

Универзитет у Београду Архитектонски факултет

Јефто Т. Терзовић

**ПРОЈЕКТОВАЊЕ СЕИЗМИЧКИ ОТПОРНИХ
АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА КОРИШЋЕЊЕМ
ПАНЕЛА ОД КОНСТРУКЦИОНОГ СТАКЛА ИЛИ
ПОЛИКАРБОНАТА**

докторска дисертација

Београд, 2016.

University of Belgrade Faculty of Architecture

Jefto T. Terzović

**DESIGN OF SEISMIC RESISTANT ARCHITECTURAL
STRUCTURES BY USING PANELS OF
CONSTRUCTION GLASS OR POLYCARBONATES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016.

ментор

др Миодраг Несторовић
редовни професор
Универзитет у Београду Архитектонски факултет

чланови комисије

др Растислав Мандић
ванредни професор
Универзитет у Београду Грађевински факултет

др Ташко Манески
редовни професор
Универзитет у Београду Машински факултет

ПОДАЦИ О ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Наслов дисертације

**ПРОЈЕКТОВАЊЕ СЕИЗМИЧКИ ОТПОРНИХ АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТАТА
КОРИШЋЕЊЕМ ПАНЕЛА ОД КОНСТРУКЦИОНОГ СТАКЛА ИЛИ
ПОЛИКАРБОНАТА**

Резиме

У тези је предложен концепт пројектовања сеизмички отпорних архитектонских објеката, употребом неконвенционалних материјала – ламелираног стакла и ламелираног клирита, који се у грађевинарству најчешће не користе у ту сврху, па су, иако широко распрострањени и лако доступни, дефинисани као неконвенционални. Предложеним концептом пројектовања, ламелирано стакло и ламелирани клирит, предвиђени су као испуна у челичном раму, на који налажу посредством интермедијалног слоја гуме, чиме се формира композитни склоп. На тај начин се формирају вертикални елементи укрућења, интегрисани у конструктивни систем објекта, оспособљени за пријем сеизмичке силе. Применљивост таквог система, проверена је експериментом у лабораторијским условима, где су експериментални модели на бази ламелираног стакла и ламелираног клирита излагани дејству цикличног оптерећења, које симулира сеизмичку силу. Тиме је проверен капацитет носивости композитних склопова, за дејство динамичког оптерећења, паралелног равни склопа. Утврђен је интензитет напрезања којем композитни склопови могу бити изложени, степен укрућења конструкције у смислу исказаних деформација, као и предности једне врсте испуне у односу на другу. Помоћу специјализованог софтвера, чији се рад базира на методи коначних елемената, креиран је рачунарски модел конструкције објекта који је обрађиван у студији случаја, који је у првој фази процеса пројектовања служио за анализу проблема. У тај рачунарски модел, имплементиран је систем укрућења на бази композитних склопова испитаних у лабораторији. Резултати модалне анализе и сеизмичког прорачуна из рачунарског модела са примењеним укрућењима, показали су ефикасност решења, чиме је заокружена процедура пројектовања асеизмичког укрућења коришћењем неконвенционалних материјала.

Кључне речи

Ламелирано стакло, ламелирани клирит, асеизмичко укрућење, експеримент, лабораторијско испитивање, студија случаја, рачунарски модел, метод коначних елемената

Научна област

Архитектура и урбанизам

Ужа научна област

Конструктивни системи

УДК број

624.042.7:004.42(043.3); 691.618.5:699.8(043.3)

DATA ON DOCTORAL DISSERTATION

Thesis title

DESIGN OF SEISMIC RESISTANT ARCHITECTURAL STRUCTURES BY USING PANELS OF CONSTRUCTION GLASS OR POLYCARBONATES

Abstract

The thesis proposes a design concept of seismic resistant architectural structures by using unconventional materials-laminated glass and laminated klirit, materials that are not usually used in construction design for that purpose, although being widespread and easily available, and therefore defined as unconventional. In the proposed design concept, laminated glass and laminated klirit are considered as a filling in a steel frame on which they overlap by the intermediate rubber layer, thereby forming a composite assembly. In this way vertical elements of stiffening are formed, capable for reception of seismic force and integrated into the structural system of the building. The applicability of such a system was verified by experiments in laboratory conditions where the experimental models based on laminated glass and laminated klirit had been exposed to the cyclic loads that simulate the seismic force. In this way the load capacity of composite assemblies was tested for the effects of dynamic load that was parallel to assembly plane. Thus, the stress intensity to which composite systems might be exposed was determined as well as the range of the structure stiffening referring to the expressed deformation along with the advantages of a particular type of filling compared to the other one. Using specialized software whose operation is based on the finite element method, a computer model of the structure was created and processed in the case study; the same computer model was used for analyzing the problem in the first phase of the design process. The stiffening system based on composite assemblies tested in laboratories is implemented in the computer model. The results of the modal analysis and seismic calculation from the computer model with stiffeners applied showed an efficacy of such a solution, thus rounding the design procedures for aseismic stiffening by using unconventional materials.

Key words

Laminated glass, laminated klirit, aseismic stiffening, experiment, laboratory testing, case study, computer model, finite element method

Academic expertise

Architecture and Urbanism

Field of Academic expertise

Structural Systems

UDC number

624.042.7:004.42(043.3); 691.618.5:699.8(043.3)

Садржај

1. Увод у истраживање	9
1.1 Проблем и предмет истраживања	9
1.2 Циљеви, задаци и методе истраживања	15
1.3 Генерална структура истраживања	17
2. Стакло и поликарбонат као конструкциони материјали	21
2.1.Стакло као конструкциони материјал	21
2.1.1 Хемијски састав стакла и физичке особине	21
2.1.2 Индустијска обрада стакла	23
2.1.3 Отпорност стакла на спољне утицаје	31
2.2.Поликарбонат као конструкциони материјал	45
2.2.1 Хемијски састав и особине пластичних маса.....	45
2.2.2 Поликарбонат (<i>PC</i>) и полиметил-метакрилат (<i>PMMA</i>)	52
3. Лабораторијско испитивање физичко механичких карактеристика ламелираног стакла и ламелираног клирита	60
3.1 Увод	60
3.2 Испитивање запреминске масе	61
3.3 Испитивање коефицијента термичког ширења	61
3.4 Испитивање чврстоће при притиску	63
3.5 Испитивање чврстоће при савијању и прорачун одговарајућег модула еластичности	65
3.6 Испитивања на затезање	69
3.6.1 Испитивање ламелираног клирита на затезање	69
3.6.2 Испитивње ламелираног стакла на затезање	71
3.6.3 Радни (σ - ϵ) дијаграми и прорачун одговарајућег модула еластичности	73
3.6.3.1 Ламелирани клирит	73

3.6.3.2 Ламелирано стакло	74
3.7 Укупни табеларни преглед резултата испитивања	76
4. Лабораторијско испитивање понашања композитних панела на бази ламелираног стакла и ламелираног клирита под дејством динамичког оптерећења	77
4.1 Организациона поставка лабораторијског испитивања	77
4.2 Пројектовање и израда експерименталних композитних панела за лабораторијско испитивање	79
4.3 Припрема лабораторијске опреме за испитивање	87
4.4 Лабораторијско испитивање експерименталних композитних панела	93
4.4.1 Пробна статичка испитивања силом паралелном равни експерименталног модела	93
4.4.2 Пробна статичка испитивања увијањем и силом управно на раван експерименталног модела	107
4.4.3 Динамичка испитивања силом паралелном равни експерименталног модела, са обрадом резултата	109
4.4.4 Резиме лабораторијских испитивања на дејство динамичке силе	140
5. Могућност асеизмичког укрућивања конструкције објекта коришћењем ламелираног стакла и клирита, приказано на студији случаја	145
5.1 Процедура (алгоритам) пројектовања сеизмички отпорних архитектонских објеката коришћењем неконвенционалних материјала	145
5.2 Студија случаја – асеизмичко укрућивање објекта коришћењем неконвенционалног материјала	151
5.2.1 Анализа геометрије објекта (конструктивне целине, материјали)	151
5.2.2 Карактеристике посебне конструктивне целине – масе	153
5.2.3 Рачунска анализа проблема издвојене масе	155
5.2.4 Решење система за асеизмичко укрућење	168

5.2.5	Рачунска анализа система за асеизмичко укрућење ...	170
5.2.6	Интензитети пресечних сила и напрезања у елементима асеизмичког укрућења	179
5.2.7	Резиме решења система за асеизмичко укрућење	191
6.	Закључак	193
7.	Преглед ознака	197
8.	Преглед илустрација	199
9.	Преглед табела	208
10.	Референце	210
11.	Биографија аутора	226
12.	Прилози	227

1. УВОД У ИСТРАЖИВАЊЕ

1.1 ПРОБЛЕМ И ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Стакло се карактерише као изразито крт конструкциони материјал, који нема способност пластичне деформације. Према устаљеној пројектантској и инжењерској пракси, у грађевинским конструкцијама, у односу на остале традиционалне грађевинске материјале, не употребљава се често као носећи материјал. Стакло се углавном користи као фасадни конструктивни елемент, који од оптерећења најчешће прима само дејство ветра, управно на своју раван.

Истовремено, стакло поседује повољне физичко–механичке карактеристике, посебно у смислу чврстоће на притисак, чак и у смислу чврстоће на затезање. Модул еластичности стакла је и до два и по пута већи од модула еластичности бетона стандардног квалитета.

Одлучујућа особина стакла, која га квалификује за масовну употребу у грађевинарству, јесте провидност, тако да је стакло врло често пресудни мотив у архитектонском обликовању и организацији архитектонског простора. Транспарентност отвара пут применљивости стакла у било ком месту у конструкцији архитектонског објекта. Тежиште предложене тезе докторске дисертације на физичко-механичким карактеристикама стакла јесте на истраживању могућности да се стакло искористи и у сврху *пријема динамичких (сеизмичких) сила*.

Досадашња испитивања стакла у циљу његове евентуалне неконвенционалне употребе, углавном су се односила на излагање удару управно на раван стакленог панела, чиме је симулирано дејство на стакло као безбедносну преграду. Осим тога, стакло се у грађевинарству све чешће појављује и као линијски гредни елемент, оптерећен на савијање, нарочито у оквиру посебних ентеријерских обрада. Предложена тема докторске дисертације истражује могућност да се конструкционом стаклу додели улога у глобалној стабилности архитектонског објекта.

Већина прописа третира стакло као неконструктивни елемент. Стаклена фасада (или појединачне застакљене површине), традиционално се анализирају као

неконструктивни елемент у глобалном смислу. Димензионисање стаклене фасаде, пре свега се врши за сопствени тежину, затим за везу са основном носећем конструкцијом, као и на дејство ветра управно на површ панела.

Велике штете које су настале при земљотресима на стакленим површинама иницирале су истраживања понашања стаклених фасада у овој области - у случају сеизмичких дејстава. Генерално, истраживања иду у два правца:

- обезбедити да се минимизује штета на самој стакленој површини;
- укључити и стаклену површину у носивост конструкције на сеизмичка оптерећења. У том случају, стаклена површина може учествовати у стабилизацији фасадног система, односно целог система на хоризонталне утицаје. Оваква истраживања су ређа од оних која се баве минимизацијом штете на стакленим површинама.

Сучуолу (*Haluk Sucuoglu*) и Валабан (*Girija Vallabhan*)¹, баве се утицајем сеизмике на стаклену фасаду и на појединачне панеле. Аналитички је испитивано понашање стакле испуне при дејству силе у равни и управно на раван стаклене површине. Уочен је механизам понашања стакленог панела у његовој равни при међуспратним померањима: деформација оквира која проузрокује контакт панела и оквира, ротирајући мод (обртање панела), који води ка формирању притиснуте дијагонале. На бази међуспратних померања добијених на основу еквивалентног статичког оптерећења, дата је процена потребног зазора између панела и оквира, да не би дошло до пуцања стакла. Детаљније је анализирано понашање стаклених панела под сеизмичким оптерећењем управно на раван, као плоча зглобно ослоњених по ободу.

Хувенерс (*E. M. P. Huveners*), Хервијнен (*F. van Herwijnen*), Сетенс (*F. Soetens*) и Хофмајер (*H. Hofmeyer*)², експериментално су анализирали могућност мобилисања стаклених панела у циљу стабилизације целокупне челичне фасаде. Оптерећење је посматрано као статичко. Експериментално је анализиран изолован

¹ Haluk Sucuoglu, C. V. Girija Vallabhan, *Behaviour of window glass panels during earthquakes*, Engineering structures, Vol. 19, No. 8 (p. 685-694), Elsevier Science Ltd, 1997

² E. M. P. Huveners, F. van Herwijnen, F. Soetens, H. Hofmeyer, *Glass panes acting as shear wall*, Heron Vol. 52 (p. 6-30), Faculty of Architecture, Building and Planning, Structural Design Group, Technische Universiteit Eindhoven, 2007

склоп у равни: носивост челичног оквира са зглобовима и панели од стакла. Тестиран је утицај различитих врста веза (од епоксија и полиуретана) са различитим начином ослањања - директно чеоно ослањање, бочно обострано и бочно једнострано. За први тип везе, уочено је формирање притиснуте дијагонале, слично као у претходном раду.

Бедон (*Chiara Bedon*) и Амадио (*Claudio Amadio*)³, баве се проблематиком избочавања стаклених панела под оптећењем у њиховој равни. Стабилност стаклених панела је важан моменат у анализи оптерећених стаклених панела у равни.⁴

У раду чији су аутори Крстевска, Ташков и Рајчић⁵, стаклени панели се користе за стабилизацију дрвених оквира. Везе између панела и оквира су на бази епоксида, силикона или полиуретана. Спроведено је експериментално и нумеричко истраживање (МКЕ). Показано је да је интеракција панела и оквира кључна за укупну крутост и носивост. За везу са епоксидом, констатовано је да је крута и да обезбеђује пуну композитну везу између оквира и стакленог панела. Носивост је велика, а дуктилоност мала. Са полиуретанским (или силиконским) адхезивима је потпуно другачије. Релативно брзо долази до прекорачења носивости на затезање адхезива и нарашавања композитне везе, па је и носивост знатно мања.

Штрукељ (*Andrej Štrukelj*), Бер (*Boštjan Ber*) и Премров (*Miroslav Premrov*)⁶, бавили су се динамичким експерименталним истраживањима дрвених оквира са стакленом испуном. То је један од ретких радова у оквиру којих је спроведено тестирање под динамичким оптерећењем. Главни извор дисипације енергије је клизање између стаклених панела и дрвеног оквира, као и у чворовима самог дрвеног оквира.

³ Chiara Bedon, Claudio Amadio, *Buckling of flat laminated glass panels under in-plane compression or shear*, Engineering structures 36 (p. 185-197), Elsevier Science Ltd, 2012

⁴ Chiara Bedon, Claudio Amadio, *Effect of circumferential sealant joints and metal supporting frames on the buckling behaviour of glass panels subjected to in-plane shear loads*, Glass Structure Engineering, Springer International Publishing, 2015

⁵ Lidija Krstevska, Ljubomir Taškov, Vlatka Rajčić, *Seismic Behaviour of Composite Panel Composed of Laminated Wood and Bearing Glass – Experimental Investigation*, Advanced Materials Research, Vol. 778, (p. 698-705), Trans Tech Publications Switzerland, 2013

⁶ Andrej Štrukelj, Boštjan Ber, Miroslav Premrov, *Racking resistance of timber-glass wall elements using different types of adhesives*, Construction and Building Materials 93 (p. 130-143), Elsevier Science Ltd, 2015

Поред стакла, са аспекта провидности, једнако су интересантне и пластичне масе *полимери*, пре свега *поликарбонати* и *полиметил-метакрилат*, који су у свакодневној пракси шире познати по називима специјализованих произвођача (на пример *клирит*). Степен провидности ових материјала је најмање једнак степену провидности стакла, чак може бити и већи. Истовремено, модул еластичности поликарбоната је изузетно низак и вредност му се креће око једне десетине вредности модула еластичности бетона стандардног квалитета, односно, око једне двадесетине модула еластичности стакла. Међутим, захваљујући особини провидности, поликарбонати и полиметил-метакрилат, опште су применљиви у архитектонским објектима и потребно је испитати понашање поликарбоната и полиметил-метакрилата на дејство динамичког (сеизмичког) оптерећења.

Естетски квалитет стакла и одређених врста поликарбоната и полиметил-метакрилата, који се пре свега огледа у њиховој провидности, чини их веома пожељним материјалима са пројектантског и дизајнерског аспекта, што је допринело формирању основне идеје предложене теме докторске дисертације за потенцијално коришћење панела стакла, односно поликарбоната и полиметил-метакрилата (клирита) и у сврху пријема сеизмичких сила.

Проблем предложене теме истраживања је могућност примене конструкционог стакла и клирита као материјала за обезбеђење архитектонских објеката од дејства сеизмичких сила, у виду вертикалних панела. За ту намену, приоритетно се испитује понашање панела конструкционог стакла и клирита на дејство силе која је паралелна његовој равни.

Према концепту асеизмичког укрућења архитектонских објеката коришћењем стакла и клирита, који је изложен у овој дисертацији, панел конструкционог стакла, односно клирита, чија је улога пријем сила које делују паралелно његовој равни, по целом обиму је уоквирен у метални (челични) рам. *Испуна* од стакла, односно клирита, наслања се на челични рам посредством амортизујућег слоја тврде гуме – *кедера*. Према томе, панел на бази конструкционог стакла или клирита представља *композитни* конструктивни склоп, састављен од три различита материјала – *испуна* (стакло / клирит), гума и челик – који имају различите физичко механичке карактеристике, као и различите топлотне коефицијенте линеарног ширења, тако да

је предмет предложене теме истраживања и заједничко деловање ова три материјала под дејством статичког и динамичког оптерећења.

Суштински, стакло се може сматрати идеално кртим материјалом. Слом стакленог елемента се увек одиграва изненадно, у тренутку, уз муњевиту пропагацију прслине по целој димензији елемента.

Предложеном темом истраживања, испитује се могућност максималног искоришћења физичко–механичких карактеристика стакла пре настанка кртог лома, јер *кртост* – као основна неповољна особина стакла – дефинише границу проблема предложене теме истраживања

Панел испуне од конструкционог стакла или клирита, који је део композитног склопа и предмет предложене теме истраживања и сам представља склоп (пакет) ламелираних плоча. Панел стакла или клирита, као део ширег композитног склопа, јесте *ламинатне* структуре, односно, ради се о *ламинаном* склопу, јер је састављен од више појединачних слојева – *ламела* – дебљине 4, 6, 8 или 10 мм, које су међусобно спојене посебним хемијским средствима. Коначна дебљина пакета конструкционог стакла или клирита може бити 60, 80, 100 мм, што зависи од технологије произвођача и пројектованих напрезања. Спајање појединачних ламела у компактан пакет готовог производа, представља посебну проблематику и предмет је низа истраживања, како у смислу технологије и примене адхезива, тако и у смислу понашања под оптерећењем, што ће бити касније споменуто у овом раду.

У делу дисертације који се односи на стакло, предмет истраживања је стандардно грађевинско – обично равно стакло (*float glass*) и у смислу утврђивања физичко-механичких карактеристика и у циљу процене могућности коришћења као конструкционог материјала за пријем динамичког оптерећења. Намера је да се провери понашање широко доступног материјала.

Осим основне врсте стакла, предмет истраживања је и провидна пластична маса, за коју се у пракси најчешће користи колоквијални назив *Клирит*, према номенклатури специјализованог произвођача. Овај материјал, у естетском смислу, поседује једнаке квалитете као стакло, што га намеће као могуће решење за коришћење у носивим конструкцијама архитектонских објеката. Као што је урађено

и у случају стакла, испитиван је клирит као материјал стандардног квалитета, такође у широкој употреби.

Прва фаза лабораторијског испитивања, изведена је у лабораторији, када су експериментални узорци – епрувете и призме од два материјала (стакло и клирит), излагани дејству статичког оптерећења, са циљем утврђивања физичко механичких карактеристика материјала.

Друга фаза испитивања, такође јеспроведена у лабораторијским условима и представља експерименталну проверу понашања објекта експеримента – *основног појединачног елемента конструкције* – панела на бази стакла / клирита, на дејство циклично нанетог оптерећења. У другој фази, лабораторијској опреми помоћу које се третира панел, саопштено је динамичко оптерећење, са одређеним *правцем, смером, интензитетом* и *учесталошћу* – параметрима који су дефинисани на основу процена карактеристика земљотреса и могућности лабораторијске опреме.

Након лабораторијских испитивања, спроведена је рачунска анализа могућности примене система укрућења на бази стакла односно клирита, примењена на студији случаја конкретног архитектонског објекта. Креиран *јерачунарски модел* генералног конструктивног система објекта, са посебним освртом на издвојену масу (подсистем) конструкције, која је осетљива на сеизмичке утицаје (купола на осам стубова, на врху објекта). У првој етапи анализе, научним аналитичким приступом, рачунским путем који се базира на *Методи коначних елемената*, симулира се излагање генералног конструктивног система дејству сеизмичке силе, у складу са важећим прописима за пројектовање објеката високоградње у сеизмички активним подручјима. Анализом понашања генералног конструктивног система, идентификовани су проблеми недовољне интегрисаности издвојене масе конструкције, који се огледају у неповољним резултатима модалне анализе и високим вредностима деформација. У другој етапи анализе, на исти рачунарски модел су примењени елементи асеизмичког укрућења конструкције, претходно испитани у лабораторијским условима. Прорачуном конструкције са укрућењима и анализом добијених резултата, испитана је ефикасност примењеног решења. Утврђено је да се резултати напрезања и деформација добијени рачунском анализом, крећу у границама вредности које су добијене у испитивањима експерименталних модела.

1.2 ЦИЉЕВИ, ЗАДАЦИ И МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Научни циљеви истраживања у докторској дисертацији приказују се кроз описане фазе истраживања:

- експериментално утврђивање физичко-механичких карактеристика ламелираних склопова стакла и клирита;
- експериментална провера понашања конструкционих панела на бази стакла и клирита под дејством циклично нанетог оптерећења;
- креирање релевантног рачунског модела за испитивање могућности примене панела на бази конструкционог (ламелираног) стакла и клирита за пријем сила које су паралелне равни панела, у циљу обезбеђења архитектонских објеката од дејства сеизмичке силе.

Остваривање научних циљева предложене теме истраживања пружиће могућност за коришћење неконвенционалног приступа у пројектовању сеизмички отпорних архитектонских конструкција. Исти приступ могао би да се примени и код санације и реконструкције старих објеката.

Студија случаја третира рачунски модел генералног конструктивног система изложеног динамичком оптерећењу, који садржи армиранобетонску куполу пречника шеснаест метара, ослоњену на осам стубова који су висине десет метара. Купола на стубовима је саставни део објекта и представља његову највишу и најистакнутију целину, тако што је подножје куполе на висини од двадесет метара у односу на коту терена око објекта, али се ради доминантно о издвојеној маси у смислу деловања сеизмичких сила.

Рачунска анализа, у свом првом делу, помоћу рачунарског модела конструкције даје интензитете сеизмичких сила по висини објекта. Анализом утицаја, утврђено је да конструкција куполе на стубовима не може ефикасно примити сеизмичке силе, односно да су померања конструкције изазвана на овај начин већа од допуштених и да нису у складу са важећим стандардима за

пројектовање конструкција објеката високоградње у сеизмички активним подручјима. Проблем је евидентан од подножја куполе, односно места ослањања њених стубова на остатак конструкције објекта, па до врха куполе.

Фасада куполе, односно простор између стубова, материјализована је од обичних фиксних стаклених окана, дебљине до четири милиметра. Разматрање овог проблема дало је идеју за изналажење могућности неконвенционалног начина санације, како би се конструкција оспособила за ефикасан пријем сеизмичких сила. У ту сврху, предлаже се коришћење стаклене фасадне опне, која би прерасла уобичајену улогу преграђивања унутрашњег простора од спољашњег, и постала конструктивни елемент. Када су стари објекти у питању, овакво решење би задовољило обавезан услов да првобитни изглед након интервенције остане непромењен.

У циљу остваривања дефинисаних циљева научног истраживања, утврђени су задаци које је било неопходно испунити:

- испитивање физичко механичких карактеристика ламелираног стакла и ламелираног клирита;
- експериментална провера рачунског модела композитног склопа на бази челика и стакла или клирита, димензионисаног за пријем сеизмичких сила паралелних равни панела;
- максимално искоришћење физичко-механичких карактеристика ламелираног стакла, односно ламелираног клирита, пре настанка лома;

Елементи радне хипотезе истраживања су:

- прилог новом концепту пројектовања сеизмички отпорних архитектонских конструкција;
- унапређење архитектонског простора пројектовањем конструктивног система од неконвенционалних материјала;
- примена конструкционог стакла и клирита за обезбеђење архитектонских објеката од дејства сеизмичких сила.

За истраживање у оквиру предложене докторске дисертације, која се односи на неконвенционалне системе обезбеђења архитектонских објеката од дејства сеизмичких сила, коришћене су следеће методе истраживања:

- анализа података из литературе о савременој употреби конструкционог стакла и клирита у грађевинским конструкцијама;
- лабораторијско – испитивање физичко-механичких карактеристика ламелираних пакета од обичног равног стакла и од поликарбоната;
- лабораторијско – испитивање понашања композитних склопова на бази ламелираног стакла и ламелираног клирита, са рамом од челика и амортизујуће гуме, на дејство динамичке силе;
- научни аналитички приступ, заснован на *Методи коначних елемената*, за разраду рачунарског модела, у циљу провере могућности примене претходно испитаних ламелираних пакета од обичног равног стакла и од клирита за пријем сеизмичких сила.

1.3 ГЕНЕРАЛНА СТРУКТУРА ИСТРАЖИВАЊА

УВОДНИ ДЕО – представља преглед особина стакла и пластичних маса (поликарбонати, полиметил-метакрилат) и проблема који се појављују у случају коришћења тих материјала за формирање конструктивних елемената. У делу који се односи на стакло, уз превод аутора, значајно је коришћен извор Haldimann, Dr M., Luible, Dr A., Overend, Dr M., *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 2008, који даје суштински приказ особина стакла.

ПРВА ФАЗА – представља лабораторијско испитивање у циљу утврђивања физичко-механичких карактеристика материјала испуне у композитним панелима – (ламелирано стакло и клирит).

ДРУГА ФАЗА – представља лабораторијско испитивање под динамичким оптерећењем реалног модела основног појединачног елемента конструкције –

композитног панела димензија 40 · 50 центиметара, материјализованог од ламелираног стакла / клирита, укупне дебљине пакета 60 милиметара, уоквиреног у челични рам, са амортизујућим слојем тврде гуме (кедера) на контакту испуне и челика.

Први корак друге фазе истраживања чине базична лабораторијска испитивања, са циљем генералног упознавања са физичко-механичким карактеристикама материјала на којима се формирају композитни панели. Нарочито је важан део овог испитивања који се односи на поређење карактеристика пакета ламела, како стакла, тако и клирита, у смислу оријентације пресека под дејством оптерећења – читавају се очекиване разлике ако је аплицирана сила управна на раван ламела од којих је пакет сачињен и ако је паралелна тим ламелама. Лабораторијска испитивања из првог корака друге фазе, спроведена су у лабораторији Института за материјале и конструкције, на Грађевинском факултету Универзитета у Београду.

Посебно је комплексан други корак друге фазе и он представља тежиште целокупног истраживања. Он се односио на испитивање композитних панела на бази оба основна материјала на дејство динамичке силе. Ово испитивање је спроведено помоћу посебне лабораторијске опреме под називом *Пулзатор*, смештене у лабораторији Лимес на Машинском факултету Универзитета у Београду. Опрема је у надлежности Катедре за опште машинске конструкције. Пулзатор има могућност да на предмет испитивања, помоћу посебно дизајнираног прихватног алата, наноси динамичко оптерећење, према задатој фреквенцији.

Алат, који постаје саставни део опреме за извођење испитивања, дизајниран је тако да буде у сагласности са контурним условима рачунарског модела.

Улазни параметри за испитивање реалног модела у Пулзатору, усвојени су на основу препорука Републичког сеизмолошког завода о процени могућег земљотреса, као и на основу могућности лабораторијске опреме. Сила на реални модел није наношена одједном у целости, већ поступно, у вредности инкремента коју опрема (Пулзатор) допушта.

Све време наношења оптерећења на експериментални модел инкременталним поступком, пажљиво је посматрано стање модела, у смислу напрезања која се читавају и евентуалних оштећења која се могу уочити.

У уводној фази лабораторијских испитивања на Пулзатору, уместо наношења динамичке силе, наношено је статичко оптерећење инкременталним поступком, све до лома, чиме је установљена критична сила за тај модел. Након тога су направљене допунске анализе конструкције експерименталних модела, извршене су њихове модификације, чиме су додатно усаглашени са могућом практичном применом, као и са рачунарским моделом.

Саставни део другог корака у другој фази истраживања, чине анализе добијених резултата, који се упоређују, са основним циљем да се утврди разлика у понашању композитних панела са испуном од ламелираног стакла и композитних панела са испуном од ламелираног клирита.

У завршном делу дисертације, у студији случаја је креиран рачунарски модел конструкције објекта, који садржи армиранобетонску куполу на стубовима, која је истакнута као посебно проблематичан подсистем конструкције, у смислу пријема сеизмичких сила. Истраживање се спроводи кроз више корака, а као основни научни алат за извођење истраживања, користи се аналитички приступ, помоћу Методе коначних елемената.

Полази се од проблема неинтегрисаности куполе у конструктивни систем објекта, што је чини изразито осетљивом на дејство сеизмичких сила. Предлаже се решење у виду конструкционих панела на бази клирита, који су претходно испитани у лабораторији. Затим се спроводи рачунска анализа модела конструкције допуњеног системом панела, којом се утврђује ниво напрезања појединачних панела. На крају рачунске анализе, добијају се резултати који су у границама дефинисаним лабораторијским испитивањима, што говори о могућности примене предложеног система у циљу оспособљавања конструкције објекта за пријем сеизмичких сила.

Истраживање тежи промовисању неконвенционалног приступа, односно употребе неконвенционалних материјала, у пројектовању конструктивног система за обезбеђење архитектонских објеката од дејства сеизмичких сила.

Резултати рада представљају прилог проширењу сазнања о конструкционом стаклу и пластичним масама као грађевинским материјалима, који, у процесу пројектовања конструктивног система, могу имати улогу носећег елемента за пријем сеизмичких сила.

Уопштено говорећи, истраживање настоји да прошири схватање улоге стакла и пластичних маса у процесу пројектовања и конструисања архитектонских објеката и да промовише примену конвенционалног приступа пројектовању, који стакло углавном третира као елемент фасадне опне, која преграђује унутрашњи простор од спољног. У устаљеној пројектантској пракси, у конструкционом смислу, стаклу се, скоро искључиво, поверава улога прихватања оптерећења од ветра који делује на фасаду и преношење тог оптерећења на основни конструктивни систем објекта, којег најчешће чине армиранобетонски, челични или дрвени елементи. Примена резултата истраживања приказаних у дисертацији треба да буде прилог примени конструкционог стакла и клирита као носећих елемената у грађевинским конструкцијама архитектонских објеката.

Истраживање настоји да буде увод у даљу анализу могуће примене стакла и клирита као конструкционих материјала, као и трасирање пута за проналажење специфичног места за стакло и пластичне масе у важећим домаћим прописима и стандардима у области грађевинарства.

2. СТАКЛО И ПОЛИКАРБОНАТ КАО КОНСТРУКЦИОНИ МАТЕРИЈАЛИ

2.1 СТАКЛО КАО КОНСТРУКЦИОНИ МАТЕРИЈАЛ

2.1.1 Хемијски састав стакла и физичке особине

Код употребе конструкционог стакла, веома важну улогу игра његов хемијски састав. Састав стакла се базира на силицијум оксиду (SiO_2), који је истовремено и основни састојак песка, а најширу употребу у традиционалном, али и у савременом градитељству, има обичностакло, које осим силицијум оксида, у основном хемијском саставу има знатне количине калцијум оксида (CaO) и натријум оксида (Na_2O), те се назива и *содно-кречно стакло*. За посебне сврхе, као што су разна заштитна стакла или ватроотпорна стакла, користи се *боросиликатно* стакло. У следећој табели је упоредно дат хемијски састав ове две основне и најчешће врсте стакла⁷.

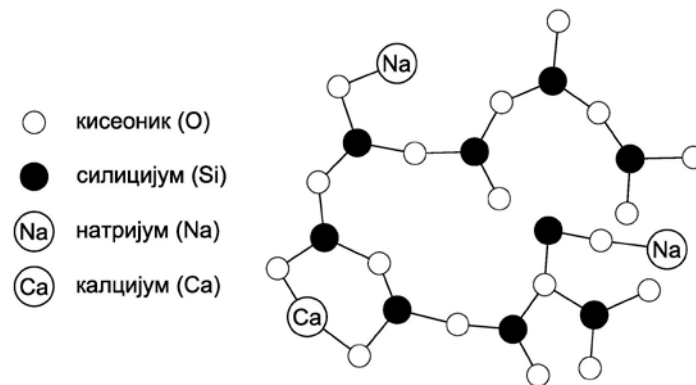
Табела 2.1.1: хемијски састав содно-кречног и боросиликатног стакла

Хемијско једињење	Хемијска ознака	Содно-кречно стакло	Боросиликатно стакло
Силицијум диоксид	SiO_2	69-74%	70-87%
Калцијум оксид	CaO	5-14%	-
Натријум оксид	Na_2O	10-16%	0-8%
Бор оксид	B_2O_3	-	7-15%
Калијум оксид	K_2O	-	0-8%
Магнезијум оксид	MgO	0-6%	-
Алуминијум оксид	Al_2O_3	0-3%	0-8%
Остало		0-5%	0-8%

Стакло је неоргански производ, чији се поступак производње састоји од топљења, односно стапања основних градивних елемената на температурама од 1600°C до 1800°C , затим формирања, односно обликовања, на температурама од 800°C до 1600°C и, на крају, хлађења на температурама од 100°C до 800°C . Стакло хлађењем прелази у чврсто стање, али без кристализације. Управо изостанак

⁷ Haldimann, Dr Matthias, Luble, Dr Andreas, Overend, Dr Mauro, *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 2008 (p. 4)

кристализације приликом хлађења одређује касније физичко-механичке особине стакла. Стакло се не састоји од геометријски правилне кристалне мреже, већ од неправилне мреже атома силицијума и кисеоника, између којих се налазе атоми алкала.



Слика 2.1.1: шематски приказ неправилне структуре содно-кречног стакла⁸

Физичке особине содно-кречног и боросиликатног стакла, упоређене су у следећој табели.

Табела 2.1.2: физичке особине содно-кречног и боросиликатног стакла

Особина	Ознака	Јединица	Содно-кречно стакло ⁹	Боросиликатно стакло ¹⁰
Запреминска маса	ρ	kg/m^3	2500	2200–2500
Тврдоћа	$\text{HK}_{0,1/20}$	GPa	6	4.5–6
Модул еластичности	E	MPa	70000	60000–70000
Поасонов коеф.	ν	-	0.23	0.2
Коефицијент термичког ширења	α_T	10^{-6}K^{-1}	9	класа 1: 3.1–4.0 класа 2: 4.1–5.0 класа 3: 5.1–6.0
Специфични термички капацитет	c_p	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	720	800
Термичка проводљивост	λ	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	1	1
Просечни индекс преламања у видљивом спектру	n	-	1.52 [§]	1.5

⁸ *Ibid.* (p. 5)

⁹ EN 572-1:2004. *Glass in building – Basic soda lime silicate glass products – Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties.* CEN, 2004.

¹⁰ EN 1748-1-1:2004. *Glass in building – Special basic products – Borosilicate glasses – Part 1-1: Definition and general physical and mechanical properties.* CEN, 2004.

2.1.2 Индустриска обрада стакла

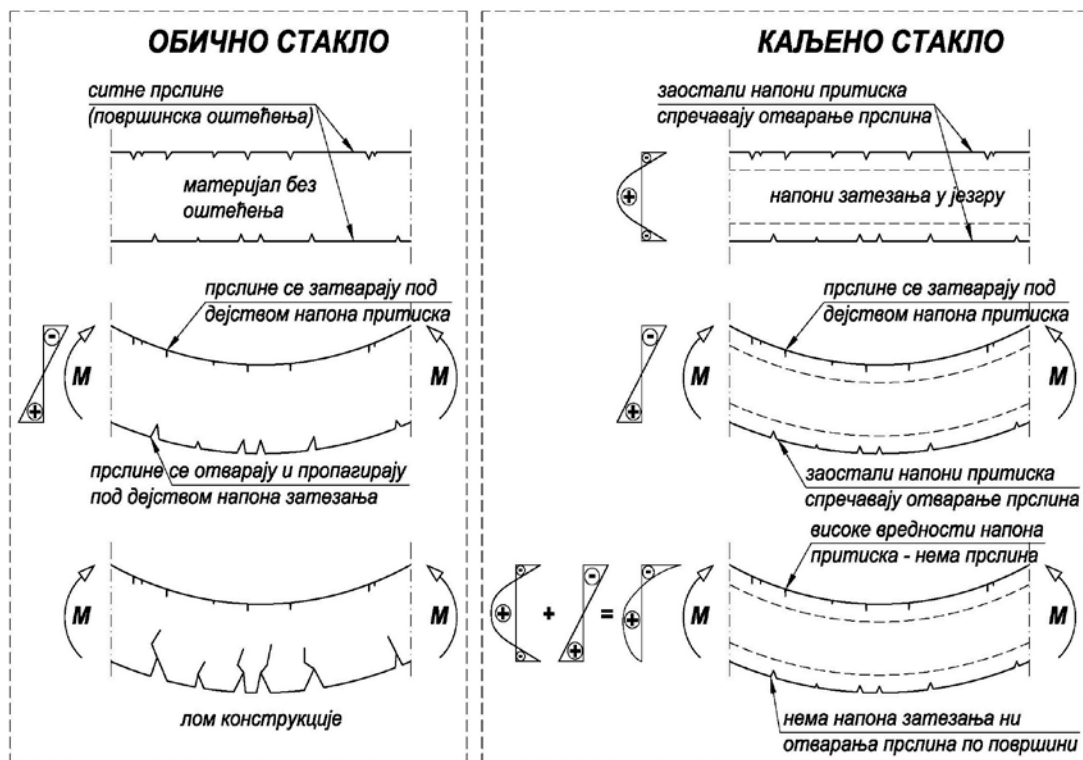
Готов производ од стакла је могуће даље обрађивати и унапређивати, како би се добио финални производ који ће испунити посебне захтеве у експлоатацији. Ова додатна обрада може подразумевати¹¹:

- сечење у циљу уклањања оштећења по ивицама и добијања панела одговарајуће величине;
- бушење рупа;
- посебно обликовање - закривљивање;
- термичка обрада у циљу повећања чврстоће или потпуно каљење;
- излагање “врућем оптерећењу”, у циљу уклањања могућности да дође до “спонтаног лома” каљеног стакла, проузрокованог присуством никл сулфида у саставу стакла;
- ламелирање у циљу:
 - поправљања особина након лома;
 - повећања безбедности у случају ударца;
 - отпорности на удар метка;
 - отпорности на пожар;
 - звучне изолације;
- површинска обрада у циљу постизања посебне декорације или затамњења;
- формирање склопа термоизолационог стакла у циљу смањења топлотних губитака, или за смањење утицаја сунчевог зрачења, односно поправљања звучних перформанси.

¹¹ Haldimann, Dr Matthias, Luible, Dr Andreas, Overend, Dr Mauro, *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 2008 (p. 9)

Од наведених поступака модификације и унапређивања готових производа од стакла, каљење представља веома важан поступак, у смислу увећања носивости стакла.

Основна идеја код каљења стакла јесте увођење заосталих напона и то затежућих напона у језгру, односно средњем слоју пресека стакленог елемента и притискујућих напона на површини и у слоју непосредно испод површине стакленог елемента. Језгро попречног пресека стакленог елемента не садржи прсLINE, тако да има добре предиспозиције у смислу отпорности према напонима затезања. Неизбежне микропрсLINE на површини стакла су предодређене за пропацију у случају излагања стакла напонима затезања. Код каљеног стакла, све док су напони затезања, који су изазвани спољним оптерећењем, мањег интензитета од заосталих напона притиска, који су произведени процесом каљења стакла, то не постоји могућност појаве напона затезања у смислу пресечних сила, тако да, самим тим, нема опасности од пропације прсLINE.¹²

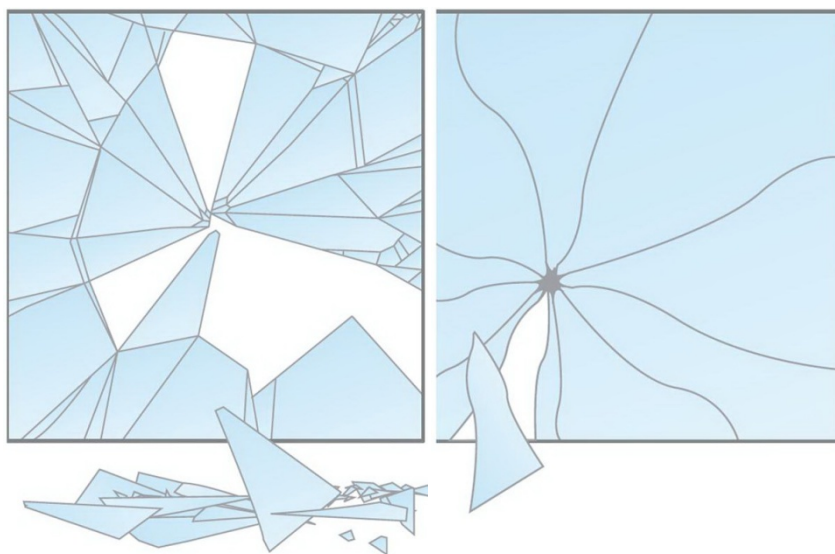


Слика 2.1.2: поређење понашања обичног и каљеног стакла под дејством момента савијања, чиме се објашњава основни принцип каљења¹³

¹²Ibid. (p. 10)

¹³Ibid. (p. 10)

Начин лома стакла је у функцији енергије накупљене у стаклу, заосталих напона и напона произведених дејством спољног оптерећења. На следећим сликама су приказани начини лома различитих врста стакла: обичног, делимично каљеног (“*heat strengthening*”) и потпуно каљеног. Потпуно каљено стакло поседује највећи интензитет заосталог напона и приликом лома се распарчава у мноштво малих, релативно безбесних, комадића величине до 100 мм². Из тог разлога, потпуно каљено стакло се још назива и “*безбедно стакло*”, што може навести на погрешан закључак о природи лома оваквог стакла, јер, иако ситни, ови комадићи могу изазвати озбиљне повреде ако падају са висине од неколико метара.



Слика 2.1.3: начин лома обичног и ојачаног стакла (делимично каљеног)¹⁴



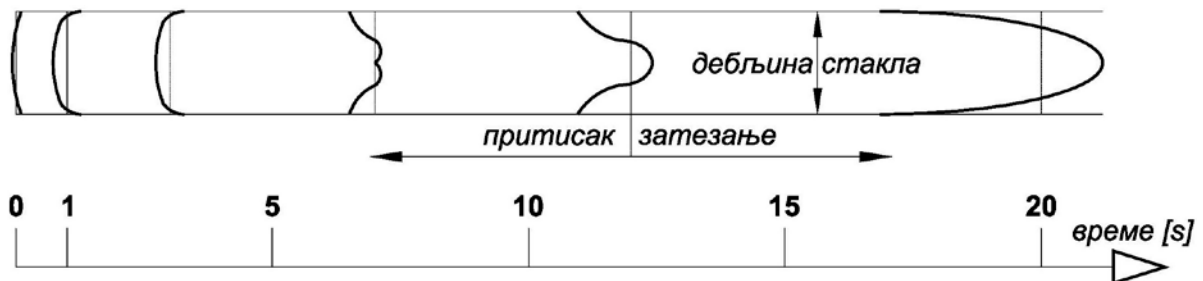
Слика 2.1.4: поређење начина лома обичног, потпуно каљеног и делимично каљеног стакла¹⁵

¹⁴ Илустрација преузета са сајта: <http://www.crystal-india.com/products-page/toughened-glass/toughened-glass/>; приступљено 24. 05. 2015.

¹⁵ Фотографије преузете са сајта: <http://www.magiglass.com/our-product/magitemp>; приступљено 24. 05. 2015.

Делимично каљено стакло, захваљујући довољно добрим особинама у смислу чврстоће, али и знатно крупнијој фрагментацији приликом лома, врло често добија предност у односу на потпуно каљено стакло, поготово уколико је опредељујући фактор безбедност корисника у случају лома.

Током процеса каљења, обично стакло се у пећи најпре загрева на температурама од 620°C до 675°C , а затим се нагло хлади излагањем млазевима хладног ваздуха. Тако најпре долази до очвршћавања површине, па тек онда и до очвршћавања унутрашњости пресека. У првих неколико секунди хлађења, долази до појаве затежућих напона на површини и притискујућих напона у унутрашњости. Пошто је на тој температури стакло вискозно, долази до нагле релаксације затежућих напона. Ако је почетна температура сувише ниска, не може доћи до релаксације затежућих напона, што може проузроковати лом стакла у тој фази процеса каљења. Када се температура спусти испод 525°C , стакло очвршћава и моментално наступа прекид релаксације напона затезања. Температурна дистрибуција је приближно параболична и у овој фази унутрашњост је топлија.



Слика 2.1.5: расподела напонских стања у пресеку стакленог елемента током хлађења, у процесу каљења¹⁶

На крају долази и до потпуног хлађења унутрашњости стакла. Површински слој стакла, који је раније очврсноу, спречава термичко скупљање унутрашњости пресека, чије касније хлађење доводи до заосталих напона. Тако се у површинским слојевима јављају притискујући напони, а у језгру, односно унутрашњости пресека, јављају се напони затезања и то представља суштину процеса каљења стакла. Да би се постигли оптимални ефекти каљења, процес треба подесити тако да површина

¹⁶Haldimann, Dr Matthias, Luible, Dr Andreas, Overend, Dr Mauro, *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 2008 (p. 12)

очврсне тачно у моменту највеће температурне разлике, када долази до релаксације напона затезања.

Ламелирано стакло се састоји од два или више панела, који су међусобно спојени провидним међуслојем на бази пластике. Појединачни панели могу бити исте или различите дебљине и чак могу бити претходно различито третирани (делимично или потпуно каљени). Најчешћи поступак ламелирања се изводи у *аутоклав* уређају, на температури од око 140°C. Висока температура и притисак до 14 бара, онемогућавају појаву ваздушних “цепова” између панела стакла и интермедијалног слоја пластичне фолије.

Без обзира што поступци делимичног или потпуног каљења повећавају чврстоћу и конструкциону носивост стакла, оно и даље остаје крт материјал. Ламелирање помоћу провидног пластичног слоја између два или више панела стакла, значајно унапређује понашање стакла након лома: фрагменти стакла остају причвршћени на интермедијални пластични слој, тако да и даље постоји одређени ниво носивости ламелираног склопа, који формирају “лук”, или остају “заглављени” у првобитном положају. Преостала носивост зависи од нивоа фрагментације. Што су фрагменти стакла након лома већи, то је већа и преостала носивост. Ламелирано стакло достиже значајан ниво преостале носивости ако је израђено од обичног или делимично каљеног стакла, који се крупно фрагментирају приликом лома.

Понашање ламелираног стакла након лома зависи од интермедијалног слоја помоћу којег су панели стакла залепљени један за други. Као интермедијални слој, најчешће се користи *поливинил бутирална* (ПВБ) фолија, која у потпуности зауставља ултраљубичасто зрачење, тако да се често назива и *УВ заштитна фолија*. Дебљина једне ПВБ фолије износи 0,38 мм. Уобичајено је да две (0,76 мм) или четири (1,52 мм) ПВБ фолије формирају интермедијални слој у поступку ламелирања стаклених панела. Поливинил бутир, од којег се израђује фолија за интермедијални слој код ламелирања стаклених панела, јесте вискоеластични материјал, тако да његове физичке особине одлучујуће зависе од температуре и трајања оптерећења. На собној температури, ПВБ је релативно мек, са издужењем приликом лома које износи више од 300%. На температурама испод 0°C и за краткотрајно оптерећење, интермедијални слој од ПВБ-а ефикасно и у потпуности преноси смичуће напоне са једног панела стакла на други. Код виших температура и

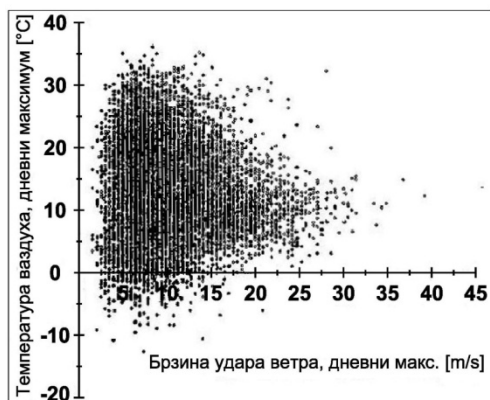
дуготрајног оптерећења, способност преношења смичућих напона се значајно умањује.

У следећој табели су дате типичне особине ПВБ фолије:

Табела 2.1.3: физичке особине ПВБ фолије

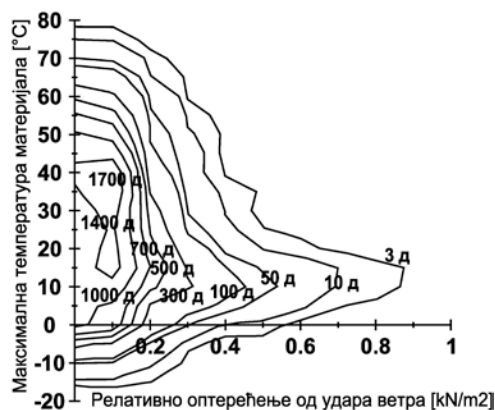
Особина	Ознака	Јединица	вредност
Запреминска маса	ρ	kg/m ³	1070
Модул смицања	G	GPa	0 – 4
Поасонов коефицијент	ν	-	≈ 0.50
Коефицијент термичког ширења	α_T	K ⁻¹	$80 \cdot 10^{-6}$
Чврстоћа на затезање	f_t	MPa	≥ 20
Издужење у фази лома	ε_t	%	≥ 300

ПВБ фолије, као адхезиона средства у пакетима ламелираног стакла су полимери, са вискоеластичним особинама. Приликом повећања температуре, полимери у физичком смислу слабе и показују склоност ка течењу под дејством оптерећења високог интензитета и дуготрајног оптерећења. У случају дуготрајног оптерећења, уобичајено је претпоставити да долази до течења интермедијалног слоја, те се занемарује степен преноса смицања између панела који чине пакет ламелираног стакла. За разлику од дуготрајног, код краткотрајног оптерећења, као што је оптерећење од ветра, треба рачунати на могућност преноса смицања међу суседним панелима у пакету, узимајући у обзир температуру материјала, природу оптерећења и век експлоатације. Уколико би се код пројектовања стаклених панела усвојило да је панел у истом тренутку изложен екстремној очекиваној температури и ветру највишег могућег интензитета, резултат би био стаклени панел нерационалне дебљине. Следећа слика приказује типичан однос између брзине удара ветра и температуре у граду Ахену, у Немачкој. Треба приметити да се ветрови највећих брзина јављају у току олуја, када су температуре ваздуха између 10°C и 15°C, што је значајно испод максималних забележених температура које се крећу око 30°C.



Слика 2.1.6: брзина удара ветра и дневне температуре ваздуха у Ахену, Немачка, дневни максимум за период од 100 година¹⁷

На следећој слици је приказан однос брзине ветра, односно једнакоподељеног површинског оптерећења од удара ветра и температуре материјала.



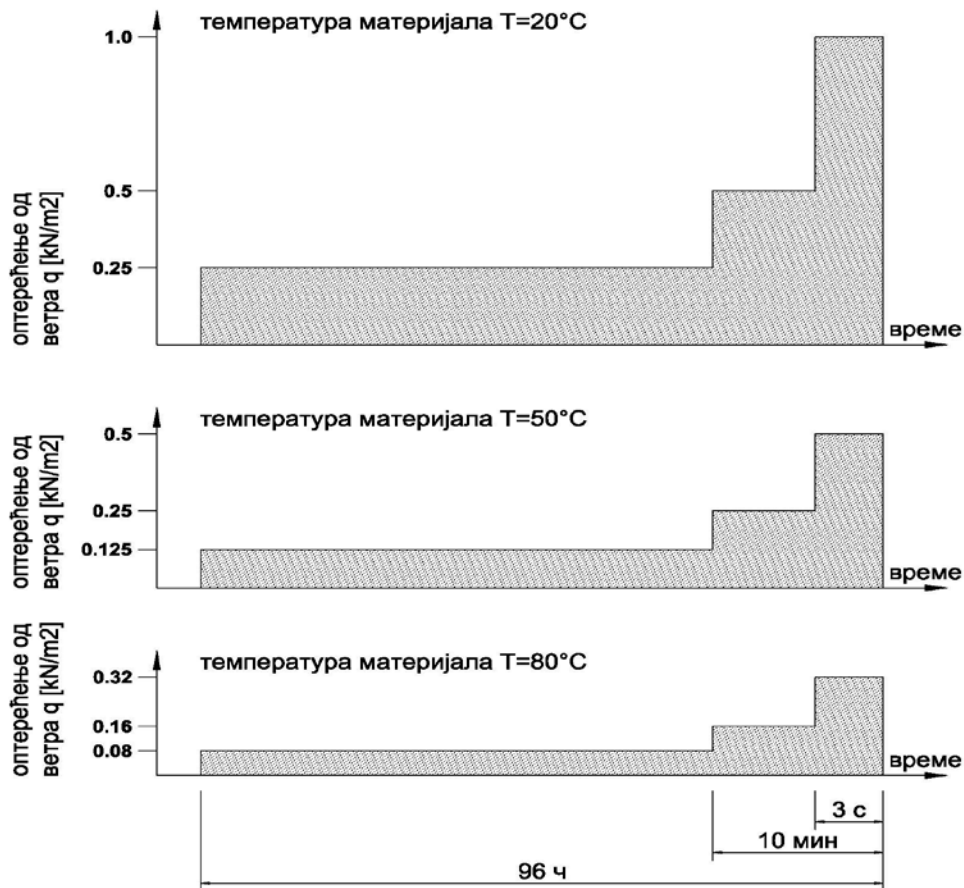
Слика 2.1.7: корелација оптерећења од удара ветра и температуре материјала¹⁸

Дијаграм се базира на мерењима температуре ваздуха из осам метеоролошких станица у Немачкој, у периоду између 1970. и 1998. године. Релевантна температура материјала проузрокована упијањем сунчевог зрачења, одређена је једногодишњим мерењем ламелираног стакла. Контурне линије на дијаграму показују очекивани број дана за период од 100 година, током којих ће бити превазиђене назначене вредности оптерећења од удара ветра и температуре материјала. Препорука код пројектовања фасадних конструкција од ламелираног стакла, у чијем саставу се налазе описани

¹⁷Wellershoff, F. *Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebaudehullen*. Ph.D. thesis, RWTH Aachen / Shaker Verlag, 2006.

¹⁸*Ibid.*

вискоеластични материјали, представљена је на следећој слици, за подручје континенталне Европе, где до екстремних оптерећења ветром долази искључиво у време олуја.



Слика 2.1.8: корелација оптерећења од ветра и температуре материјала ¹⁹

Сва претходна истраживања и посматрања спровођена кроз дужи временски период, показала су да се модул смицања за ПВБ фолију генерално може усвојити вредност $G_{\text{PVB}} = 0.4 \text{ N/mm}^2$.²⁰

Већи део испитивања узорака од ламелираног стакла, подразумева коришћење узорака код којих су ламеле стакла спојене обично формулисаном ПВБ фолијом. Међутим, употребом ојачане формуле ПВБ фолије, која се у литератури

¹⁹*Ibid.*

²⁰*Ibid.*

може наћи под ознаком *HG/MD interlayer*, добија се знатно бољи одговор конструкције на бази ламелираног стакла на дејство спољног оптерећења. Коришћењем оваквог интермедијалног слоја, чак се може разматрати у којој мери се ламелирано стакло приближава особинама монолитног стакла исте дебљине.²¹ До унапређених особина ламелираног стакла, пре свега у смислу ефикасног трансфера напрезања са једне ламеле у пакету на другу, долази због знатно већих вредности модула смицања код фолије типа HG/MD у односу на обичну ПВБ фолију, а тај однос може бити и 2,5 пута већи у корист HG/MD фолије.²²

2.1.3 Отпорност стакла на спољне утицаје

Потребно је да се елементи ентеријера на бази стакла у архитектонским објектима, као што су ограде, врата или зидови, пројектују тако да буду отпорни на ударно дејство настало деловањем људске навале. Често је задовољавајуће да се стаклена ограда димензионише према тој врсти дејства тако што се по њеном врху постави низ концентрисаних хоризонталних сила на одређеном растојању, интензитета од 1.2 kN до 1.5 kN, или се постави хоризонтално једнакоподељено оптерећење и то све као статичко оптерећење. Код специфичних конструкција од стакла, које имају улогу ношења, као што су разне врсте тачкасто ослоњених ограда, поједини стандарди захтевају динамичку анализу, или доказ носивости претходним тестирањем на дејство концентрисаног удараца.

Посебна тема по питању безбедности конструкција од стакла, јесте њихово понашање у случајевима експлозије бомбе. У таквим ситуацијама, у градском окружењу, фрагменти стакла проузрокују 80% од свих повреда, а чак до 55% повреда на удаљености од 120 м, настале су као последица неке врсте дејства фрагмената стакла. У новије доба, ови аспекти пројектовања конструкција од стакла постају веома актуелни, обзиром на растућу опасност од тероризма и напада сличне

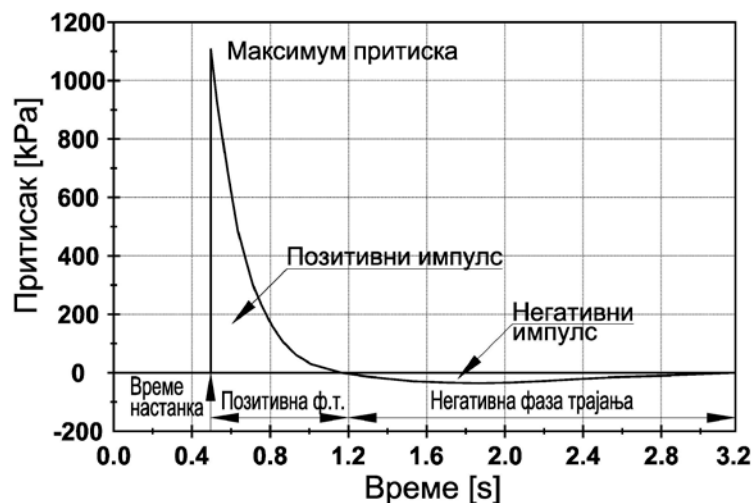
²¹ Abarca, Ana Maria, *Tests performed on Laminated Glass Bonded With a New Interlayer Composition*, A Thesis in Civil Engineering, Texas Tech University, 2003.

²² EL-Shami, M., Norville, S., Ibrahim, Yasser E., *Stress Analysis of Laminated Glass With Different Interlayer Materials*, Alexandria Engineering Journal, 2012, 51, (p. 61-67)

природе у градским срединама. Из тог разлога се посвећује посебна пажња код пројектовања конструкција од стакла, у смислу њихове заштите, било да су носеће или неносеће, при чему се постављају три основна циља:

- смањење нивоа повреда проузрокованих фрагментима стакла оштрих ивица;
- смањење нивоа и обима оштећења опреме у зградама које су изложене нападу експлозивном направом;
- скраћење времена које је потребно да се оштећени објекат након експлозије доведе у пређашње, функционално стање.

У тренутку експлозије, реакција ослобађа гасове при високој температури и притиску. Високи притисак се затим великом брзином шири кроз окружење у виду ударног таласа компримованог ваздуха. Ударни талас се шири радијално из језгра експлозије уз постепено губљење на интензитету, али са продуженим трајањем. Врх ударног таласа практично тренутно достиже свој максимум у простору где се догодила експлозија, након чега долази до опадања интензитета и стварања просторног притиска, што се још назива и *позитивна фаза* дејства. Затим следи фаза негативног притиска, односно, *сисућа фаза*. Ово је приказано на следећој слици.



Слика 2.1.9: дијаграм карактеристичног дејства експлозије²³

²³Haldimann, Dr Matthias, Luible, Dr Andreas, Overend, Dr Mauro, *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 2008 (p. 36)

Експлозије ситуиране у непосредној близини објекта, проузрокују оштећења на конструкцији објекта у локализованој средини, која непосредно окружује место експлозије. За разлику од таквих експлозија, оне које се десе на одређеној удаљености од објекта, утичу на њега смањеним интензитетом, али имају дуготрајнији ефекат, неће проузроковати озбиљнија оштећења на конструкцији објекта, али ће у широком обиму оштетити лагане елементе преграда и застакљене површине.

Одговор конструкције објекта на ударни талас експлозије, одређен је, пре свега, односом трајања позитивне фазе и периодом сопствених вибрација конструкције објекта. Ако је овај однос мањи од 0.2, ефекат експлозије се третира као ударно дејство; ако тај однос има вредност већу од 10, експлозија се може посматрати као квази статичко оптерећење. У случају да однос трајања позитивне фазе и периода сопствених вибрација конструкције објекта има вредност између 0.2 и 10, одговор конструкције је динамички и оптерећење од експлозије се тада посматра као динамичко.

Напони у стаклу настали термичким дејством, настају услед појаве температурног градијента на површини стакла. Извор топлоте може бити сунчево зрачење или термотехничка опрема у објекту.

Код сунчевог зрачења, један део енергије се рефлектује, други део стакло апсорбује и последњи део пролази кроз стакло. Апсорбована енергија повећава температуру стакла. Код стаклених елемената на фасади који су смештени у оквир од другог материјала или који су програмски заклоњени на неки начин, само откривени делови су изложени дејству сунчевих зрака. Постојање зона стаклене површине које су различитих температура, доводи до тога да се топлије зоне шире, изазивајући напоне затезања у хладнијим зонама. Уколико је температурна разлика између топлије и хладније зоне изражена, напони могу изазвати лом стакла. Опасност од лома проузрокованог температурним разликама на површини стакла, знатно је израженија код обичног стакла, него код делимично или потпуно каљеног стакла. Критични период за фасадно стакло је обично у почетном периоду сунчаног дана, након хладне ноћи. У тренутку излагања стакла дејству сунчевих зрака, стакло је хладно и откривене површине се нагло загревају, док заклоњене површине остају

хладне. Загрејане површине стакла се тада шире и изазивају напоне затезања на маргиналним хладним зонама, које су паралелне са ивицом стакла.

Отпорност стакла према лому од термички проузрокованог напона, обично се дефинише као дозвољени максимум температурне разлике. Ако је израчуната или претпостављена температурна разлика мања од дозвољене, стакло је термички безбедно. У табели у наставку су дате вредности допуштених температурних разлика на површини стакла, у зависности од врсте стакла и обраде ивица.

Табела 2.1.4: дозвољене температурне разлике на површини стакла²⁴

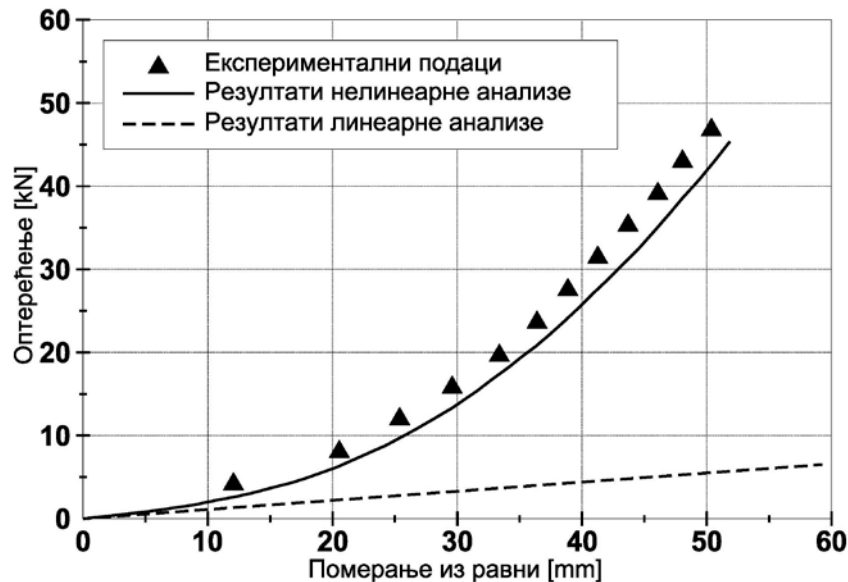
Врста стакла	Оборене или обрађене ивице [°C]	Мутно стакло [°C]	Полирано стакло [°C]
Обично стакло, $d < 12$ мм	35	40	45
Обично стакло, $15 \text{ мм} < d < 19$ мм	30	35	40
Обично стакло, $d = 12$ мм	26	30	35
Штампано стакло	26	26	26
Армирано стакло	22	22	22
Делимично каљено стакло	100	100	100
Потпуно каљено стакло	200	200	200
Ламелирано стакло	Најмања вредност компоненталних напона		

Ако на стаклену плочу делује оптерећење управно на њену равани ако су ивице плоче ослоњене по целом обиму, високи интензитети дилатације ће довести до истезања средње равни плоче, што ће у плочи произвести унутрашње или мембранске напоне и повећање крутости плоче. До овог феномена може доћи под условом да је на ивицама по обиму спречено померање у равни плоче.

У случајевима великих мембранских напрезања, упрошћавања која нуди класична теорија плоча нису применљива, те је потребна нелинеарна анализа, како би било узето у обзир и допунско мембранско стање напона.

²⁴ *Ibid.*

Без нелинеарне анализе код случајева са великим вредностима дилатација, добијају се резултати са нереално великим вредностима угиба управно на раван плоче. Размиоилажења резултата добијених линеарном и нелинеарном анализом и упоређење резултата тих анализа са експериментално утврђеним подацима, приказана су на следећој слици.



Слика 2.1.10: дијаграм односа оптерећење / деформација за плочу од потпуно ламелираног стакла димензија 1676.4 · 1676.4 · 5.66 мм, која је оптерећена управно на раван²⁵

Да би се дефинисала чврстоћа стакла, односно отпорност према лому, користи се концепт квази-статичког линеарног еластичног механизма лома.²⁶ Тај модел се још назива и модел предвиђања животног века, добијен је помоћу математичког модела који обухвата површинске услове на стакленом елементу. Лом настаје пропагацијом површинских микропрлина, које се третирају управо теоријом квази-статичког линеарног механизма лома, као и теоријом вероватноће. Једначине добијене кроз модел предвиђања животног века, служе за пројектовање стаклених елемената и њихово математичко моделирање. Ове једначине узимају у обзир субкритични раст прлина, нехомогеност, временски променљива биаксијална напонска поља, произвољну геометрију и произвољна напонска стања која претходе тренутку лома.

²⁵ Ibid. (p. 41)

²⁶ Ibid. (p. 49)

Без обзира што је релевантан за краткотрајна оптерећења, модел предвиђања животног века се не може користити за описивање динамичких феномена, као што је понашање стакла под дејством ударних оптерећења.

Квази статички линеарни механизам лома се базира на површинским прслинама, које су идеализоване преко дефинисане геометрије и посматрају се као равански ентитети. Прслине се могу налазити на површини, али и у унутрашњости материјала и управо су ове прве – површинске – те које се третирају овим моделом. Основни теоријски концепт је базиран на механици лома, о чему постоји бројна литература.²⁷

Теоријска чврстоћа материјала је одређена силама међуатомских веза. Орован (*Egon Orowan, 1902-1989*) је дао вредност напона која је потребна да би дошло до раскида међуатомских веза, што се још назива и *Орованов напон*:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{E \cdot \gamma}{r_0}} \quad (1.1)$$

где је:

γ - површинска енергија лома;

E - модул еластичности.

Ако је модул еластичности стакла $E = 70 \text{ GPa}$, $r_0 = 0,2 \text{ nm}$ и $\gamma = 3 \text{ Jm}^{-2}$, за обично силикатно стакло добија се теоријска чврстоћа $\sigma_m = 32 \text{ GPa}$, мада је из праксе познато да та чврстоћа има знатно мању вредност. Ово неслагање проистиче из постојања микропрслина на површини стакла, које су настале још у току производње и проузрокују појаву концентрације напона на одрђеним тачкама површине стакла, од самог почетка експлоатације стакленог елемента.

Чарлс Инглз (*Charles Ingles, 1875 - 1952*) је уочио да прорези, зарези или рупе на металној плочи умањују носивост елемента на затезање у већој мери него што би то проузроковало једноставно смањење површине попречног пресека. Он је показао

²⁷Шумарац, Д., Крајчиновић, Д. (1990). *Основи механике лома*. Научна књига, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд.

да увећање – концентрација – напона у темену уског прекида материјала облика елипсе чији дужи пречник лежи управно на правац дејства напона, има вредност:

$$\sigma_t = 2 \cdot \sigma_E \cdot \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (1.2)$$

где је:

ρ - полупречник кривине на врху прслине;

a - дужина прслине.

Код изузетно малих прслина, ρ је веома мало, тако да σ_t достиже високу вредност, што доводи до тога да се напон σ_t приближава вредности молекуларних веза, чак иако су напрезања релативно мала.

Грифит (*Alan Arnold Griffith, 1893 - 1963*) је моделовао статичку прслину као реверзибилан термодинамички систем. Ако се укупна слободна енергија система минимализује, прслина је у стању равнотеже, односно на ивици пропагације. Укупна енергија система има вредност:

$$U = U_M + U_S \quad (1.3)$$

где је:

U_M - механичка енергија (збир потенцијалне енергије деформације акумулиране у еластичном телу и потенцијалне енергије спољних сила);

U_S - слободна енергија утрошена у настајању нових површинских прслина.

Одавде се закључује да енергија U_M поспешује пропагацију прслине, док јој се енергија U_S супротставља. Услов равнотеже:

$$\frac{dU}{dc} = 0 \quad (1.4)$$

Назива се и *Грифитов концепт равнотеже енергије*. За прслину у бесконачној равни важи:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot a_c}} \quad (1.5)$$

где је:

σ_f - номинални напон лома;

a_c - критична дужина прслине.

Ирвин (*George Rankine Irwin, 1907 - 1998*) је проширио Грифитов концепт равнотеже енергије, уводећи специфичности материјала у смислу његове кртости отпорности на лом, као и појам фактора интензитета напона. За облик деформације прслине “I” (отварајући мод), фактор интензитета напона K_I , има вредност:

$$K_I = Y \cdot \sigma_n \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1.6)$$

где је:

σ_n - номинални напон затезања управан на раван прслине;

Y - фактор корекције;

a - величина прслине (половина дужине прслине или дубина површинске прслине).

Уместо фактора интензитета напона K_I , често се користи брзина (степен) ослобађања енергије G . За еластични материјал и мод “I”, биће:

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (1.7)$$

при чему је $E' = E$ за равно стање напона и $E' = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ за равно стање деформације.

Фактор корекције Y , зависи од дубине и геометрије прслине, геометрије стакленог елемента, напонског поља и удаљености, односно близине прслине и ивице елемента. Док је геометрија стакленог елемента мање важна, врста напрезања, облик прслине и близина ивице стакленог елемента имају знатно већи утицај на вредност фактора корекције. Из тог разлога, фактор корекције се често назива и *фактор облика*.

До тренутног лома стакленог елемента долази када фактор интензитета напона K_I достигне критичну вредност. Критична вредност је константа материјала, позната и као *чврстоћа лома* код раванске деформације и равног стања напона, или критични фактор интензитета напона K_{Ic} . Тај услов лома се назива и *Ирвинов критеријум лома* и пише се:

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (1.8)$$

Горњи критеријум се односи на отварајући мод (мод I), односно прслину изложену једноаксијалном затезању, управном на раван прслине. Код стакла може да буде од интереса и мод III (смицање ван равни прслине). То пре свега важи за стаклене површине код којих су већ настале прслине по целој дебљини елемента.

За стакла која су обрађена дејством високих температура у циљу ојачавања, било да су делимично или потпуно каљена, користи се назив *термички ојачано стакло*. Према Халдиману, Либлеу и Оверенду²⁸, код оваквих стакала, напон у равни управан на површину прслине (ознака “n” у индексима у изразу), или *напон отварања прслине*, има вредност:

$$\sigma_n(\tau, \vec{r}, \varphi) = \sigma_{E,n}(\tau, \vec{r}, \varphi) + \sigma_{r,n}(\vec{r}, \varphi) + \sigma_{p,n}(\tau, \vec{r}, \varphi) \quad (1.9)$$

где је:

- σ_E - површински напон изазван спољним деловањем;
- σ_r - заостали напон изазван каљењем (преднапрезањем);
- σ_p - површински напон изазван граничним условима – ослањањем елемента;
- τ - време;
- \vec{r} - положај прслине;
- φ - оријентација прслине.

До пропагације прслине или до лома може доћи само ако је стаклени елемент изложен напону затезања, односно, ако је: $\sigma_n(t, \vec{r}, \varphi) > 0$.

²⁸Haldimann, Dr Matthias, Luible, Dr Andreas, Overend, Dr Mauro, *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 2008 (p. 37)

Из израза (1.9) може се закључити да чврстоћа лома термички ојачаног стакла представља збир апсолутних вредности заосталог (притискујућег) површинског напона и чвретоће које само стакло поседује, која се може назвати и *сопствена чврстоћа* стакла. Сопствена чврстоћа стакла је одређена подкритичним растом прслине, што значи да зависи од услова средине у којој се стаклени елемент налази и од трајања експлоатација, док је заостали напон произведен каљењем константан и нема такве зависности.

Пројектовање елемента термички ојачаног стакла, тако да у току пуног периода експлоатације (“ T ” целокупан животни век) не долази до смањења површинског притискујућег напона, односно да не долази до појаве затежућих напона, може се математички описати следећим изразом:

$$\max_{\tau \in [0, T]} \sigma_{E,n} \leq -(\sigma_{r,n} + \sigma_{p,n}) \forall (\vec{r}, \varphi) \quad (1.10)$$

Код оваквог стакленог елемента, не постоји зависност од величине, трајања експлоатације или услова окружења.

Комбиновањем израза (1.6) и (1.8), добија се израз за напон који доводи до тренутне пропагације прслине и лома:

$$Y \cdot \sigma_n \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \geq K_{Ic} \quad (1.11)$$

Из овог изразасе може добити критични напон σ_c који изазива лом прслине дубине a :

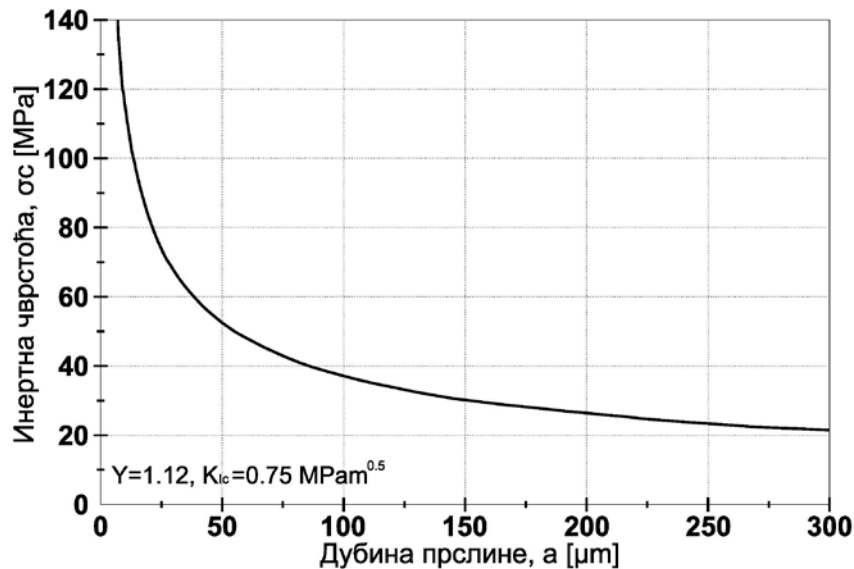
$$\sigma_c(t) = \frac{K_{Ic}}{Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a(t)}} \quad (1.12)$$

Тада је критична дубина прслине a_c у тренутку лома, при напону σ_n :

$$a_c(t) = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_n(t) \cdot Y \cdot \sqrt{\pi}} \right)^2 \quad (1.13)$$

И напон σ_n и дубина прслине a су зависни од времена, што значи да и критични напон σ_c и критична дубина прслине a_c , такође зависе од времена. Критични напон представља отпорност прслине на тренутни лом, који није изазван

под-критичним растом прслине, који се из тог разлога назива *инертна чврстоћа*. На следећој слици је приказана зависност чврстоће прслине од дубине прслине на стакленој плочи, при условима инертног стања (без под-критичног раста прслине).



Слика 2.1.11: чврстоћа прслине у инертним условима, у функцији њене дубине²⁹

Уводећи основну диференцијалну једначину пропације прслине, тако да буде меродавна у пуној мери за I мод ("K_I"), што подразумева занемаривање прага пропације прслине:

$$v = \frac{da}{dt} = v_0 \cdot \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^n \quad (1.14)$$

Уз коришћење фактора интензитета напона из израза (1.6), уз претпоставку да је $n = const.$, добија се:

$$\int_{a_i}^{a(t)} a^{-\frac{n}{2}} da = \int_0^t v_0 \cdot K_{Ic}^{-n} \cdot (Y \cdot \sqrt{\pi})^n \cdot \sigma_n^n(\tau) d\tau \quad (1.15)$$

Ако је a_i почетна дубина прслине $a_i = a(t = 0)$, тада је величина прслине која је изложена напону отварања прслине $\sigma(t)$ и која је временски зависна:

$$a(t) = \left[a_i^{\frac{2-n}{2}} + \frac{2-n}{2} \cdot v_0 \cdot K_{Ic}^{-n} \cdot (Y \cdot \sqrt{\pi})^n \cdot \int_0^t \sigma_n^n(\tau) d\tau \right]^{\frac{2}{2-n}} \quad (1.16)$$

²⁹Ibid. (p. 39)

Интеграцијом интервала времена $[0, T]$ и одговарајуће дубине прслине $[a_i, a]$, добија се основна веза:

$$\int_0^T \sigma_n^n(\tau) d\tau = \frac{2}{(n-2) \cdot \nu_0 \cdot K_{Ic}^{-n} \cdot (Y \cdot \sqrt{\pi})^n \cdot a_i^{\frac{n-2}{2}}} \cdot \left[1 - \left(\frac{a_i}{a} \right)^{\frac{n-2}{2}} \right] \quad (1.17)$$

Дубина прслине у тренутку лома a_f , јесте, у ствари, *критична дубина прслине*, приказана у изразу (1.13), а за напон лома $\sigma(t_f)$, тај израз се може написати у следећем облику:

$$a_f = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_n(t_f) \cdot Y \cdot \sqrt{\pi}} \right)^2 \quad (1.18)$$

У изразу (1.18), вредност t_f је време до лома, у оквиру животног века стакленог елемента. Једначина (1.18) се може вратити у израз (1.17), а пошто n има високу вредност (око 16), део израза у угластим заградама у једначини (1.17) се, за дуг животни век ($a_f \gg a_i$), приближава вредности 1, тако да се може добити једноставнији (краћи) израз од израза (1.17):

$$\int_0^T \sigma_n^n(\tau) d\tau = \frac{2}{(n-2) \cdot \nu_0 \cdot K_{Ic}^{-n} \cdot (Y \cdot \sqrt{\pi})^n \cdot a_i^{\frac{n-2}{2}}} \quad (1.19)$$

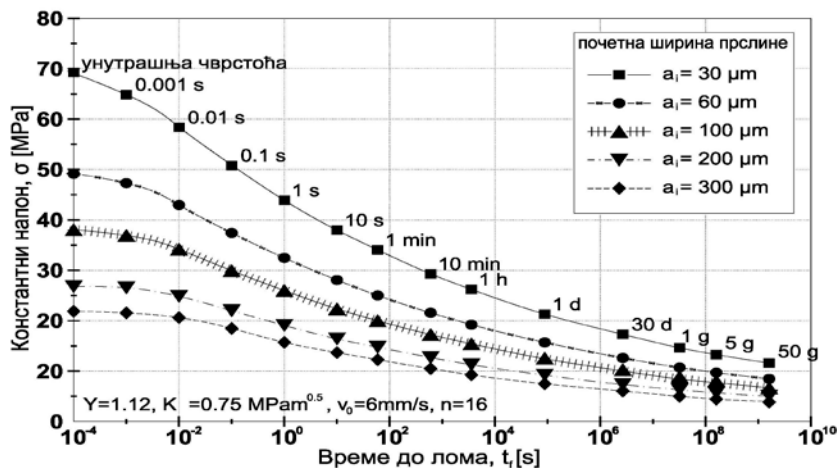
Релација (1.19), која узима у обзир почетну дубину прслине, односно њену допуштену почетну дубину, може се користити за израчунавање животног века прслине. Леви део једначине се назива *интеграл ризика* и показује акумулацију потенцијала за оштећивање у самом стаклу.

Ако је брзина пропагације прслине веома мала, или је трајање наношења оптерећења кратко (скоро инертни услови), чврстоћа прслине добијена из једначине (1.19) конвергирала би према бесконачности, што, наравно, нема смисла, из разлога што чврстоћа прслине не може имати вишу вредност од инертне чврстоће. Такође, део проблема је и то што дубина прслине у тренутку лома није много већа од почетне дубине прслине. У ствари, у идеално инертним условима, две дубине прслине – почетна дубина и дубина у тренутку лома – су исте. То значи да

претпоставка ($a_f \gg a_i$) која је коришћена за добијање једначине (1.19), није применљива за дате услове. Опште применљив израз се ипак може добити помоћу једначина (1.16) и (1.18):

$$\tilde{a}_c(\tau) = \left[\left(\frac{\sigma_n(\tau) \cdot Y \cdot \sqrt{\pi}}{K_{Ic}} \right)^{n-2} + \frac{n-2}{2} \cdot v_0 \cdot K_{Ic}^{-n} \cdot (Y \cdot \sqrt{\pi})^n \cdot \int_0^\tau \sigma_n(\tilde{\tau}) d\tilde{\tau} \right]^{\frac{2}{2-n}} \quad (1.20)$$

Дубина прслине $\tilde{a}_c(\tau)$, представља почетну дубину прслине до чијег лома долази у тренутку времена τ , када је прслина изложена напону затезања који је отвара $\sigma_n(\tau)$. Једначина (1.20) не зависи само до интеграла ризика, већ и од тренутног напона $\sigma_n(\tau)$. Интеграл ризика монотонно расте, што није случај када је у питању тренутни напон. Из тог разлога, минимална почетна дубина прслине $\tilde{a}_c(\tau)$, која је релевантна у анализи, не појављује се неопходно и на крају излагања прслине напону ($\tau = T$), већ се може појавити у било којем тренутку $\tau \in [0, T]$. До лома прслине не долази ако није испуњен услов: $a_i < \min_{\tau \in [0, T]} \tilde{a}_c(\tau)$.



Слика 2.1.12: чврстоћа површинске прслине у функцији трајања оптерећења и дубине прслине, према једначини (1.20)³⁰

Криве показују константан напон који проузрокује лом, у функцији трајања оптерећења, а за различите почетне дубине прслине. Криве су изведене за вредност $v_0 = 6 \text{ mm/s}$ линеарног параметра брзине пропације прслине.

³⁰Haldimann, Dr Matthias, Luible, Dr Andreas, Overend, Dr Mauro, *Structural Use of Glass*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 2008 (p. 40)

Може се уочити да су чврстоће прслина у строгој зависности према времену, као и да је веома ниска дуготрајна чврстоћа прслине код оних чија је почетна дубина, реда величине, 100 μm или више.

Осим *поливинил бутиралне* (ПВБ) фолије, као интермедијални слој за спајање две суседне ламеле стакла, у употребу је ушла *етилен винил-ацетатна* (ЕВА) фолија, која представља кополимер етилена и винил-ацетата. Практична предност овог материјала у односу на ПВБ фолију, пре свега се огледа у већој отпорности на влагу, док су његове остале карактеристике, које се тичу физичко механичких карактеристика, у рангу ПВБ фолије или су боље. Такође је од великог значаја што су код ЕВА фолије провидност и капацитет заустављања ултравиолетног зрачења преко 92 %, односно преко 99%. Са становишта испитивања чврстоће, основна предност ЕВА фолије у односу на ПВБ фолију јесте њено ефикасније садејство са ламелама стакла које спаја, што доприноси повећаној чврстоћи пакета ламелираног стакла.³¹

У овом раду ће бити скренута пажња на проблем ефикасности интермедијалне фолије, чија је улога спајање и спрезање две ламеле стакла и преношење смичућих напона. Савремена истраживања се интензивно баве тим проблемом, у циљу изналажења материјала на бази полимера који би пакете ламелираног стакла учинио чвршћим од монолитног стакла чија је дебљина једнака дебљини пакета ламелираног стакла.³²

³¹ Jalham, Issam S., Alsaed, Omar, *The Effect of Glass Plate Thickness and Type and Thicknes of Bonding Interlayer on the Mechanical Behavior of Laminated Glass*, New Journal of Glass and Ceramics, 2011, 1, (p. 40-48)

³² Dr. Stephen J. Bennison, *Strength of Laminated Safety Glass*, Glass Processing Days, Proceedings of the 7th international glass conference in Tampere, 2001 (p. 368-371)

2.2 ПОЛИКАРБОНАТ КАО КОНСТРУКЦИОНИ МАТЕРИЈАЛ

3.2.1 Хемијски састав и особине пластичних маса

У грађевинарству се као замена за стакло користе провидни материјали, као што су поликарбонати (ПЦ), полиметил-метакрилати (ПММА) и њима слични у смислу провидности. Ови материјали су према широј подели *неметали* и припадају групи *пластичних маса*.

Пластичне масе се добијају на бази високомолекуларних једињења (полимера). У неком стању имају пластичност, која се потпуно или делимично губи при преласку на друге услове. Ово пружа могућност да се од тих материјала добију производи потребног облика применом метода базираних на пластичној деформацији. Тако се, на пример, пресује пластична маса која је претходним загревањем доведена у пластично стање, да би се, затим, такви производи користили у другим условима као еластична тела.³³

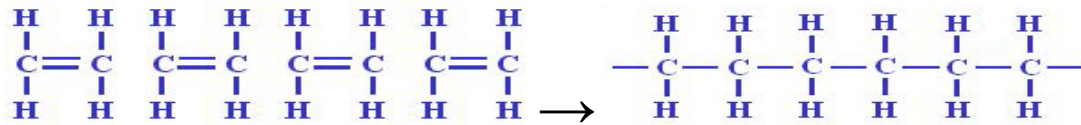
Ови материјали се одликују тиме што њихова механичка својства представљају комбинацију својства чврстих тела и течности – они су чврсти и способни за повратне механичке деформације великог обима.

Особине полимера су производ њихове унутрашње структуре. Полимери се састоје од великог броја молекуларних ланаца, који су сачињени од великог броја хемијских прстенова (карика), који могу бити једнаки или различити.



Слика 2.2.1: прелазак мономера у полимер – ПОЛИМЕРИЗАЦИЈА

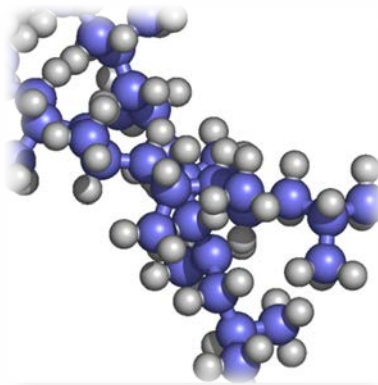
³³ Mihailidi, M., Stanković, I., Paštrakuljić, M., Stojanović, A., Tatić, J., Janać, S., *Inženjersko tehnički priručnik – Materijali*, IP Rad, Beograd, 1971



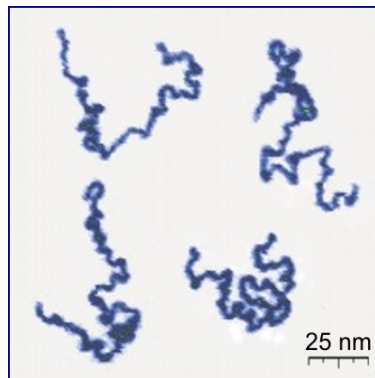
Слика 2.2.2: ланчана полимеризација етилена у полиетилен

Молекуларни ланци могу да се састоје од прстенова различитог типа који се ређају правилно или неправилно. Такође могу да се гранају и буду везани у неправилне просторне мреже.

За полимере су карактеристични дугачки ланци од молекула са врло различитим карактерима веза дуж ланца и међу ланцима.



Слика 2.2.3: пластични полимер³⁴



Слика 2.2.4: полимерски ланци под оком микроскопа³⁵

³⁴ Слика преузета са <http://www.groovypost.com/news/the-perfect-plastic-another-tech-revolution/>

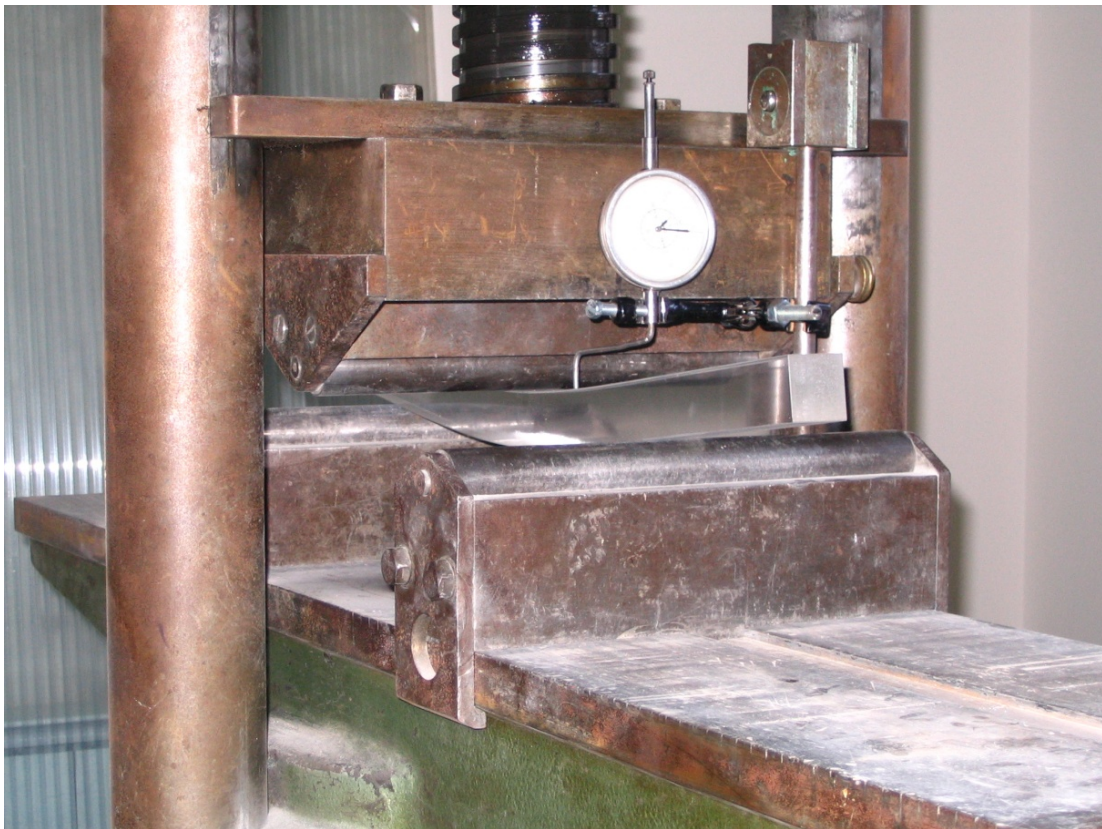
³⁵ Слика преузета из ROITER, Y.; MINKO, S., *AFM Single Molecule Experiments at the Solid-Liquid Interface: In Situ Conformation of Adsorbed Flexible Polyelectrolyte Chains*, *Journal of the American Chemical Society*, 2005, **127** (45): 15688–15689.

Уздужна својства молекула полимера су блиска својствима чврстих кристалних тела, док су, у исто време, попречна својства приближавају својствима течности.

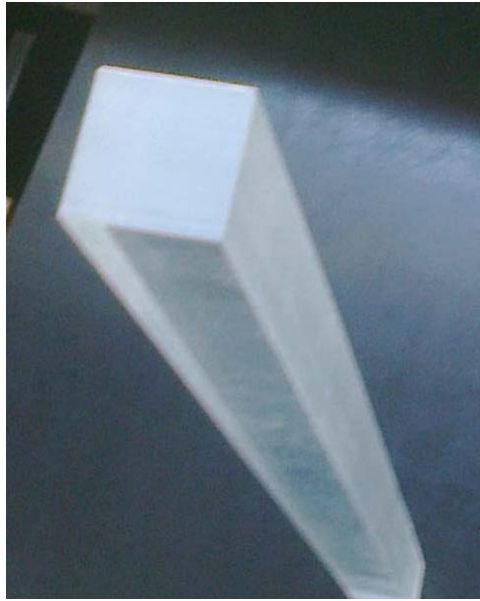
Полимери могу да буду аморфни и кристални.

За аморфне полимере, у зависности од температуре, карактеристична су три стања: стакласто, вискоеластично и пластично.

Једино полимери имају вискоеластично стање, у којем се знатно и повратно деформишу. Та деформација се може представити као развлачење прстенова, или мањих група прстенова молекула полимера под дејством спољних сила. Пошто су сви ти елементи везани у ланац, њихово развлачење је повратно. Због таквог карактера веза, при деформацији се код полимера стварају унутрашњи напони који доводе до повратних вискоеластичних деформација.



Слика 2.2.5: деформација узорка од пластичне масе – клирита, приликом испитивања у лабораторији



Слика 2.2.6: исти узорак од пластичне масе – клирита, који је приказан на претходној слици, у фази извођења лабораториског испитивања; након демонтаже из лабораторијске опреме, деформација је нестала у потпуности

Својства полимера зависе од њихове молекуларне тежине – што је већа молекуларна тежина полимера, утолико је већа његова механичка чврстоћа.³⁶

У зависности од понашања при загревању, полимери се деле на термореактивне (термоочвршћавајуће) и термопластичне.

Термореактивна једињења (термоочвршћавајући полимери) при загревању лако прелазе у пластично стање, али ако се загревање настави, због хемијске реакције прелазе у чврсто стање и трајно задржавају тај облик. До очвршћавања за време прераде при повишеној температури, долази услед иреверзибилног густог умрежавања олигомера. Производи који настају на тај начин више се не могу топити и не могу мењати облик који су добили првобитном обрадом. Имају особину да не бубре, такође се не могу растварати, а на собној температури су тврди и крти. У термореактивне масе спадају смоле на бази глицерина и вишебазних киселина, карбамидне, алкидне, епоксидне и фенол-алдехидне смоле, уреа-алдехидне смоле, незасићени полиестри и многи други полимери.³⁷

³⁶ Mihaílidi, M., Stanković, I., Paštrakuljić, M., Stojanović, A., Tatić, J., Janać, S., *Inženjersko tehnički priručnik – Materijali*, IP Rad, Beograd, 1971

³⁷ Ćirić-Marjanović, dr Gordana, *Fizička hemija makromolekula – uvodno predavanje*, Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, oktobar 2013

Термопластична једињења при загревању омекшавају и прелазе у течну стању – растоп. У стању растопа се могу лако обликовати, а при хлађењу задржавају добијени облик и поново се враћају у еластично-чврсто стање. Процес топљења и обликовања се може понављати више пута. У ову врсту аморфних и делимично кристалних једињења спадају полистирен, полиетилен, поливинил-хлорид, полипропилен, полиамид, поликарбонат, полиметил-метакрилат, полиоксиметилен, полиетилен-терефталат. Термопластични полимери се састоје од линеарних и разгранатих макромолекула.³⁸

Пластичне масе могу да се састоје само од полимера, на пример: полиетиле, полистирол. Међутим, у највећем броју случајева, пластичне масе представљају вишекомпонентне системе, у чији састав, поред полимера, улазе и полимер везиво, катализатор или очвршћивач, пунилац, пластификатор, бојило.

Према основној подели, постоје четири класе пластичних маса:

- А. Пластичне масе на бази високомолекуларних једињења, добијене ланчаном полимеризацијом;
- Б. Пластичне масе на бази високомолекуларних једињења, добијене на бази поликондензације и степенасте полимеризације;
- В. Пластичне масе на бази хемијских модифицираних природних полимера;
- Г. Пластичне масе на бази природних и нафтних асфалта и смола.

Основне индустријске методе прераде пластичних маса у готове производе су пресовање, ливење (без притиска), бризгање, екструдирање, ваљање, каландрирање и механичка обрада.

За грађевинарство су посебно важне *конструкционе пластичне масе*, које се деле на пластичне масе мале чврстоће, пластичне масе средње чврстоће и пластичне масе велике чврстоће.

У **пластичне масе мале чврстоће** спадају фенопласти, фенолити, аминокласти и друго. Ове пластичне масе се, без обзира на велику кртост, примењују у машинској индустрији за израду елемената који се излажу малим

³⁸*Ibid.*

оптерећењима (ручице, замајци и слично). У ову групу спадају и пластичне масе опште намене.

У **пластичне масе средње чврстоће** спадају слојасте пластике, направљене од хартије, тканине од памука и хартије или дрвеног фурнира, импрегниране фенолформалдехидном смолом и пластике полимеризационог типа.

Слојасте пластике, а посебно пластике ојачане дрветом, по чврстоћи су блиске алуминијумским легурама за ливење, док им је специфична чврстоћа наравно већа. Повећани ниво чврстоће, повезан са ниским коефицијентом трења, довео је до успешне примене тих материјала за израду антифрикционих елемената и зупчастих пумпи. Област примене тих материјала је ограничена због ниске специфичне отпорности на удар, а такође због великог смањења чврстоће на температурама изнад 100° С.

У пластике полимеризационог типа спадају флуоропласти, полипропилен, полиетилен, полистирол (отпоран на удар), полиамид, полиуретан, полиформалдехид, поликарбонат и други.

У овом раду се испитује чврстоћа материјала на бази полимерних једињења, најпре под дејством статичког, а затим и под дејством динамичког оптерећења, за шта постоје већ нека разматрања у области механике лома.³⁹

У **пластичне масе велике чврстоће** спадају стаклом ојачане пластике, односно полимери армирани стакленим влакнима.

Најраспрострањенији полимери ове групе су фенолформалдехидне, епоксидне и полиетарске смоле.

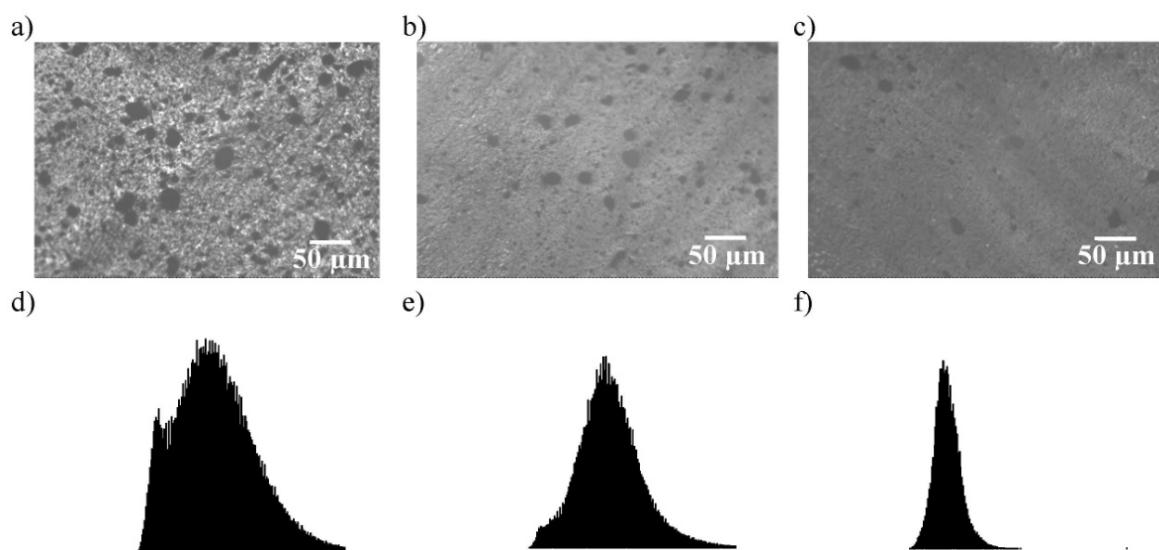
Велики утицај на механичка својства имају састав и распоред стаклених влакана. Највећа чврстоћа се постиже стакленом тканином, а мања чврстоћа ако се користи сечено неорјентисано стаклено влакно. Између ова два степена чврстоће, средњу чврстоћу имају пластичне масе чија стаклена влакна имају облик траке, или сламки од орјентисаних нити, постављених у слојевима, поређаних у два узајамно управна правца.

³⁹К. Takahashi, G. Aggag, T. Mada, *Rate Dependent Impact Fracture Toughness Analysis for Brittle Materials*, Journal de Physique IV, 1997, 07 (C3), pp.C3-1033-C3-1038.

Иста својства имају пластике које се добијају применом трака од стаклених сламки, импрегнираних синтетичком смолом.⁴⁰

Савремена истраживања која за циљ имају повећање чврстоће основог пластичног материјала као што је поликарбонат, крећу се у правцу употребе посебно чврстих материјала на бази карбонских влакана. За добијање композитног материјала, употребљавају се вишезидне карбонске наноцеви (*multi-wall nanotubes - MWNTs*).⁴¹

Дисперзијом карбонских наноцеви кроз пластичну масу поликарбоната, добија се композит са називом MWNT/PC, чије су физичкомеханичке карактеристике знатно унапређене у односу на основни пластични материјал. Чак са веома малим процентом од 3% карбонских нановлакана у оквиру укупне масе композита, долази до знатног увећања вредности модула еластичности и чврстоће на затезање. Од пресудног значаја код стварања композита, јесте степен дисперзије карбонских наноцеви кроз пластичну масу поликарбоната.

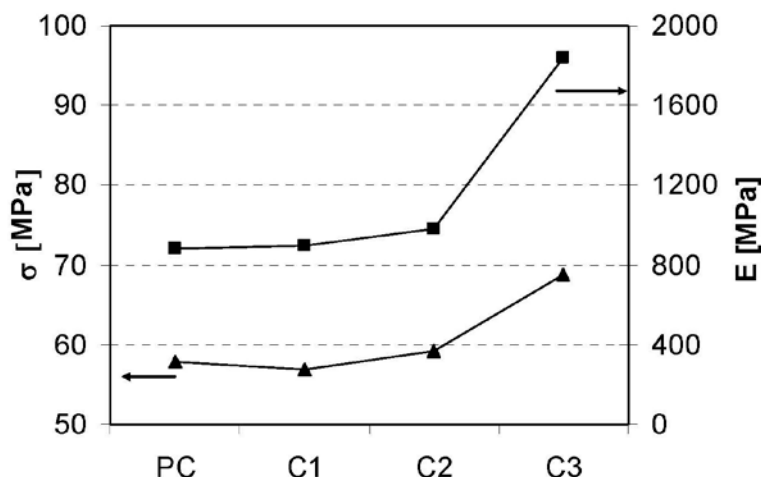


Слика 2.2.7: оптичка микрографија тропроцентног MWNT/PC, у три различита циклуса – степена дисперзије карбонских наноцеви⁴²

⁴⁰ Mihailidi, M., Stanković, I., Paštrakuljić, M., Stojanović, A., Tatić, J., Janać, S., *Inženjersko tehnički priručnik – Materijali*, IP Rad, Beograd, 1971

⁴¹ LEER, C., CARNEIRO, O. S., COVAS, J. A., MAIA, J. M., VAN HATTUM, F. W. J., BERNARDO, C. A., BIRO, L. P., HORVATH, Z. E., KIRICSI, I., *Dispersion of Carbon Nanotubes in Polycarbonate and Its Effect on the Composite Properties*, Trans Tech Publications, Switzerland, 2006, Materials Science Forum Vols. 514-516 (p 1125-1130)

⁴² *Ibid.*



Слика 2.2.8: чврстоћа на затезање и модул еластичности тропроцентног композита MWNT/PC, у три различита циклуса – степена дисперзије карбонских наноцеви⁴³

У литератури се могу наћи и примери експерименталног побољшања физичко – механичких карактеристика поликарбоната помоћу модификованих карбонских нано-цеви,⁴⁴ као и помоћу полиуретан-силикатних додатака.⁴⁵

2.2.2 Поликарбонат (PC) и полиметил-метакрилат (PMMA)

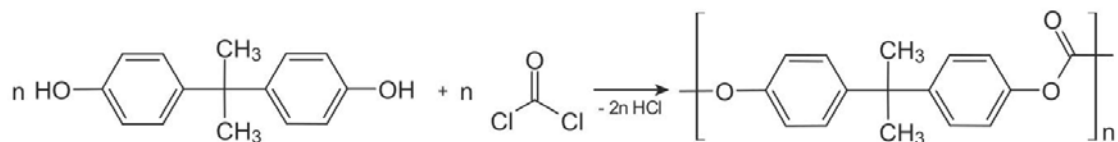
Поликарбонат је трајан материјал, отпоран на ударна дејства, а чак је провиднији од стакла (провидност преко 90%). Главни недостатак поликарбоната је његова слаба отпорност на површинске утицаје, тако да је његова површина јако подложна настајању огреботина. Познато је да поликарбонати имају широку примену у аутомобилској индустрији (ветробранска стакла), као и у индустрији стакала за наочаре. Код свих производа од поликарбоната овог типа, потребно је да се површина пресвуче посебним заштитним слојем, управо да би се обезбедила отпорност према настајању огреботина.

У хемијском смислу, поликарбонати су термопластични полимери, који у својој хемијској структури садрже карбонатну групу. Генерално, поликарбонат настаје реакцијом бисфенола А и гаса фосгена.

⁴³Ibid.

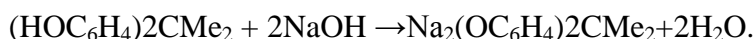
⁴⁴Y. Gao, P. He, J. Lian, L. Wang, D. Qian, J. Zhao, W. Wang, M. J. Schulz, J. Zhang, X. Zhou, D. Shi, *Improving the Mechanical Properties of Polycarbonate Nanocomposites with Plasma-Modified Carbon Nanofibers*, Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics, 45:671–679, 2006

⁴⁵R. Poreba, M. Špírková, Z. Hrdlička, *Mechanical and thermomechanical properties of polycarbonate-based polyurethane-silica nanocomposites*, Processing and Application of Ceramics 5 [3] (2011) 155–159

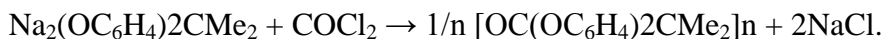


Слика 2.2.9: хемијска реакција између бисфенола А и фосгена

Најпре се бисфенол А излаже дејству натријум хидроксида, чиме долази до редукције протона и одузимања водоника из карбоксилне групе бисфенола А, те се тако добија дифеноксид:



Даље, дифеноксид наново ступа у реакцију са фосгеном, тако да настаје хлороформат, који одмах затим ступа у реакцију са следећим феноксидом



Као алтернатива поликарбонатима, у грађевинским конструкцијама се често користе полиметил метакрилати, који у својој формули не садрже бисфенол А.⁴⁶

Физичке особине поликарбоната, дате су у следећој табели:

 Табела 2.2.1.: физичке особине поликарбоната⁴⁷

Особина	Ознака	Јединица	вредност
Запреминска маса	ρ	kg/m ³	1190
Модул еластичности	E	GPa	≥ 3
Јачина на удар (Scharpy)	s	kJ/m ²	≥ 13
Тврдоћа (Rockwell)	r	М скала	100
Коефицијент термичког ширења	α_T	K ⁻¹	$7 \cdot 10^{-5}$
Чврстоћа на затезање	f_t	MPa	≥ 80
Чврстоћа на савијање	f_b	MPa	110
Чврстоћа на притисак	f_p	MPa	100
Издужење у фази лома	ϵ_t	%	≥ 4

⁴⁶ BOYER, R. F., *Dependence of Mechanical Properties on Molecular Motion in Polymers*, Polymer Engineering and Science, July 1968, Vol. 8, No. 3 (p. 165-171)

⁴⁷ Карактеристике материјала који је широко доступан на тржишту:
<http://www.galenikaklirit.co.rs/ploce.html>

Захваљујући својој чврстоћи, поликарбонат се користи за ојачавање других полимера, који немају довољно добре физичко-механичке карактеристике. На тај начин настаје нека врста легуре основног полимера са поликарбонатом, што се врло често изводи уз помоћ трећег чиниоца, чија је улога умањење контактних напона два материјала у фази дисперзије поликарбоната у основни материјал, односно повећање нивоа компатибилности два материјала. Трећи чинилац тако добија улогу *компоненте компатибилности*.

Ако се поликарбонатом врши ојачавање полипропилена (PP), онда се као компонента компатибилности ефикасно користи полипропилен-графт-малеик-анхидрид (*polypropylene-graft-maleic-anhydride*, скраћено *PP-g-MA* или *MAH*).⁴⁸

Ниво поликарбоната у једињењу са полипропиленом мора да се дозира јер већи удео поликарбоната нема довољно добар ефекат на повећање чврстоће “легуре“, вероватно из разлога недостатка компоненте компатибилности (*PP-g-MA*), која опет не може да се додаје у неограниченој мери, да би легирање уопште имало ефекта.⁴⁹

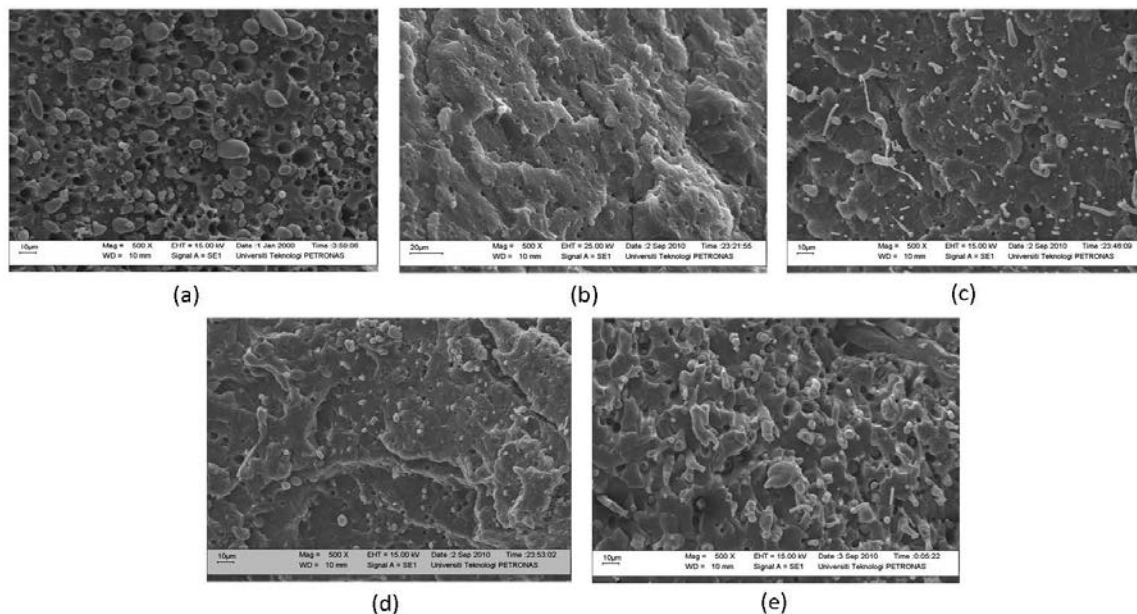
Табела 2.2.2: поређење особина легуре PP/PP-g-MA/PC, са различитим уделима градивних компоненти у структури⁵⁰

Структура[PP/PP-g-MA/PC]	100/0/0	90/5/5	80/15/5	70/25/5	60/35/5
Чврстоћа на притисак [MPa]	34,4	30,6	31,9	33,6	28,2
Модул еластичности [MPa]	627,6	648,1	649,0	706,2	601,3

⁴⁸ OROMIENIE, A., EBADI-DEHAGHANI, H., MIRBAGHERI, S., *Chemical Modification of Polypropylene by Maleic Anhydride: Melt Grafting, Characterization and Mechanism*, International Journal of Chemical Engineering and Applications, Vol. 5, No. 2, April 2014

⁴⁹ MAT SHAYUTI, Muhammad, ABDULLAH, Mohamad Z., MEGAT YUSOFF, Puteri S. M., *Compressive Properties and Morphology of Polypropylene / Polycarbonate Blends*, International Conference on Environment and Industrial Inovation IPCBEE vol. 12, IACSIT Press, 2011, Singapore

⁵⁰ *Ibid.*



Слика 2.2.10: структуре приказане електронским микрографским скенирањем: (a) – PP/PC (70/30), (b) – PP/PC/PP-g-MA (90/5/5), (c) – PP/PC/PP-g-MA (80/15/5), (d) – PP/PC/PP-g-MA (70/25/5), (e) – PP/PC/PP-g-MA (60/35/5)⁵¹

Постоје четири најраспрострањеније методе заваривања (спајања) елемената од полимера:⁵²

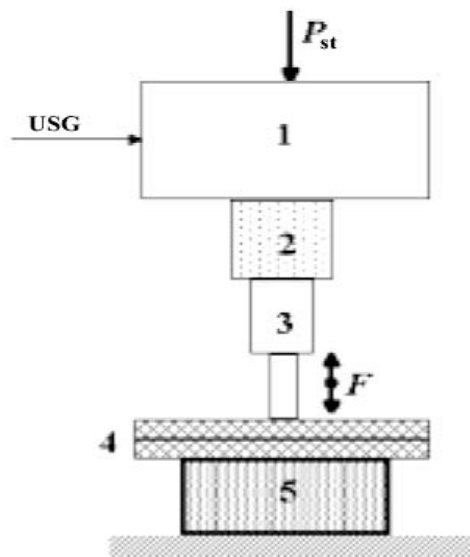
- Ултразвучно заваривање;
- Топлотно спајање;
- Микроталасно заваривање;
- Тачкасто заваривање трењем.

Ултразвучно заваривање је процес у којем се генерише топлота, уз употребу механичких вибрација ултразвучне фреквенције и мале амплитуде. Фреквенција механичких вибрација се креће од 15 до 70 kHz, у зависности од врсте полимера који се заварује. Осим тога, потребна је и притисна сила одређеног интензитета, тако да се ултразвучним заваривањем остварује спајање материјала само у контактним тачкама. На универзални уређај за ултразвучно заваривање, потребно је монтирати

⁵¹ *Ibid.*

⁵² BALOS, S., SIDJANIN, L., SABO, B., GRABULOV, V., *Tehnologija zavarivanja polimetilmetakrilata (PMMA)*, Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 4/2010 (p. 143-146)

одговарајући алат који одговара радном предмету, односно плочама чије се заваривање изводи.



Слика 2.2.11: Функционална шема уређаја за ултразвучно заваривање⁵³

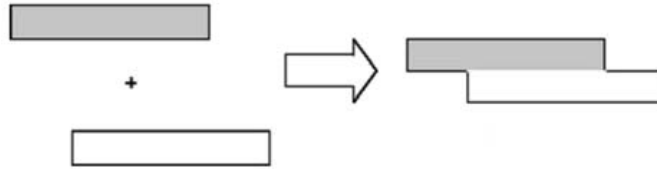
На функционалној шеми уређаја за ултразвучно заваривање, са *USG* је означен генератор ултразвука, који претвара електричну струју из мреже у сигнал фреквенције 20 до 50 kHz; са (1) је означен конвертор који ултразвучневибрације из генератора ултразвука претвара у механичке вибрације; (2) – трансформатор вибрација који регулише амплитуду осциловања; (3) – *сонотрода*, која преноси вибрације на радни предмет; (4) – алат, конструисан у складу са особинама радног предмета; (5) – радни сто. На цео склоп делује статичко оптерећење P_{st} и сила F .

Основни параметри за ултразвучно заваривање полиметил-метакрилата су: амплитуда 10 – 40 μm , фреквенција ~ 20 kHz, трајање заваривања 5 – 7 секунди, статички притисак 10 – 15 МПа. Ултразвучним заваривањем се добијају квалитетни заварени спојеве на нижим температурама у односу на друге технологије.

Топлотно спајање је метода којом се загревају полимери до температуре блиске температури остакљивања, која уз одређени притисак и у одређеном трајању доводи до спајања. Полимер прелази у вискозно стање или се топи, при чему долази до попречног повезивања полимерних ланаца. Загревање се изводи на константној температури, чиме се избегавају појаве топлотних напона и деформација. Чврстоћа

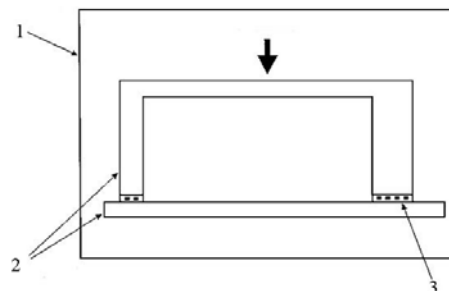
⁵³*Ibid.*

завареног споја зависи од трајања и притиска. Сличне вредности чврстоће се могу добити уз примену притиска већег интензитета и краћег трајања, или мањег притиска уз дуже трајање.



Слика 2.2.12: топлотно спајање уз повишену температуру и притисак⁵⁴

Микроталасно заваривање подразумева комбинацију притиска и микроталасног зрачења фреквенције 2,45 GHz. Између два дела израђена од полимера (обично поликарбонат или полиметил-метакрилат), поставља се танак слој (приближно 50 nm) проводног полимера (полианилин) или метала (хром или злато). Топлота се генерише унутар самог материјала, због атомских / молекуларних вибрација.



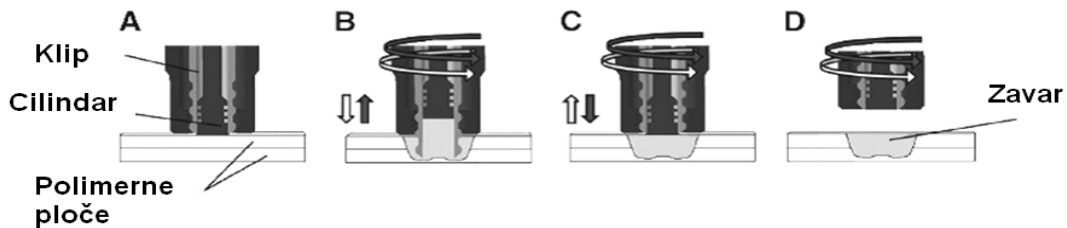
Слика 2.2.13: шема микроталасног заваривања: 1 – микроталасна комора; 2 – компоненте које се заварују; 3 – слој проводног материјала

Метода микроталасног заваривања, у поређењу са осталим технологијама заваривања остварује значајне уштеде у енергији и времену. Омогућава постизање релативно високе чврстоће завареног споја и формирање тродимензионалних заварених спојева сложене конфигурације. Температуре које се генеришу нису превисоке, тако да се могу спајати полимери са релативно ниским температурама остакљивања и топљења.

Тачкасто заваривање трењем је метода код које се топлота потребна за спајање добија трењем дводелног алата (цилиндар и клип) о полимер. Након

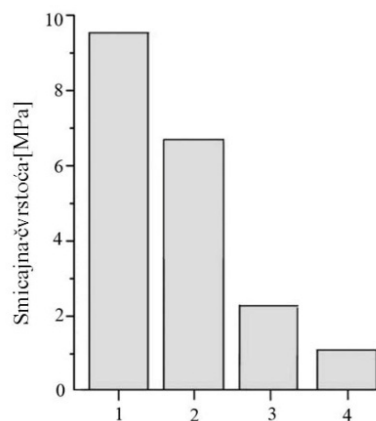
⁵⁴*Ibid.*

постизања довољно високе температуре када долази до омекшавања или топљења полимера, цилиндар се урања у полимер, а клип се подиже, извлачећи одређену количину полимера (B). Када се постигне довољно велика дубина (до суседне плоче која се заварује), цилиндар се извлачи а клип спушта, враћајући истопљени полимер у формирану отвор (C). Након тога, алат се одваја од полимерних плоча које се заварују (D).



Слика 2.2.14: тачкасто заваривање трењем⁵⁵

Када се изврши правилан избор параметара заваривања, долази до квалитетног мешања материјала који се спајају, тако да се методом тачкастог заваривања трењем, могу остварити релативно високе вредности чврстоће завареног споја. Овом методом се могу спајати и различите врсте полимера.



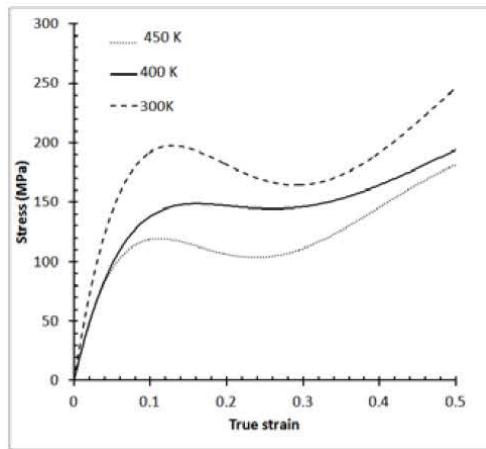
Слика 2.2.15: смичуће чврстоће заварених спојева, добијене различитим методама: 1 – тачкасто заваривање трењем, 2 – микроталасно заваривање, 3 – топлотно спајање, 4 – ултразвучно заваривање⁵⁶

Поликарбонати, полиметил-метакрилати и полимери уопште, имају особину да им се под дејством температуре мењају физичко-механичке карактеристике. У овом раду утицај температуре није разматран, већ је анализирано понашање експерименталних модела под дејством динамичког оптерећења. Теоријско

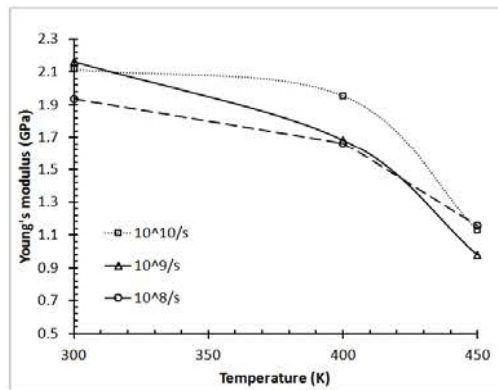
⁵⁵Ibid.

⁵⁶Ibid.

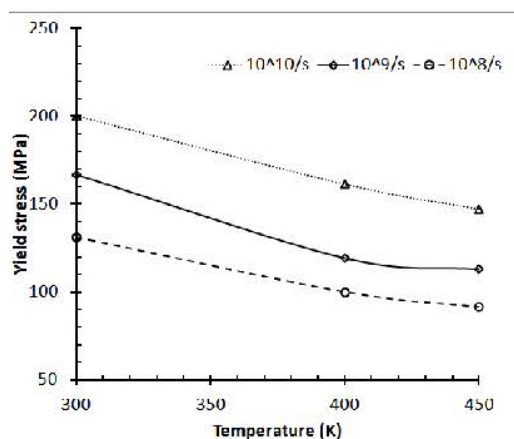
екпериментална испитивања вршена у пракси, показују ниво промене особина поликарбоната под утицајем температуре и промене степена дилатације.



Слика 2.2.16: утицај температуре на однос напон / дилатација⁵⁷



Слика 2.2.17: утицај температуре и степена дилатације на модул еластичности



Слика 2.2.18: утицај температуре и степена дилатације на тачку границе течења⁵⁸

⁵⁷ I.H. Sahputra, A.T. Echtermeyer, *Molecular Dynamics Simulation of Polycarbonate Deformation: Effect of Temperature and Strain Rate*, International Conference on Computational Mechanics (CM13) 25-27 March 2013, Durham, UK

⁵⁸ *Ibid.*

3. ЛАБОРАТОРИЈСКО ИСПИТИВАЊЕ ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА ЛАМЕЛИРАНОГ СТАКЛА И ЛАМЕЛИРАНОГ КЛИРИТА⁵⁹

3.1 УВОД

У следећој табели је дат програм испитивања:

Табела 3.1.1: програм испитивања физичко механичких својстава ламелираног стакла и клирита

Својство које се испитује	Ламелирано стакло		Клирит	
	Облик узорка	Број комада	Облик узорка	Број комада
1. Чврстоћа при затезању	Према цртежима датим у прилогу*)	5	Према цртежима датим у прилогу	5
2. Радни (σ - ϵ) дијаграм	Према цртежима датим у прилогу*)	5	Према цртежима датим у прилогу	5
3. Модул еластичности	Према цртежима датим у прилогу*), а на основу добијених σ - ϵ дијаграма	-	Према цртежима датим у прилогу, а на основу добијених σ - ϵ дијаграма	-
4. Чврстоћа при притиску	Призма 60x60x180 mm	5	Призма 60x60x180 mm	5
5. Чврстоћа при савијању	Призме 30x30x600 mm**)	5 + 5	Призме 30x30x600 mm**)	5
6. Коеф. термичког ширења	Призме 30x30x600 mm	5	Призме 30x30x600 mm	5
7. Запреминска маса***)	-	-	-	-
Укупан број узорка:		25 + 5	-	25

*) узорци се формирају (израђују) тако да њихове дебљине од 20 мм представљају склопове (скупове) од четири ламеле дебљине по 5 мм, односно склопове (скупове) од пет ламела дебљине по 4 мм.

***) пет узорка се излаже савијању око осе паралелне равнима ламела, а пет савијању око осе управне на равни ламела у оквиру узорка.

****) запреминска маса се испитује на истим узорцима на којима се предвиђа испитивање коефицијента термичког ширења, при чему се подразумева да се испитивање под 7. врши пре испитивања под 6.

⁵⁹ Мурављов, М., Јевтић, Д. (2013). *Извештај о лабораторијским испитивањима физичко-механичких својстава ламелираног стакла и клирита*. Институт за материјале и конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду

3.2 ИСПИТИВАЊЕ ЗАПРЕМИНСКЕ МАСЕ

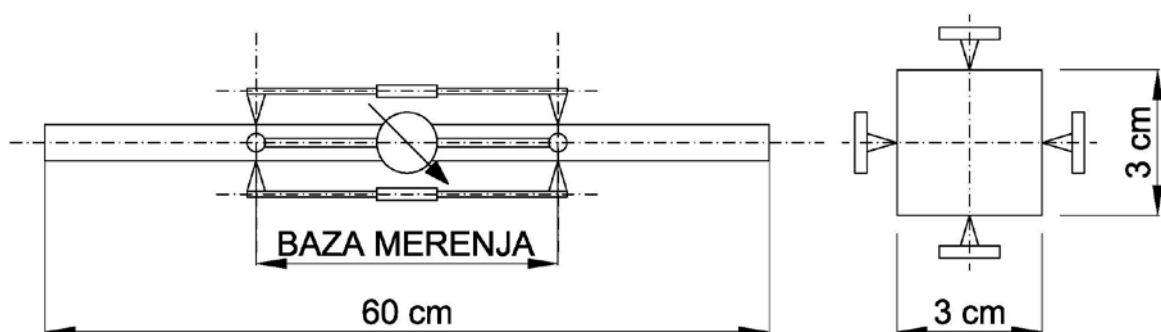
Запреминске масе ламелираног стакла и клирита одређене су мерењем маса призматичних узорака димензија 60x60x180 мм, да би се, након тога, израчунавањима дошло до тражених вредности запреминских маса. Резултати тог испитивања приказани су у табели у наставку:

Табела 3.2.1: резултати испитивања запреминске масе (запремина узорка 648 cm³)

Број узорка	Ламелирано стакло	Клирит
	Маса узорка (g)	Маса узорка (g)
1	1519,9	763,5
2	1527,1	757,5
3	1512,0	760,3
Средње вредности	1519,7	760,4
Запреминска маса γ[kg/m³]	2345	1173

3.3 ИСПИТИВАЊЕ КОЕФИЦИЈЕНТА ТЕРМИЧКОГ ШИРЕЊА

Мерење коефицијента термичког ширења ламелираног стакла и клирита α_T спроведено је сагласно диспозицији приказаној на приложеној скици, која показује да су за предметна испитивања коришћени узорци димензија 30x30x600 мм. На овим узорцима су формиране по четири мерне линије (1, 2, 3 и 4), при чему је у конкретном случају за мерење деформација коришћен деформетар LABISKON, са базом мерења од 250 мм и са податком инструмента мм/1000.



Слика 3.3.1: диспозиција испитивања коефицијента термичког ширења

Концепција испитивања је била следећа: узорци су излагани температурама $T_1 = 0^\circ\text{C}$, $T_2 = 15^\circ\text{C}$, $T_3 = 30^\circ\text{C}$, $T_4 = 45^\circ\text{C}$ и $T_5 = 60^\circ\text{C}$, најмање у трајању од 24 часа, при чему су на свакој од наведених температура узимана читања на инструменту (величине l_i). Након тога, исти поступак мерења деформација спроведен је и при хлађењу узорака (мерења на температурама $T_4 = 45^\circ\text{C}$, $T_3 = 30^\circ\text{C}$, $T_2 = 15^\circ\text{C}$ и $T_1 = 0^\circ\text{C}$), па су као меродавне вредности за израчунавање величина α_T усвајане средње вредности читања l_i у поступку загревања и у поступку хлађења. Ове средње вредности су употребљене за одређивање разлика читања $\Delta_l = l_i - l_1$, у односу на прва читања l_1 .

Узимајући у обзир базу мерења и температурне интервале на које се односе дате средње вредности Δ_l (интервали $\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$), а применом израза

$$\alpha_{T_i} = \Delta_l / \Delta T_i,$$

израчунате су вредности коефицијената термичког ширења која одговарају сваком од температурних интервала $\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$. Обзиром да су предметна испитивања вршена за укупно четири температурна интервала, као меродавне вредности су усвојене средње вредности величина α_{T_i} . Резултати предметног испитивања приказани су у табелама 3.3.1. и 3.3.2.

Табела 3.3.1: резултати испитивања коефицијента термичког ширења ламелираног стакла

Број базе мерења	$T_1 = 0^\circ\text{C}$	$T_2 = 15^\circ\text{C}$	$T_3 = 30^\circ\text{C}$	$T_4 = 45^\circ\text{C}$	$T_5 = 60^\circ\text{C}$
	$\Delta T_1 = 0$	$\Delta T_2 = 15^\circ\text{C}$	$\Delta T_3 = 30^\circ\text{C}$	$\Delta T_4 = 45^\circ\text{C}$	$\Delta T_5 = 60^\circ\text{C}$
1	$l_1 = 2348$	$l_2 = 2334$	$l_3 = 2302$	$l_4 = 2293$	$l_5 = 2217$
	-	$\Delta_2 = 14$	$\Delta_3 = 46$	$\Delta_4 = 55$	$\Delta_5 = 131$
2	$l_1 = 2301$	$l_2 = 2288$	$l_3 = 2257$	$l_4 = 2228$	$l_5 = 2115$
	-	$\Delta_2 = 13$	$\Delta_3 = 44$	$\Delta_4 = 73$	$\Delta_5 = 186$
3	$l_1 = 2213$	$l_2 = 2198$	$l_3 = 2172$	$l_4 = 2162$	$l_5 = 2077$
	-	$\Delta_2 = 15$	$\Delta_3 = 41$	$\Delta_4 = 51$	$\Delta_5 = 136$
4	$l_1 = 2131$	$l_2 = 2113$	$l_3 = 2082$	$l_4 = 2083$	$l_5 = 1955$
	-	$\Delta_2 = 18$	$\Delta_3 = 49$	$\Delta_4 = 48$	$\Delta_5 = 176$
$\Delta_{i,sr}$	-	$\Delta_{2,sr} = 15,00$	$\Delta_{3,sr} = 45,00$	$\Delta_{4,sr} = 56,75$	$\Delta_{5,sr} = 157,25$
α_{T_i}	-	$4,00 \cdot 10^{-6}$	$6,00 \cdot 10^{-6}$	$5,04 \cdot 10^{-6}$	$10,48 \cdot 10^{-6}$
Меродавна вредност $\alpha_T / (1/^\circ\text{C})$	$6,38 \cdot 10^{-6}$				

Табела 3.3.2: резултати испитивања коефицијента термичког ширења ламелираног клирита

Број базе мерења	$T_1 = 0^\circ\text{C}$ $\Delta T_i = 0$	$T_2 = 15^\circ\text{C}$	$T_3 = 30^\circ\text{C}$	$T_4 = 45^\circ\text{C}$	$T_5 = 60^\circ\text{C}$
		$\Delta T_2 = 15^\circ\text{C}$	$\Delta T_3 = 30^\circ\text{C}$	$\Delta T_4 = 45^\circ\text{C}$	$\Delta T_5 = 60^\circ\text{C}$
1	$l_1 = 2565$	$l_2 = 2405$	$l_3 = 2025$	$l_4 = 1708$	$l_5 = 1423$
	-	$\Delta_2 = 160$	$\Delta_3 = 540$	$\Delta_4 = 857$	$\Delta_5 = 1142$
2	$l_1 = 2603$	$l_2 = 2440$	$l_3 = 2035$	$l_4 = 1741$	$l_5 = 1483$
	-	$\Delta_2 = 163$	$\Delta_3 = 568$	$\Delta_4 = 862$	$\Delta_5 = 1120$
3	$l_1 = 2445$	$l_2 = 2292$	$l_3 = 1918$	$l_4 = 1656$	$l_5 = 1405$
	-	$\Delta_2 = 153$	$\Delta_3 = 527$	$\Delta_4 = 789$	$\Delta_5 = 1040$
4	$l_1 = 2626$	$l_2 = 2453$	$l_3 = 2083$	$l_4 = 1810$	$l_5 = 1564$
	-	$\Delta_2 = 173$	$\Delta_3 = 543$	$\Delta_4 = 816$	$\Delta_5 = 1062$
$\Delta_{i,sr}$	-	$\Delta_{2,sr} = 162,25$	$\Delta_{3,sr} = 544,50$	$\Delta_{4,sr} = 831,00$	$\Delta_{5,sr} = 1091,0$
α_{Ti}	-	$43,30 \cdot 10^{-6}$	$72,60 \cdot 10^{-6}$	$73,90 \cdot 10^{-6}$	$72,70 \cdot 10^{-6}$
Меродавна вредност $\alpha_T/(1/^\circ\text{C})$	$65,60 \cdot 10^{-6}$				

Објашњења:

T_i – температура на којој се мери деформација

$\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$ – температурна разлика

l_1 – почетна дужина базе мерења (измерена температура у [mm], при температури T_1)

l_i – измерена дужина базе мерења у мм при температури $T_i > T_1$

$\Delta_i = l_i - l_1$ – промена дужине базе мерења [mm]

$\varepsilon_{Ti} = \Delta_i / (\text{baza mereња})$ – температурна дилатација

3.4 ИСПИТИВАЊЕ ЧВРСТОЋЕ ПРИ ПРИТИСКУ

Чврстоћа при притиску ламелираног стакла и клирита испитивана је на призматичним узорцима димензија 60x60x180 мм, при чему су при тим испитивањима добијане граничне силе – силе лома узорака P_{gr} . Резултати спроведених испитивања приказани су у табели 3.4.1.

Табела 3.4.1: резултати испитивања чврстоће при притиску

Узорак	Ламелирано стакло		Клирит		Диспозиција испитивања ($F = 36 \text{ cm}^2$)
	P_{gr} [kN]	f_p [MPa]	P_{gr} [kN]	f_p [MPa]	
1	660	183,3	392	108,9	
2	600	166,7	464	128,8	
3	654	181,7	462	128,3	
Средња вредност f_p [MPa]	-	177,2	-	122,0	



Слике 3.4.1 и 3.4.2: ламелирано стакло – узорак на почетку испитивања чврстоће при притиску и исти узорак на крају испитивања – у фази лома



Слике 3.4.3 и 3.4.4: ламелирани клирит – узорак на почетку испитивања чврстоће при притиску и исти узорак на крају испитивања – у фази лома

На фотографијама су приказани узорци ламелираног стакла и клирита на почетку испитивања чврстоће при притиску и исти узорци на крају тог испитивања у фази лома (отказа). Током извршених испитивања, а то потврђују и приложене фотографије, ламелирано стакло је показало врло крто понашање, док су отказу узорака клирита претходиле јако изражене пластичне деформације.

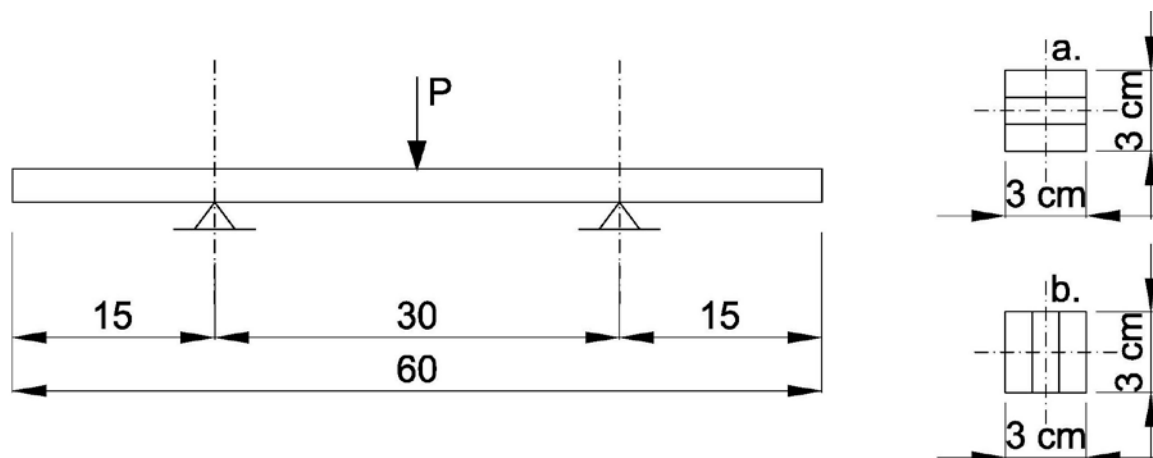
3.5 ИСПИТИВАЊЕ ЧВРСТОЋЕ ПРИ САВИЈАЊУ И ПРОРАЧУН ОДГОВАРАЈУЋЕГ МОДУЛА ЕЛАСТИЧНОСТИ

Чврстоћа при савијању ламелираног стакла и клирита спроведена је на призматичним узорцима димензија 30x30x600 мм, који су на срединама размака између ослонаца – на срединама распона од 300 мм – оптерећивани концентрисаним силама. При предметним испитивањима, вођено је рачуна о ламелираности практично и једног и другог материјала, тако да су код оба материјала узорци

излагани савијању како око оса паралелних равнина ламела (узорци **a.**), тако и око оса управних на равни ламела (узорци **b.**). Резултати спроведених испитивања, која су вршена све до лома, односно до достизања сила P_{gr} , приказани су у табели 3.5.1.

Табела 3.5.1: резултати испитивања чврстоће при савијању

Узорак	Стакло a.	Стакло b.	Клирит a.	Клирит b.
	P_{gr} [kN]	P_{gr} [kN]	P_{gr} [kN]	P_{gr} [kN]
1	0,80	2,40	3,60	7,00
2	0,80	2,20	4,10	5,70
3	0,90	2,10	4,20	7,00
4	0,80	2,30	3,70	5,50
5	0,90	2,20	3,80	6,10
Средње вредности	0,84	2,24	3,88	6,26
M_{max} [kNcm]	6,30	16,80	29,10	46,95
f_{zs} [MPa]	14,00	37,30	64,70	104,30



Слика 3.5.1: диспозиција испитивања чврстоће при савијању ($W = 4,5 \text{ cm}^3$)

Код израчунавања чврстоће при савијању, коришћени су следећи рачунски изрази:

Максимални момент савијања: $M_{max} = 0,25 \cdot 30 \cdot P = 7,5 \cdot P$ ([kNcm], за P у [kN])

Чврстоћа при савијању: $f_{zs} = 7,5 \cdot P / 4,5 = 1,667 \cdot P$ [kN/cm²]

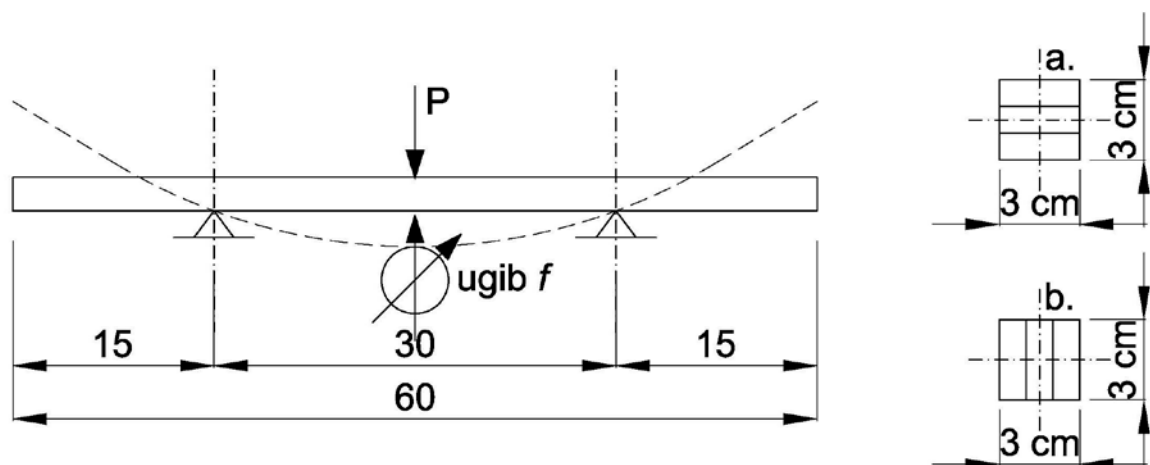
При испитивању на савијање, на по једном од узорака ламелираног стакла **a.** и **b.** и клирита **a.** и **b.**, спроведено је мерење угиба у срединама распона од 300 мм

помоћу одговарајућих угибомера, при чему су радне силе при тим испитивањима износиле највише око 50% од силе P_{gr} , одређених претходно спроведеним испитивањима узорака до лома. Усвајање наведених радних сила било је засновано на чињеници да се до крајњих вредности тих радних оптерећења, зависност између конкретне радне силе P_{rad} и измереног угиба мења практично линеарно.

Резултати описаног истраживања ламелираног стакла **a.** и **b.** и клирита **a.** и **b.**, који се односе на испитивања путем савијања, приказани су у табели 3.5.2. Из дате табеле се, између осталог, врло јасно види споменута зависност између достигнуте радне силе P_{rad} и измереног угиба, израженог преко вредности читања на угибомеру f_{cit} . Као што је напред наведено, та зависност је практично линеарна.

Табела 3.5.2: резултати испитивања модула еластичности при савијању

Фаза оптерећења	Стакло a.	Стакло b.	Клирит a.	Клирит b.
	$P_{rad}[\text{kN}]$ f_{cit}	$P_{rad}[\text{kN}]$ f_{cit}	$P_{rad}[\text{kN}]$ f_{cit}	$P_{rad}[\text{kN}]$ f_{cit}
1	0 424	0 401	0 393	0 402
2	0,1 426	0,3 405	1,0 395	0,75 403
3	0,2 428	0,6 409	2,0 397	1,5 404
4	0,3 430	0,9 413	3,0 399	2,25 405
5	0,4 432	1,2 416	4,0 401	3,0 406
Измерени угиби	$f_{mer} = 8 / 1000$ mm	$f_{mer} = 15 / 1000$ mm	$f_{mer} = 8 / 100$ mm	$f_{mer} = 4 / 100$ mm



Слика 3.5.2: диспозиција испитивања у циљу израчунавања модула еластичности при савијању ($I = 6,75 \text{ cm}^4$)

У табели са резултатима испитивања модула еластичности при савијању, може се уочити да је при мерењу деформација (угиба) стакла коришћен угибомер са податком инструмента mm/1000, а да је код мерења која се односе на клирит коришћен угибомер са податком инструмента mm/100.

Прорачун модула еластичности на бази измерених угиба епрувета

Стакло **a.**:

$$E = 40 \cdot 30^3 / (48 \cdot 6,75 \cdot 0,008 / 10) = 4166667 \cdot 10^{-5} = 41,7 \text{ GPa}$$

Стакло **b.**:

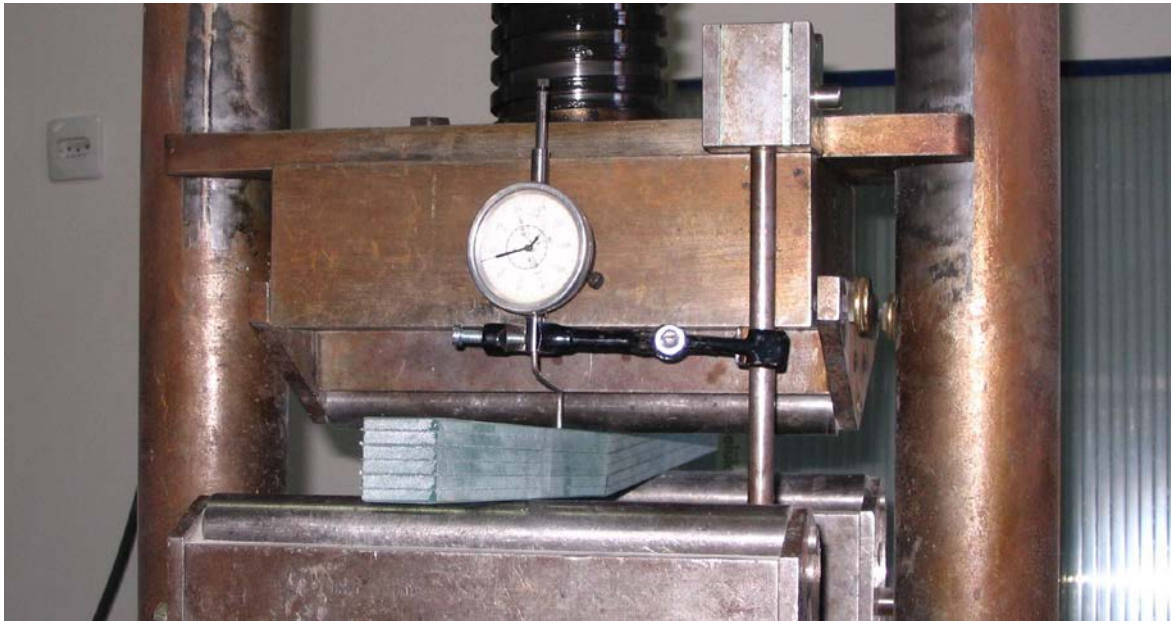
$$E = 120 \cdot 30^3 / (48 \cdot 6,75 \cdot 0,015 / 10) = 6666667 \cdot 10^{-5} = 66,7 \text{ GPa}$$

Клирит **a.**:

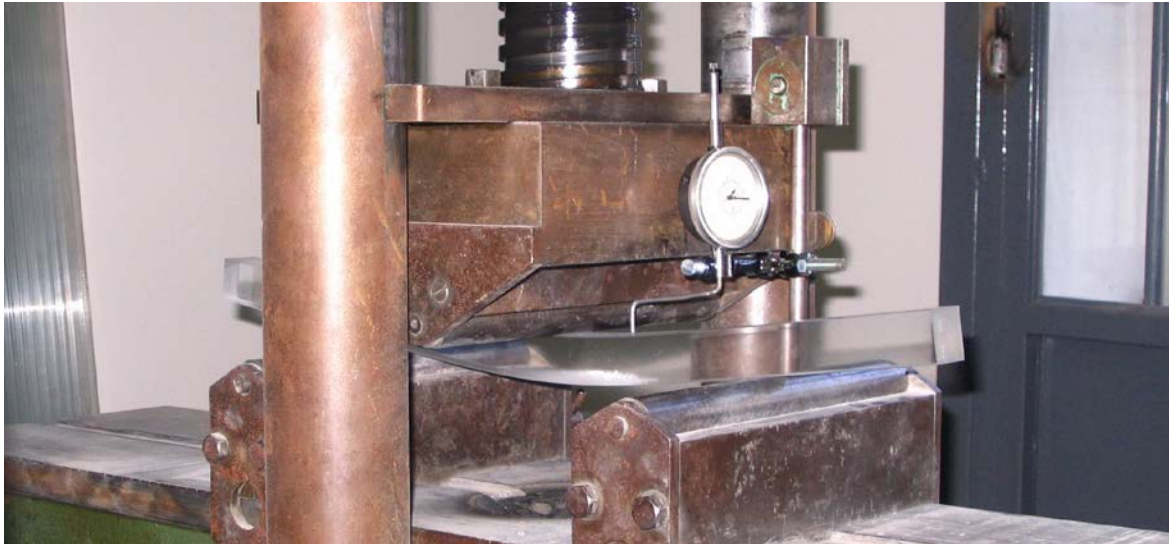
$$E = 400 \cdot 30^3 / (48 \cdot 6,75 \cdot 1,20 / 10) = 277778 \cdot 10^{-5} = 2,78 \text{ GPa}$$

Клирит **b.**:

$$E = 300 \cdot 30^3 / (48 \cdot 6,75 \cdot 0,80 / 10) = 312500 \cdot 10^{-5} = 3,12 \text{ GPa}$$



Слика 3.5.3: један од узорака ламелираног стакла **a.**, у фази отказа – лома (“преломљен” узорак)



Слика 3.5.4: један од узорка ламелираног клирита **a.**, у фази отказа – лома; види се врло изражен угиб – узорак више није у стању да прихвати силу, али нема случаја класичног “прелома”

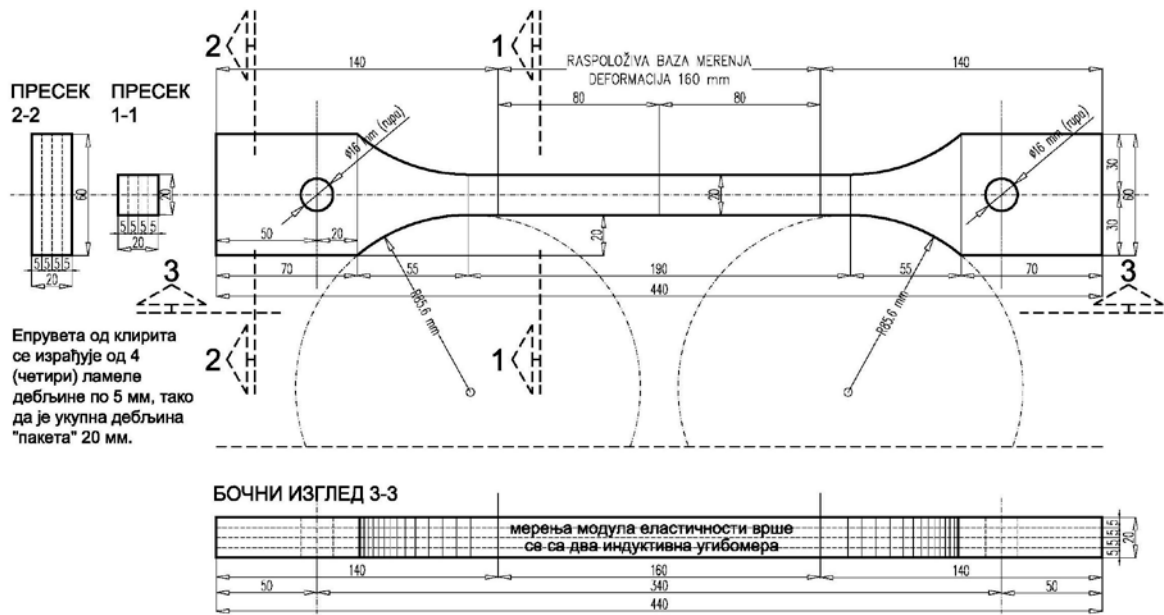
Током спроведених испитивања на савијање до лома, дошло се до следећих закључака:

- ламелирано стакло, без обзира да ли је реч о узорцима **a.** или **b.**, карактерише врло крто понашање – до лома долази нагло и без визуелно уочљиве деформације (узорак се тренутно “прелама”);
- отказу узорка ламелираног клирита, без обзира да ли је реч о узорцима **a.** или **b.**, увек претходе јако изражене, чак и визуелно уочљиве пластичне деформације; међутим, након растерећења значајан део тих деформација се губи (реверзибилне деформације) – узорак се у великој мери “исправља”.

3.6 ИСПИТИВАЊА НА ЗАТЕЗАЊЕ

3.6.1 Испитивање ламелираног клирита на затезање

Испитивање клирита на “чисто” затезање, извршено је на узорцима – епруветама – приказаним на слици 3.6.1. При том испитивању је примењен и специјално конструисан алат неопходан за “хватање” узорка епрувете у “чељустима” лабораторијске кидалице.



Слика 3.6.1: узорак – епрувета – за испитивање чврстоћеламелираног клирита при затезању



Слика 3.6.2: испитивање чламелираног клирита на “чисто” затезање

Табела 3.6.1: резултати испитивања ламелираног клирита на затезање

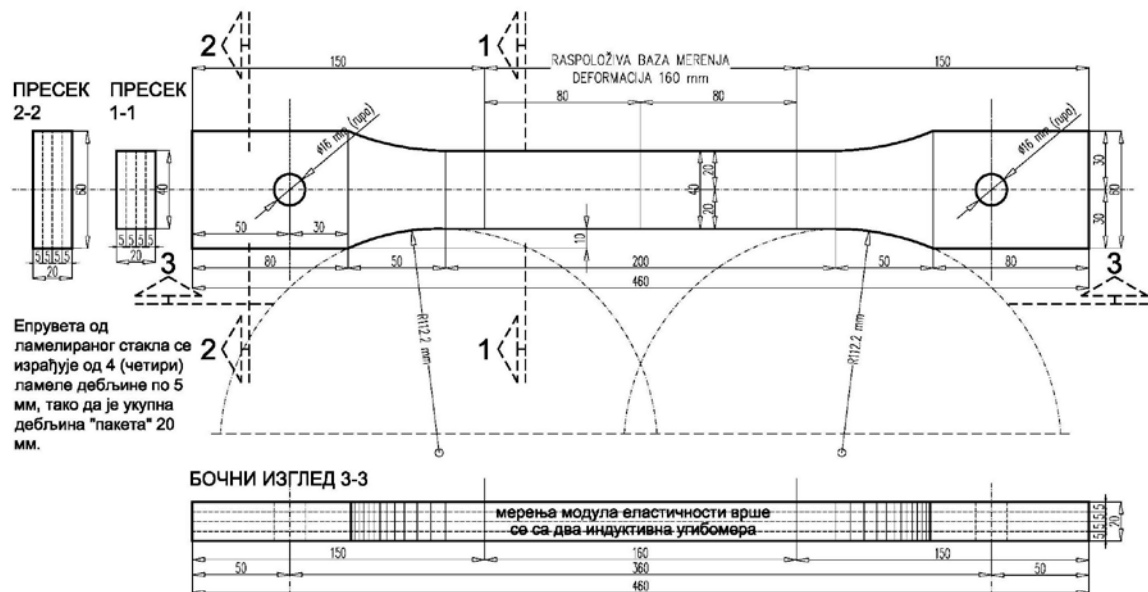
Број узорка	Сила лома P_{gr} [kN]	Напомена: површина попречног пресека епрувете износи $4,0 \text{ cm}^2$
1	18,6	Крт лом наступио око средине епрувете
2	20,3	Крт лом наступио око средине епрувете
3	16,1	Крт лом наступио на самом почетку закривљења
Средња вредност P_{gr} [kN]	18,33	

Према томе, чврстоћа клирита при затезању износи:

$$f_z = 183,3 / 4,0 = 45,8 \text{ МПа.}$$

3.6.2 Испитивање ламелираног стакла на затезање

Испитивање ламелираног стакла на “чисто” затезање, извршено је на узорцима – епруветама – приказаним на слици 3.6.3. И при овом испитивању је примењен специјално конструисан алат, неопходан за “хватање” узорка епрувете у “челустима” лабораторијске кидалице. Овај алат се унеколико разликује од алата примењеног при испитивању клирита.



Слика 3.6.3: узорак – епрувета – за испитивање чврстоће ламелираног стакла при затезању



Слика 3.6.4: испитивање ламелираног стакла на “чисто” затезање – лом око средине узорка - епрувете

Табела 3.6.2: резултати испитивања ламелираног стакла на затезање

Број узорка	Сила лома P_{gr} [kN]	Напомена: површина попречног пресека епрувете износи $8,0 \text{ cm}^2$
1	14,8	Крт лом наступио на самом почетку закривљења
2	12,2	Крт лом наступио око средине епрувете
3	9,9	Крт лом наступио на самом почетку закривљења
Средња вредност P_{gr} [kN]	12,3	

Према томе, чврстоћа ламелираног стакла при затезању износи:

$$f_z = 12,3 / 8,0 = 15,4 \text{ MPa.}$$

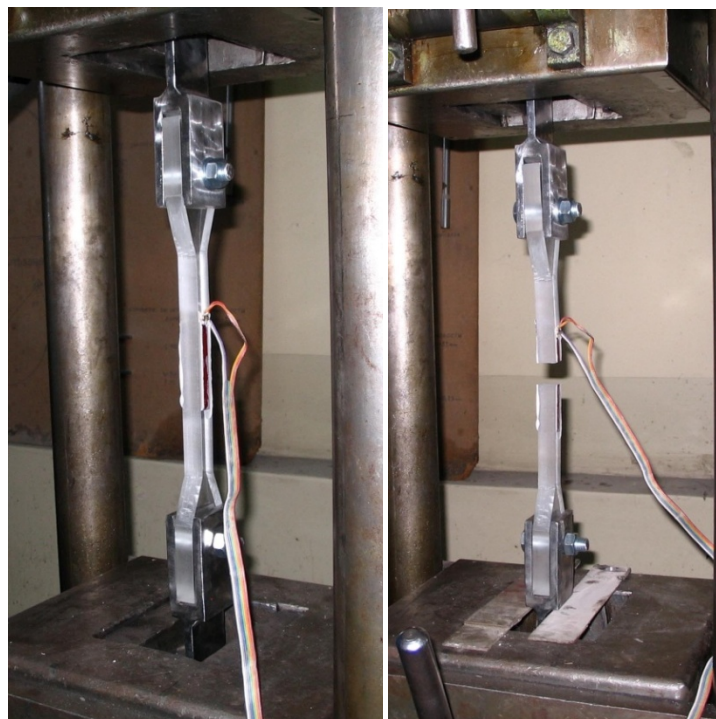
3.6.3 Радни (σ - ϵ) дијаграми и прорачун одговарајућег модула еластичности

3.6.3.1 Ламелирани клирит

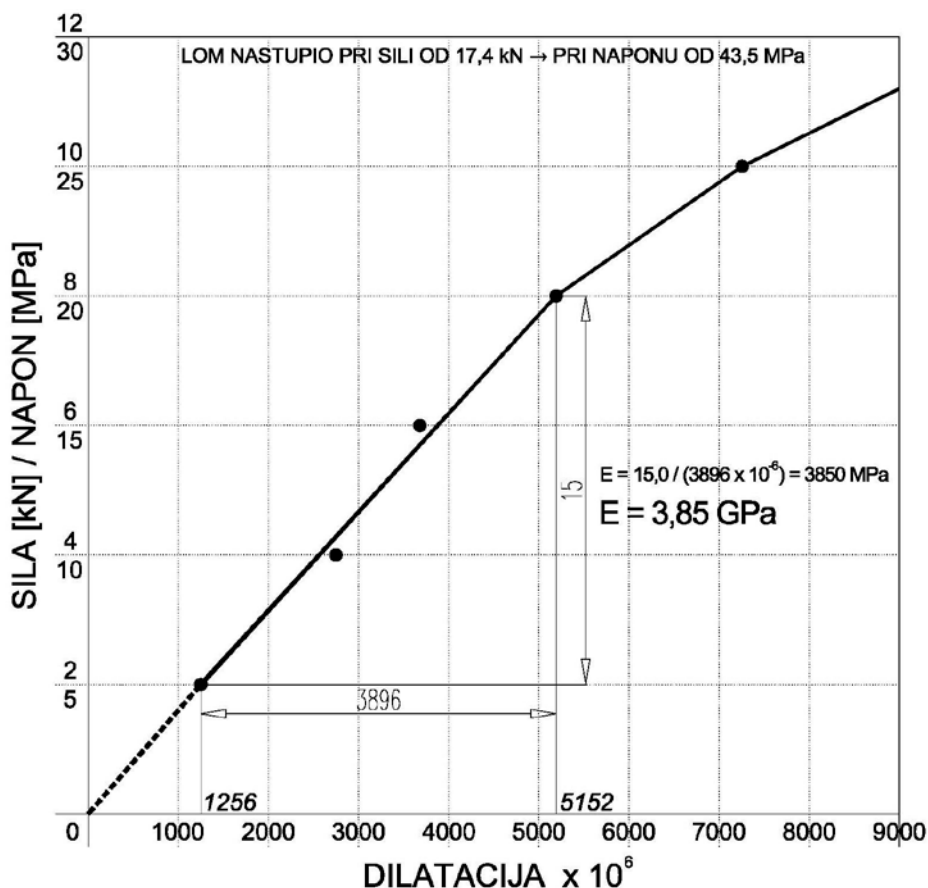
Радни дијаграм клирита добијен је излагањем на “чисто” затезање истог узорка – епрувете о којем је напред већ било речи при разматрању затезне чврстоће клирита, при чему је у конкретном испитивању мерење деформација (дилатација) спроведено путем две наспрамне мерне траке залепљене у средини узорка – епрувете (видети слику у наставку).

Испитивање о коме је реч, спроведено је тако што је оптерећивање узорка – епрувете, а узимајући у обзир и претходно добијене вредности чврстоће клирита на чисто затезање повећавано у корацима од 2 kN до лома, при чему је при свакој од остварених сила регистрована одговарајућа деформација у микродилатацијама.

Резултати конкретног испитивања приказују се путем приложеног дијаграма на следећој слици, док се на напред датој фотографији десно, приказује изглед узорка – епрувете на крају испитивања.



Слике 3.6.5 и 3.6.6: одређивање радног дијаграма: диспозиција испитивања; изглед узорка (епрувете) на крају испитивања



Слика3.6.7: радни дијаграм ламелираног клирита → σ - ϵ зависност

На основу добијеног радног дијаграма, а обзиром на чињеницу да је линија σ - ϵ у подручју напона до око 20 МПа практично права линија, добија се следећа вредност модула еластичности ламелираног клирита:

$$E = 15,0 / (3,896 \cdot 10^{-6}) = 3850 \text{ MPa} = 3,85 \text{ GPa}.$$

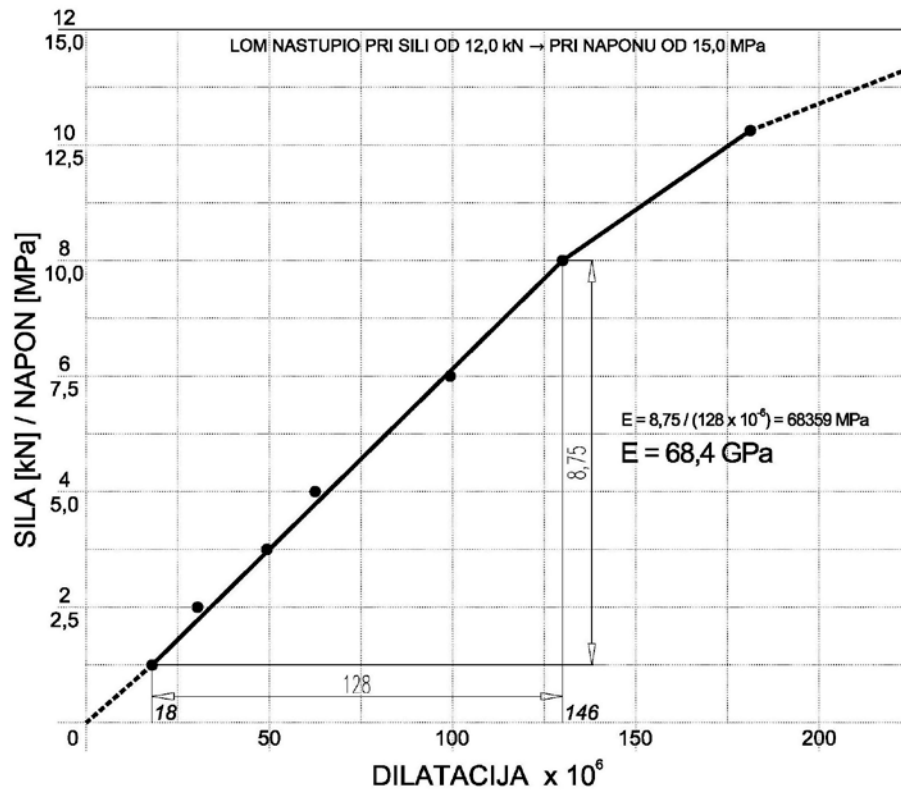
3.6.3.2 Ламелирано стакло

Радни дијаграм ламелираног стакла добијен је излагањем на “чисто” затезање истог узорка – епрувете о којем је напред већ било речи при разматрању затезне чврстоће ламелираног стакла, при чему је у конкретном испитивању мерење деформација (дилатација) спроведено путем две наспрамне мерне траке залепљене у средини узорка – епрувете (видети слику у наставку).

Испитивање о коме је реч, спроведено је тако што је оптерећивање узорка – епрувете, а узимајући у обзир и претходно добијене вредности чврстоће ламелираног

стакла на “чисто” затезање, повећавано у корацима од 1,25 kN до 2,50 kN до лома, при чему је при свакој од остварених сила регистрована одговарајућа деформација у микродилатацијама.

Резултати конкретног испитивања приказују се путем приложеног дијаграма на следећој слици.



Слика 3.6.8: радни дијаграм ламелираног стакла → σ - ϵ зависност

На основу добијеног радног дијаграма, а обзиром на чињеницу да је линија σ - ϵ у подручју напона до око 10 MPa практично права линија, добија се следећа вредност модула еластичности ламелираног стакла:

$$E = 8,75 / (128 \cdot 10^{-6}) = 68359 \text{ MPa} = 68,4 \text{ GPa.}$$

3.7 УКУПНИ ТАБЕЛАРНИ ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА

У следећој табели, дат је преглед свих резултата који су добијени испитивањима (делимично заокружене вредности).

Табела 3.7.1 Укупни табеларни преглед резултата испитивања

Карактеристика материјала	Ламелирано стакло		Ламелирани клирит	
Запреминска маса [kg/m ³]	2300		1170	
Чврстоћа при притиску [MPa]	177		122	
Чврстоћа при затезању [MPa]	15		45,8	
Модул еластичности [GPa]	68		3,8	
Коефицијент термичког ширења [1/°C]	6,4 · 10 ⁻⁶		65,6 · 10 ⁻⁶	
Резултати испитивања путем савијања				
Чврстоћа при савијању [MPa]	14	37	65	104
Модул еластичности [GPa]	42	67	2,8	3,1

Истраживања чврстоће стакла при савијању, уколико би се вршила на још већем броју узорака него што је то овде био случај, показала би да се чврстоћа при лому тешко може приказати преко нормалне расподеле. Лом стакла је резултат комбинације инцијалних прслина и напона, тако да се параметри који га описују не могу извести помоћу линеарне теорије еластичности механике лома.⁶⁰

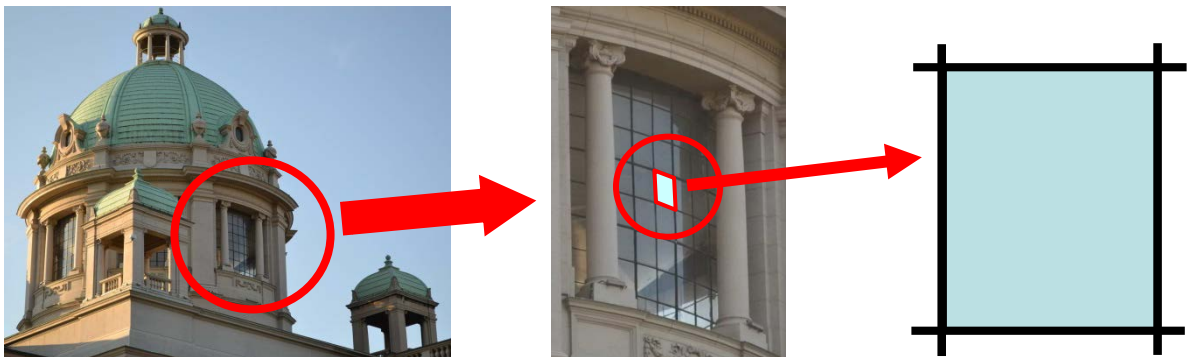
⁶⁰ F. A. Veer, *The Strength of Glass, a Nontransparent Value*, Faculty of Architecture, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, HERON, Vol. 52, No. 1/2 (p. 87-104)

4. ЛАБОРАТОРИЈСКО ИСПИТИВАЊЕ ПОНАШАЊА КОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛА НА БАЗИ ЛАМЕЛИРАНОГ СТАКЛА И ЛАМЕЛИРАНОГ КЛИРИТА ПОД ДЕЈСТВОМ ДИНАМИЧКОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

4.1 ОРГАНИЗАЦИОНА ПОСТАВКА ЛАБОРАТОРИЈСКОГ ИСПИТИВАЊА

Као инспирација за извођење овог истраживања, послужила је идеја да се уместо обичног стакла у геометрији постојеће браварије тамбура велике куполе објекта који ће бити приказан у студији случаја, примени конструкционо стакло, односно клирит, у циљу оспособљавања конструкције објекта за пријем сеизмичких сила. Отуда панел испуне димензија $400 \cdot 500$ мм, дебљине 60 мм, уоквирен у челични рам одговарајуће профилације, са утиснутим гуменим интермедијалним слојем (такозвани *мупф*), по систему ветробранског стакла у аутомобилу.⁶¹

За лабораторијско испитивање се предвиђа панел испуне који може бити алтернативно у две варијанте: од стакла (ламелирано, из три слоја дебљине по 20 мм у пакету), или од клирита (такође ламелирани, $3 \cdot 20$ мм = 60 мм).



Слика 4.1.1: шематски приказ издвојеног основног елемента укрућења велике куполе – композитног панела – из матичног конструктивног система

Дефинисани су кораци који се односе на лабораторијско испитивање:

1. Израда пројекта експерименталних композитних панела на бази челика, тврде гуме и стакла односно поликарбоната, са тежиштем на ценовно доступним материјалима у смислу дефинисања њиховог квалитета;

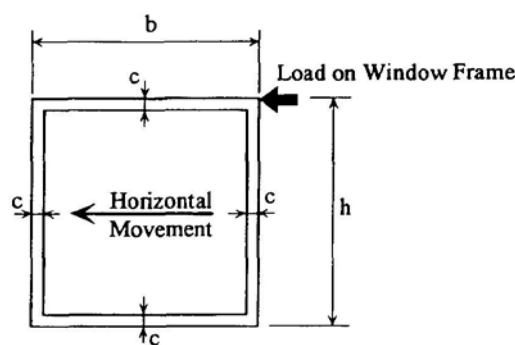
⁶¹ Mitrović, R., Stamenić, Z., Mišković, Ž., Ćorić, B., Terzović, J., Mandić, R., Srećković, G. (2014). *Izveštaj o laboratorijskom ispitivanju eksperimentalnog modela sa ispunom od lameliranog stakla / polikarbonata na dejstvo dinamičkog opterećenja*. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.

2. Радионичка израда експерименталних композитних панела на бази челика, тврде гуме и стакла / клирита (по пет комада на бази оба материјала испуне);
3. Израда сета лабораторијског алата, преко којег се обезбеђује веза челичне конструкције рама са лабораторијском опремом (машином)– пулзатором – помоћу којег се изводи испитивање;
4. Лабораторијско испитивање укупно десет експерименталних композитних панела (пет на бази стакла и пет на бази клирита), током којег се панели излажу статичком и динамичком оптерећењу.

Излагање експерименталних композитних панела статичком и динамичком оптерећењу треба да покаже деформациони капацитет стакленог панела смештеног у челични рам. Претпоставке су да деформациони капацитет зависи од два фактора:

- померања крутог тела – стакленог панела – у оквиру челичног рама и
- степена скраћења панела по дијагонали, под дејством притискујуће силе.⁶²

Први механизам зависи од димензије (дебљине) и тврдоће интермедијалног слоја гуме која онемогућава директан контакт стакленог панела и челичног рама, док други механизам директно зависи од механичких карактеристика стакленог панела, односно његове чврстоће на притисак.⁶³

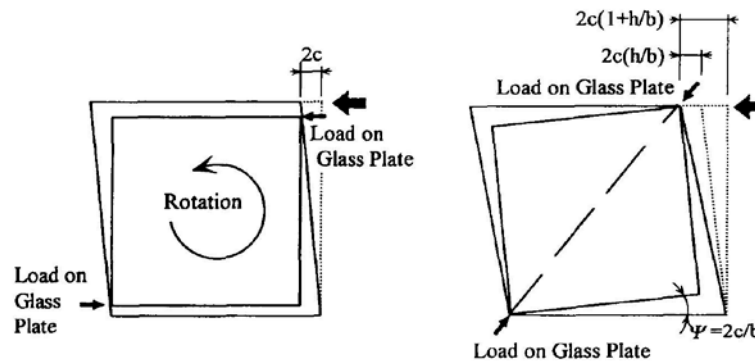


Слика 4.1.2: скица прозорског окна, са правцем и смером хоризонталне силе⁶⁴

⁶² Haluk Sucuoglu, C. V. Girija Vallabhan, *Behaviour of window Glass Panels During Earthquakes*, Engineering Structures, Elsevier Science Ltd, 1997, Vol. 19, No. 8 (p. 685-694)

⁶³ *Ibid.*

⁶⁴ *Ibid.*



Слика 4.1.3: први механизам – померање стакленог панела у оквиру челичног рама; други механизам – правац скраћења стакленог панела по дијагонали, под дејством притискујуће силе⁶⁵

Аналогно испитивањима стакленог панела смештеног у челични рам, у литаратури која обрађује овај део истраживачке праксе, вршена су испитивања стакленог панела уоквиреног у дрвени рам. По правилу, тада се веза између испуне и рама изводи заптивајућим материјалом – одређеном врстом лепка. Најбоље резултате, у смислу интензитета критичне силе, дају заптивајући материјали са већим модулом еластичности, који обезбеђују висок степен спрезања рама са испуном.⁶⁶

Испитивања дрвеног рама са стакленом испуном у смислу отпорности на сеизмичко оптерећење, коришћењем адхезива са малим модулом еластичности, довела су до клизања стаклене испуне дуж штапова дрвеног рама и до трајних оштећења на раму, али је стаклена испуна остала неоштећена.⁶⁷

4.2 ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ИЗРАДА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ КОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛА ЗА ЛАБОРАТОРИЈСКО ИСПИТИВАЊЕ

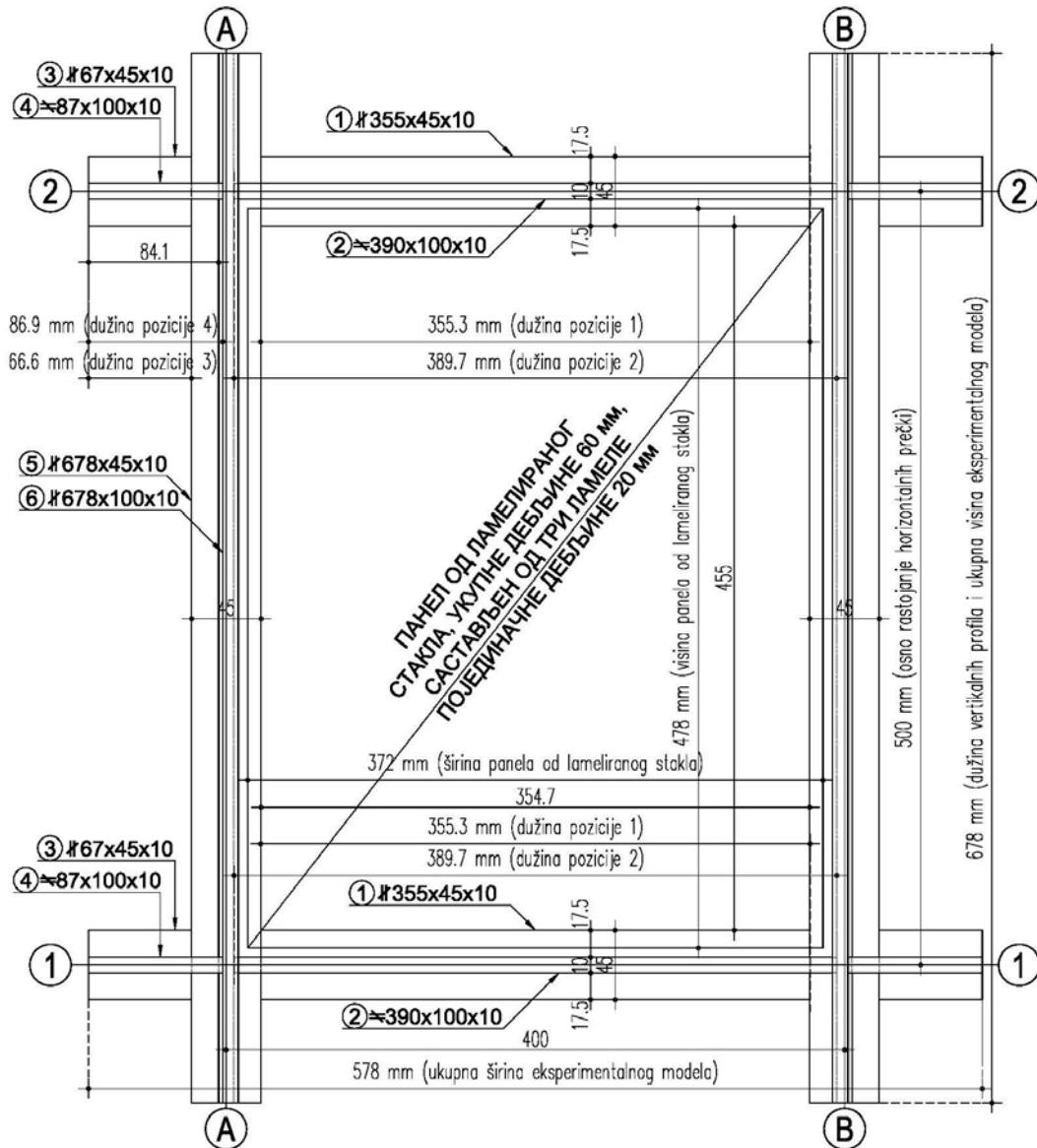
Лабораторијска испитивања су изведена на експерименталном моделу основног појединачног елемента конструкције, који је материјализован од трослојног ламелираног стакла / клирита укупне дебљине 60 мм, уоквиреног

⁶⁵ *Ibid.*

⁶⁶ Andrej Štrukelj, Boštjan Ber, Miroslav Premrov, *Racking Resistance of Timber-glass Wall Elements Using Different Types of Adhesives*, Construction and Building Materials 93, 2015 (p. 130-143)

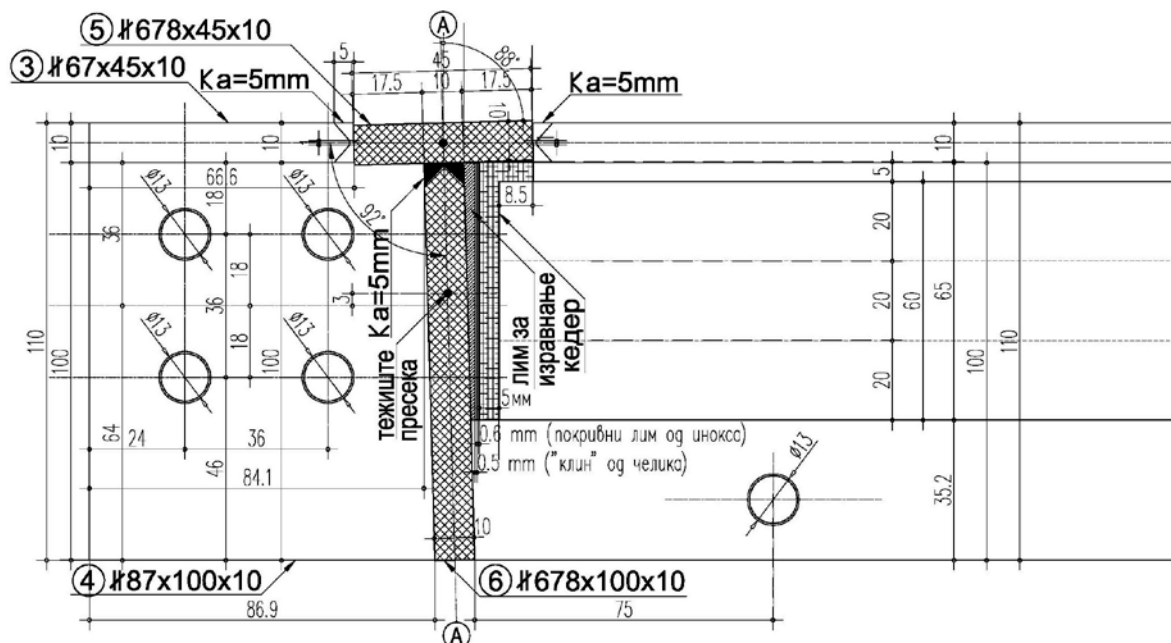
⁶⁷ Lidija Krstevska, Ljubomir Tashkov, Vlatka Rajcic, Roko Zarnic, *Seismic Behaviour of Composite Panel Composed of Laminated Wood and Bearing Glass – Experimental Investigation*, Trans Tech Publications, Switzerland, Advanced Materials Research Vol. 778, 2013 (p. 698-705)

челичним рамом, са слојем тврде гуме (кедера) на контакту стакла / клирита и челика. Израђено је укупно десет панела, од чега је пет панела са ламелираним стаклом и пет панела са ламелираним клиритом.



Слика 4.2.1: детаљ – фронтални изглед готовог композитног панела од ламелираног стакла / клирита (изглед "изнутра")

Челични рам је састављен од две вертикале, на међусобном осном растојању 400 мм и две хоризонтале на осном растојању 500 мм. Ови елементи оивичавају правоугаоно поље чије су унутрашње светле димензије 355 · 455 мм.



Слика 4.2.2: Челична конструкција рама – детаљ хоризонталног пресека: прва фаза монтаже панела од ламелираног стакла / клирита

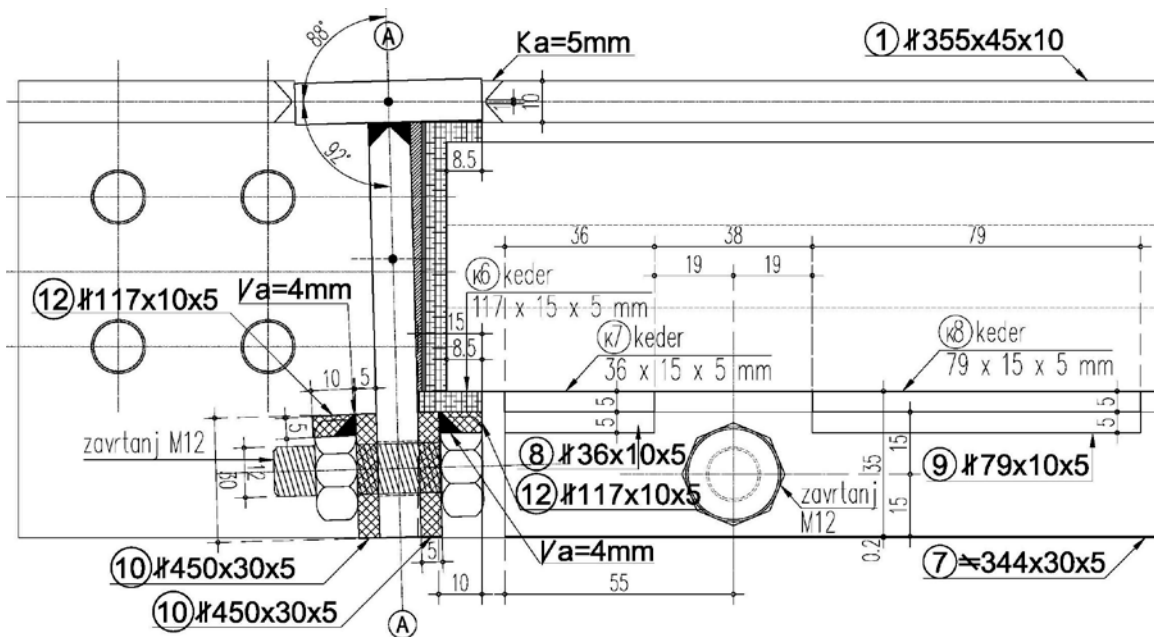
Попречни пресек штапова челичног рама има облик слова “Т” и сачињен је од два челична лима дебљине 10 мм, од којих један има ширину 100 мм (“ребро” слова “Т”), а други има ширину 45 мм (“ножица” слова “Т”). Лимови су међусобно заварени сучеоним “К” шавом дебљине 5 мм, по целој дужини контакта. С обзиром на геометрију попречног пресека челичних штапова, габарит, односно спољне мере рама су 578 · 678 мм.

Дужина вертикалног штапа челичног рама износи 678 мм. Хоризонтални штап челичног рама има укупну дужину од 578 мм и састоји се из три дела (средњи део, дужине 355 мм и два крајња дела, дужине по 67 мм), који су заварени за вертикални штап сучеоним “К” шавом дебљине 5 мм. Дужина средњег дела хоризонталног штапа износи 355 мм, док је дужина два крајња дела по 67 мм, на шта се додају две ширине ножице вертикалног штапа од по 45 мм, чиме се добија укупна дужина хоризонталног штапа од 578 мм.

На крајевима штапова челичног рама, на њиховим ребрима, налазе се по четири рупе Ø13 мм, преко којих се остварује контакт експерименталног панела са лабораторијским алатом. Кроз рупе пролазе завртњи Ø12 мм, квалитета 8.8, који носе на смицање и који су прихваћени од стране лабораторијског алата преко две смичуће површине попречног пресека, тако да су двосечни. Посредством ових рупа,

односно завртњева, врши се и ослањање експерименталног модела на лабораторијски алат, као и аплицирање силе на експериментални модел.

Лим за изравнање је клин који се утискује при монтажи панела од ламелираног стакла, односно клирита, у челични рам. Ради се о лиму дебљине 3 мм ширине 65 мм и дужине 490 мм, који се радионички обрађује, како би му по ширини од 65 мм једна ивица била дебљине 1 мм, чиме у попречном пресеку добија клинаст облик и тиме попуњава зазор између испуне и челичног рама, који је проистекао из кружне основе велике куполе – објекта чије се укрућење пројектује.



Слика 4.2.3: Челична конструкција рама – детаљ хоризонталног пресека: друга фаза монтаже панела од ламелираног стакла / клирита

Са унутрашње стране, стаклени панел се фиксира челичним лимом пресека латиничног слова “L“, кроз који се монтира завртањ у ребро вертикале односно хоризонтале рама. Ово омогућава да светла димензија прозорског окна буде максимална, а у рачунском смислу то ће значити да је стаклени панел ослоњен по целом обиму зглобном везом. Да је ножица “Т“ профила шири и да је належући профил са унутрашње стране такође шири, стаклени панел би по обиму био укљештен.⁶⁸

⁶⁸C. Amadio, C. Bedon, *Effect of circumferential sealant joints and metal supporting frames on the buckling behavior of glass panels subjected to in-plane shear loads*, Glass Structure Engineering, Springer International Publishing, 2015

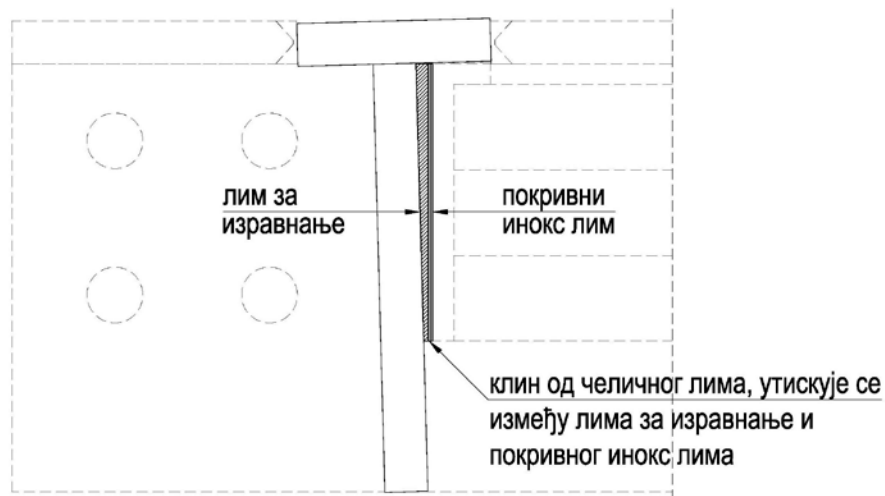
Гумена трака – *кедер* – се лепи на бочне стране – *кантове* – панела од ламелираног стакла, односно клирита. Посредством гуме, панел од ламелираног стакла, односно клирита, налаже на ребра хоризонталних и вертикалних штапова. Гумена трака има дебљину 5 мм, тврдоћу 75 шора и армирана је текстилном мрежом у два слоја. У смислу трајности, врста гуме мора бити ЕПДМ (*Етилен Пропилен Дуен Мономер*).

Панел од ламелираног стакла има укупну дебљину 60 мм, а димензије су му 372 x 478 мм. Панел је сачињен од три појединачне ламеле дебљине 20 мм и све ламеле су од сировог стакла (не каљеног). Ламеле су спојене у пакет, постављањем двоструке ПВБ (*Поливинил бутерне*) фолије између две суседне ламеле. Пакет се затим обрађује у *АУТОКЛАВ* уређају, како би дошло до пријањања, односно спрезања ламела. Бочне површине панела (*кантови*) ширине 60 мм, након ламелирања морају бити идеално равне, да би на њих могле бити залепљене траке гуме – кедера.

Међусобно лепљење две траке гуме које се додирују на углу панела, тако што бочна страна (кант) једне траке налаже на маргину фронталне површине друге траке, врши се структуралним лепком, као што су лепкови за стакло *PRO* или *ULTIMATE*, произвођача *WÜRTH*, односно лепковима истог или вишег квалитета. Лепак мора имати тренутну и трајну еластичност, односно не сме губити еластичност током времена. Физичко механичке карактеристике лепка морају бити сличне физичко механичким карактеристикама гуме. Лепак којим се траке кедера лепе за бочне површине (кантове) панела од ламелираног стакла, такође мора имати тренутну и трајну еластичност. И код овог лепка, физичко механичке карактеристике морају бити сличне физичко механичким карактеристикама гуме.

Челични рам је коначно спреман за монтажу панела од ламелираног стакла, односно клирита, када је са унутрашње стране вертикалних ребара рама залепљен клинасти лим “за изравнање”. У рам се затим монтира панел од ламелираног стакла, односно клирита. Фиксирање панела дуж вертикала рама, врши се утискивањем клинова од челичног лима између лима за изравнање и покривног инокс лима, који је залепљен на кедер којим је обложен кант панела од ламелираног стакла, односно клирита. Фиксирање панела дуж хоризонтала рама, врши се утискивањем клинова од

челичног лима само између ребра вертикалне пречке рама и покривног инокс лима, јер на хоризонталама рама нема лима за изравнање.



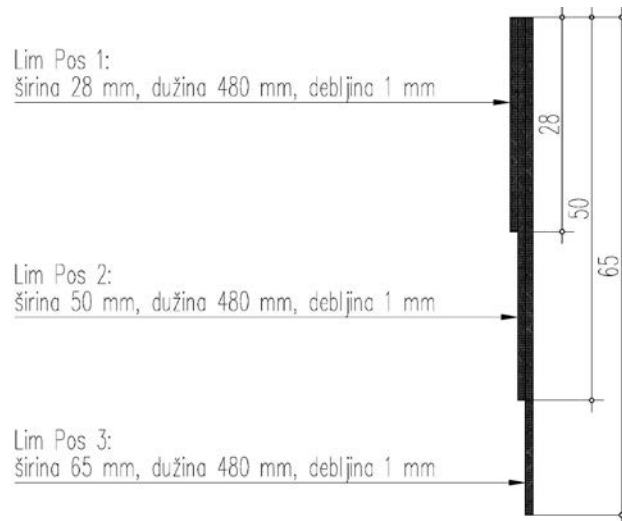
Слика 4.2.6: положај лима за изравнање, покривног лима и клинастог лима – детаљ хоризонталног пресека



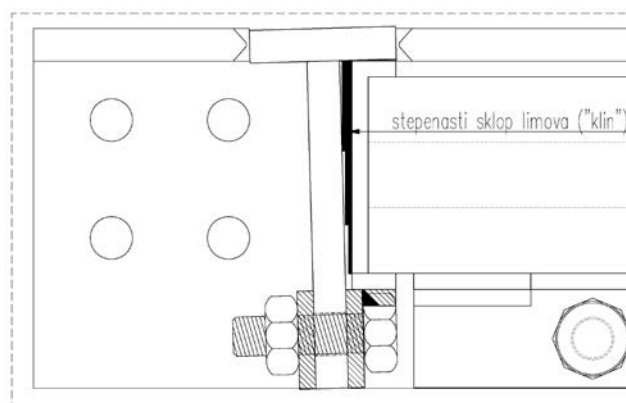
Слика 4.2.7: положај лима за изравнање, који се лепи за ребро вертикале челичног рама – детаљ хоризонталног пресека

Приказани лим за изравнање, представља идеалну диспозицију, у којој је постигнуто линеарно константно смањење почетне дебљине од 2,8 мм, на коначних 1 мм. Циљ експеримента јесте испитивање реалног и доступног модела, за чију производњу не би биле потребне посебне технологије или посебни, специјални материјали, већ оне технологије и материјали који су широко доступни. Тако се као испуна од ламелираног стакла користи обично, а не каљено стакло, амортизујући слој посредством којег испуна налаже на челични рама је од обичне гуме стандардне тврдоће, а челик је стандардног квалитета S235. У истом смислу, технологија за

производњу панела мора бити стандардна, без посебних захтева, а производња овде описаног клинастог лима, могла би представљати нешто сложенији захват. Из тог разлога је понуђено и алтернативно решење за израду клинастог лима за изравнање, које је представљено на следећим сликама. У попречном пресеку, лим за изравнање више није клинасти, већ је степенести, са каскадом висине 1 мм, чиме се у довољној мери постиже налегање панела испуне обложеног гумом на челични рам.



Слика 4.2.8: попречни пресек кроз алтернативно решење лима за изравнање



Слика 4.2.9: лим за изравнање (алтернативни степенести склоп) – детаљ хоризонталног пресека кроз вертикалу експерименталног модела

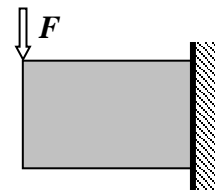
Након утискивања клинова, завршни корак представља монтажа унутрашњих граничних елемената, “L” профила, који се монтирају на ребра вертикалних и хоризонталних пречки рама, помоћу завртњева М12 и који, посредством кедера, са унутрашње стране фиксирају панел од ламелираног стакла.

Након описаног поступка и завршне монтаже у радионици, укупно десет композитних експерименталних панела (пет са испуном од ламелираног стакла и пет са испуном од клирита), достављено је у лабораторију *ЛИМЕС* на Машинском факултету Универзитета у Београду, где се изводи лабораторијско испитивање експерименталних композитних панела.

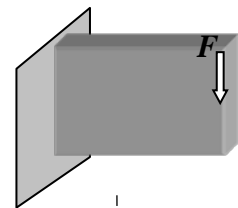
4.3 ПРИПРЕМА ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ОПРЕМЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ

Предвиђена су следећа статичка и динамичка испитивања опитних панела:

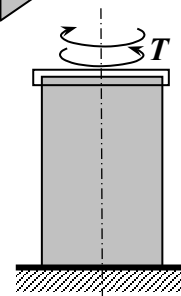
Случај 1. – деловањем оптерећења паралелно равни панела



Случај 2. – деловањем оптерећења управно на раван панела



Случај 3. – увијањем око осе панела



Слика 4.3.1: диспозиције за испитивања експерименталних лабораторијских панела

Динамичко и статичко испитивања експерименталних композитних панела од оба материјала испуне алтернативно, обављена су на серво хидрауличној машини за динамичко и статичко испитивање материјала *ZWICK Roell HB – 250 (Пулзатору)* последње генерације, на Катедри за опште машинске конструкције Машинског факултета Универзитета у Београду, у акредитованој Лабораторији за Испитивање

Машинских Елемената и Система – ЛИМЕС (ATS 31-304 SRPS ISO/IEC 17025:2006).



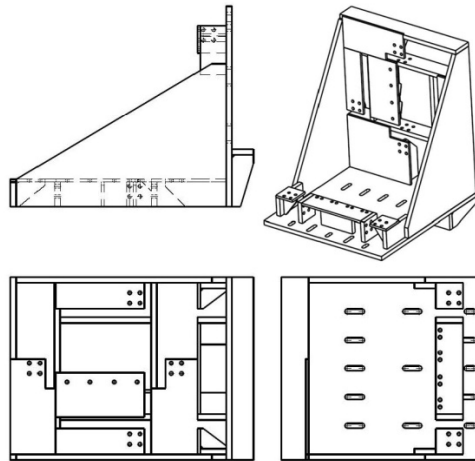
Слика 4.3.2: серво хидраулична машина за динамичко и статичко испитивање материјала ZWICK Roell HB – 250

Основни технички подаци хидрауличне машине за динамичко и статичко испитивање материјала ZWICK Roell HB – 250:

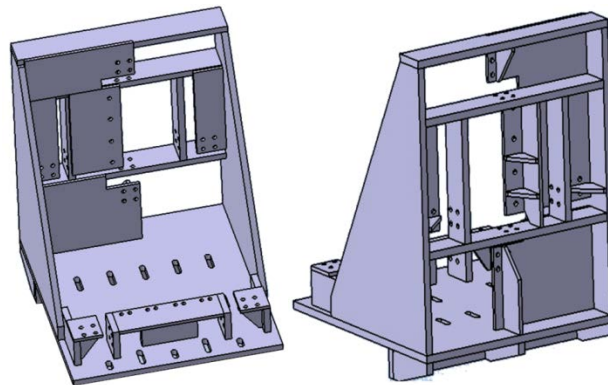
- максималне димензије радног простора: 670 x 1070 mm
- статичко испитивање: затезањем, притискањем и савијањем
- динамичко испитивање: затезањем, притискањем, савијањем и увијањем
- истовремено испитивање са два независна актуатора (затезањем и увијањем)
- висока тачност и поновљивост резултата испитивања
- велика флексибилност услова испитивања до 130Hz у опсегу од пар mm/min до пар m/s
- потпуна линеарност у пуном опсегу од 0 до 250 kN
- потпуна усаглашеност са најновијим светским стандардима:
 - ISO 6892-1:2009, испитивање затезањем

- ISO 12106:2003, испитивање замарањем
- ISO 12108:2002, испитивање брзине раста заморне прслине

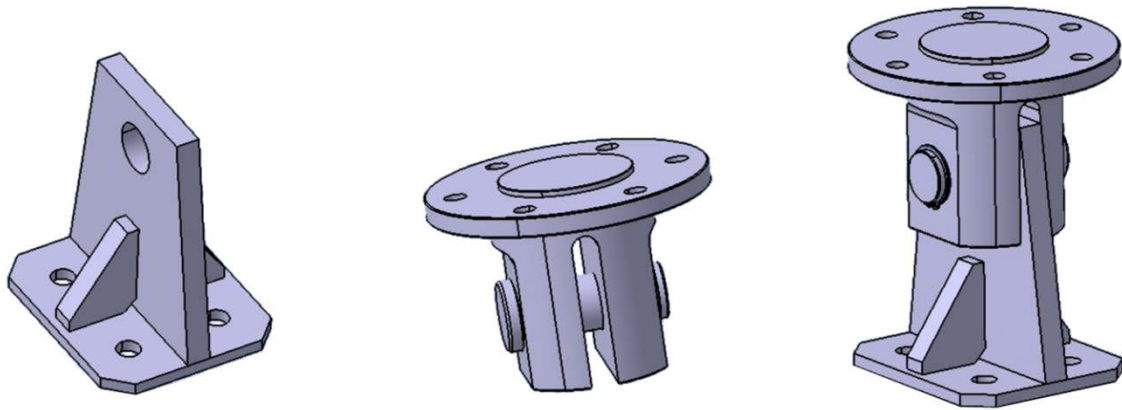
За потребе испитивања конструисан је и израђен посебан сет више сегментног прихватног алата, који омогућује стабилност испитивања у све три тражене равни. Алат је конструисан у сагласности са захтевима испитивања, са повећаном крутости, тако да његове еластичне деформације, генерисане током испитивања, не утичу на коначне резултате. Посебно су дефинисане позиције монтаже и укрућења експерименталних модела, као и тачке деловања главног (експерименталног) оптерећења. Веза испитних панела са алатом остварена је помоћу 24 вијка класе чврстоће 8.8.



Слика 4.3.3: радионички цртежи главног сегмента прихватног алата – *радног стола*, који је *посредник* између експерименталног панела и лабораторијске опреме

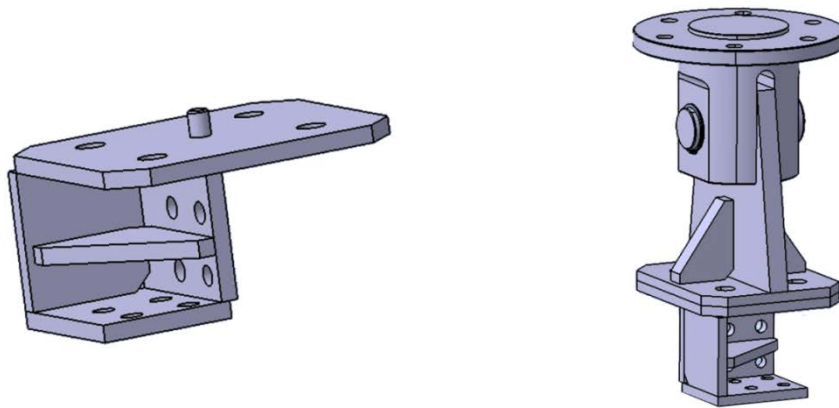


Слика 4.3.4: тродимензионални прикази главног сегмента прихватног алата – *радног стола*

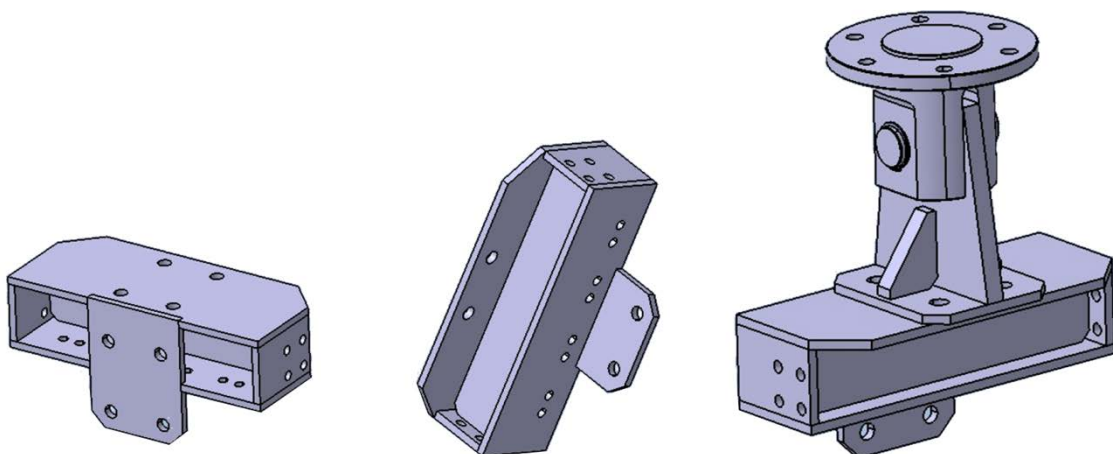


Слика 4.3.5: Изглед зглобног адаптера за везу лабораторијске опреме и сегмената прихватног алата за увођење оптерећења

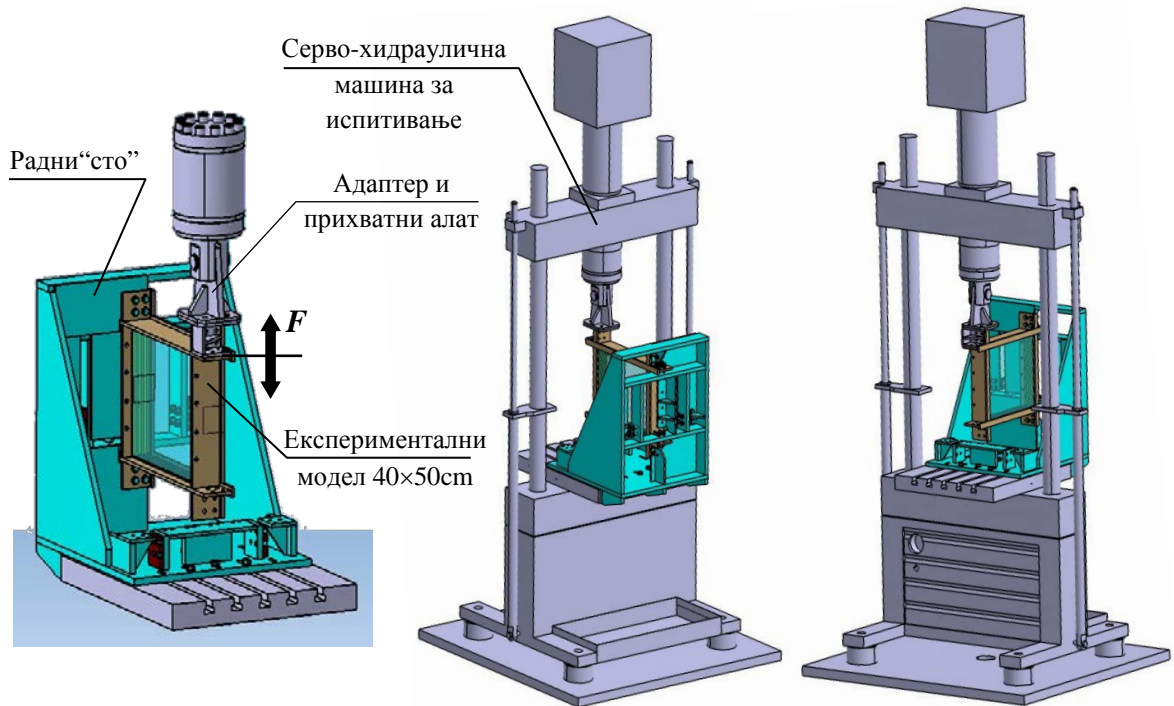
Зглобни адаптер је посебно конструисан са зглобом, који обезбеђује да током испитивања, вектор главне силе увек буде управан на испитни панел.



Слика 4.3.6: Изглед прихватног алата за увођење оптерећења (за испитивање савијањем у бочној равни)

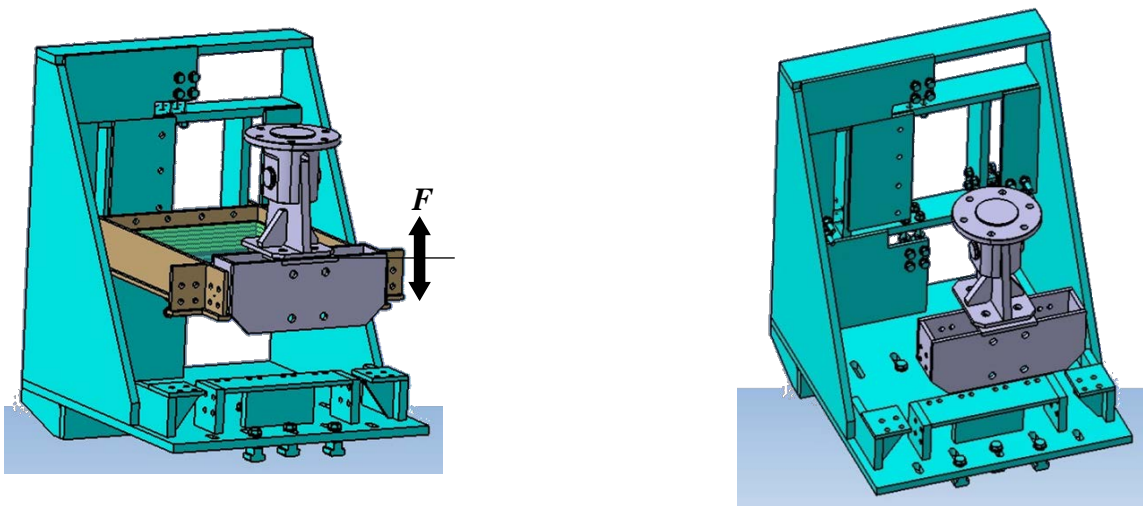


Слика 4.3.7: Изглед прихватног алата за увођење оптерећења (за испитивање савијањем у нормалној равни и испитивање увијањем)



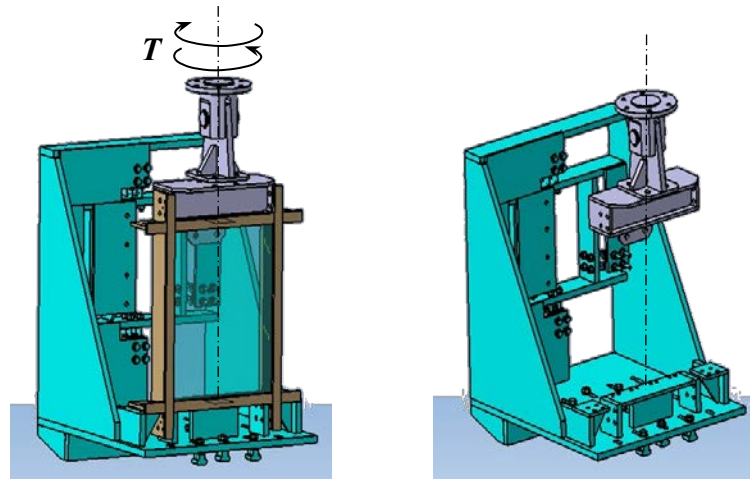
Слика 4.3.8: положај експерименталног панела у прихватном алату у машини, за испитивање силом која је паралелна равни панела

Приказани склоп лабораторијске опреме и алата, представља ефикасан систем за извођење испитивања и сагледавање њихових резултата.⁶⁹



Слика 4.3.9: положај експерименталног панела у прихватном алату у машини, за испитивање силом која је управна на раван панела

⁶⁹ Y.-F. Wu, *The Structural Behavior and Design Methodology for a New Building System Consisting of Glass Fiber Reinforced Gypsum Panels*, Construction and Building Materials, Elsevier Ltd, 2009, (p. 2905-2913)



Слика 4.3.10: положај експерименталног панела у прихватном алату у машини, за испитивање увијањем око подужне осе панела (торзија)

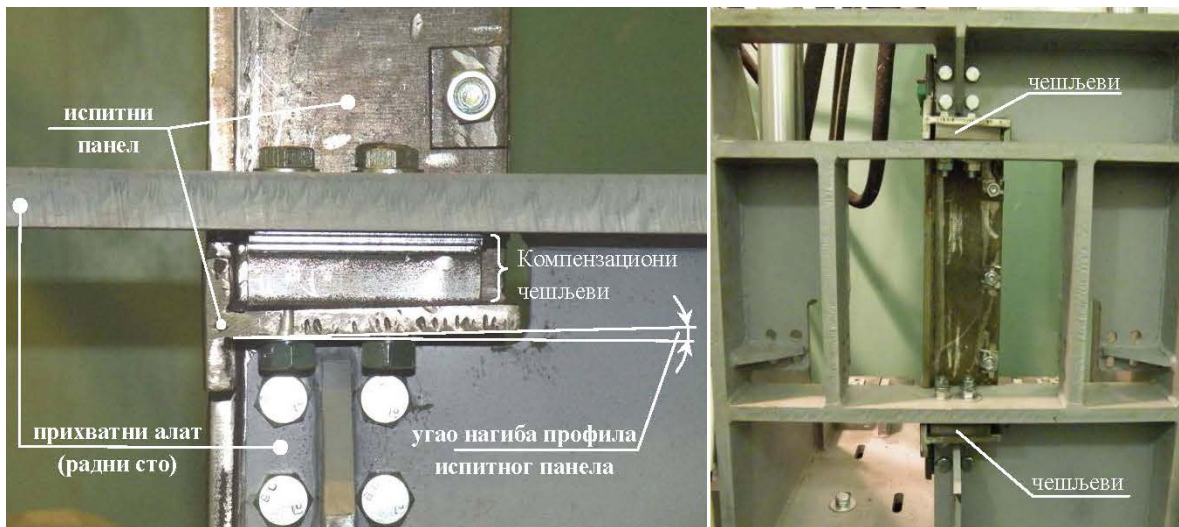
Посебно су конструисани и направљени „чешљеви” за компензацију угла нагиба и чешљеви различите дебљине за анулирање евентуалног зазора између испитног панела и алата.



Слика 4.3.11: Конусни чешљеви за компензацију угла нагиба профила испитног панела



Слика 4.3.12: Чешљеви различитих дебљина за анулирање зазора



Слика 4.3.13: Чешљеви у склопу алата и испитног профила

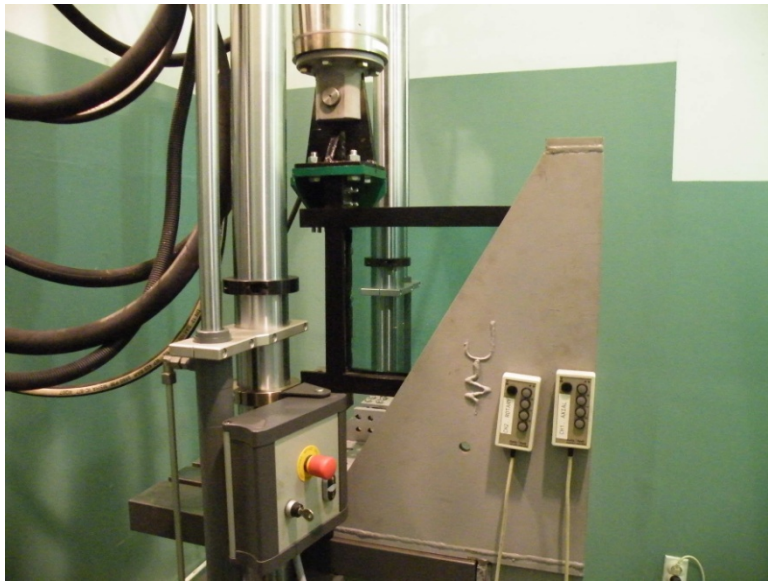
4.4 ЛАБОРАТОРИЈСКО ИСПИТИВАЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ КОМПОЗИТНИХ ПАНЕЛА

4.4.1 Пробна статичка испитивања силом паралелном равни експерименталног модела

У циљу дефинисања понашања конструкције, конструкционог решења и коначног дефинисања сила и момената, испитиван је пробни панел (прототип) са стакленом испуном и то статичким дејством силе, притискањем и затезањем. Ова испитивања су била неопходна како би се:

- дефинисао опсег померања конструкције пробног панела у области еластичних деформација;
- нашла зависност померања у функцији силе у генералном смислу;
- уочиле и исправиле евентуалне конструкционе грешке на прототипу панела.

На следећој слици, приказан је испитни панел у алату, непосредно пре почетка испитивања.



Слика 4.4.1: експериментални панел пре почетка статичког испитивања

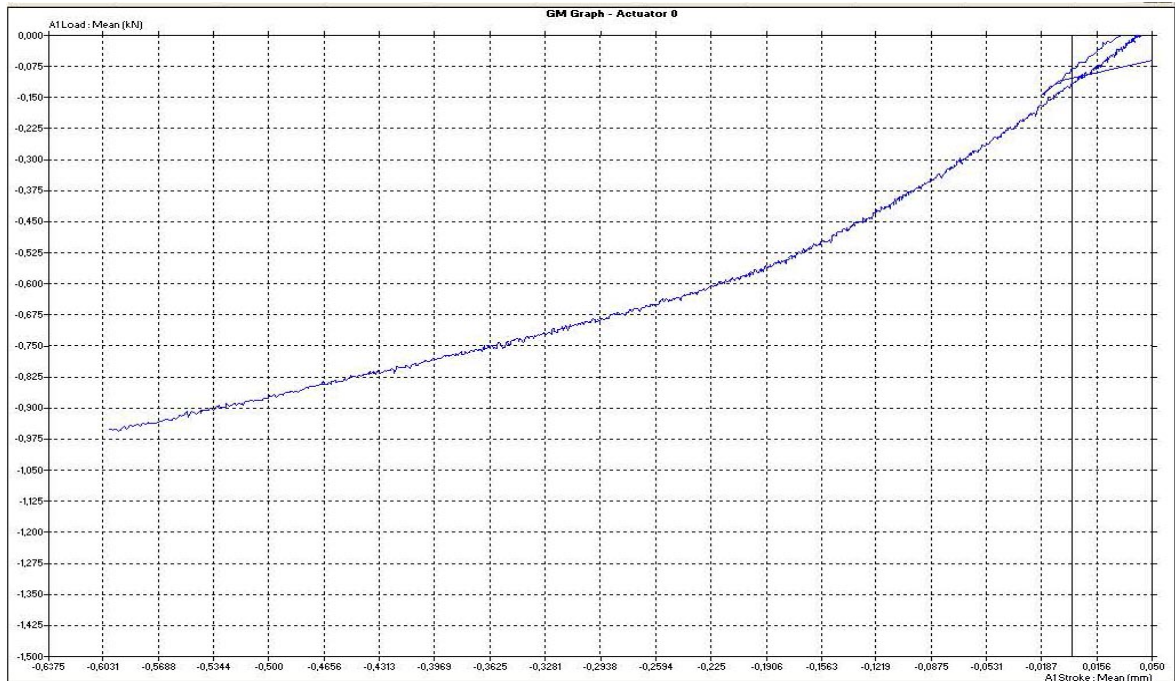
Прво пробно испитивање прототипа панела је извршено са малим прираштајем силе од 0,01 kN по секунди до оптерећења од 1 kN.

Друго пробно испитивање је спроведено након растерећења, до максималне силе од 2,5 kN са другим прираштајем силе. За оба испитивања добијени су дијаграми у функцији сила-деформација и сила-време, као и база података са нумеричким подацима.

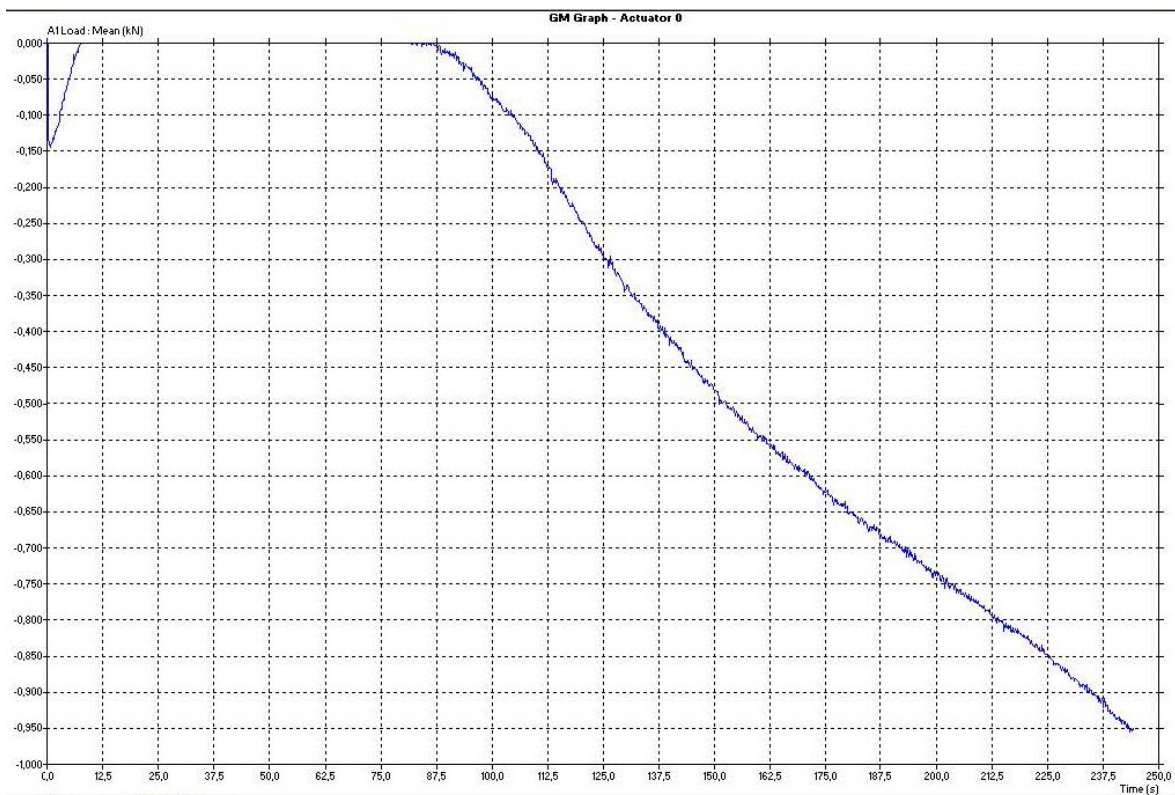
Треће пробно испитивање спроведено је испитивањем на притисак са прираштајем силе од 0,33 kN по секунди до лома стакла или конструкције. Максимална сила притискања панела при којој је дошло до појаве и раста прслина као и лома ламелиране стаклене испуне је 86 kN. Лом стакла је настао дијагонално, одозго (од тачке деловања силе) на доле (доња тачка укрућења, на супротној страни од тачке деловања силе).

Четврто пробно испитивање спроведено је на истом пробном узорку, затезањем са прираштајем силе од 0,33 kN по секунди до лома стакла или конструкције. Максимална сила притискања панела при којој је дошло до лома ламелиране стаклене испуне је 85,8 kN. Лом стакла је такође настао дијагонално, али по другој дијагонали, односно, одоздо (супротни угао рама испод тачке деловања силе) на горе (горња тачка укрућења, наспрам тачке деловања силе), с тим што се дијагонална пропација прслине зауставила тачно на пресеку са првом дијагоналном прслином. Испитани панел након испитивања притискањем и

затезањем се може видети на сликама у наставку. На фотографијама се јасно уочавају дијагоналне прслине стаклене испуне од оба испитивања.



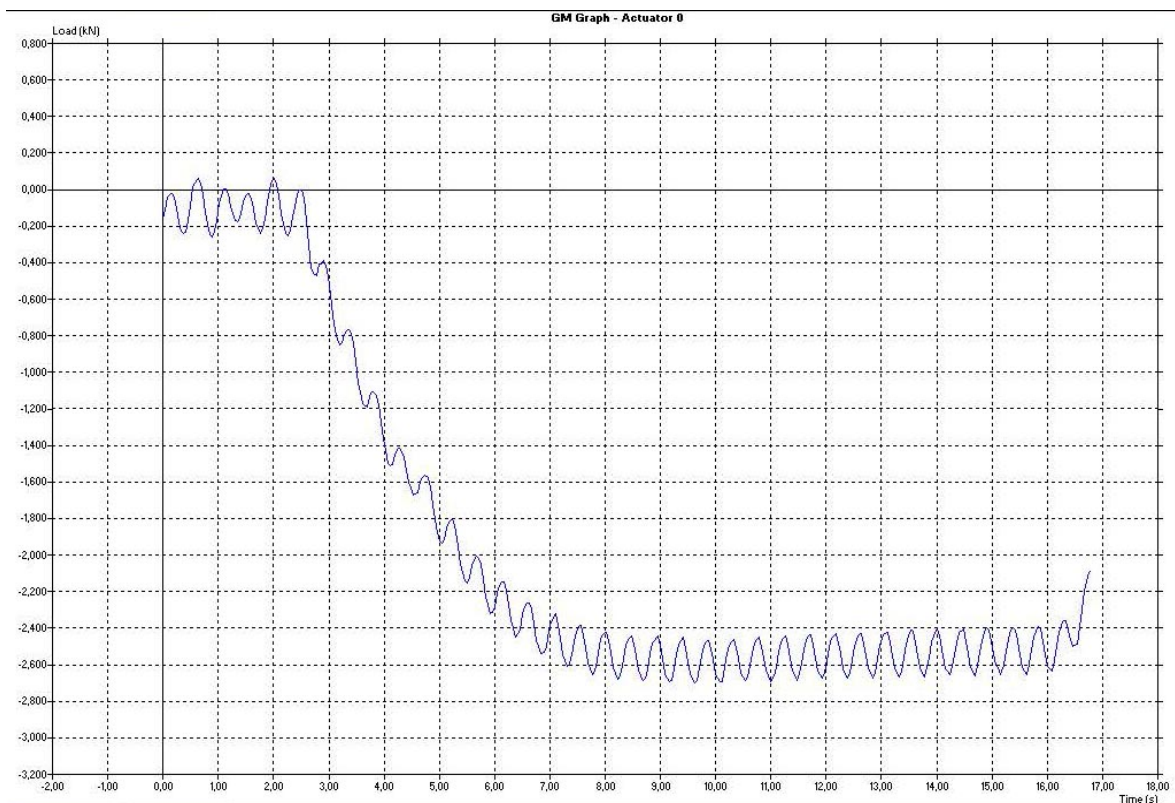
Слика 4.4.2: пробно статичко испитивање панела, оптерећење 1kN (дијаграм сила деформација)



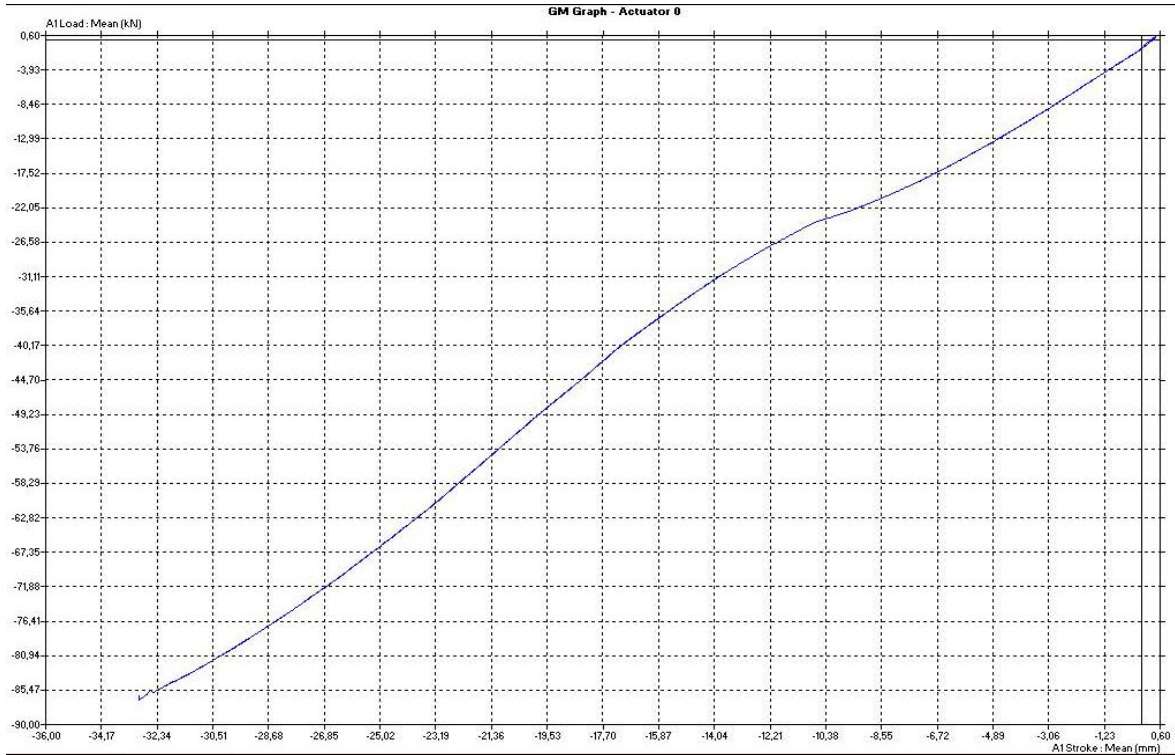
Слика 4.4.3: пробно статичко испитивање панела, оптерећење 1kN (дијаграм сила време)



Слика 4.4.4: пробно статичко испитивање панела, оптерећење 2.5 kN (дијаграм: сила / деформација)



Слика 4.4.5: пробно статичко испитивање панела, оптерећење 2.5 kN (дијаграм сила/ време)



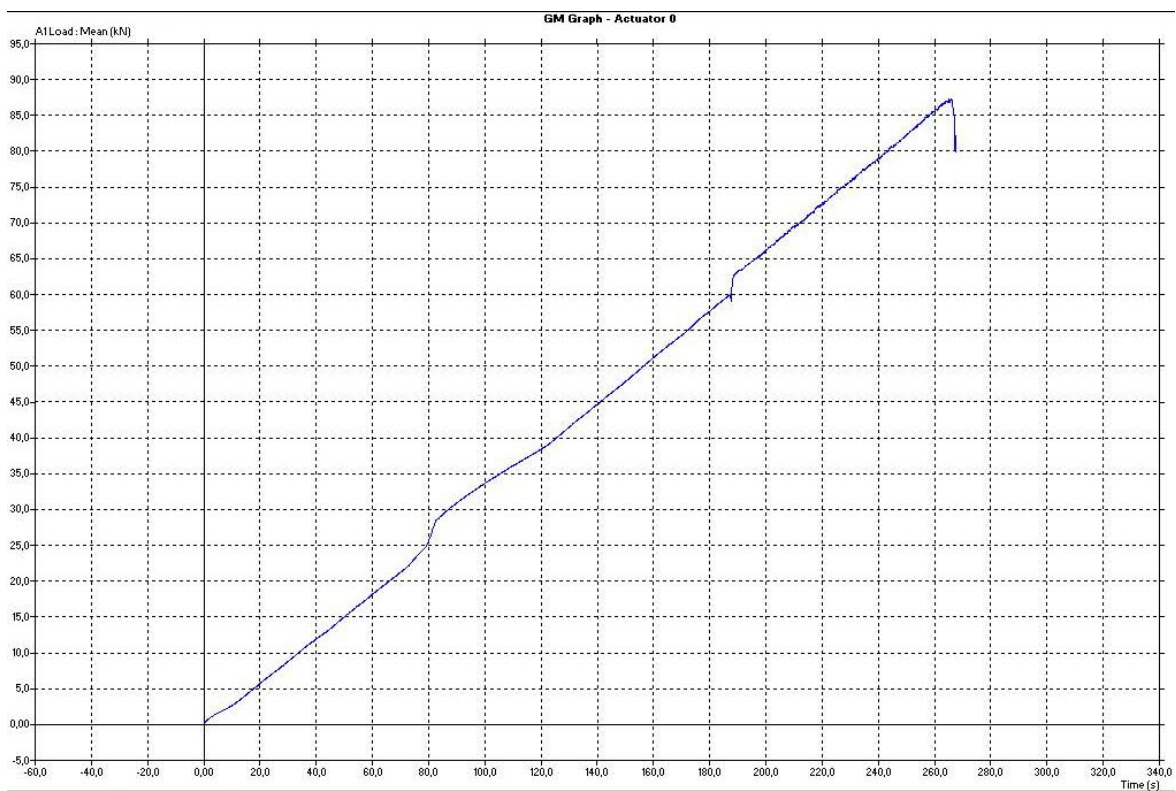
Слика 4.4.6: пробно статичко испитивање притискавањем, оптерећење 86 kN (дијаграм: сила / деформација)



Слика 4.4.7: пробно статичко испитивање притискавањем, оптерећење 86 kN (дијаграм: сила / време)



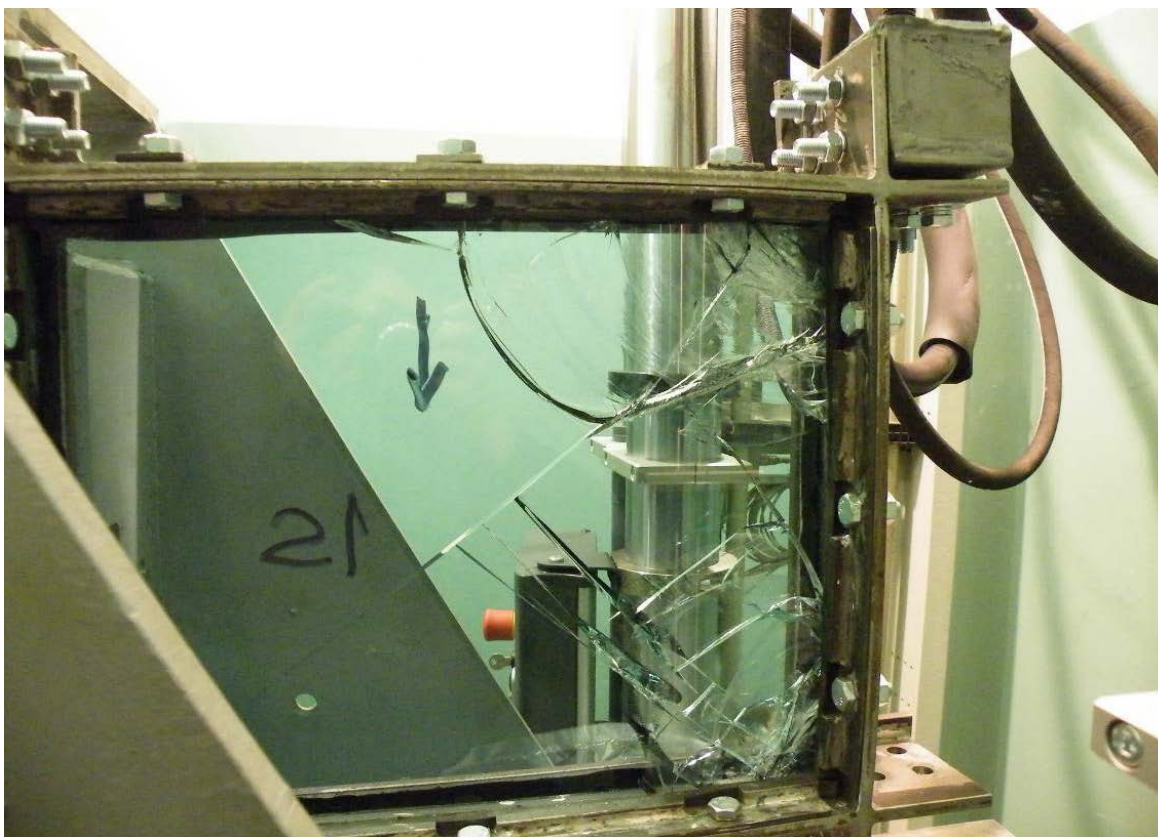
Слика 4.4.8: пробно статичко испитивање затезањем, оптерећење 86 kN (дијаграм: сила / деформација)



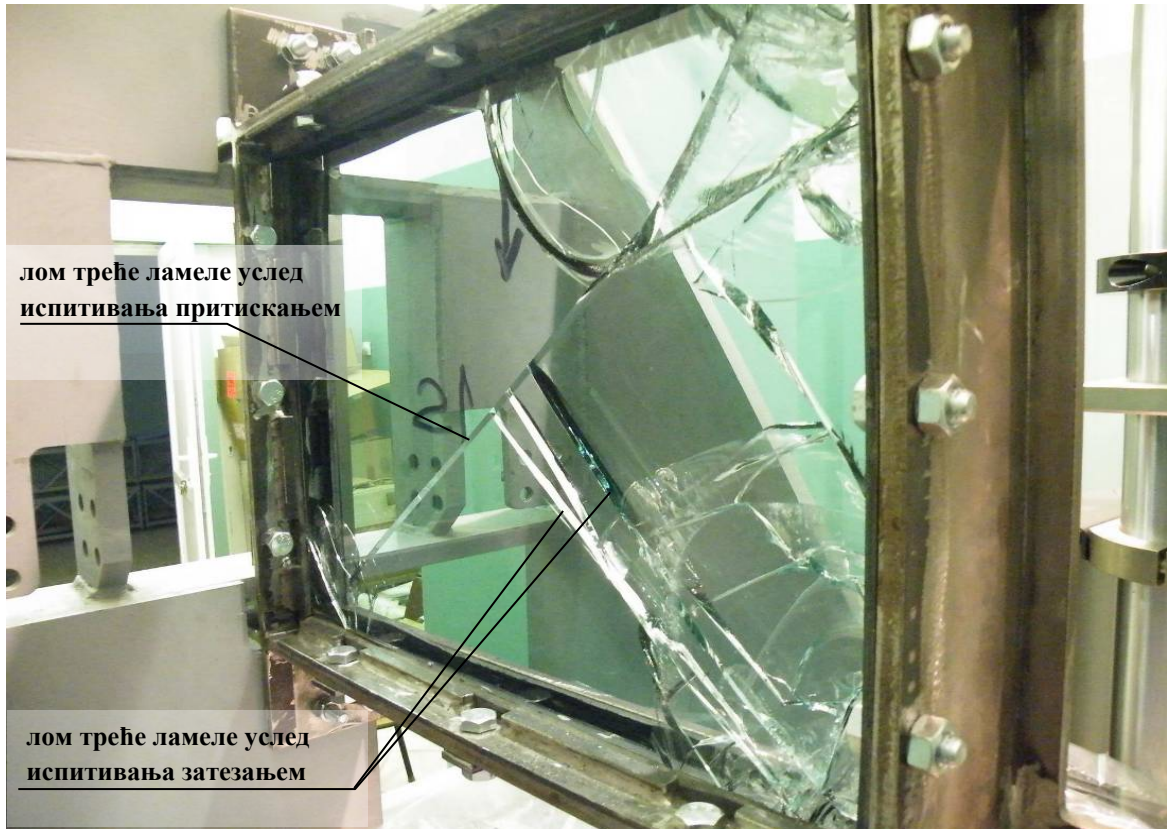
Слика 4.4.9: пробно статичко испитивање затезањем, оптерећење 86 kN (дијаграм: сила / време)



Слика 4.4.10: експериментални панел након испитивања (поглед са леве стране)

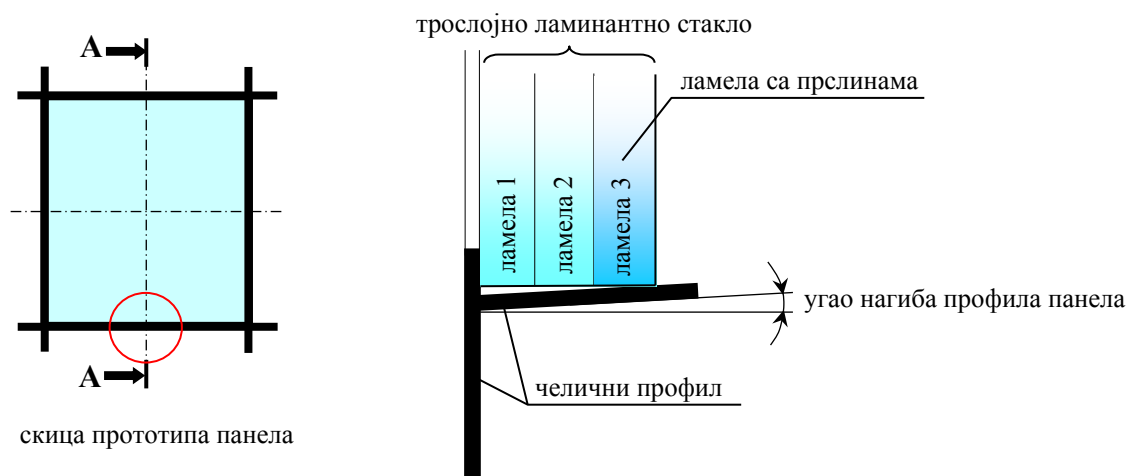


Слика 4.4.11: експериментални панел након испитивања (поглед са десне стране)



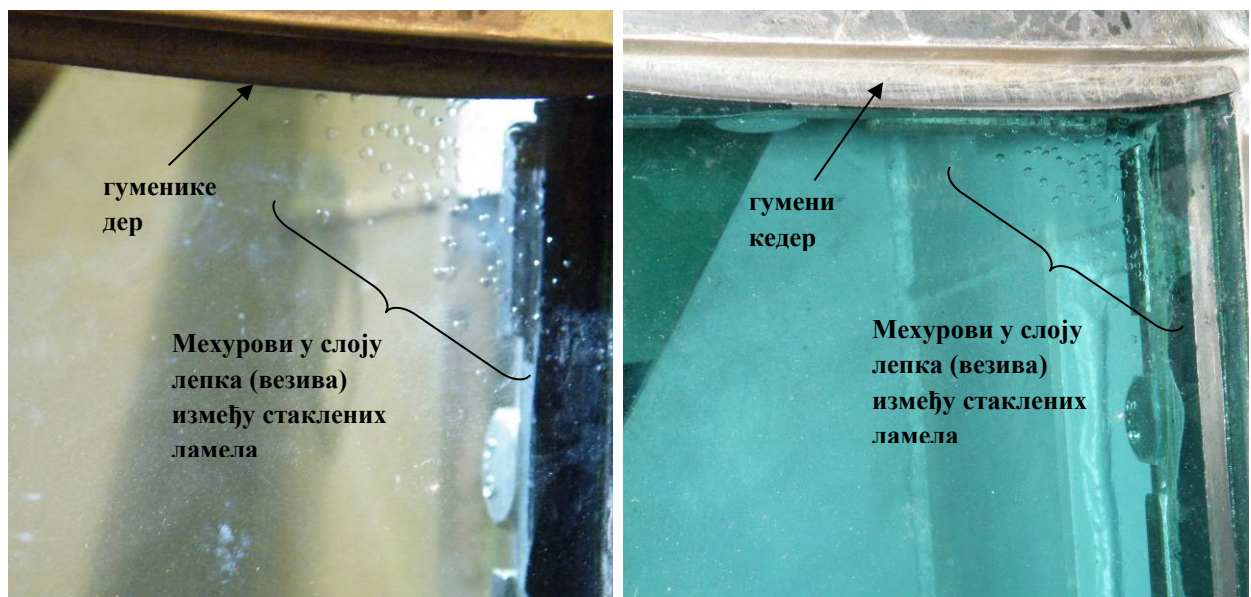
Слика 4.4.12: експериментални панел након испитивања (поглед са задње стране)

Анализом прототипа панела са стакленом ламинатном испуном након испитивања, уочене су деформације кедера (испадање, кривљење). Затим је уочено да је лом стаклене испуне уследио само на једној стакленој ламели трослојне стаклене испуне, и то на ламели која је најближа ребру челичног “Т” профила, односно која је најудаљенија од ножице челичног “Т” профила. Уочено је и раслојавање лепка између ламела стакла.



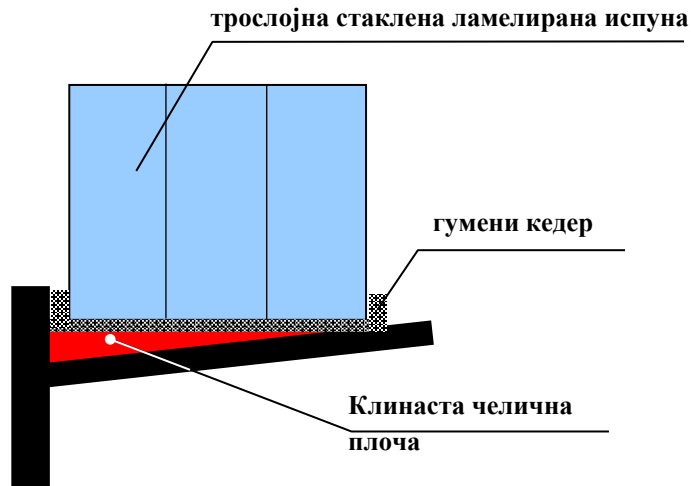
Слика 4.4.13: Положај ламеле стакла на којој су се јавиле прсине

Овде је закључено да због угла челичног профила рама (угао одговара закривљености контуре фасадне опне на куполи) током испитивања, расподела оптерећења није била равномерно распоређена на све три ламеле стаклене испуне истовремено, услед чега је само трећа ламела примила већи део оптерећења. Последица овога је и појава прелина на стаклу ламеле 3, већ при оптерећењу од 86 kN. Раслојавање лепка (везива) је настало приликом преношења дела оптерећења са ламеле 3 на остале ламеле посредством везивног средства између ламела.



Слика 4.4.14: Мехурови – раслојавање везивног средства између ламела стакла

Закључак који се намеће након испитивања прототипа панела је да је неопходно уметнути компензациону челичну клинасту плочу на профил под углом, у зону контакта стаклене/поликарбонатне испуне са гуменоим кедером и челичне конструкције рама панела, што је и урађено на свим преосталим узорцима (на девет преосталих експерименталних панела).



Слика 4.4.15: скица новог конструкционог решења са уметнутом клинастом челичном плочом



Слика 4.4.16: Уметнута клинаста плоча за постизање равномерне расподеле оптерећења

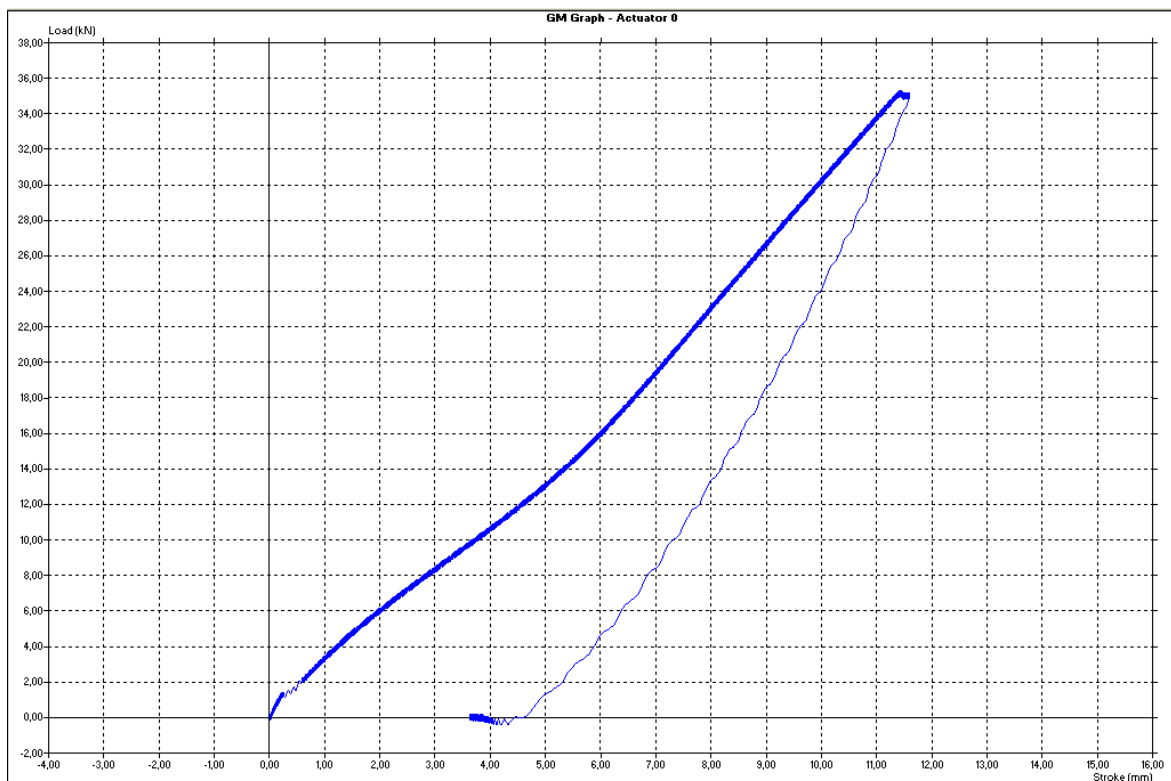
Како оптерећење од 86 kN, приликом кога су се јавиле прве прслине на стаклу, превазилази оптерећења у овом правцу, која би се генерисала при најјачем очекиваном земљотресу, није било потребно понављати статичка испитивања са истим параметрима на модификованим панелима, где је обезбеђена равномерна расподела оптерећења на све ламеле испуне од стакла/клиритаистовремено.

Овим статичким испитивањима прототипа панела постигнуто је следеће:

- добијена је зависност померања (деформација) панела у функцији силе у генералном смислу;
- уочене су и исправљене конструкционе грешке на прототипу панела.

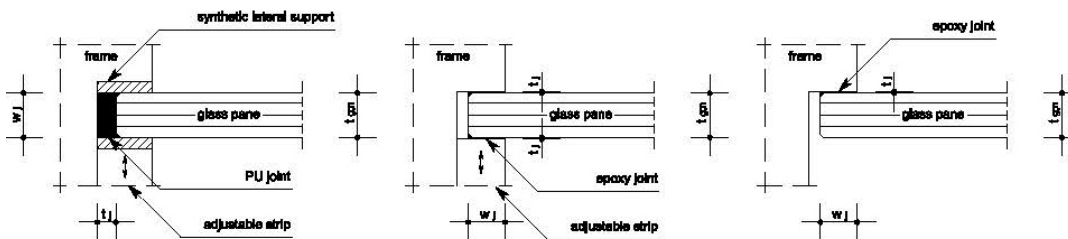
Након модификације конструкције панела, односно уметања компензационих клинастих челичних плоча на свим преосталим испитним панелима, поновљена су статичка испитивања затезањем и притискивањем, до максималне силе од 35 kN.

Овим испитивањем су добијени параметри за одређивање модула еластичности конструкције модификованог испитног панела, а на основу података је одређена зависност генерисаних деформација у функцији концентрисане силе.

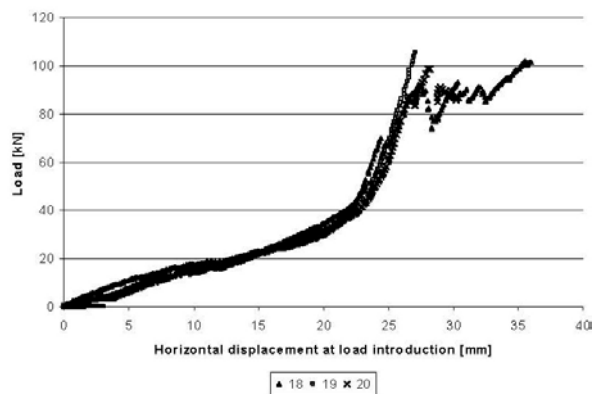


Слика 4.4.17: Статичко испитивање затезањем панела са клиритом, $F_{max} = 35 \text{ kN}$ (дијаграм: сила / деформација)

Утицај граничних (ивичних) услова ослањања стакленог панела на челични рам, показали су Хувернес, Хервијнен, Сетенс и Хофмајер (*E. M. P. Huvernes, F. Van Herwijnen, F. Soetens, H. Hofmeyer, 2007*).⁷⁰ У мањој или већој мери, у почетној фази испитивања се може уочити утицај амортизујућег слоја, који представља интермедијалну средину уметнуту између стакленог панела и челичног рама, са улогом спречавања њиховог директног контакта. Са њиховим резултатима поготово су упоредиви овде добијени резултати приказани на сликама 4.4.8 и 4.4.9, са дијаграмима сила / деформација и време / деформација. Може се уочити фаза померања, односно “намештања“ стакленог панела унутар оквирног система – челичног рама. Тај део дијаграма се разликује од следећег дела, у којем је “прорадила“ притиснута дијагонала, која преузима комплетно оптерећење, све до лома.



Слика 4.4.18: гранични услови по обиму стакленог панела у истраживању Хувернеса, Хервијнена, Сетенса и Хофмајера; најприближнији условима приказаним у овом раду су крајње лево – са належућим слојем од полиуретана⁷¹



Слика 4.4.19: дијаграм сила / деформација за први случај граничних услова код Хувернеса, Хервијнена, Сетенса и Хофмајера⁷²

⁷⁰E. M. P. Huvernes, F. Van Herwijnen, F. Soetens, H. Hofmeyer, *Glass Panes Acting as Shear Wall*, Faculty of Architecture, Building and Planning, Structural Design Group Technische Universiteit Eindhoven, the Netherlands, HERON Vol. 52 (2007) No. 1/2 (p. 5-29)

⁷¹*Ibid.*

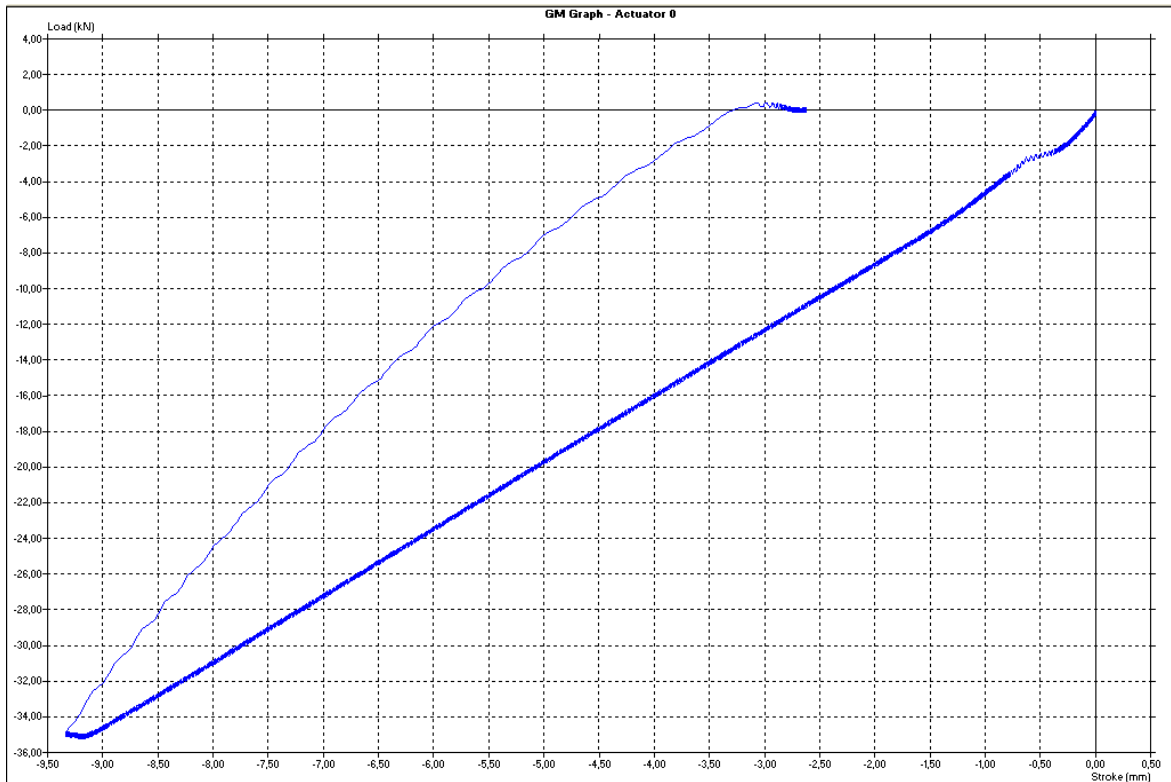
⁷²*Ibid.*

Значајно је уочити и појаву мехурова у слоју између две суседне ламеле стакла, који показују да је ПВБ фолија која је коришћена за спајање ламела стакла, изгубила носивост. О врстама и карактеристикама фолија које служе за спајање ламела стакла било је речи раније у овом раду (видети поглавље 2), а у овим пробним испитивањима је дошла до изражаја чврстоћа фолије код наношења оптерећења паралелно равни спојнице ламела. Обзиром на појаву мехурова приликом лома, очигледно је да је ПВБ фолија која је употребљена у изради ламлираних панела са врло ниским степеном крутости. То је од посебног значаја јер је клинасто налегање панела на челични рам довело до максималног оптерећивања ламеле која је најближе челичном раму. “Мека“ ПВБ фолија је проузроковала то да напрезање није ефикасно пренешено на остале ламеле, тако да није ни дошло до ексцентричног напрезања по целој ширини пресека стакла, па се није јавило ни извијање пресека по целој ширини.⁷³

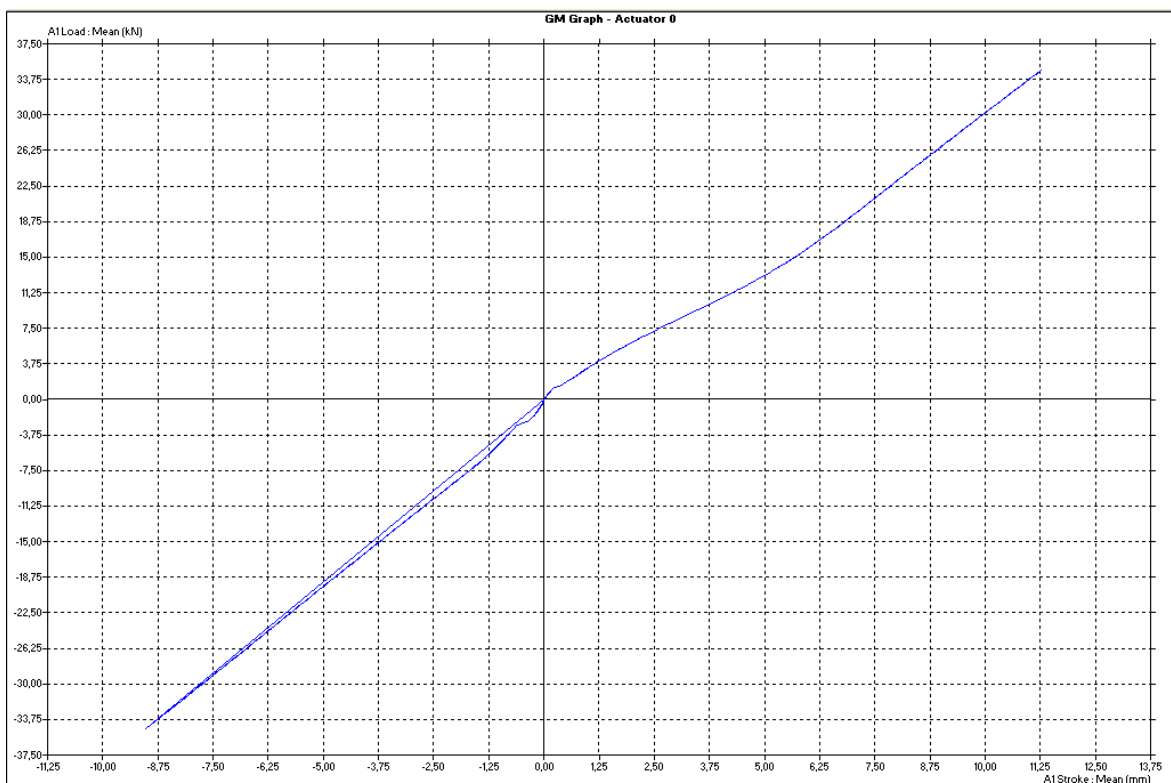
Извијање стакленог панела под дејством оптерећења паралелног његовој равни, још увек је у фази истраживања, са циљем да се дефинишу релевантни улазни параметри који ће веродостојно описати степен конекције стаклених плоча у оквиру ламелног пакета помоћу интермедијалног слоја – фолије. Дефинисање параметара такође мора узети у обзир услове ивичног ослањања, као и услове температуре и трајања оптерећења.⁷⁴

⁷³ Johan Blaauwendraad, *Buckling of Laminated Glass Columns*, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, HERON Vol. 52, (2007), No. 1/2 (p. 148-164)

⁷⁴ Chiara Bedon, Claudio Amadio, *Buckling of Flat Laminated Glass Panels under In-plane Compression or Shear*, Engineering Structures 36, 2012, (p. 185-197)



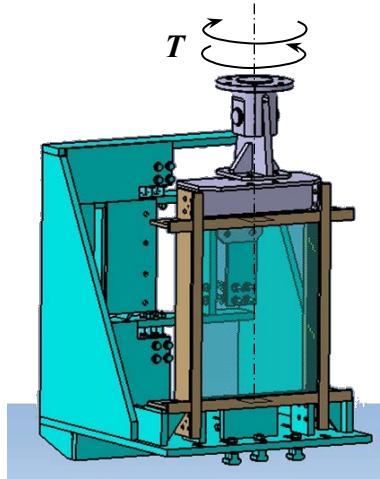
Слика 4.4.20: Статичко испитивање притискивањем панела са клиритом, $F_{max} = 35 \text{ kN}$ (дијаграм: сила / деформација)



Слика 4.4.21: Статичка испитивања затезањем и притискивањем панела са испуном од клирита, $F_{max} = 35 \text{ kN}$ (дијаграм: сила / деформација)

4.4.2 Пробнастатичка испитивања увијањем силем управном на раван експерименталног модела

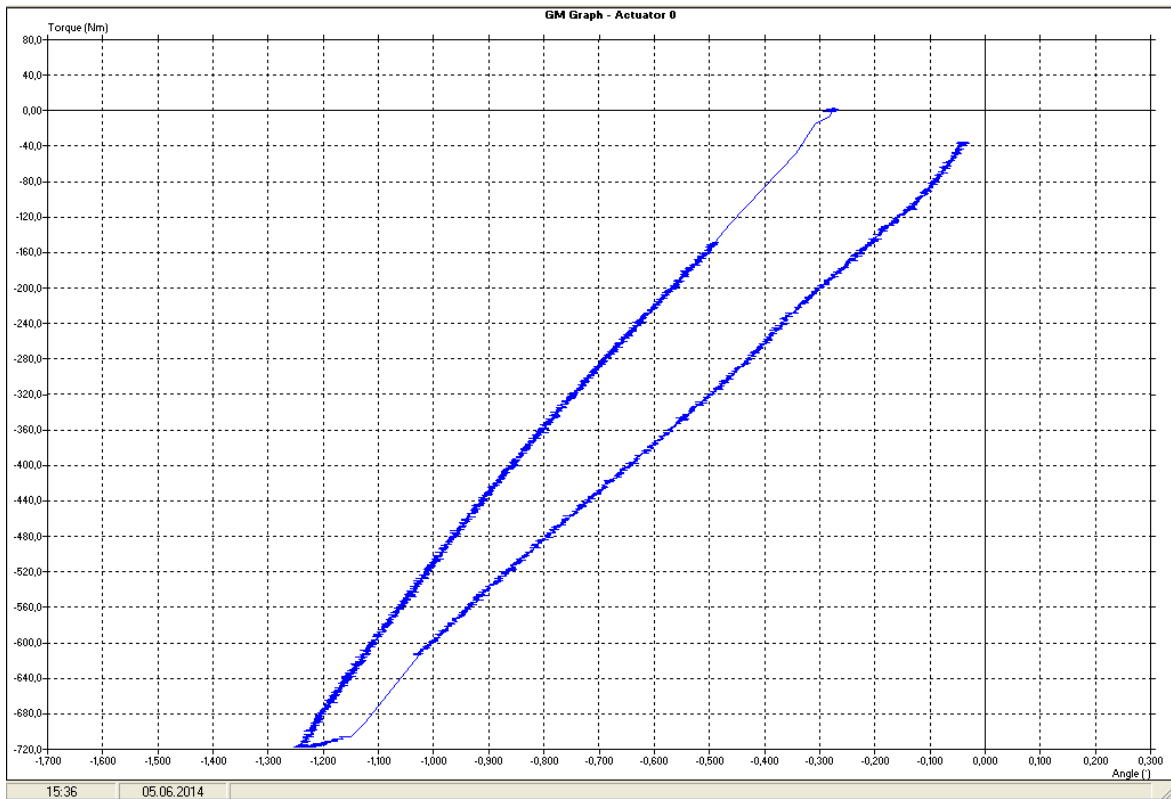
Статичка испитивања су настављена испитивањем увијањем око осе панела. За то је припремљен посебан алат који омогућује увођење момента увијања (торзије) у предвиђену зону испитивања.



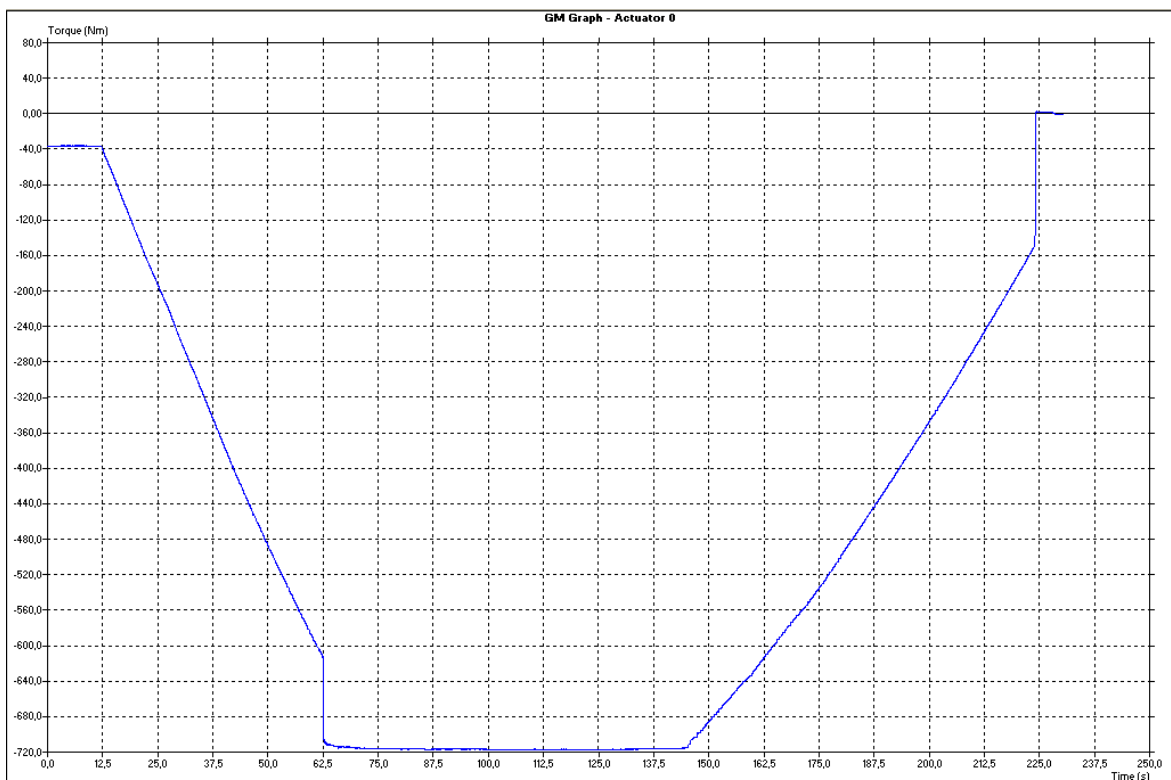
Слика 4.4.22: Положај експерименталног панела у прихватном алату и изглед самог алата за испитивање увијањем

Испитиван је модификован панел са испуном од поликарбоната/клирита. Параметри испитивања такође су дефинисани прорачуном и у сагласности су са вредностима коју би изазвао евентуални земљотрес очекиване енергије. Статичко испитивање увијањем је извршено са прираштајем момента од 15 Nm/s, до

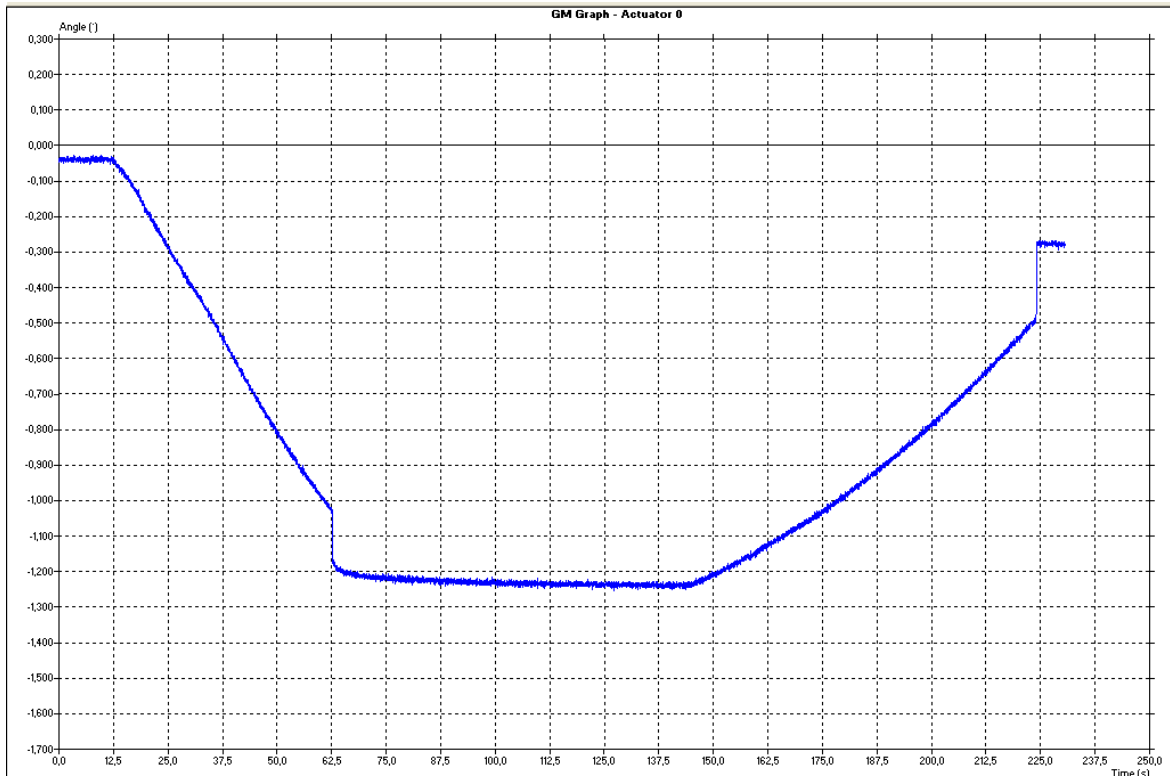
максималне вредности момента увијања (торзије) од $T = 750 \text{ Nm}$. Овим испитивањем је утврђена зависност угла увијања од вредности момента.



Слика 4.4.23: Испитивање панела увијањем (дијаграм: угао / момент)



Слика 4.4.24: Испитивање панела увијањем (дијаграм: време / момент)

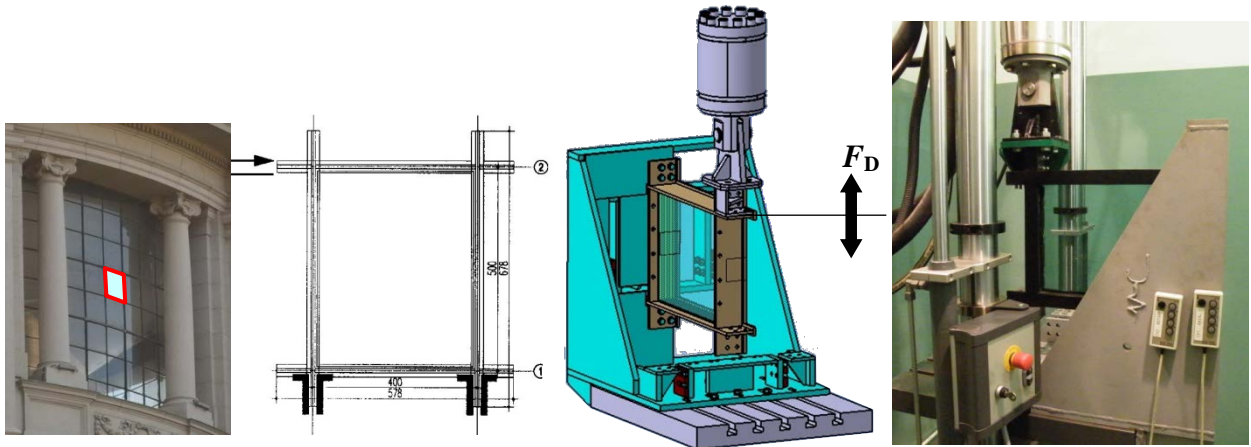


Слика 4.4.25: Испитивање панела увијањем (дијаграм: време / угао)

Резултати статичких испитивања панела увијањем су показали да конструкција панела издржава знатно веће интензитете оптерећења од оних који би се генерисали током очекиваног земљотреса.

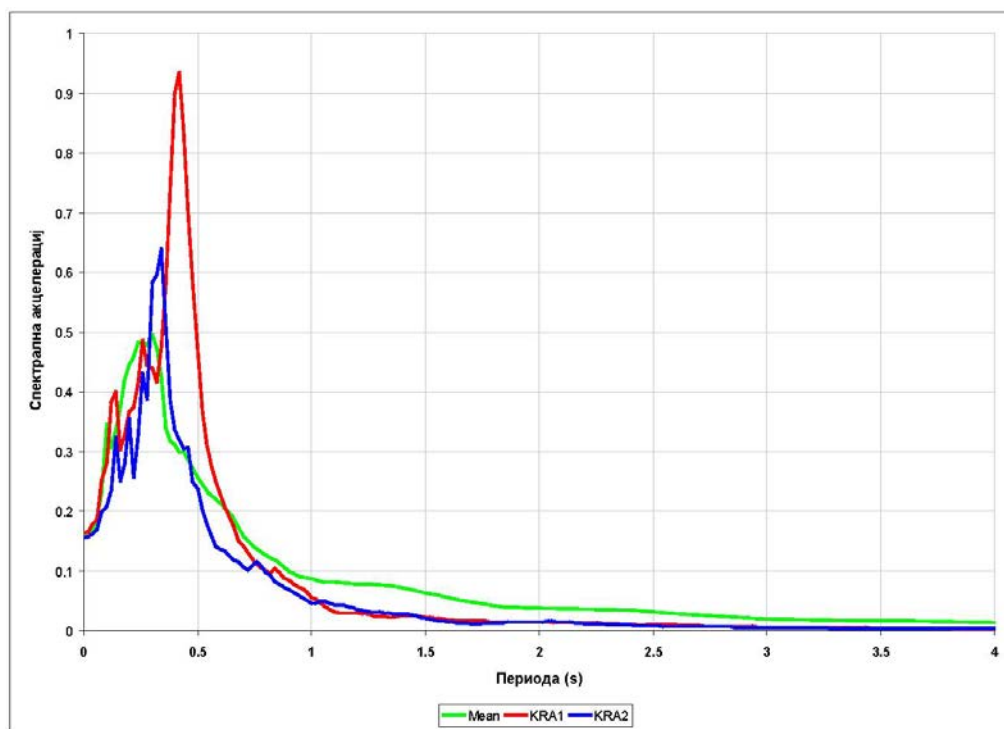
4.4.3 Динамичка испитивања

Динамичка испитивања су спроведена на модификованим испитним панелима. Анализом испитивања статичким дејством силе, одлучено је да се динамичка испитивања спроведу за случај деловањем оптерећења паралелно равни експерименталног модела.

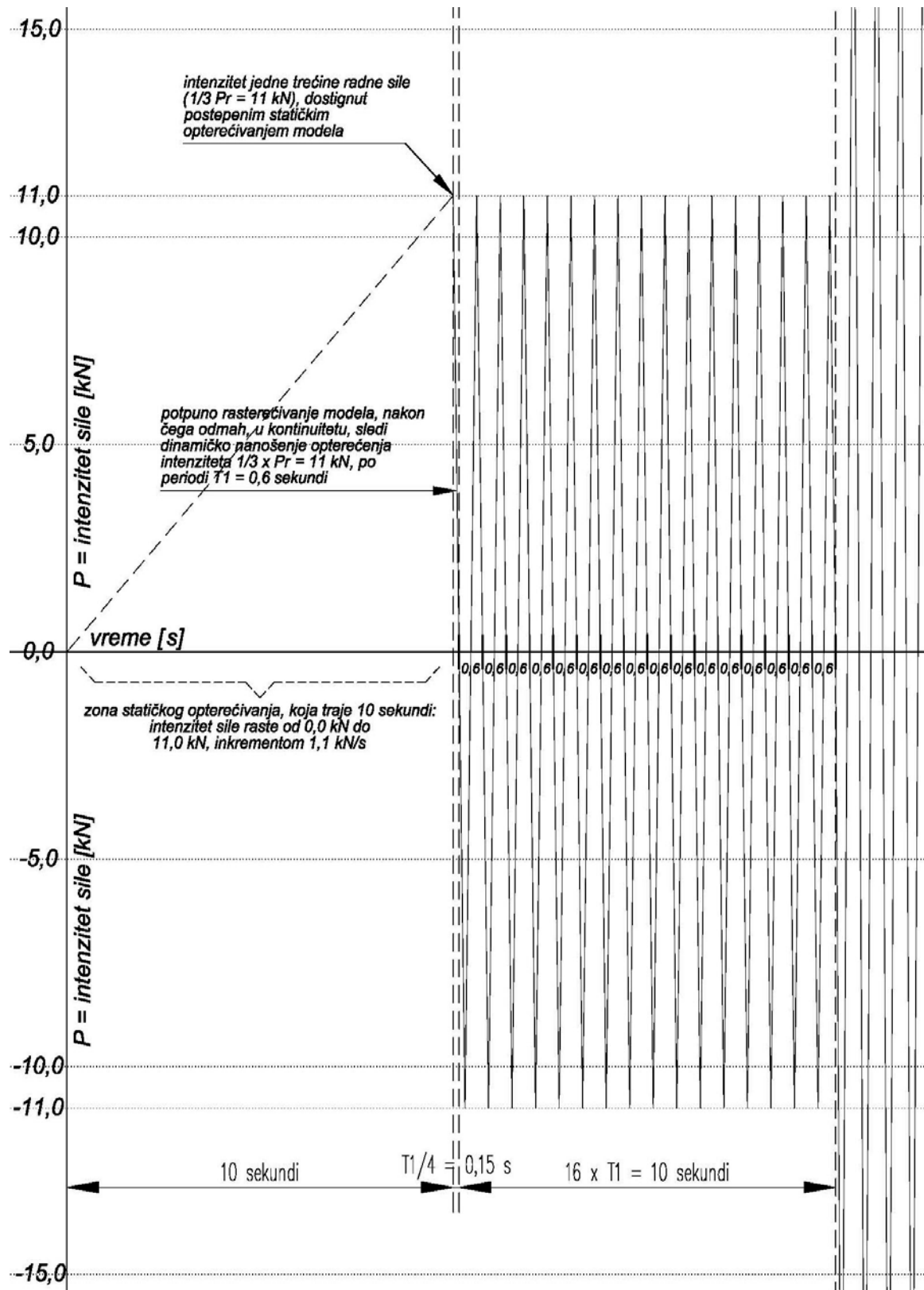


Слика 4.4.26: Начин укрупњења и тачка деловања оптерећења за испитивања динамичким дејством силе за случај деловањем оптерећења паралелно равни експерименталног модела (затезање и притискивање)

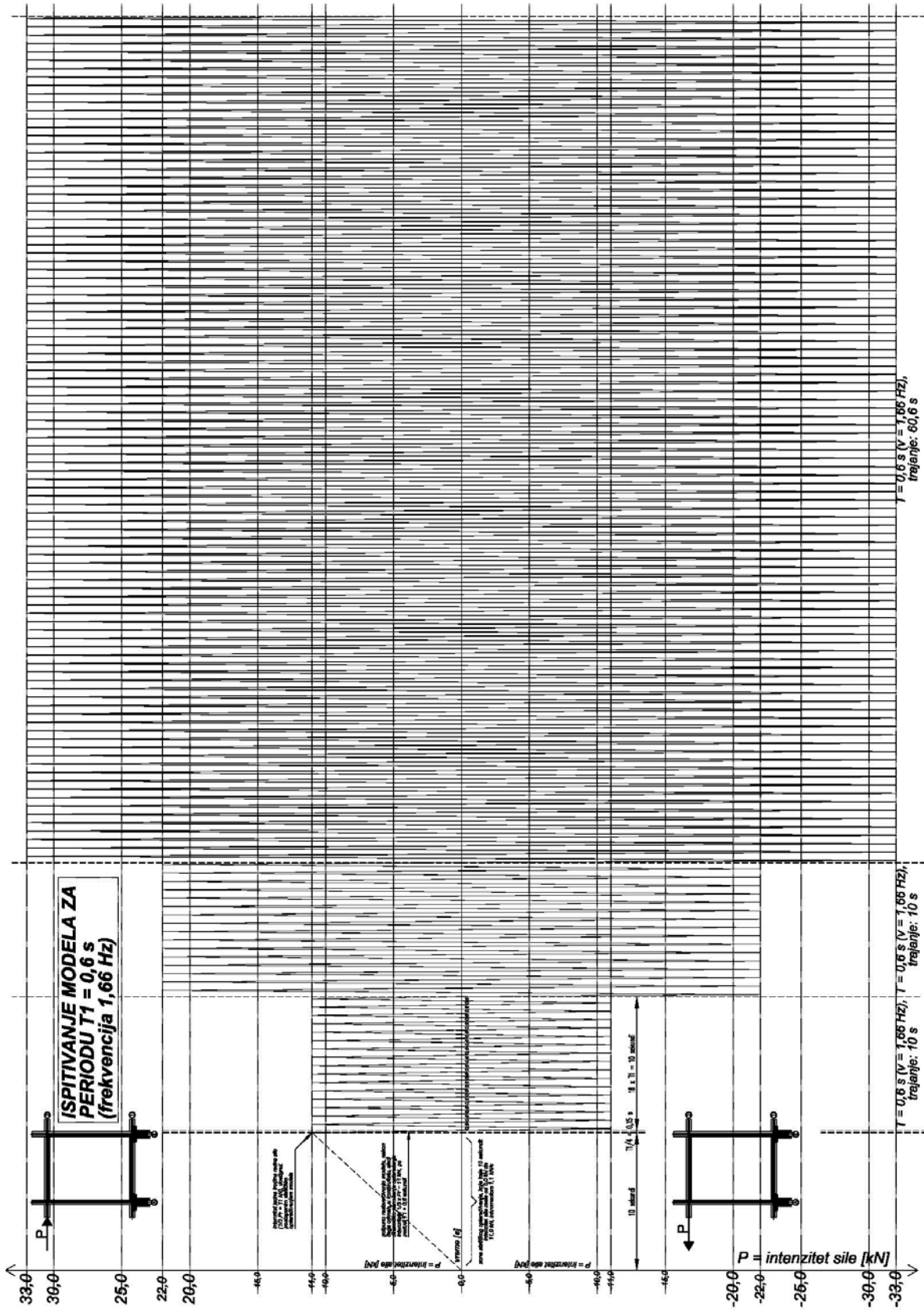
За динамичка испитивања дефинисани су улазни параметри добијени на основу истраживања која су обављена у оквиру поглавља (3) овог рада, затим на основу података добијених од републичког сеизмолошког завода, док су узете у обзир и могућности, односно ограничења лабораторијске опреме.



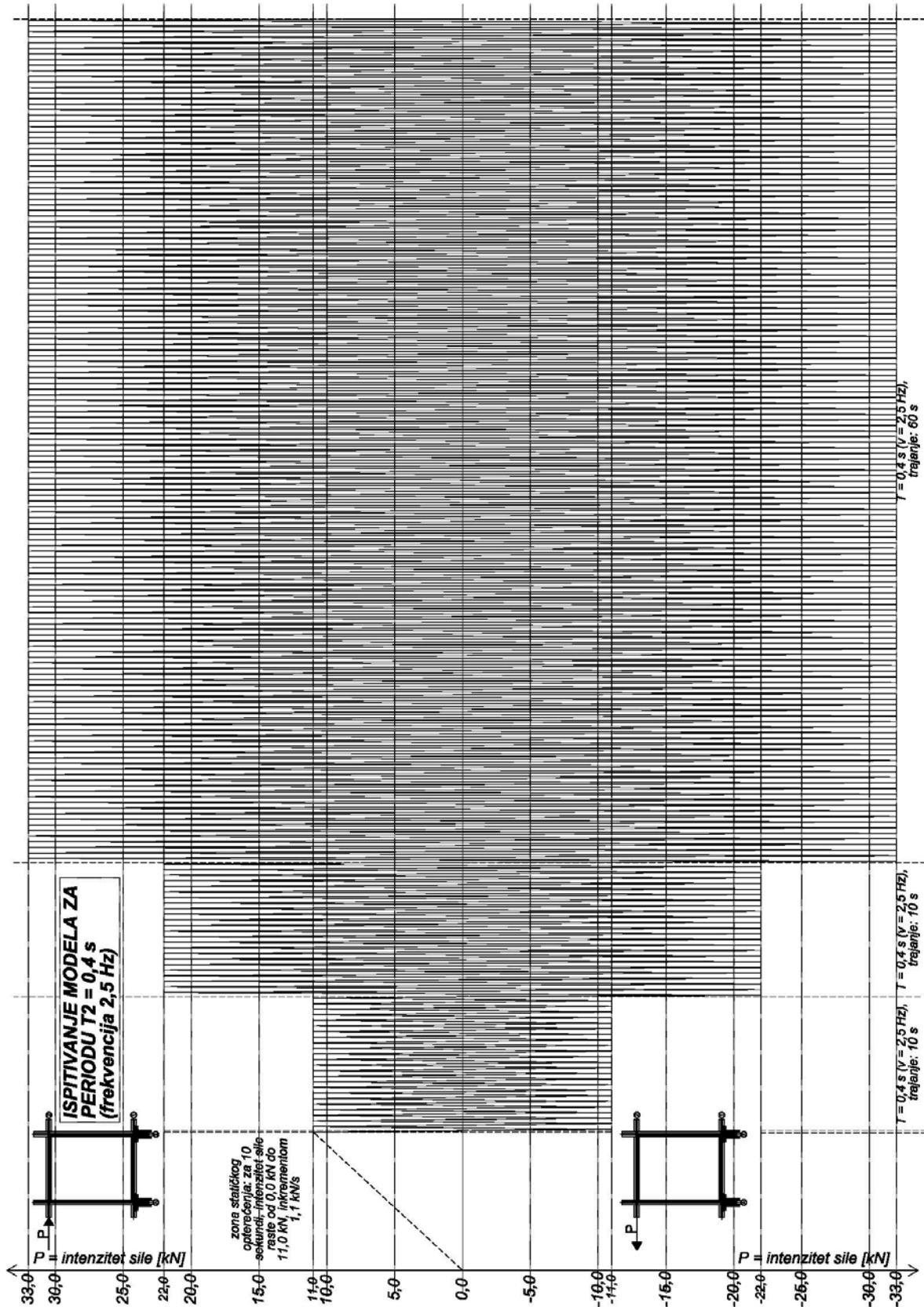
Слика 4.4.27: дијаграм односа спектралне акцелерације и периоде, добијен од републичког сеизмолошког завода



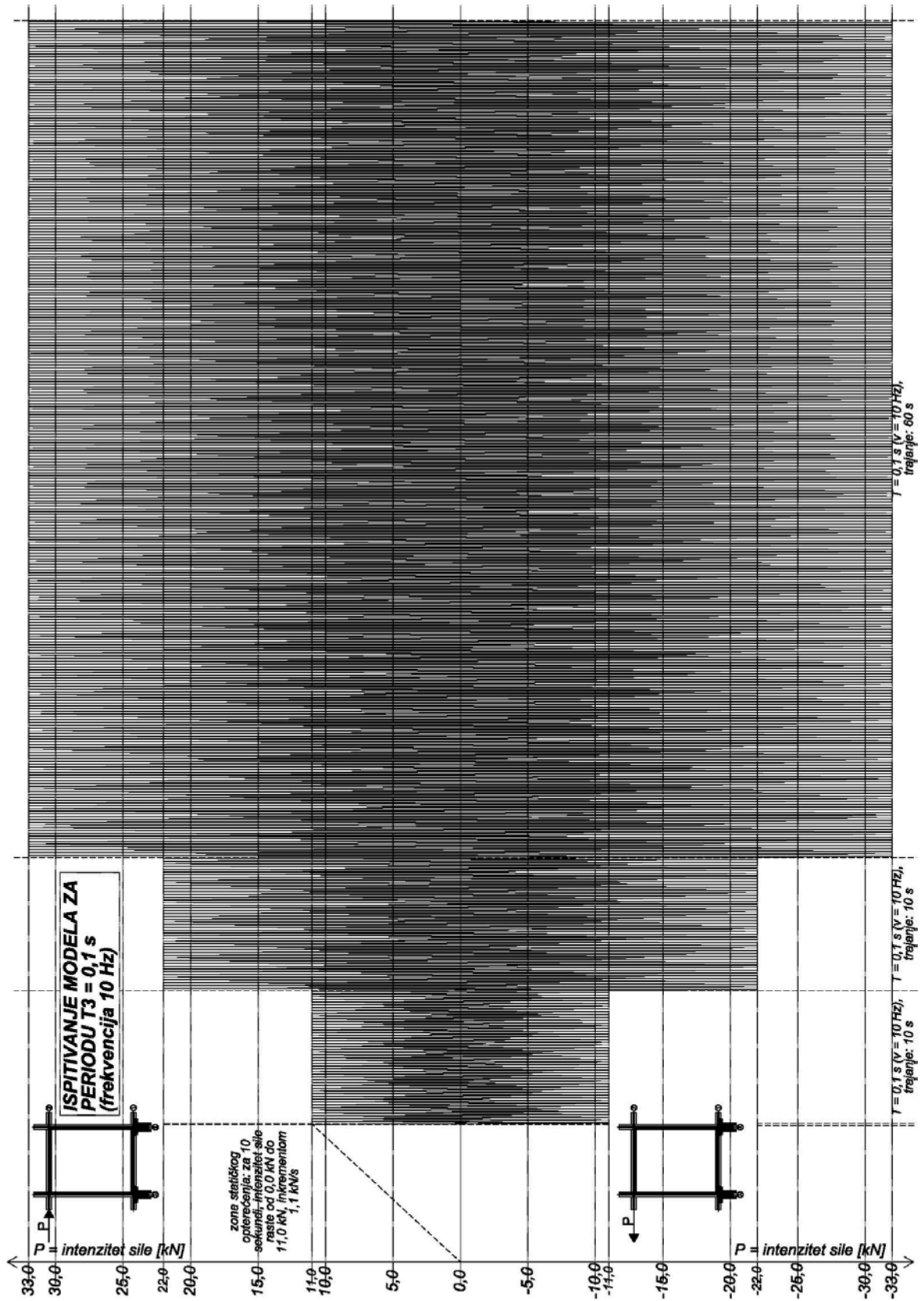
Слика 4.4.28: динамичко испитивање на фреквенцији 1.66 Hz, почетни део



Слика 4.4.29: програм динамичког испитивање на фреквенцији 1.66 Hz, у целини



Слика 4.4.30: програм динамичког испитивања на фреквенцији 2.5 Hz



Слика 5.4.31: програм динамичког испитивања на фреквенцији 10 Hz

Имајући у виду велика померања испитног панела током испитивања (вредности померања су одређене статичким испитивањем прототипа панела), параметри су делимично кориговани узимајући у обзир ограничења машине за динамичко испитивања – пулзатора, али у сагласности са оквирима предлога параметара добијених прорачуном. Испитивања су изведена у више фаза:

- Фаза 1: Фреквенција промене силе $\nu_1 = 0,5$ Hz, уз варирање динамичке силе и времена дејства силе

Динамичка сила $F = 11$ kN, 15 циклуса, трајање 30 секунди;

Динамичка сила $F = 22$ kN, 15 циклуса, трајање 30 секунди;

Динамичка сила $F = 33$ kN, 15 циклуса, трајање 30 секунди.

- Фаза 2: Фреквенција промене силе $\nu_2 = 1,6$ Hz, уз варирање динамичке силе и времена дејства силе, односно броја циклуса.

Динамичка сила $F = 11$ kN, 48 циклуса, трајање 30 секунди;

Динамичка сила $F = 22$ kN, 48 циклуса, трајање 30 секунди;

Динамичка сила $F = 33$ kN, 48 циклуса, трајање 30 секунди.

- Фаза 3: Фреквенција промене силе $\nu_3 = 2,5$ Hz, уз варирање динамичке силе и времена дејства силе, односно броја циклуса.

Динамичка сила $F = 11$ kN, 150 циклуса, трајање 60 секунди;

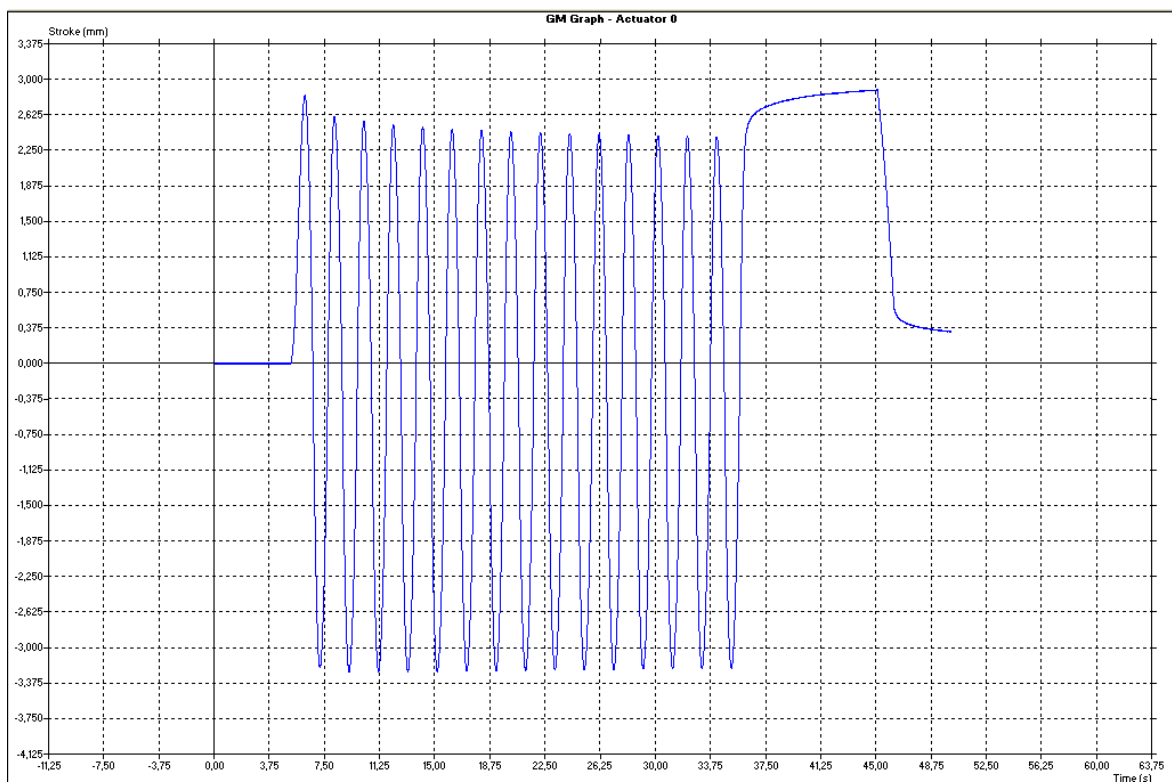
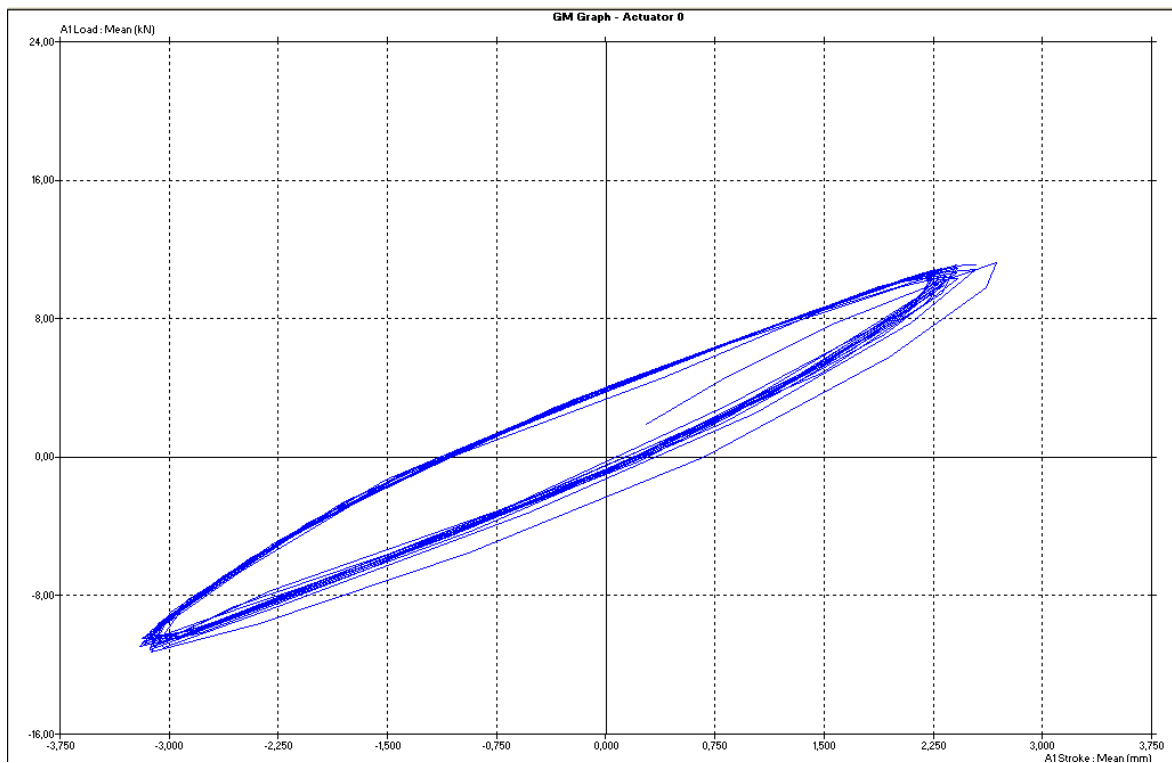
Динамичка сила $F = 22$ kN, 150 циклуса, трајање 60 секунди;

Динамичка сила $F = 33$ kN, 150 циклуса, трајање 60 секунди.

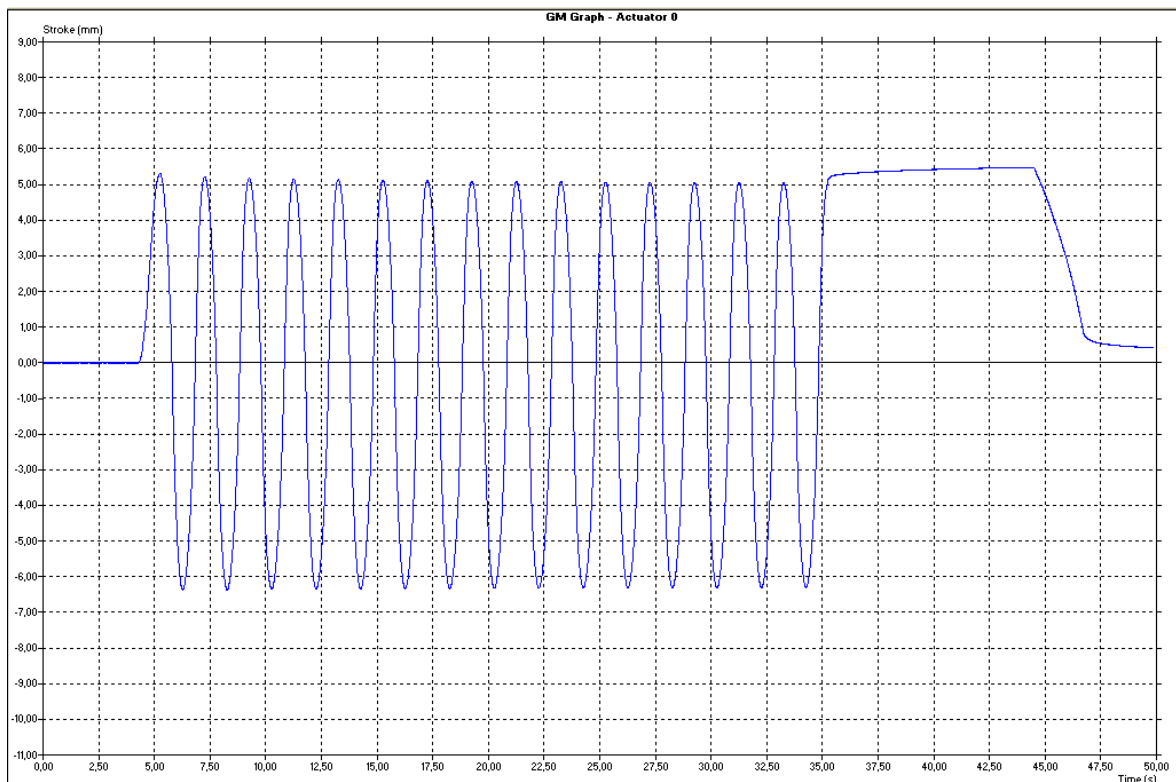
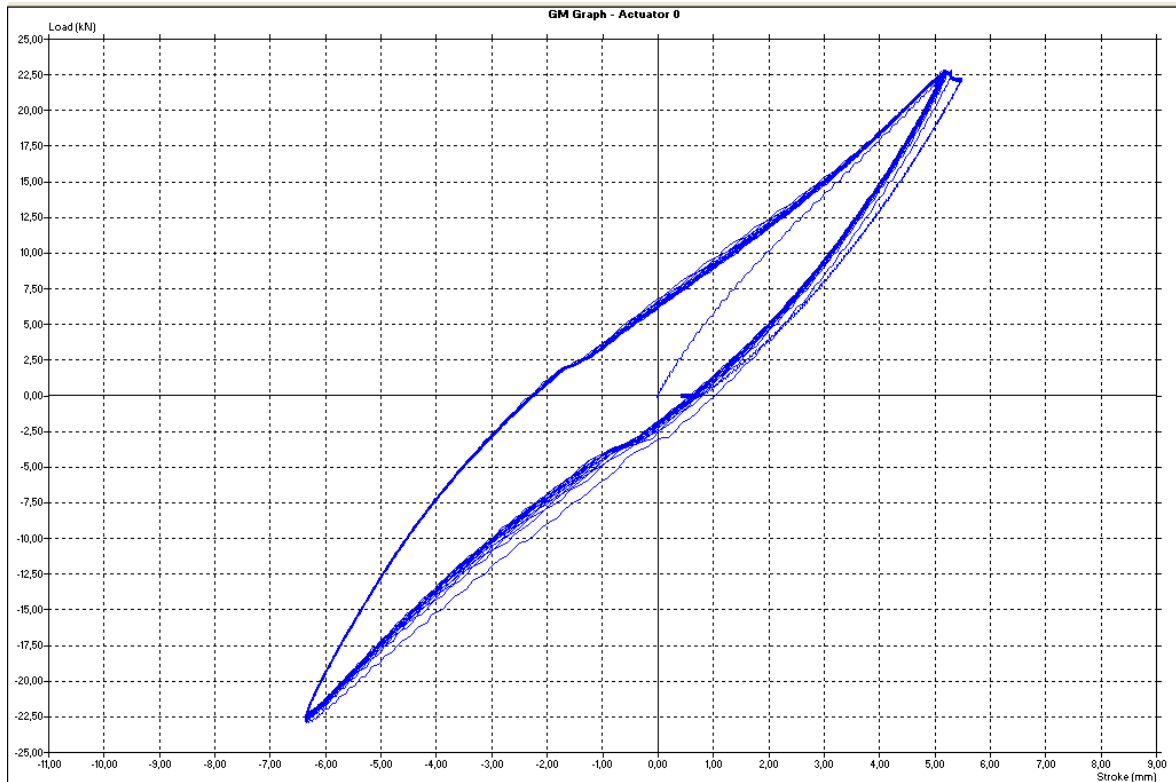
Само на једном узорку експерименталног модела са испуном од клирита, извршена је још једна фаза испитивања, са циљем да се утврди понашање конструкције ван прорачунских вредности сила.

- Фаза 4: Фреквенција промене силе $\nu_2 = 1,6$ Hz, динамичка сила $F = 50$ kN, 96 циклуса.

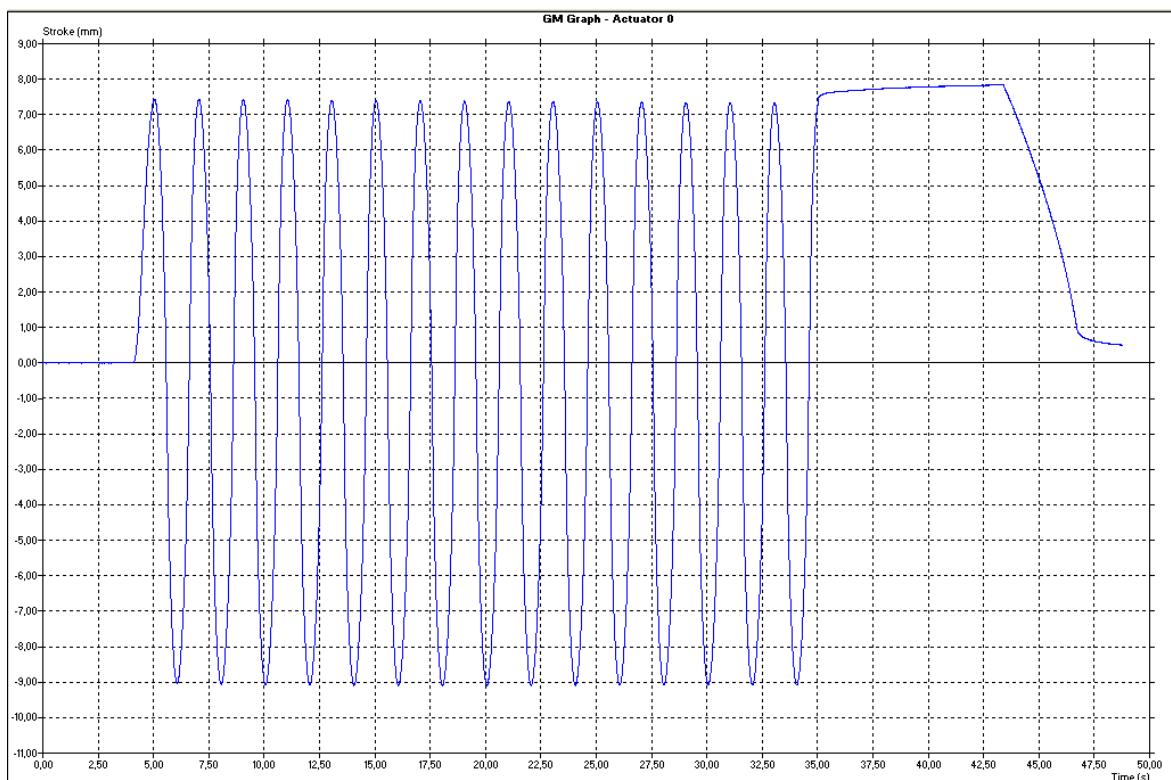
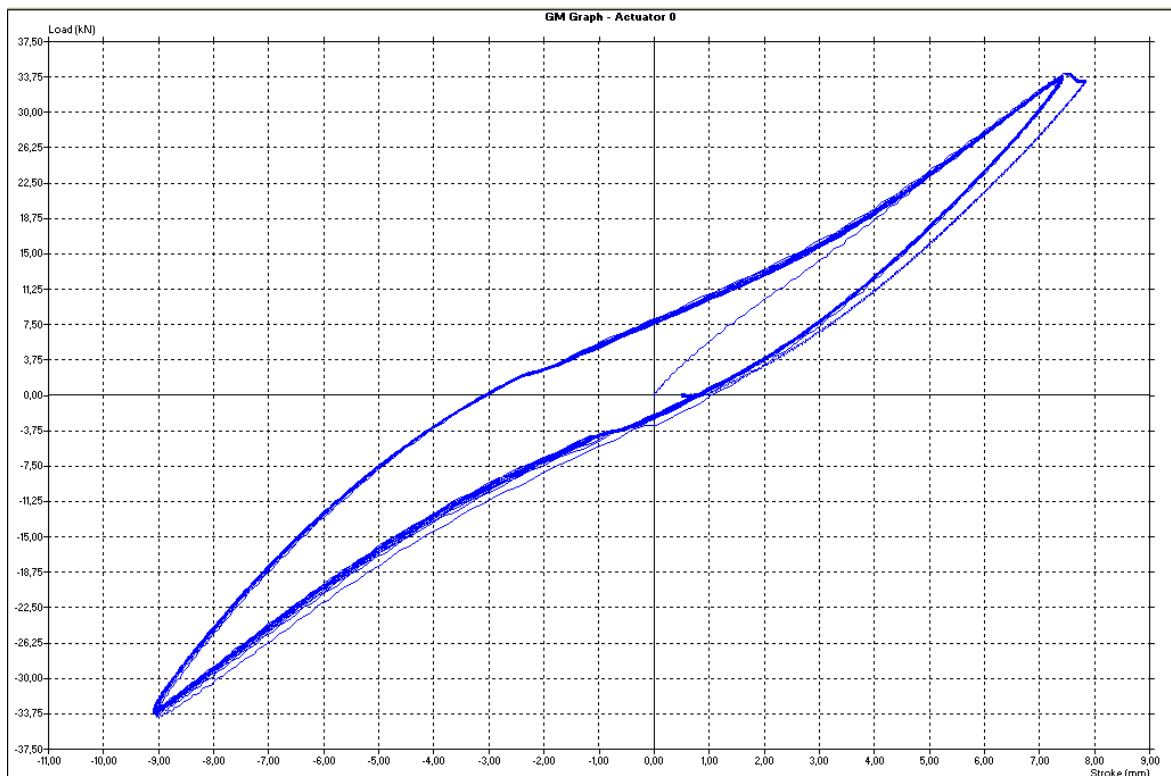
Све фазе испитивања, осим фазе 4, спроведене су на експерименталним моделима са испуном од ламелираног стакла и поновљене за панеле са испуном од поликарбоната/клирита. Резултати испитивања су приказани дијаграмски и дати на сликама које следе.



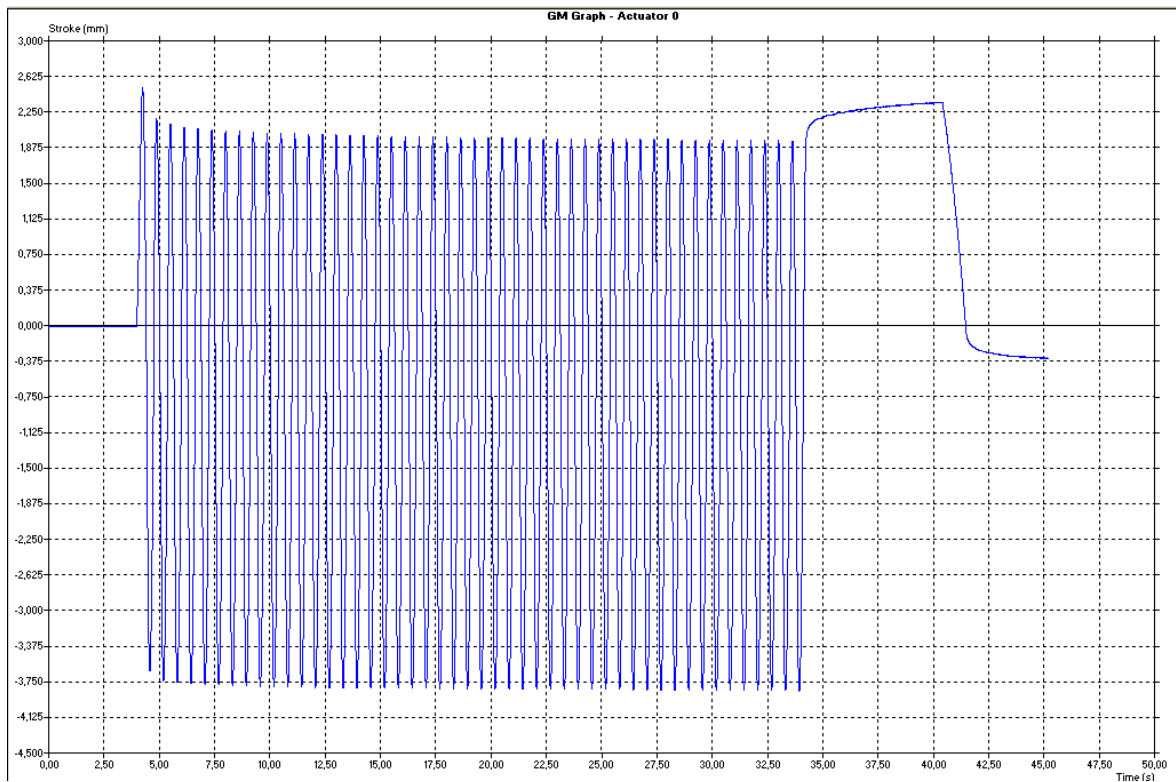
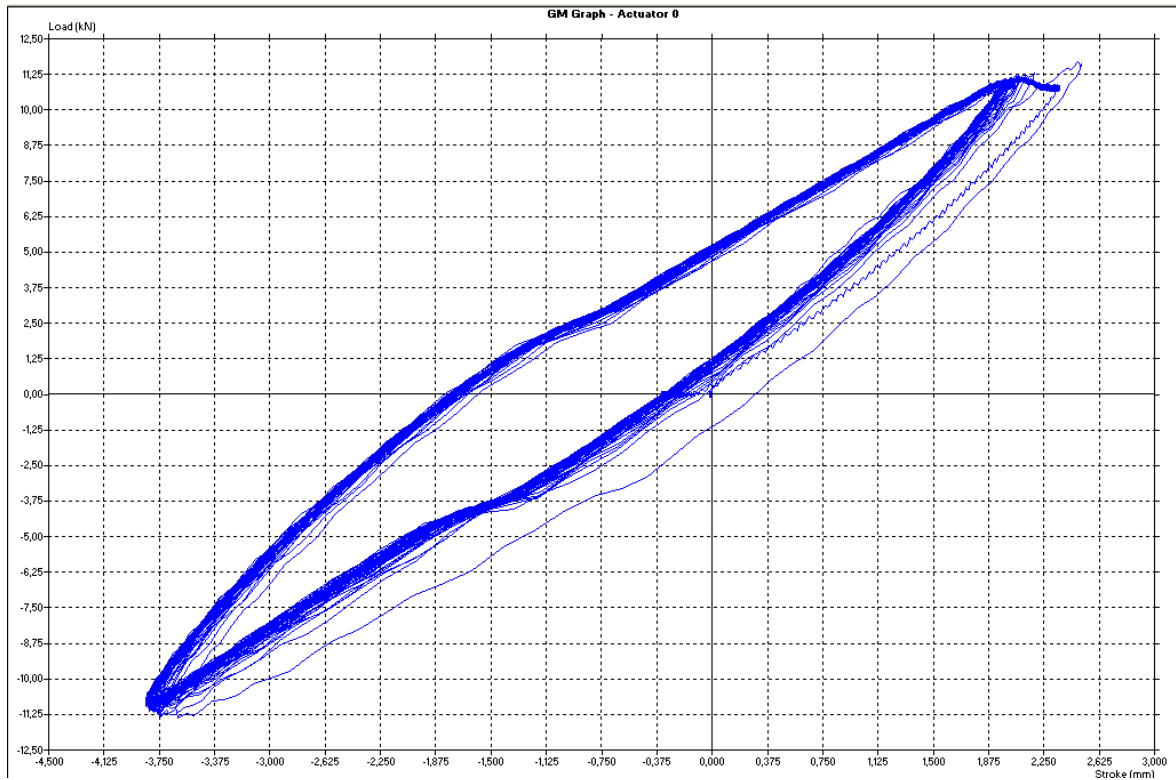
Слике 4.4.32 и 4.4.33: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $\nu_1 = 0,5 \text{ Hz}$, $FD = 11 \text{ kN}$, 15 циклуса



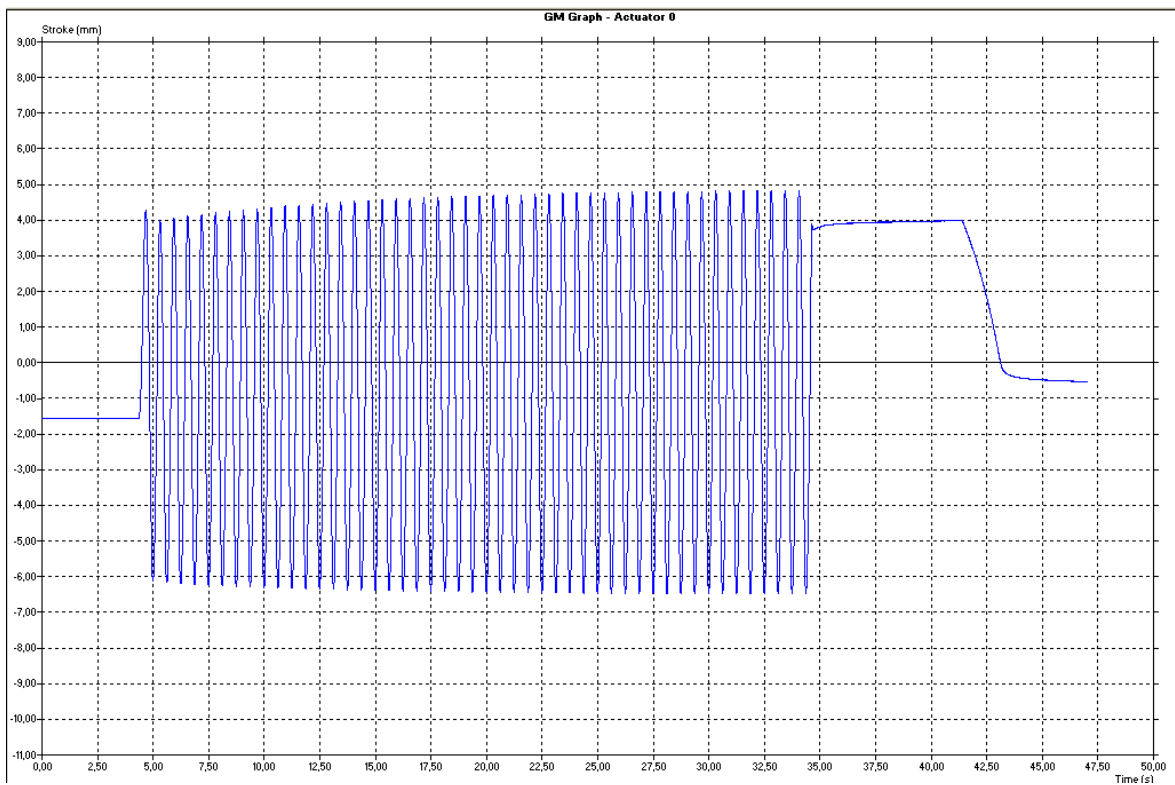
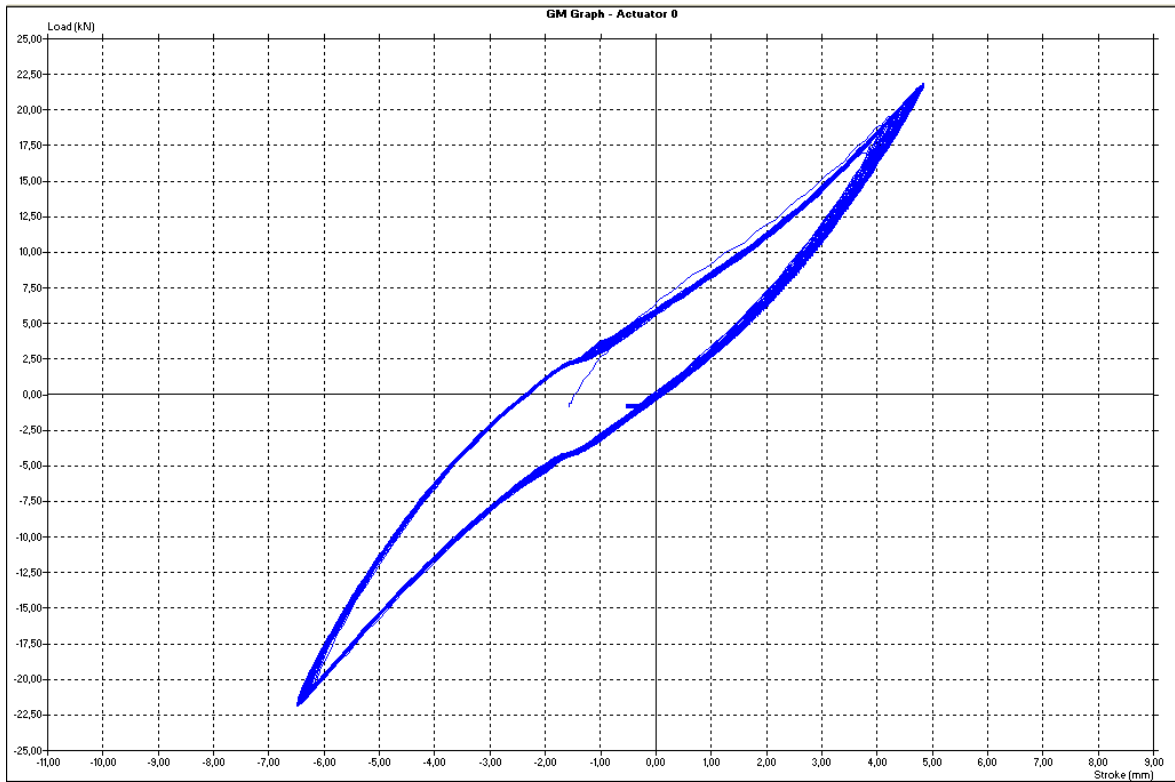
Слике 4.4.34 и 4.4.35: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $v_1 = 0,5 \text{ Hz}$, $FD = 22 \text{ kN}$, 15 циклуса



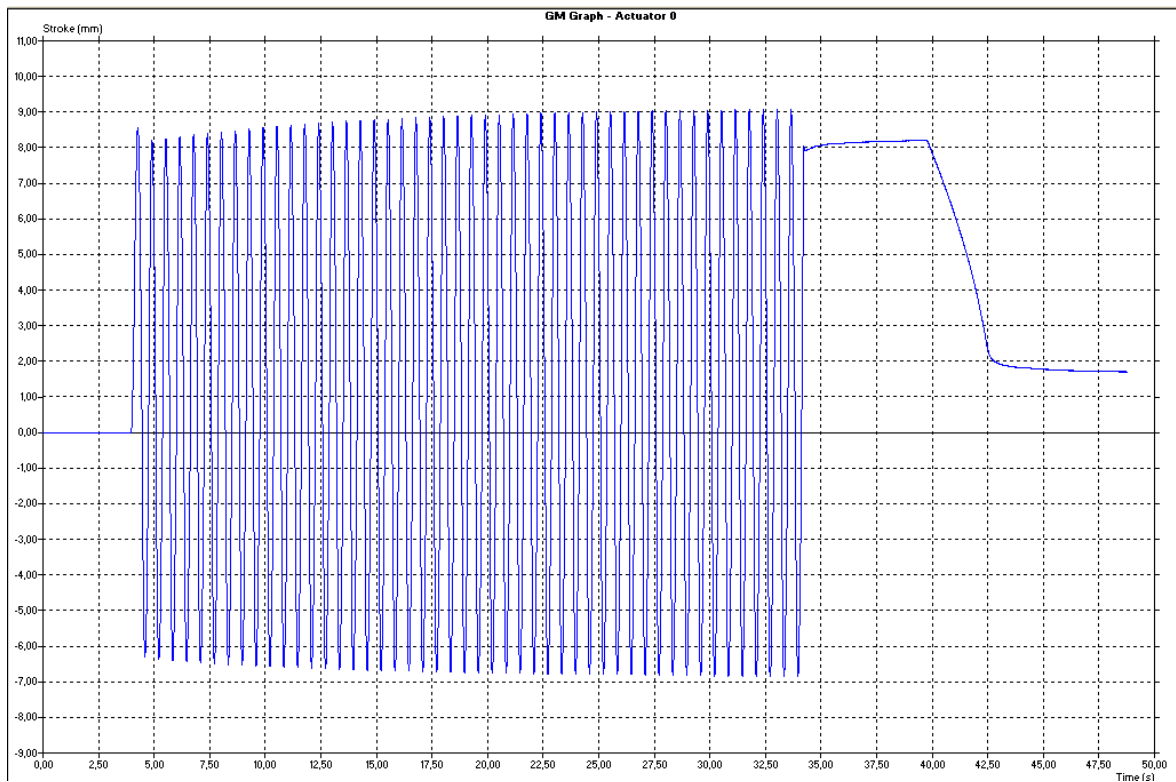
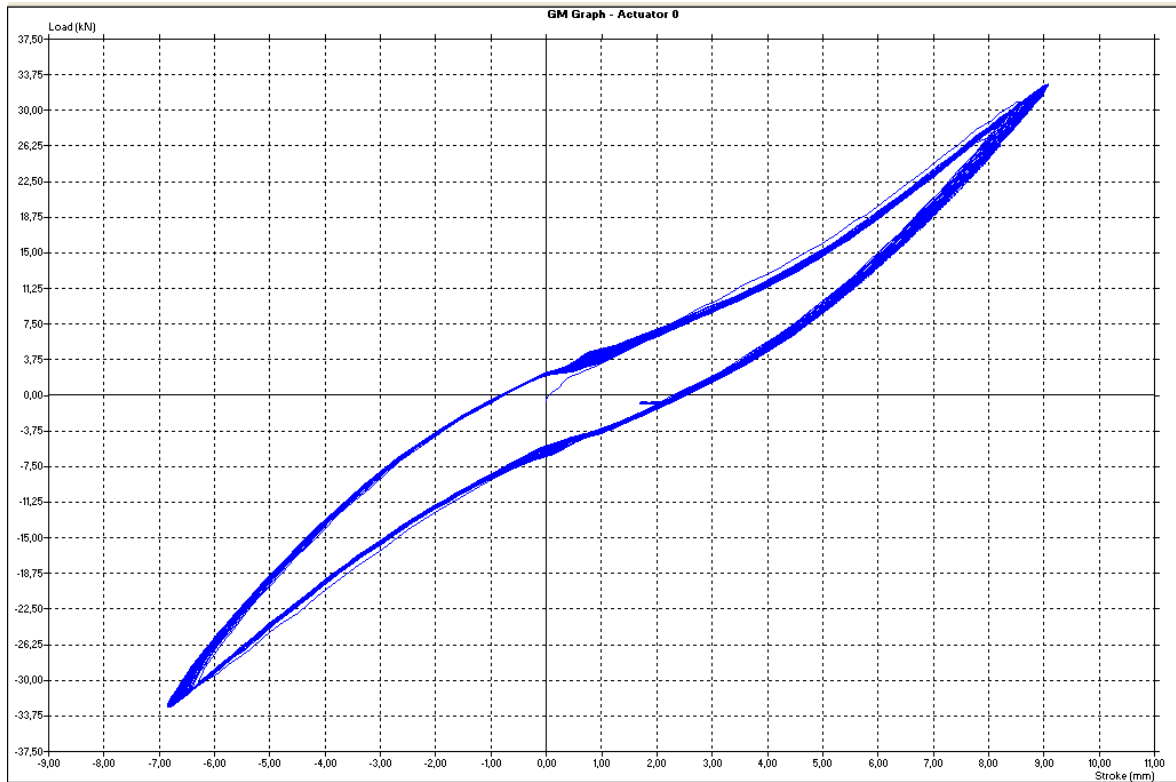
Слике 4.4.36 и 4.4.37: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $v_1 = 0,5 \text{ Hz}$, $F_D = 33 \text{ kN}$, 15 циклуса



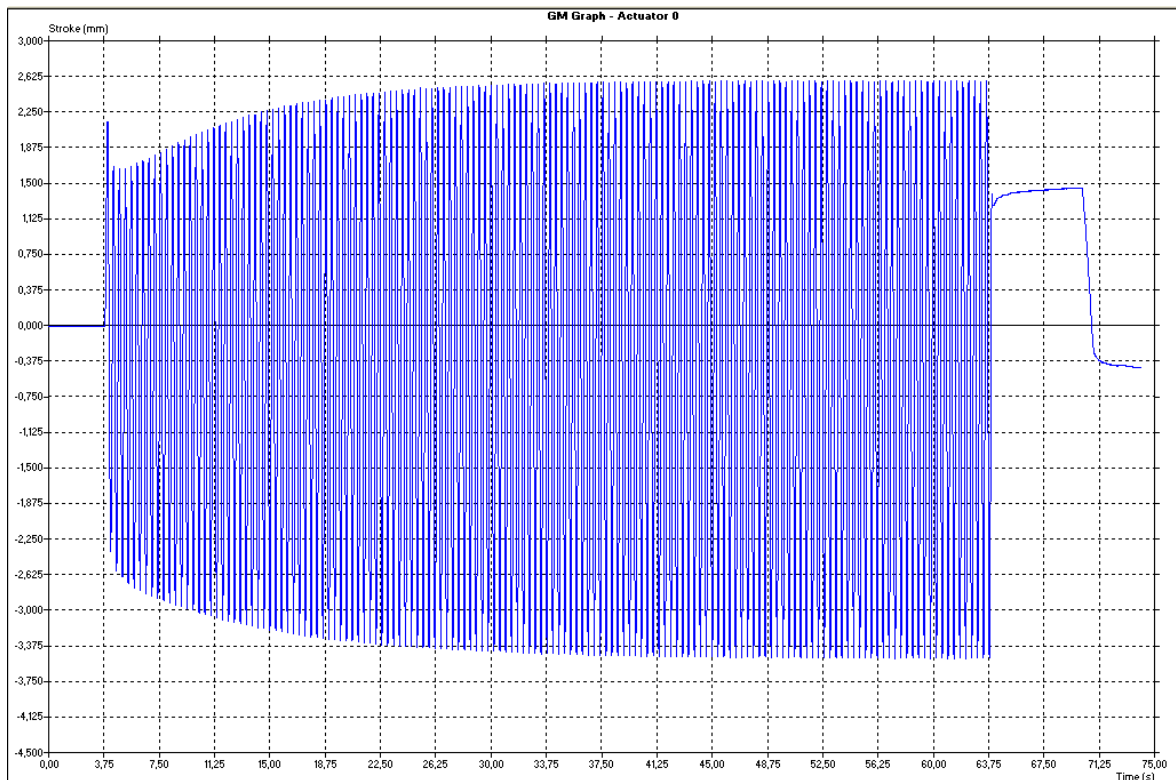
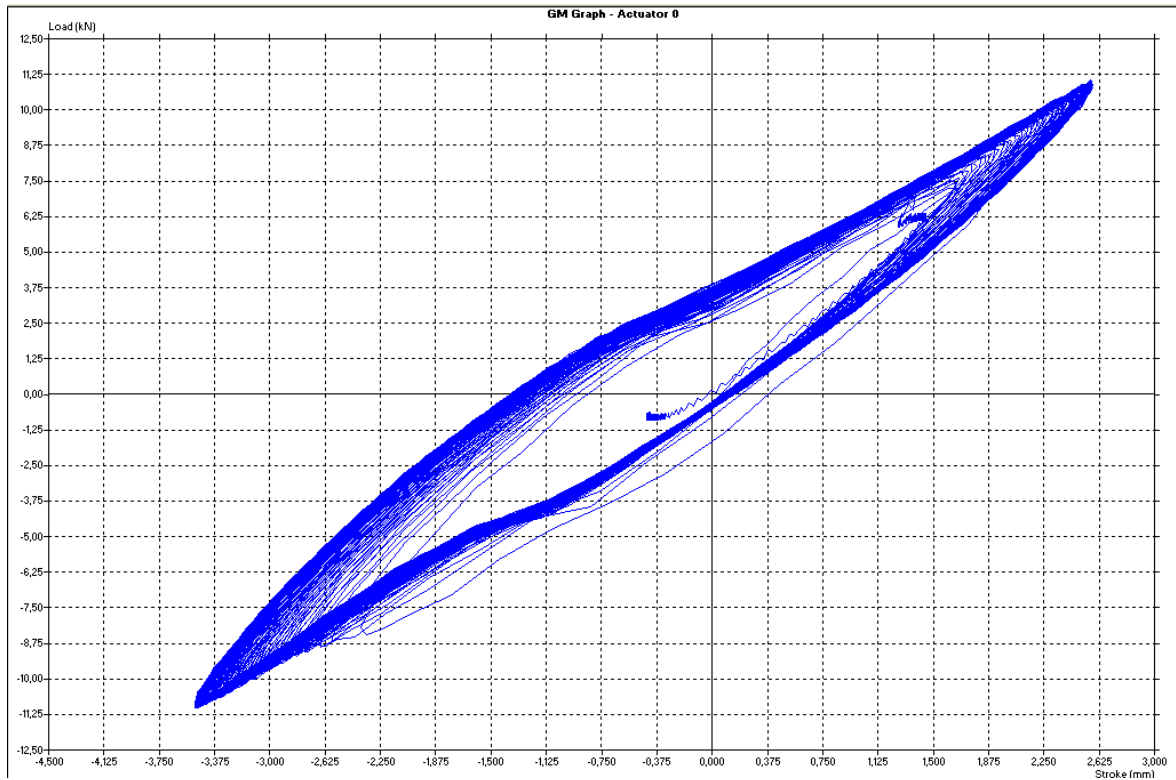
Слике 4.4.38 и 4.4.39: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $v_2 = 1,6 \text{ Hz}, F_D = 11 \text{ kN}, 48 \text{ циклуса}$



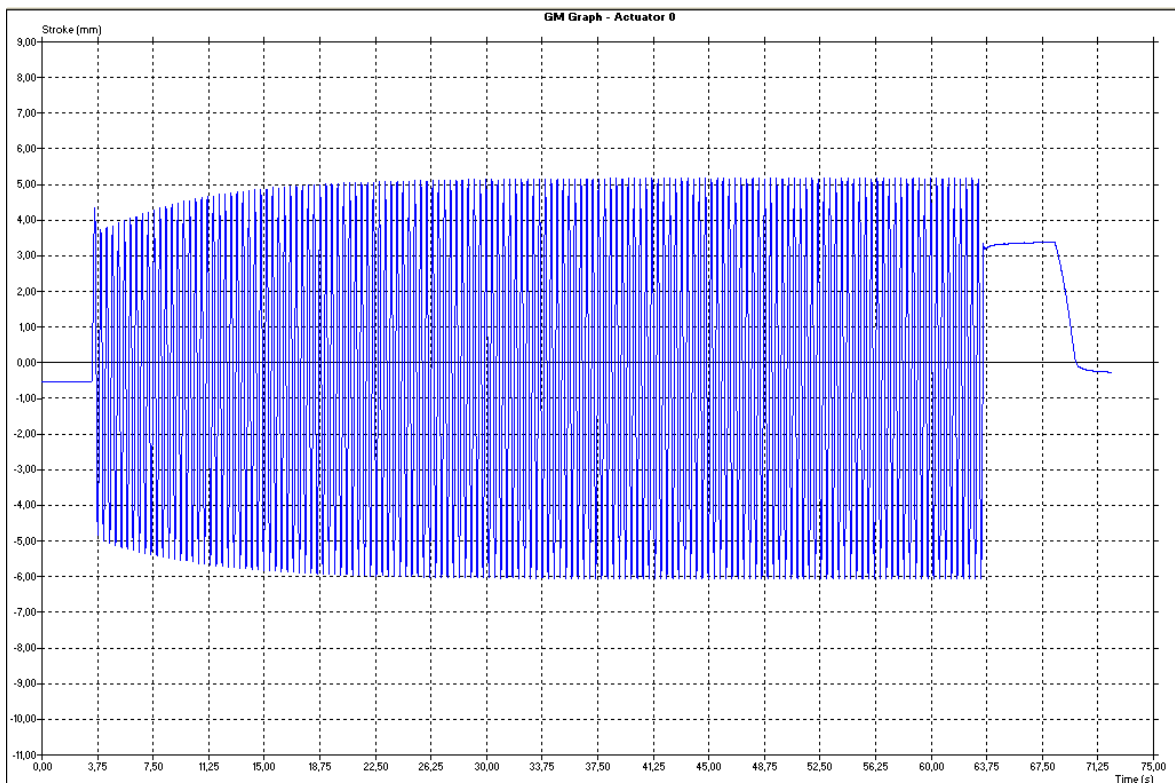
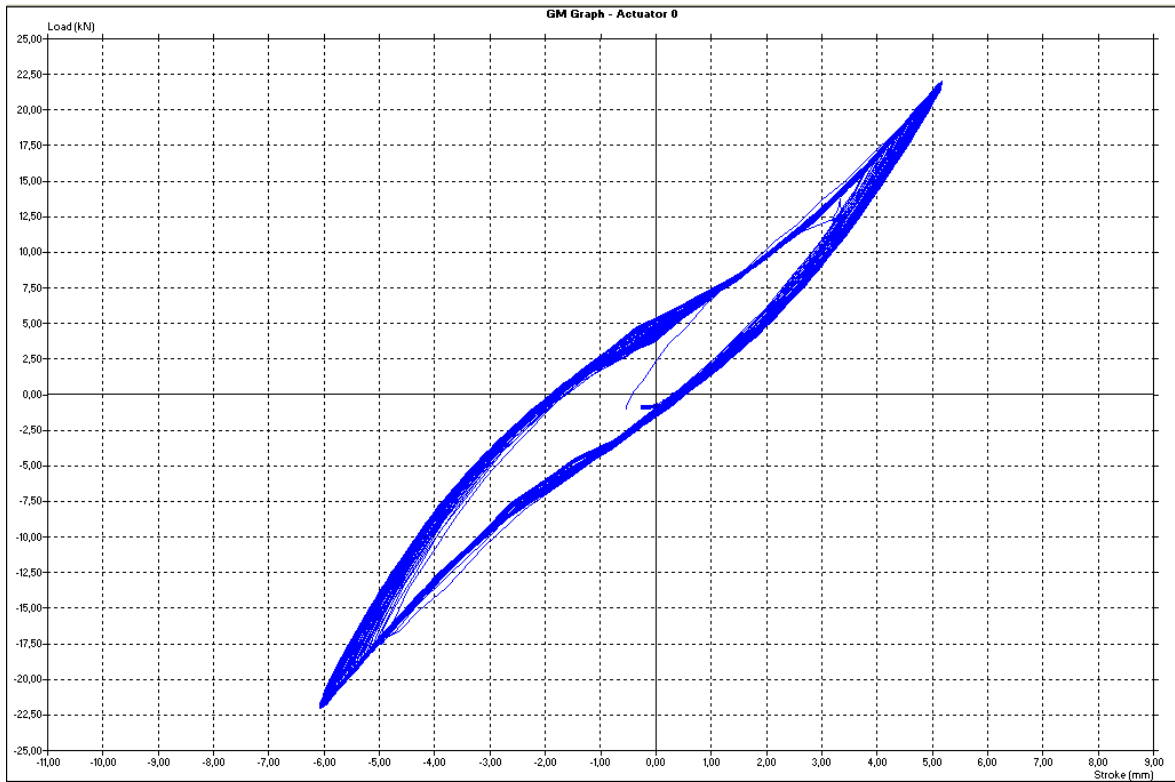
Слике 4.4.40 и 4.4.41: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $v_2 = 1,6 \text{ Hz}$, $F_D = 22 \text{ kN}$, 48 циклуса



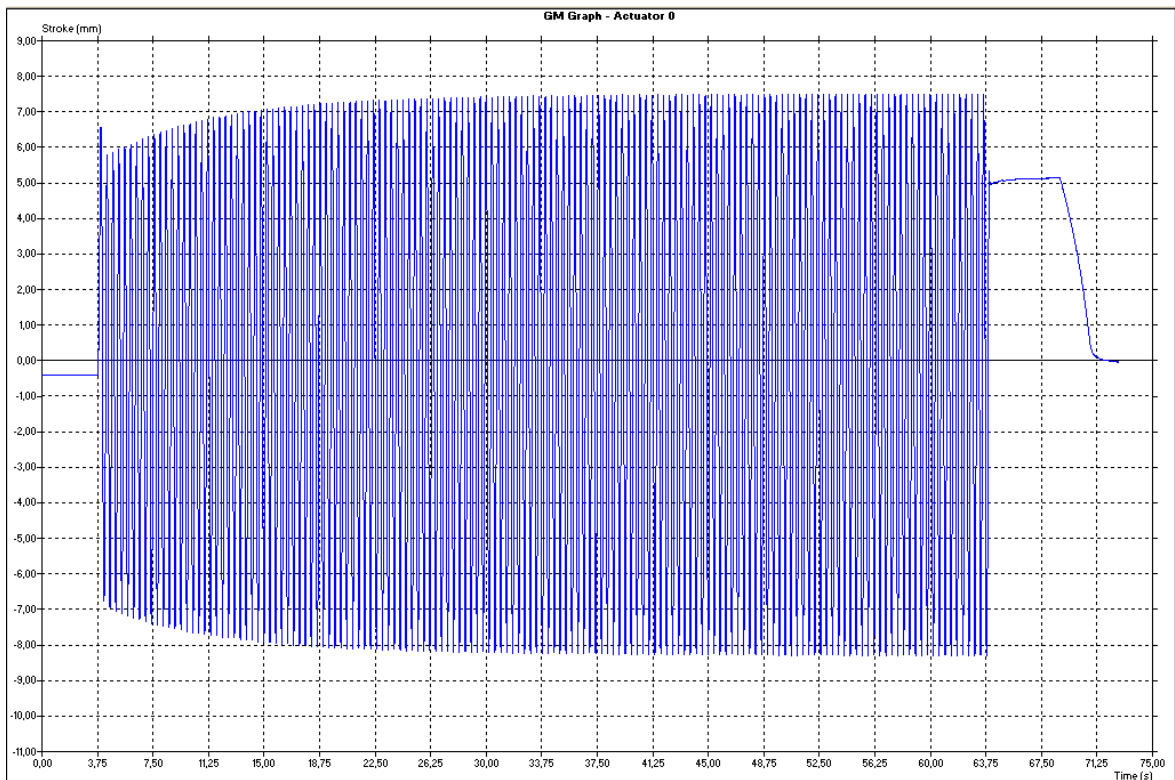
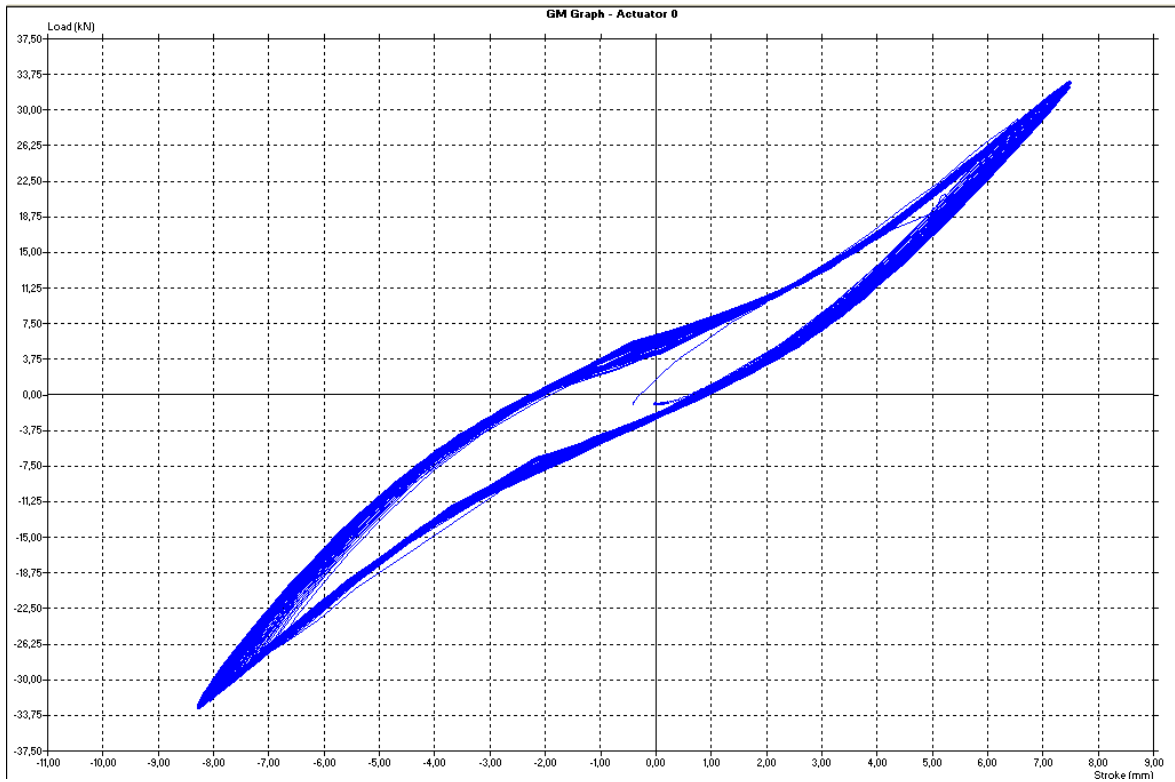
Слике 4.4.42 и 4.4.43: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $v_2 = 1,6 \text{ Hz}$, $F_D = 33 \text{ kN}$, 48 циклуса



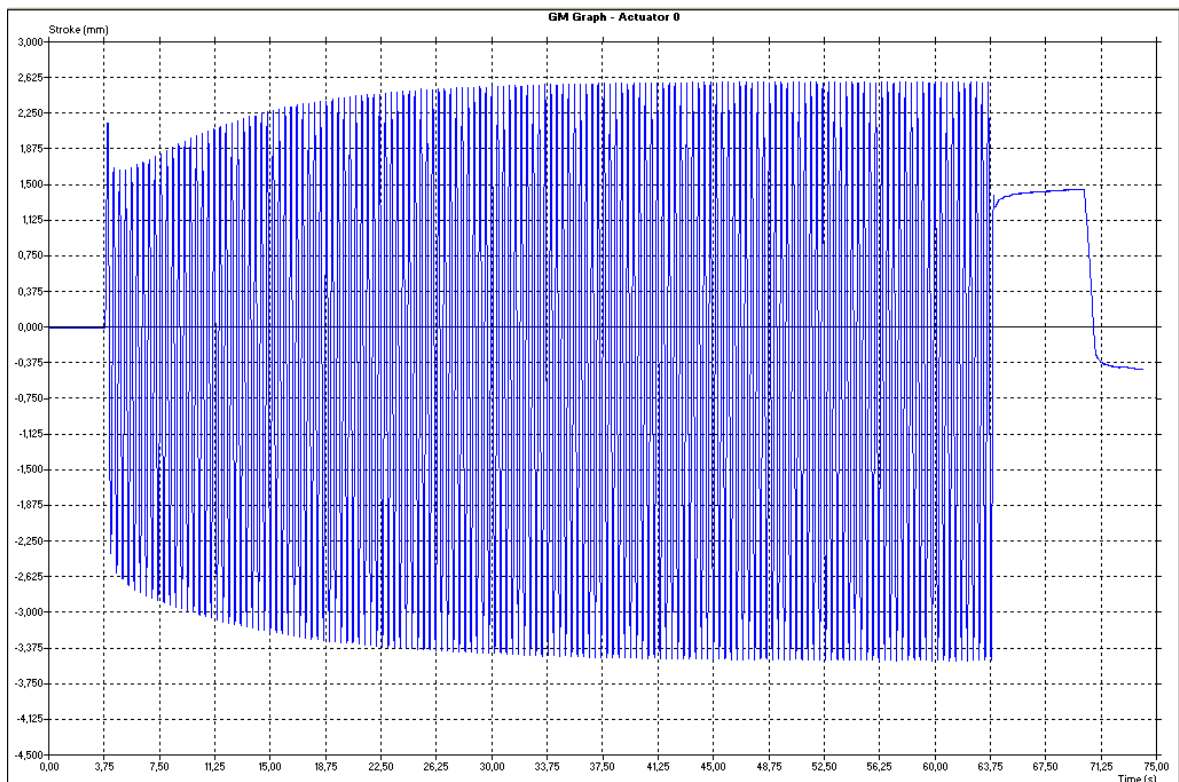
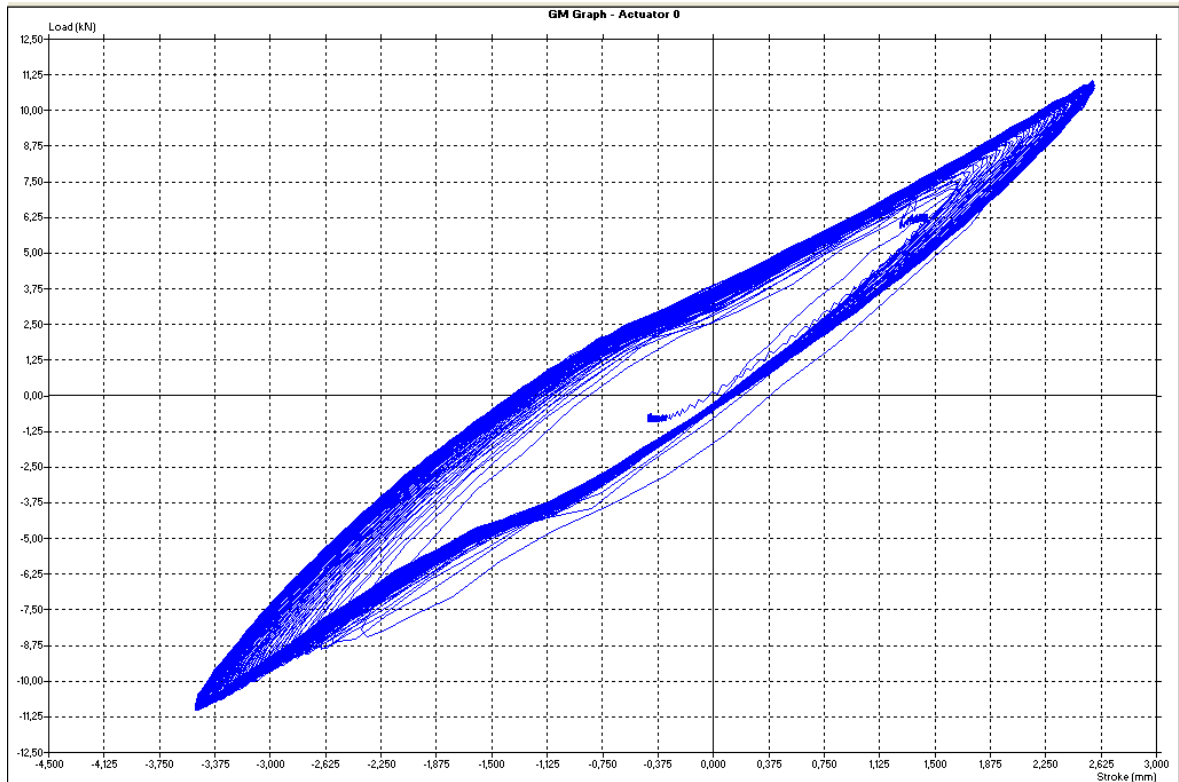
Слике 4.4.44 и 4.4.45: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $\nu_3 = 2,5 \text{ Hz}$, $F_D = 11 \text{ kN}$, 150 циклуса



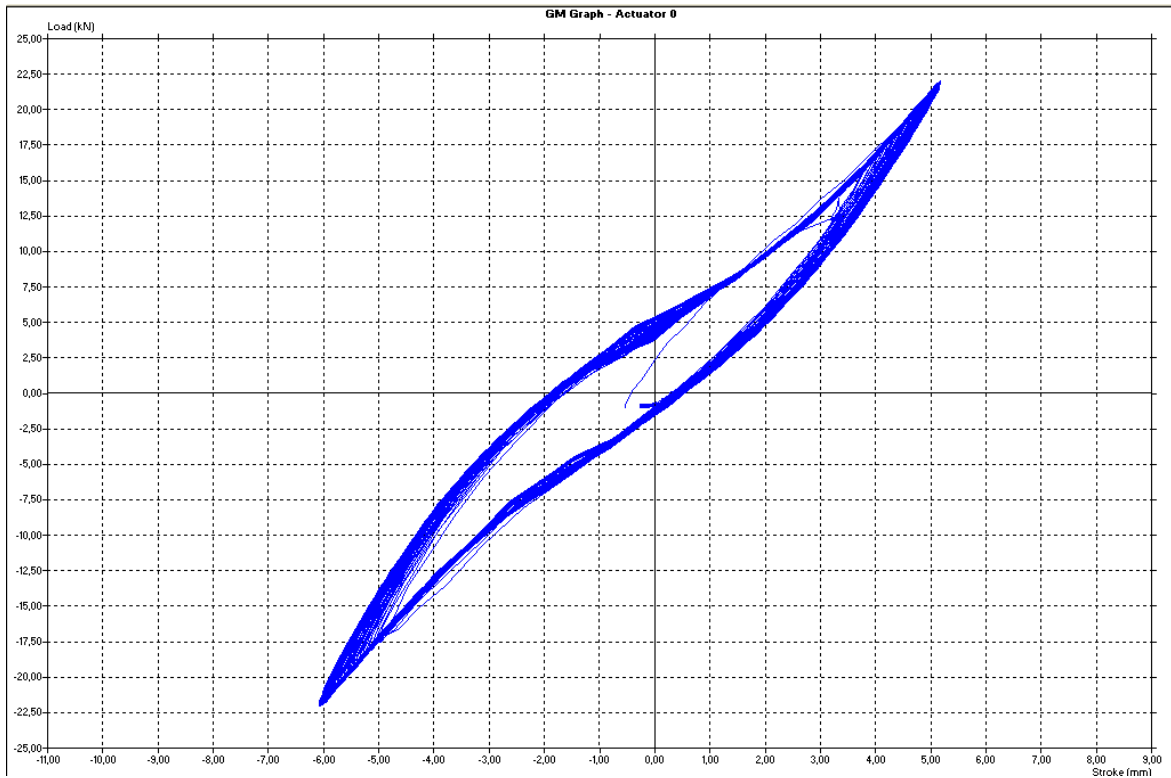
Слике 4.4.46 и 4.4.47: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $v_3 = 2,5 \text{ Hz}$, $F_D = 22 \text{ kN}$, 150 циклуса



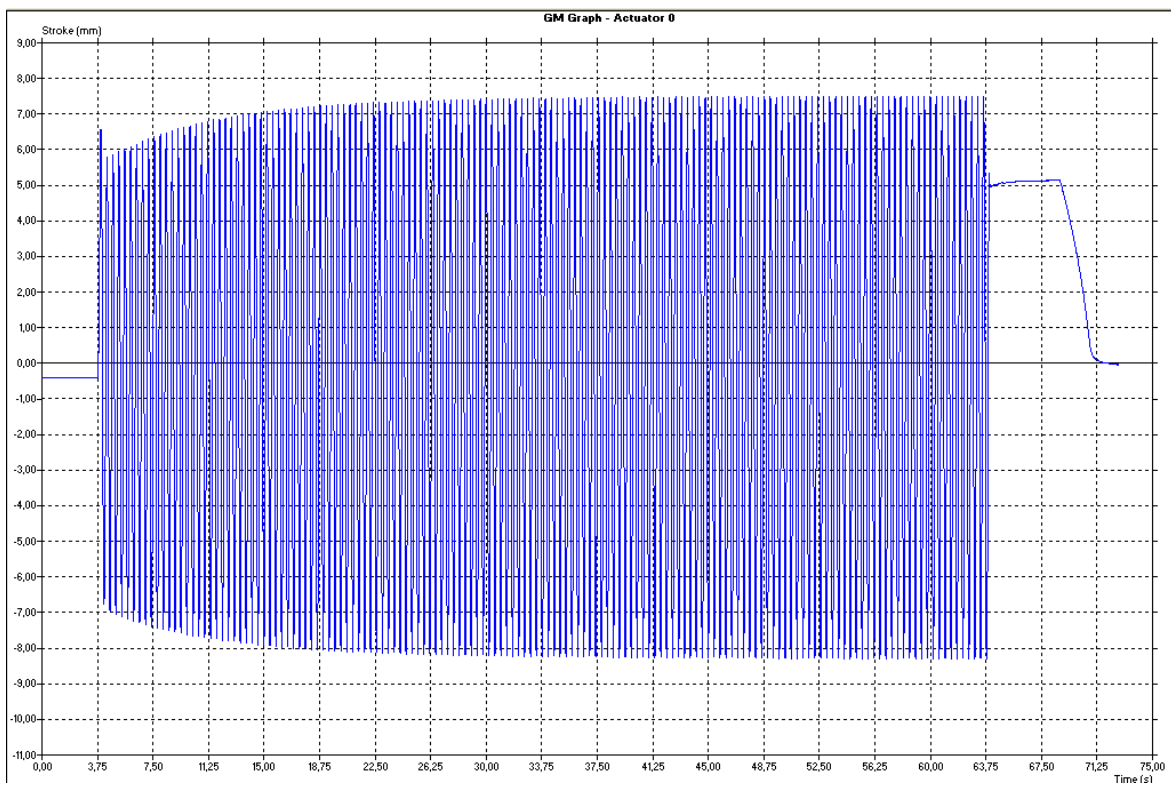
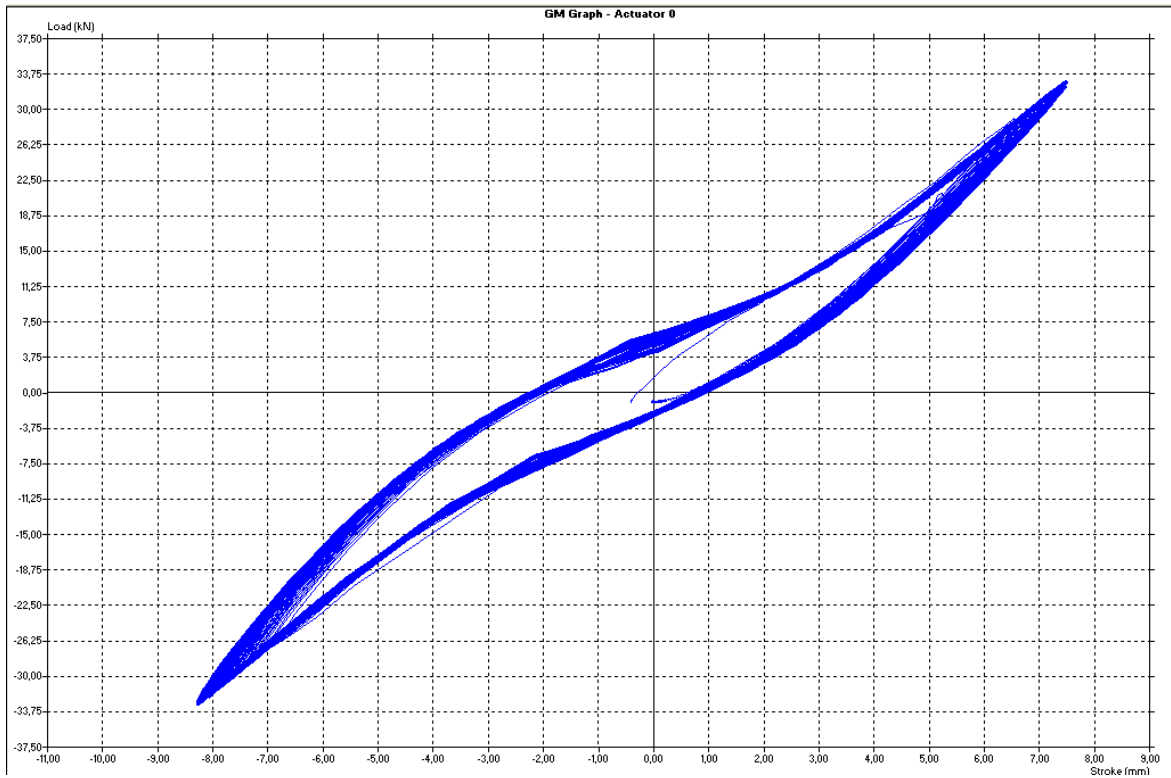
Слике 4.4.48 и 4.4.49: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $v_3 = 2,5 \text{ Hz}$, $F_D=33 \text{ kN}$, 150 циклуса



Слике 4.4.50 и 4.4.51: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $v_4 = 2,6 \text{ Hz}$, $F_D = 11 \text{ kN}$, 150 циклуса



Слике 4.4.52 и 4.4.53: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $\nu_4 = 2,6 \text{ Hz}$, $F_D = 22 \text{ kN}$, 150 циклуса



Слике 4.4.54 и 4.4.55: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита
 $\nu_4 = 2,6 \text{ Hz}$, $F_D = 33 \text{ kN}$, 150 циклуса

Након ове фазе испитивања панела са ламелираном испуном од поликарбоната/клирита, у циљу добијања и поређења података померања у функцији силе, извађена је испуна од клирита. Таква, „празна” челична конструкција рама је испитивана променљивом силом на затезање и притискивање са истим параметрима (фазе 1 – 3). Овим испитивањем је омогућено да се пореде подаци испитивања са испуном и без ње.

Након динамичких испитивања челичне конструкције рама без испуне, настављена су испитивања, односно настављена је фаза 2, кроз испитивања панела са испуном од стакла и клирита.

На основу обављених испитивања модела на бази ламелираног стакла од 28. 03. 2014. и 09. 04. 2014. године и модела на бази клирита од 28. 02. 2014. и 03. 04. 2014. године, направљено је поређење понашања модела са две различите врсте испуне, што је дато у наставку рада.

У првом примеру, директно су поређени: модел са испуном од ламелираног стакла испитиван 28. 03. 2014. године и модел са испуном од ламелираног клирита испитиван 03. 04. 2014. године. У табели су приказане вредности померања за различите улазне параметре (фреквенција, број циклуса, интензитет силе). Померања су дефинисана у позитивном (+) и негативном (-) смеру. Испод сваког пара позитивног / негативног померања, у истом пољу табеле уписано је и апсолутно (укупно, сабрано) померање, као збир апсолутних вредности позитивног и негативног померања. Апсолутно померање је меродаван и илустративан податак, који показује ефикаснији рад модела са испуном од ламелираног клирита у односу на модел са испуном од ламелираног стакла. Најизразитија разлика у померању два модела са различитим испунама види се код максималног интензитета силе (50 kN), где је померање модела са испуном од ламелираног клирита мање за 21%.

У другом примеру, директно су поређени: модел са испуном од ламелираног стакла испитиван 09. 04. 2014. године и модел са испуном од ламелираног клирита испитиван 28. 02. 2014. године. У табеларном приказу добијених вредности померања, види се још изразитија разлика у корист модела са испуном од ламелираног клирита, који се услед дејства максималне силе од 50 kN, померио чак 33% мање од модела са испуном од ламелираног стакла.

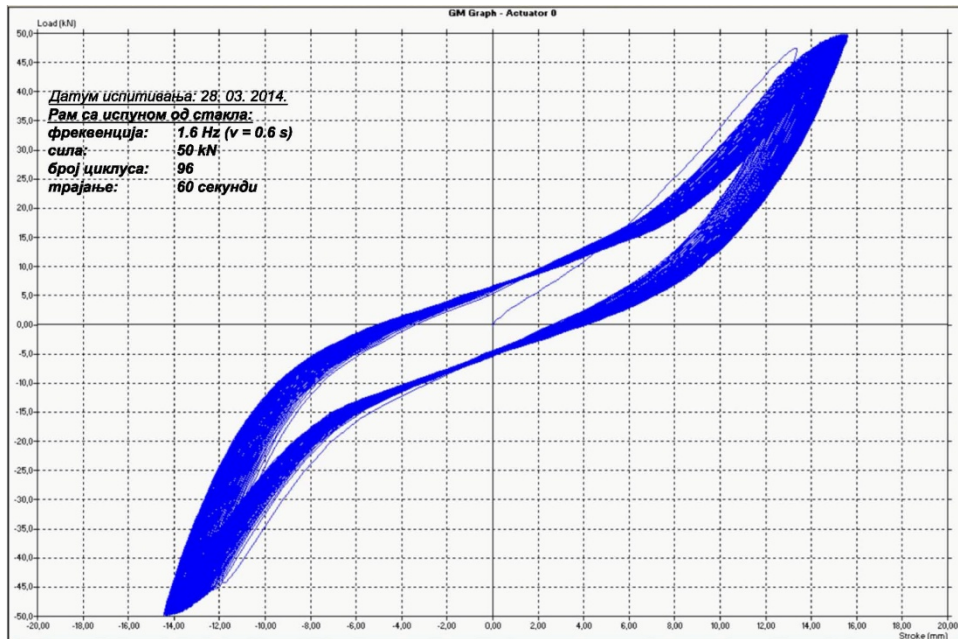
Треба уочити значајну разлику у понашању модела са испуном од ламелираног стакла испитиваног 28. 03. 2014. и модела са истом врстом испуне, испитиваног 09. 04. 2014. године, где се овај први знатно боље понаша и показује мање вредности померања, под истим условима спољног дејства. Такође треба уочити да такве разлике нису изражене код два различита модела са испуном од ламелираног клирита, који су испитивани 28. 02. 2014. и 03. 04. 2014. године. Може се закључити да код модела са испуном од ламелираног клирита постоји већи ниво компактности и заједничког дејства, у односу на моделе са испуном од ламелираног стакла, код којих је, под истим условима, теже остварити садејство различитих материјала који чине модел.

Модел са испуном од ламелираног клирита, који је првобитно испитиван 28. 02. 2014. године, затим је, док је још био монтиран у лабораторијској опреми, модификован на тај начин што је из њега извађена испуна (панел од ламелираног клирита). На тај начин је за даље испитивање припремљен изолован челични рам, који је третиран у лабораторији 13. 03. 2014. године.

Из претходно обављеног испитивања модела са испуном од ламелираног клирита, обављеног 28. 02. 2014. године, очитани су резултати померања, за различите улазне параметре (фреквенција, број циклуса, интензитет силе). Дефинисана померања су затим аплицирана на челични рам без испуне, а као резултат испитивања су очитани интензитети сила које су се јавиле као реакција рама на задато померање. На овај начин је могуће утврдити удео челичног рама у пријему силе, односно расподелу пријема спољног оптерећења између челичног рама и испуне. Ова расподела је приказана у трећем примеру, где су упоређени интензитети сила и вредности померања за модел са испуном од ламелираног клирита испитиван 28. 02. 2014. године и модел челичног рама без испуне, који је испитиван 13. 03. 2014. године. Челични рам без испуне је третиран само са фреквенцијом 1.6 Hz (0.6 s), из разлога што ограничења лабораторијске опреме спречавају излагање модела фреквенцији од 2.5 Hz (0.4 s), са очитаним вредностима померања.

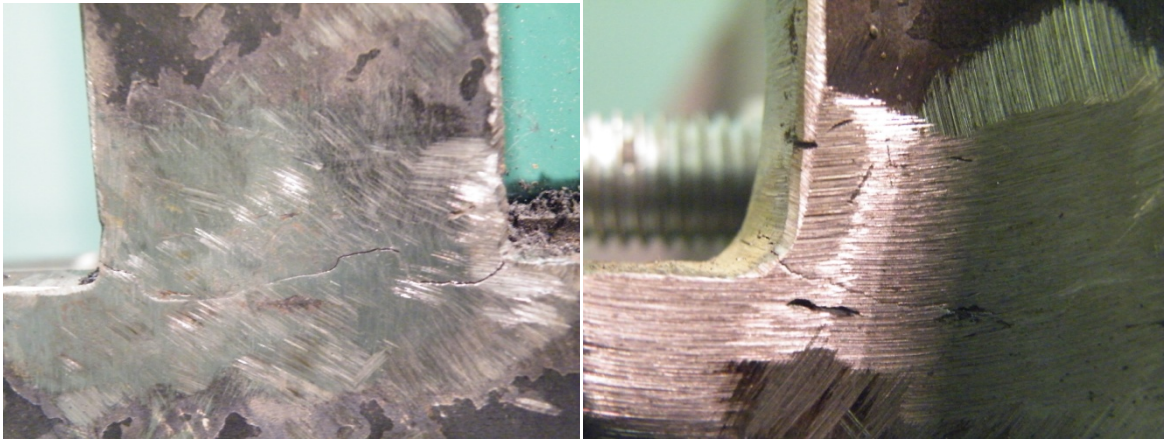
Облици хистерезисних петљи показују правилност и доследност, те се може закључити да композитни систем у великој мери задржава почетну крутост током цикличног наношења оптерећења, било да се ради о рамовима са испуном од стакла,

или о рамовима са испуном од клирита. Превој на хистерезисној петљи настаје у моменту пуне активације испуне, када је исцрпљен амортизујући капацитет интермедијалног слоја гуме по ободној спојници рама и испуне. Од тог тренутка се може уочити знатно спорији прираст деформације и убрзани прираст силе коју прима експериментални модел.



Слика 4.4.56: хистерезисна петља за експериментални модел са испуном од стакла (испитиван 28. 03. 2014.)

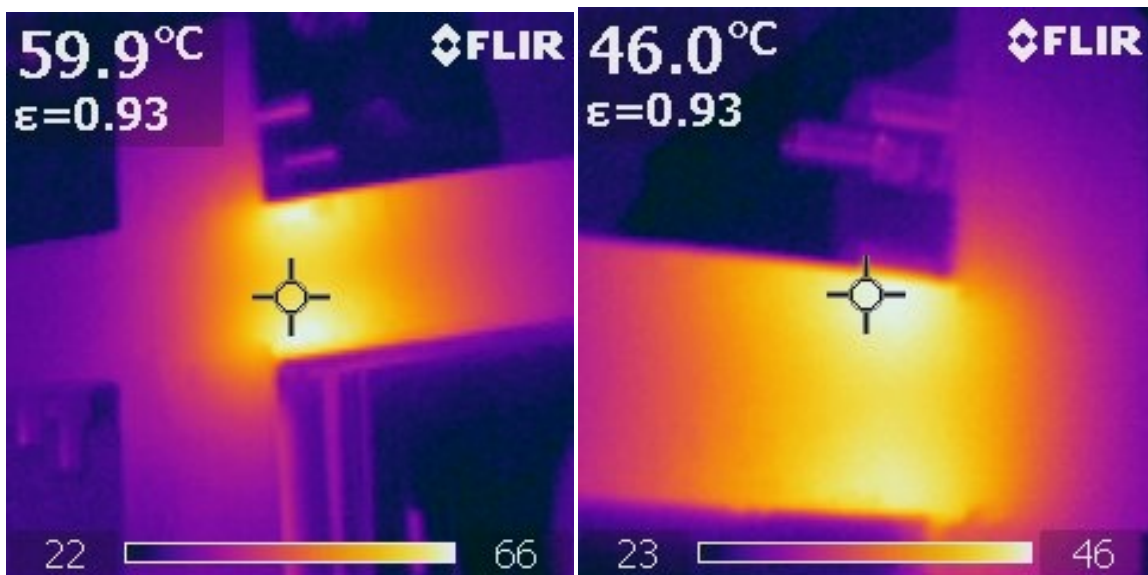
Сасвим мали губитак крутости композитног система, може се уочити на врховима хистерезисне петље, где се деформације од 1. до 96. циклуса повећавају за око 15%, што је последица пада крутости завареног споја у углу челичног рама. Динамичко наношење оптерећења управо на угловима рама оставља највеће последице, чак доводи до оштећења, након чега се формира пластични зглоб.



Слике 4.4.57 и 4.4.58: оштећења на угловима челичног рама, након излагања дејству силе интензитета 50 kN, при фреквенцији 1,6 Hz, у трајању 60 секунди

Оштећења на угловима челичног рама су настала услед великог броја циклуса у наношењу оптерећења, где заварени спој није показао потребну жилавост, што је последица изабране технологије заваривања, што је потребно посебно истражити.

Испитивање је праћено и термовизијском камером, која показује значајан пораст температуре на критичним местима – угловима челичног рама. Тачке са највишим вредностима температуре, у потпуности одговарају местима оштећења.

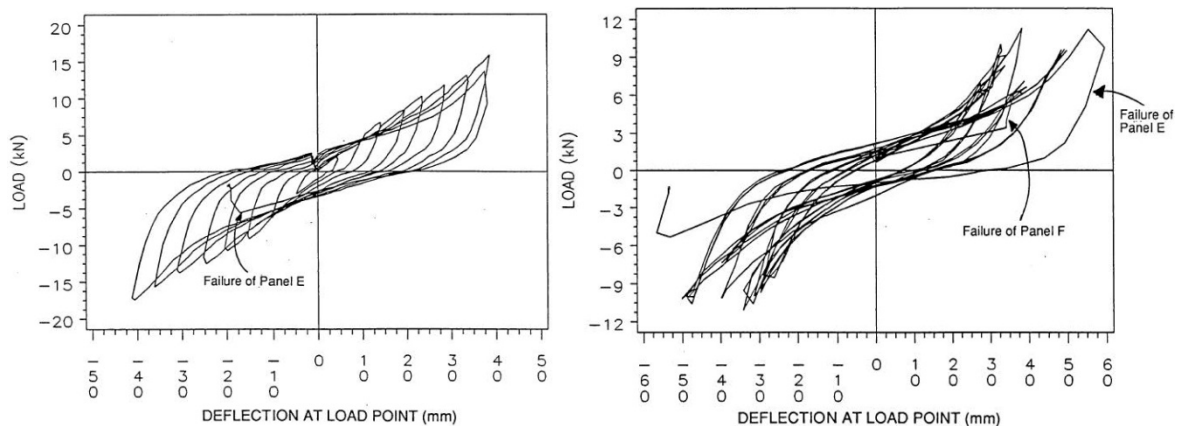


Слике 4.4.59 и 4.4.60: температурне вредности на угловима челичног рама у току динамичког испитивања, снимљене термовизијском камером

Наравно, треба напоменути да на свим узорцима који су испитивани са динамичким наношењем оптерећења, није дошло ни до каквих оштећења испуне, како од ламелираног стакла, тако и од клирита. Дакле, као критично место се може

идентификовати угао рама, од чијих особина, односно крутости, у доброј мери зависи облик хистерезисне петље и вредности деформација. У сваком случају, од кључне важности је доказ добијен испитивањем да капацитет испуне није искоришћен до краја.

Испитивања која се спроводе над обичним прозорским фасадним панелима, показују аналогију са испитивањем приказаним у овом раду: хистерезисна петља има сличан облик, али прираст димензије контуре одсликава понашање меког прозорског рама изложеног дуготрајном цикличном оптерећењу.⁷⁵



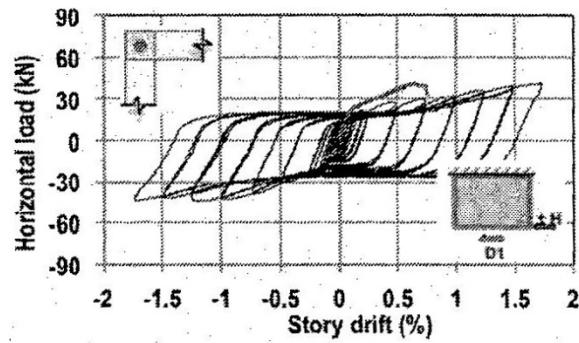
Слике 4.4.61 и 4.4.62: хистерезисне петље са испитивања обичних прозорских фасадних панела⁷⁶

Испитивања извођена на стакленим панелима уоквиреним у дрвени рам за који су фиксирана одређеном врстом лепка, показала су да испуна остаје неоштећена, а да је дрвени рам у угловима претрпео трајна оштећења. Ова испитивања су такође спроведена са динамичким оптерећењем, симулацијом конкретног земљотреса преко акцелерограма. Степен деформације система у току испитивања зависи од врсте везе штапова дрвеног рама у угловима, односно од степена крутости те везе.⁷⁷

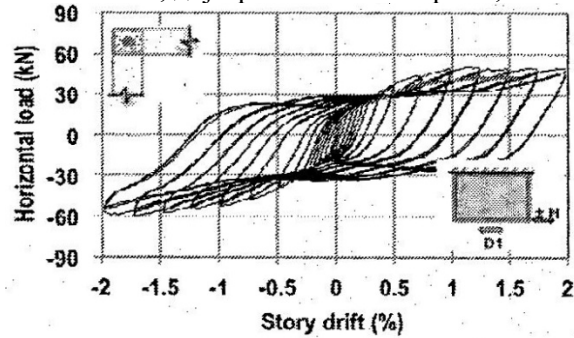
⁷⁵ K. Y. S. Lim, A. B. King, *The Behaviour of External Glazing Systems Under Seismic in Plane Racking*, Study Report No. 39, BRANZ The Resource Centre for Building Excellence, Porirua, New Zealand, 1991 (p. 41-53)

⁷⁶ *Ibid.*

⁷⁷ R. Žarnić, V. Rajčić, L. Krstevska, Lj. Taškov, M. Stepinac, D. Antolinc, *Development of Seismic Resistant Wooden Frames With Laminated Glass Infill*, Proceedings of International Conference – Research in the Field of Building Materials and Structures, Society for Materials and Structures Testing of Serbia, Belgrade, 2012 (p. 215-226)



Слика 4.4.63: хистерезисна петља, дијаграм сила / померање, за везу са једним завртњем⁷⁸



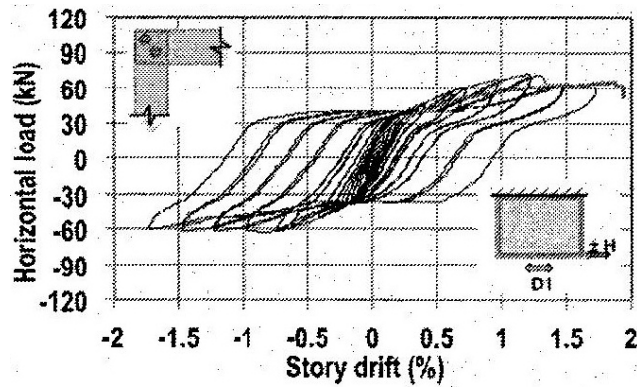
Слика 4.4.64: хистерезисна петља, дијаграм сила / померање, за везу са једним завртњем и металним конектером⁷⁹



Слика 4.4.65: оштећење на вези штапова дрвеног рама, за други случај (један завртањ и метални конектер) – виде се трајна деформација металног конектера и пукотина на хоризонталном дрвеном штапу⁸⁰

⁷⁸ Ibid.

⁷⁹ Ibid.



Слика 4.4.66: хистерезисна петља, дијаграм сила / померање, за везу са два завртња⁸¹

Упоређени су резултати испитивања у овој дисертацији, са приказаним карактеристичним испитивањима обичног фасадног прозорског панела, а посебно са резултатима испитивања дрвеног рама са испуном од стакла, при чему су сва испитивања вршена са цикличним наношењем оптерећења. Може се уочити законитост у смислу кључних проблема који одређују понашање система, а то су степен крутости рама у који је испуна уоквирена и степен чврстоће саме испуне, у смислу пријема притискујуће силе по оптерећеној дијагонали. Треба споменути и секундарни ниво проблема, а то је структура ламелиране испуне по питању ефикасности везива између спрегнутих ламела, као и линијска веза између рама и испуне по целом обиму, што, све заједно, има удела у резултатима испитивања.

У наставку су дате упоредне табеле карактеристичних парова испитиваних експерименталних модела. За сваку од тих табела, у Прилогу 1 на крају рада, приказани су и упоредни дијаграми, односно хистерезисне петље које описују понашање сваког од модела током третмана у лабораторијској опреми. На тај начин се може детаљно сагледати целокупан истраживачки процес који је тема дисертације и да се уоче разлике у понашању панела са две различите испуне.

⁸⁰*Ibid.*

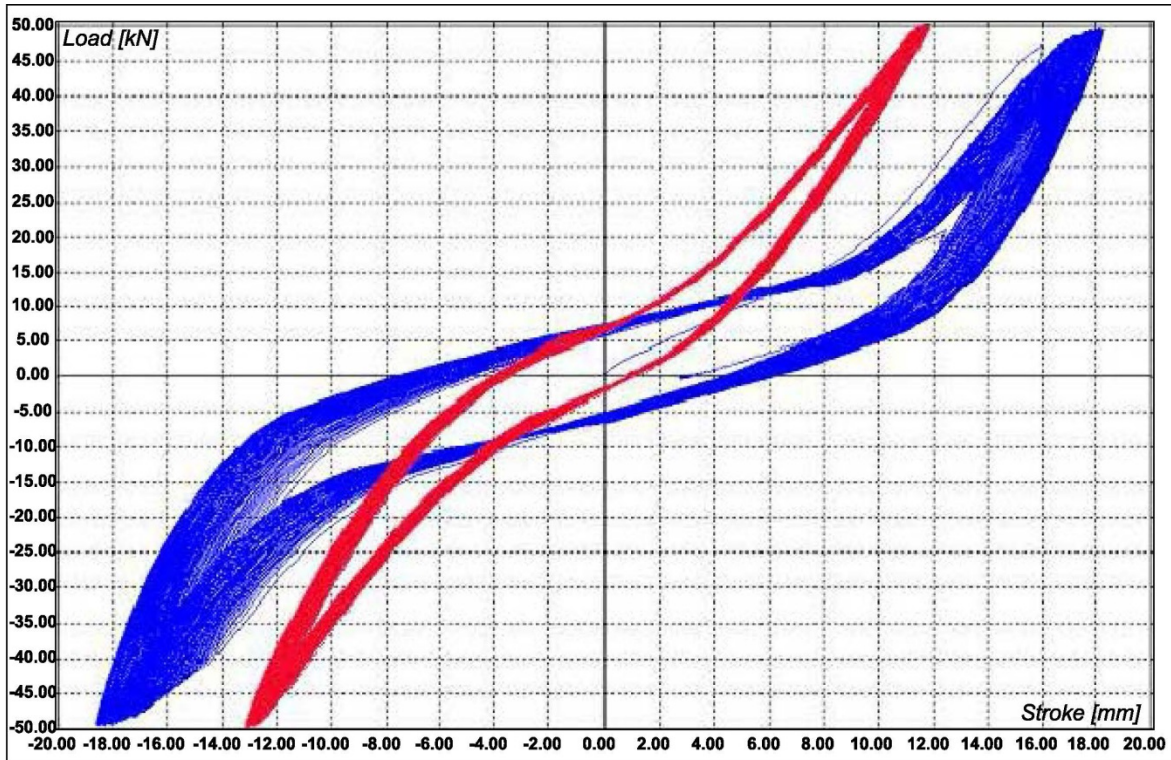
⁸¹*Ibid.*

Табела 4.4.1: поређење резултата лабораторијских испитивања експерименталних модела са испуном од стакла (28. 03. 2014.) и клирита (03. 04. 2014.); видети дијаграме са ознаком “1-...” у Прилогу 1 на крају рада

Материјал	Померање [mm] за задате услове фреквенције, интензитета силе, броја циклуса									
	0.5 Hz; 11 kN	0.5 Hz; 22 kN	0.5 Hz; 33 kN	1.6Hz; 11 kN	1.6Hz; 22 kN	1.6Hz; 33 kN	2.5 Hz; 11 kN	2.5 Hz; 22 kN	2.5 Hz; 33 kN	1.6Hz; 50 kN
<i>Стакло</i> (28.03.'14.)	$\frac{+4.3}{-2.8}$ 7.1 mm	$\frac{+7.4}{-6.2}$ 13.6 mm	$\frac{+10.3}{-9.4}$ 19.7 mm	$\frac{+3.2}{-5.2}$ 8.4 mm	$\frac{+5.8}{-8.8}$ 14.6 mm	$\frac{+9.8}{-9.8}$ 19.6 mm	$\frac{+3.2}{-5.2}$ 8.4 mm	$\frac{+7.4}{-7.5}$ 14.9 mm	$\frac{+10.6}{-9.5}$ 20.1 mm	$\frac{+15.5}{-14.5}$ 30.0 mm
<i>Клирит</i> (03.04.'14.)	$\frac{+4.3}{-2.0}$ 6.3 mm	$\frac{+7.5}{-4.2}$ 11.7 mm	$\frac{+10.0}{-6.6}$ 16.6 mm	$\frac{+3.5}{-3.5}$ 7.0 mm	$\frac{+6.5}{-5.3}$ 11.8 mm	$\frac{+9.0}{-7.1}$ 16.1 mm	$\frac{+3.8}{-3.2}$ 7.0 mm	$\frac{+6.6}{-5.2}$ 11.8 mm	$\frac{+9.0}{-7.0}$ 16.0 mm	$\frac{+13.5}{-10.2}$ 23.7 mm

Табела 4.4.2: поређење резултата лабораторијских испитивања експерименталних модела са испуном од стакла (09. 04. 2014.) и клирита (28. 02. 2014.) .); видети дијаграме са ознаком “2-...” у Прилогу 1 на крају рада

Материјал	Померање [mm] за задате услове фреквенције, интензитета силе, броја циклуса									
	0.5 Hz; 11 kN	0.5 Hz; 22 kN	0.5 Hz; 33 kN	1.6Hz; 11 kN	1.6Hz; 22 kN	1.6Hz; 33 kN	2.5 Hz; 11 kN	2.5 Hz; 22 kN	2.5 Hz; 33 kN	1.6Hz; 50 kN
<i>Стакло</i> (09.04.'14.)	$\frac{+4.7}{-3.8}$ 8.5 mm	$\frac{+8.5}{-9.8}$ 18.3 mm	$\frac{+11.6}{-14.0}$ 25.6 mm	$\frac{+3.6}{-6.2}$ 9.8 mm	$\frac{+7.5}{-11.5}$ 19.0 mm	$\frac{+11.5}{-13.4}$ 24.9 mm	$\frac{+3.8}{-6.1}$ 9.9 mm	$\frac{+9.6}{-10.7}$ 20.3 mm	$\frac{+13.0}{-13.0}$ 26.0 mm	$\frac{+18.4}{-18.7}$ 37.1 mm
<i>Клирит</i> (28.02.'14.)	$\frac{+2.7}{-3.2}$ 5.9 mm	$\frac{+5.4}{-6.3}$ 11.7 mm	$\frac{+7.8}{-9.1}$ 16.9 mm	$\frac{+2.4}{-3.9}$ 6.3 mm	$\frac{+4.9}{-6.5}$ 11.4 mm	$\frac{+9.0}{-6.9}$ 15.9 mm	$\frac{+2.5}{-3.4}$ 5.9 mm	$\frac{+5.2}{-6.1}$ 11.3 mm	$\frac{+7.5}{-8.3}$ 15.8 mm	$\frac{+11.4}{-13.4}$ 24.8 mm



Слика 4.4.67: хистерезисне петље са испитивања панела са испуном од стакла (плава, 09. 04. 2014.) и испуном од клирита (црвена, 28. 02. 2014.), изложених дејству динамичке силе интензитета 50 kN, при фреквенцији 1,6 Hz

Претходна табела, а поготово претходна слика, илустративно показује разлике у понашању екперименталних модела са испунама од стакла односно клирита, изложених дејству динамичког оптерећења. Према облицима хистерезисних петљи на претходној слици, може се закључити да се код експерименталног модела са испуном од клирита, испуна раније укључи у пријем силе, него што је случај код модела са испуном од стакла. Ова аномалија код модела са испуном од стакла, дешава се због проклизавања испуне дуж контактне површине са интермедијалним слојем гуме, што одлаже време укључења испуне у пријем оптерећења. На овај начин, испуна од клирита показује бољу интегрисаност у композитни склоп експерименталног модела.

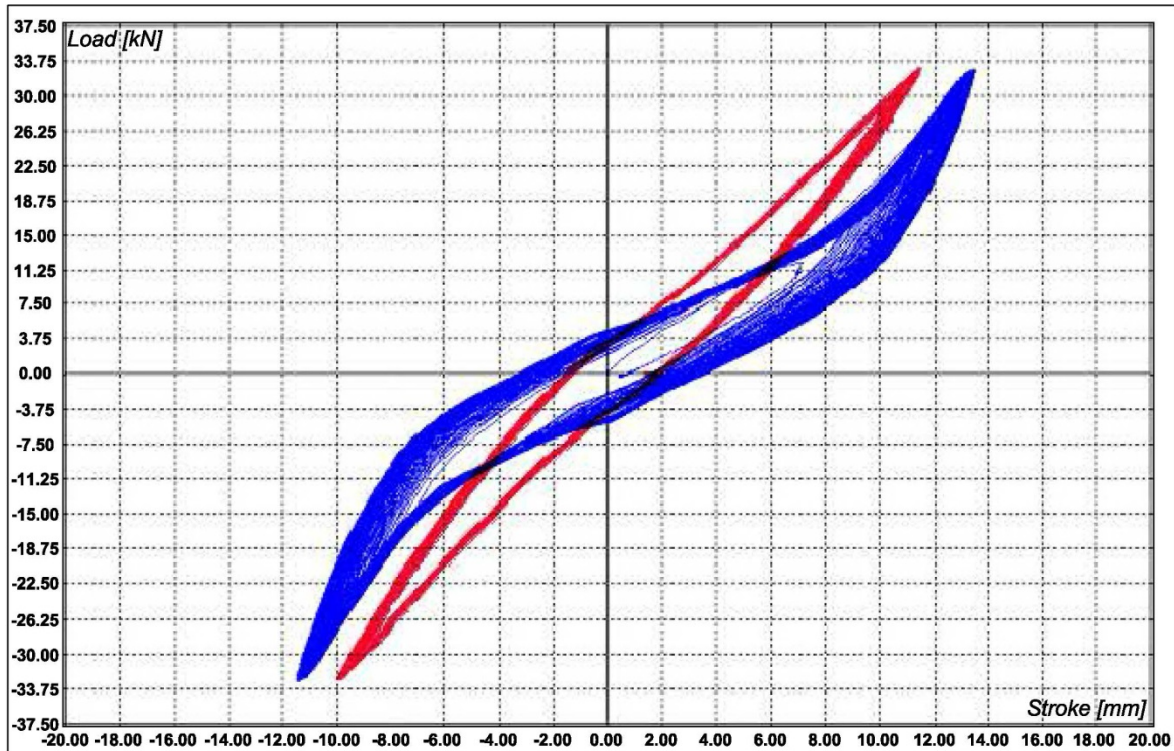
Табела 4.4.3: поређење резултата лабораторијског испитивања експерименталних модела са испуном од клирита (28. 02. 2014.) и челичног рама без испуне (13. 03. 2014.) .); видети дијаграме са ознаком “3-...” у Прилогу 1 на крају рада

Материјал	Померање [mm] за задате услове фреквенције, интензитета силе, броја циклуса		
	1.6Hz; 11 kN	1.6Hz; 22 kN	1.6Hz; 33 kN
<i>Клирит</i> (28.02.'14.)	$\frac{+2.4}{-3.9}$ 6.3 mm	$\frac{+4.9}{-6.5}$ 11.4 mm	$\frac{+9.0}{-6.9}$ 15.9 mm

Материјал	Интензитет силе[kN] за задате услове фреквенције, померања, броја циклуса		
	1.6Hz; $\frac{+2.4}{-3.9}$ mm	1.6Hz; $\frac{+4.9}{-6.5}$ mm	1.6Hz; $\frac{+9.0}{-6.9}$ mm
<i>Рам без испуне</i> (13.03.'14.)	$\frac{+5.0}{-4.2}$ 4.6kN	$\frac{+8.5}{-9.3}$ 8.9kN	$\frac{+14.0}{-10.0}$ 12.0kN

Табела 4.4.4: поређење резултата лабораторијског испитивања експерименталних модела са испуном од стакла (24. 04. 2014.) и клирита (08. 05. 2014.) .); видети дијаграме са ознаком “4-...” у Прилогу 1 на крају рада

Материјал	Померање [mm] за задате услове фреквенције, интензитета силе, броја циклуса								
	0.5 Hz; 11 kN	0.5 Hz; 22 kN	0.5 Hz; 33 kN	1.6Hz; 11 kN	1.6Hz; 22 kN	1.6Hz; 33 kN	2.5 Hz; 11 kN	2.5 Hz; 22 kN	2.5 Hz; 33 kN
<i>Стакло</i> (24.04.'14.)	$\frac{+4.4}{-3.7}$ 8.1 mm	$\frac{+10.5}{-5.9}$ 16.4 mm	$\frac{+12.5}{-11.0}$ 23.5 mm	$\frac{+3.0}{-6.5}$ 9.5 mm	$\frac{+8.3}{-9.8}$ 18.1 mm	$\frac{+12.3}{-11.7}$ 24.0 mm	$\frac{+4.3}{-6.6}$ 10.9 mm	$\frac{+11.2}{-9.1}$ 20.3 mm	$\frac{+13.5}{-11.5}$ 25.0 mm
<i>Клирит</i> (08.05.'14.)	$\frac{+1.8}{-1.5}$ 3.3 mm	$\frac{+3.6}{-3.6}$ 7.2 mm	$\frac{+5.5}{-5.5}$ 11.0 mm	$\frac{+1.4}{-2.2}$ 3.6 mm	$\frac{+3.4}{-3.8}$ 7.2 mm	$\frac{+5.3}{-5.5}$ 10.8 mm	$\frac{+1.3}{-2.2}$ 3.5 mm	$\frac{+3.4}{-3.8}$ 7.2 mm	$\frac{+5.3}{-5.4}$ 10.7 mm



Слика 4.4.68: хистерезисне петље са испитивања панела са испуном од стакла (плаво, 24. 04. 2014.) и испуном од клирита (црвено, 08. 05. 2014.), изложених дејству динамичке силе интензитета 33 kN, при фреквенцији 2,5 Hz

Као и у случају пара испитиваних модела од 09. 04 2014. и 28. 02. 2014., облици хистерезисних петљи на претходној слици, показују да се код експерименталног модела са испуном од клирита, испуна раније укључи у пријем силе, него код модела са испуном од стакла. Тренутак ојачања, представља тренутак активирања притиснуте дијагонале испуне, чиме долази до повећања крутости целог склопа. Овај ефекат се уочава код излагања експерименталног модела сили једнакој или већој од 22 kN.

Табела 4.4.5: поређење резултата лабораторијских испитивања експерименталних модела са испуном од клирита (08. 05. 2014) и челичног рама без испуне (27. 06. 2014. .); видети дијаграме са ознаком “5-...” у Прилогу 1 на крају рада

Материјал	Померање [mm] за задате услове фреквенције, интензитета силе, броја циклуса								
	0.5 Hz; 11 kN	1.6Hz; 11 kN	2.5 Hz; 11 kN	0.5 Hz; 22 kN	1.6Hz; 22 kN	2.5 Hz; 22 kN	0.5 Hz; 33 kN	1.6Hz; 33 kN	2.5 Hz; 33 kN
Клирит (08.05.'14.)	+1.8	+1.4	+1.3	+3.6	+3.4	+3.4	+5.5	+5.3	+5.3
	-1.5	-2.2	-2.2	-3.6	-3.8	-3.8	-5.5	-5.5	-5.4
	3.3 mm	3.6 mm	3.5 mm	7.2 mm	7.2 mm	7.2 mm	11.0 mm	10.8 mm	10.7 mm

Материјал	Интензитет силе[kN] за задате услове фреквенције, померања, броја циклуса								
	0.5Hz; mm	1.6Hz; mm	2.5Hz; mm	0.5Hz; mm	1.6Hz; mm	2.5Hz; mm	0.5Hz; mm	1.6Hz; mm	2.5Hz; mm
Рам без испуне (27.06.'14.)	+1.8	+1.4	+1.3	+3.6	+3.4	+3.4	+5.5	+5.3	+5.3
	-1.5	-2.2	-2.2	-3.6	-3.8	-3.8	-5.5	-5.5	-5.4
	3.5kN	3.3kN	3.4kN	7.0kN	7.0kN	6.9kN	10.0kN	10.1kN	10.3kN

Табела 4.4.6: резултати лабораторијског испитивања експерименталног модела са испуном од клирита (17. 04. 2014.); видети дијаграме са ознаком “К-...” у Прилогу 1 на крају рада

Материјал	Померање [mm] за задате услове фреквенције, интензитета силе, броја циклуса									
	0.5 Hz; 11 kN	0.5 Hz; 22 kN	0.5 Hz; 33 kN	1.6Hz; 11 kN	1.6Hz; 22 kN	1.6Hz; 33 kN	2.5 Hz; 11 kN	2.5 Hz; 22 kN	2.5 Hz; 33 kN	1.6Hz; 50 kN
Клирит (17.04.'14.)	+5.1	+7.6	+9.5	+3.6	+6.8	+9.2	+3.7	+7.0	+9.6	+11.5
	-3.0	-5.6	-8.5	-4.5	-6.7	-8.8	-4.4	-6.3	-8.6	-12.4
	8.1 mm	13.2 mm	18. mm	8.1 mm	13.5 mm	18.0 mm	8.1 mm	13.3 mm	18.2 mm	 23.9 mm

У табелама је приказано упоређење ефикасности две врсте испуна: стакла и клирита, које су испитиване у лабораторији преко опитних тела изложених динамичком дејству. Резултати у табелама су очитани из дијаграма са хистерезисним петљама које су у Прилогу 1 на крају рада.

Неки од дијаграма са хистерезисним петљама посебно илустративно описују разлику у понашању експерименталних панела са испуном од клирита, у односу на панеле са испуном од стакла, као што је приказано на упоредним приказима хистерезисних петљи. Из табеларно приказаних резултата, може се уочити да модели са испуном од клирита имају мање деформације од модела са испуном од стакла, а поређењем облика хистерезисних петљи, изводи се закључак о бољој интегрисаности испуне од клирита у композитни склоп.

4.4.4 Резиме лабораторијских испитивања на дејство динамичке силе

Предмет истраживања су композитни панели на бази ламелираног стакла и клирита, у смислу капацитета за пријем динамичких сила у њиховој равни. Композитни панели су сачињени од челичног рама одговарајуће профилације, испуне од ламелираног стакла односно клирита и интермедијалног слоја гуме, чија је улога спречавање директног контакта између испуне и рама. Тежиште лабораторијског испитивања композитних панела је на третирању динамичком силом, односно цикличним наношењем оптерећења, чиме се жели симулирати сеизмичко дејство. Након лабораторијског испитивања, на студији случаја је рачунски приказана могућност примене композитних панела на објекту, у функцији оспособљавања конструкције објекта за пријем хоризонталних сеизмичких сила.

Лабораторијским испитивањем су равноправно третирана два материјала: *стакло и клирит*.

Најпре су механичка својства испуне од ламелираног стакла и од клирита, утврђена експерименталним испитивањем у лабораторији Института за материјале и конструкције на Грађевинском факултету Универзитета у Београду.

Затим је пројектовано и израђено по пет опитних тела – *композитних панела* – на бази сваког од ова два материјала, са циљем да се истражи њихова отпорност на дејство динамичких сила. Ово испитивање је извршено у лабораторији *Лимес*, на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Да би се опитна тела припремила за динамичко испитивање, извршен је њихов “тренинг”, наношењем алтернативних статичких оптерећења, која су расла инкрементално, тако да деформације рамова остану у еластичној области. Поред тога, на два рама, један са испуном од стакла, а други без испуне, наношена су оптерећења до лома. Ови резултати су били подлога за димензионисање композитног панела и одређивање интензитета експерименталног оптерећења.

Основни задаци лабораторијског испитивања су били:

1. да се утврди **понашање композитног панела**, сачињеног од челичног рама, интермедијалног (амортизујућег) слоја од тврде гуме и испуне од ламелираног стакла / клирита под дејством динамичке силе саопштене у лабораторијским условима;
2. да се утврди који од два алтернативна материјала (стакло / клирит) својим понашањем кроз садејствовање са осталим материјалима који чине композитни склоп (челични рам и тврда гума), даје бољи одговор на саопштену силу, како у смислу **степенa интегрисаности у композитни склоп** (испуна + амортизујућа гума + челични рам), тако и у смислу исказаних **вредности померања** – деформације композитног склопа.

Димензионисање композитног панела и интензитет експерименталног оптерећења

Композитни панел је димензионисан на основу уводног испитивања експерименталног модела, као и према могућностима и ограничењима лабораторијске опреме (пулзатора). Приликом уводног испитивања у лабораторији, дошло је до лома композитног експерименталног модела у тренутку наношења силе интензитета $P_d = 86 \text{ kN}$.

Обим испитивања

Пре почетка извођења експеримента, планирано је испитивање укупно десет експерименталних модела – узорака и то по пет комада на бази стакла односно клирита. Испитивање експерименталних модела на бази стакла, извршено је по следећим датумима: 18. 12. 2013., 25. 12. 2013., 28. 03. 2014., 09. 04. 2014. и 24. 04. 2014. године. Испитивање експерименталних модела на бази клирита, извршено је по следећим датумима: 28. 02. 2014., 07. 03. 2014., 03. 04. 2014., 17. 04. 2014. и 08. 05. 2014. године. Испитивање челичних рамова без испуне, извршено је 13. 03. 2014. и 27. 06. 2014. године.

Након уводног статичког испитивања и димензионисања експерименталног модела, у току главног процеса лабораторијског испитивања, композитни панели су оптерећени поступним повећањем интензитета динамичке силе, са почетном вредношћу од 11 kN, преко 22 kN, до максималне силе од 33 kN, на свим фреквенцијама: $\nu_1 = 0,5 \text{ Hz}$, $\nu_2 = 1,6 \text{ Hz}$, $\nu_3 = 2,5 \text{ Hz}$.

Општа запажања

Назив *композитни панел* је формулисан на основу примене различитих материјала: рам од челика, испуна од стакла / клирита и интермедијална (амортизујућа) тврда гума, која је посредник у налегању испуне на рам.

У испитиваном домену, композитни склопови показују углавном стабилне хистерезисне петље. Стабилнији и консеквентнији резултати су запажени код склопова са клиритом, него код склопова са ламелираним стаклом. Амплитуде померања су углавном симетричне у односу на средњу референтну вредност $x_0 = (x_{\max} + x_{\min}) / 2$. Вредност x_0 није увек једнака нули, што је највероватније последица услова испитивања.

Интермедијални слој између панела и оквира представља важан елемент у раду композитног склопа. Гумени подметачи треба да обезбеде:

- равномерно налегање по ширини, односно по целој дебљини панела;
- контакт по обиму, чиме се избегава концентрисано увођење силе у панел. Интермедијални слој због својих вискозних својстава је главни извор дисипације енергије, чија је мера површина у оквиру хистерезисних петљи.

У анализираном домену није дошло до лома стакла, односно клирита ни композитног склопа као целине.

Нису примећене значајније деградације носивости и крутости.

Утицај фреквенције

Анализиран је утицај динамичког оптерећења услед динамичких сила са фреквенцијалма $\nu_1 = 0,5 \text{ Hz}$, $\nu_2 = 1,6 \text{ Hz}$, $\nu_3 = 2,5 \text{ Hz}$. Ниже фреквенције одговарају тоновима осциловања за који се очекују највећа померања. Дужина испитивања је варирана од 30 секунди за силе од 11 kN и 22 kN, до чак 60 секунди за силе од 33 kN, што далеко превазилази време трајања земљотреса. По достизању максималне силе, петље су стабилне, што значи да није уочена деградација крутости и носивости у току времена. Према добијеним резултатима, утицај фреквенција на амплитуде померања око референтне вредности је мали.

Утицај амплитуде оптерећења

Сила је варирана у границама $\pm 11, 22, 33 \text{ kN}$, (50 kN). Максимална добијена померања су за 50 kN око 16 mm , што за осну висину склопа $H = 500 \text{ mm}$ даје релативно померање на нивоу композитног склопа $\Delta_k = 0,032$. За $F = 33 \text{ kN}$ тај однос је $\Delta_k = 0,020$. Ипак треба имати на уму да је композитни склоп део роштиљног система, па је реално очекивати да релативно спратно померање целог роштиља буде $\Delta = \eta \Delta_k$, при чему је $\eta < 1$. Према Еврокоду 8⁸², дозвољене вредности максималних међуспратних релативних померања од $\Delta = 0.005$ до $\Delta = 0.01$, односе се на ограничење појаве оштећења (*damage limitation requirement*) услед земљотреса са повратним периодом $T_{DLR} = 95$ година; према домаћим прописима⁸³, допуштено Δ , уз умерени ниво нелинеарних деформација, износи $\Delta = H/150 = 0.0066$. То показује да су у лабораторијским условима на нивоу композитног склопа добијена померања која су у границама оних које допуштају наведени прописи.

Уочено је да у испитиваном домену, при цикличном оптерећењу, део силе који преузима испуна од клирита износи око 58% за амплитуду силе од 11 kN , око 60% за амплитуду силе од 22 kN и око 67% за амплитуду силе од 33 kN . Повећање силе се може објаснити активирањем притиснуте дијагонале у панелу.

Понашање челичног оквира

Челични оквир у току испитивања показује одређена оштећења на угловима, али је глобални одговор еластичан. Оштећења наугловима челичног рама су настала услед великог броја циклуса у наношењу оптерећења, где заварени спој није показао потребну жилавост, што је у великој мери последица изабране технологије заваривања, али то може бити предмет посебног истраживања. Потребно је да се обрати посебна пажња обради овог детаља и не сме се дозволити појава кртог лома. Оквир треба димензионисати тако да се евентуално појаве пластични зглобови у фази граничне носивости за земљотресе са повратним периодом ($T = 475$ година према Еврокоду 8).

⁸²EN 1998-1:2004, CEN Brussels

⁸³Правилник о техничким нормама за изградњу објеката високоградње у сеизмичким подручјима, Сл. лист СФРЈ 31, јуни 1981,52, септембар 1981

Смернице за даља истраживања

Приказано истраживање је, кроз дуготрајне рачунске и лабораторијске анализе, дало одређене закључке који су базирани на предностима које је испољио један разматрани материјал у односу на други. Да би се у конкретном случају донео коначан суд, односно дефинитивни избор материјала за укрућење објекта за дејство сеизмичких сила, овде изложене закључке треба узети у обзир, али свакако треба истражити и спровести:

1. Анализу целог роштиљног система на динамичко оптерећење
2. Анализу композитног склопа или целог система до лома
3. Анализу склопа са становишта механичких својстава гумених подлошки
4. Могућност другачије везе панела система за челични роштиљ

Томе треба додати:

5. Утицаје температурних промена на понашање композитног склопа, пре свега оних од клирита због високог коефицијента термичке дилатације;

При избору материјала за панеле мора се водити и рачуна о:

6. утицају атмосферелија на панеле у виду абразивног дејства;
7. постојаности у току дужег временског периода;
8. остале феномене, обзиром на специфичност и изложеност материјала.

5. МОГУЋНОСТ АСЕИЗМИЧКОГ УКРУЋИВАЊА КОНСТРУКЦИЈЕ ОБЈЕКТА КОРИШЋЕЊЕМ ЛАМЕЛИРАНОГ СТАКЛА И КЛИРИТА, ПРИКАЗАНО НА СТУДИЈИ СЛУЧАЈА

5.1 ПРОЦЕДУРА (АЛГОРИТАМ) ПРОЈЕКТОВАЊА СЕИЗМИЧКИ ОТПОРНИХ АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА КОРИШЋЕЊЕМ НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА (СТАКЛО / КЛИРИТ)

Анализа проблема (*претпроцесор*)

Сагледава се проблем конкретног конструктивног система на дејство сеизмичких сила. Понашање конструкције се испитује кроз рачунарски модел, који је креиран помоћу методе коначних елемената.

У циљу креирања релевантног рачунарског модела конструкције, детаљно се анализира геометрија предметне конструкције. Такође се врши идентификација посебних конструктивних целина, које се масом и величином издвајају из глобалног конструктивног система. Код таквих конструктивних система са разуђеним масама, од кључног значаја је препознавање међусобних веза конструктивних елемената који чине издвојену масу и конструктивних елемената остатка објекта.

Врши се идентификација материјала од којих је конструкција изведена, уз евентуална лабораторијска испитивања појединих делова, за које не постоје поуздани подаци о квалитету, посебно ако се ради о примарним елементима конструкције.

Утврђују се димензије попречних пресека конструктивних елемената (облик и димензије попречних пресека штапастих елемената и дебљине плочастих елемената).

У зависности од величине конструкције, у циљу оптимизације пројектантског процеса, разматра се могућност парцијалне рачунске анализе, односно израде парцијалног модела конструкције. Мора се водити рачуна да евентуални парцијални модел конструкције има такве граничне услове који ће адекватно симулирати

остатак конструкције који се не моделира. Ако везу моделираног предметног дела конструкције и остатак конструкције који остаје ван модела и рачунске анализе, није могуће симулирати граничним (ослоначким) условима на прави начин, мора се моделирати цео конструктивни систем предметне конструкције. Ако се предметни конструктивни систем састоји од засебних конструктивних целина, које су јасно одвојене дилатационим разделницама како у надземном делу конструкције тако и у темељној конструкцији, у потпуности је могуће креирати засебан релевантни рачунарски модел дела конструкције.

Пре моделирања конструкције објекта, потребно је извршити избор одговарајућег комерцијалног софтверског пакета, који ће омогућити реално моделирање структуре објекта и предложеног система за решење проблема, до којег ће се доћи у каснијој фази пројектовања.

Израђује се рачунарски модел предметне конструкције, у коме се конструктивни елементи креирају са реалним димензијама попречних пресека и реалним параметрима квалитета материјала. Посебна пажња се посвећује моделовању веза између конструктивних елемената. Потребно је детаљно дефинисање граничних услова код плочастих елемената и ослобађање крајева код гредних елемената.

Аутоматски се генерише мрежа коначних елемената, са задатим параметрима густине. Врши се контрола мреже и спроводи се оптимизација повезаности чворних тачака модела.

Спроводи се поступак прорачуна, најпре кроз извођење мултимодалне анализе, а затим кроз сеизмички прорачун. Код формирања мреже коначних елемената, већ су дефинисани сви подаци који описују геометрију и крутост конструкције, а пре модалне анализе још су дефинисани и интензитети и положаји свих маса које делују по висини објекта. Масе су распоређене у свим чворовима конструкције.

У мултимодалној анализи се израчунавају својствене вредности и облици осциловања конструкције. Анализирају се облици осциловања конструкције, у смислу правца деловања и трајања периода осциловања. Већ у овом кораку, код конструктивних система са разуђеним масама, могуће је уочити делови са изражено

високим вредностима трајања периода осциловања. Периоди осциловања конструкције се затим користе као улазни параметри за сеизмички прорачун.

Врши се анализа резултата спроведеног сеизмичког прорачуна, пре свега кроз проверу деформација (хоризонталних померања) целог објекта или истакнутих конструктивних целина код објеката са разуђеним масама. Очитавају се померања која не задовољавају критеријуме за пројектовање објеката у сеизмички активним подручјима. Идентификују се најугроженији делови конструкције са аспекта хоризонталних померања која превазилазе допуштене вредности. Сагледава се узрок, у смислу неповољне геометрије дела конструкције или целе конструкције, који је допринео високом вредностима деформација.

Решавање проблема (*процесор*)

Код асеизмичког укрућивања објекта или његове одређене најугроженије целине, морају се сагледати сви специфични услови које је неопходно задовољити.

Код архитектонских објеката, функционални и естетски критеријуми избијају у први план, а естетски аспект је посебно важан код објеката који уживају неку врсту конзерваторске заштите. Тај критеријум може у потпуности одредити концепт сеизмичког укрућења.

Конструктивни критеријуми се, у сваком случају, пре свега односе на рационалност избора система у смислу утрошка материјала, доступности технологије и потребног времена за извођење. Такође је изражен и утицај новопроектваног система за асеизмичко укрућивање на остатак постојећег конструктивног система, као што је, на пример, његово додатно гравитационо оптерећивање.

Узимајући у обзир и архитектонске, функционално – естетске критеријуме, као и конструктивне критеријуме исплативости и техничко – технолошке изводљивости, дефинише се систем асеизмичког укрућивања конструкције објекта.

У случајевима када се асеизмичко укрућивање изводи стандардним и распрострањеним методама, технологијама и материјалима, осим уобичајене рачунске анализе, додатне провере и анализе најчешће нису потребне. Примена стандардних техничко – технолошких решења је могућа, ако архитектонски,

функционално естетски захтеви нису ригидни. Ако је приступ пројектовању асеизмичког укрућивања неконвенционалан, у смислу коришћења материјала који се ретко користе са тим циљем, такав систем је, поред рачунске анализе, потребно и допунски тестирати у лабораторијским условима. У зависности од конфигурације система за асеизмичко укрућивање, лабораторијско испитивање се може извести на моделу целог система или на његовом репрезентативном делу.

Лабораторијско испитивање треба спровести у два корака: прецизно утврђивање физичко – механичких карактеристика основног материјала који се примењује (посебно изражено код ламелираних материјала, који не показују исте карактеристике у свим правцима) и понашање модела под дејством цикличног (динамичког) оптерећења, за чим постоји нарочита потреба код композитних склопова, састављених од основног материјала, који садејствује са секундарном конструкцијом. У лабораторији се, под истим условима, могу испитивати алтернативни материјали, односно склопови на бази различитих основних материјала.

Врши се анализа резултата лабораторијског испитивања, кроз коју се може утврдити отпорност одређених склопова на дејство динамичког оптерећења, као и евентуалне предности једног од испитиваних материјала у односу на други, ако су третирани различити материјали. Материјал чији експериментални модел у лабораторији искаже боље понашање, биће употребљен у рачунарској анализи. Резултати у смислу постигнуте отпорности опитних тела у лабораторији, посматрају се као граничне вредности за рачунску анализу која предстоји.

Рачунска анализа новопројектованог система за асеизмичко укрућење, спроводи се допуном (дорађивањем, ажурирањем) постојећег модела, који је коришћен приликом анализе проблема у *ретпроцесору*.

Дефинисани систем асеизмичког укрућења, преводи се у рачунарски модел, адекватним представљањем елемената укрућења у рачунарском моделу конструкције. Улазни параметри у моделу, који описују материјал који се користи за формирање елемената укрућења, узимају се из првог дела лабораторијског испитивања, којим су утврђене физичко – механичке карактеристике основног материјала за извођење укрућења. Осим тога, код дораде модела, од великог значаја

је моделирање граничних услова, како на саставима елемената за асеизмичко укрућење, тако и на везама новопроектваног система и постојеће конструкције.

Као и код анализе проблема, након дораде модела, врши се генерисање мреже коначних елемената, уз њену сталну контролу и оптимизацију.

Након коначне припреме и оптимизације модела, спроводи се рачунска анализа под истим условима и по истом редоследу, као и у анализи проблема: мултимодална анализа и сеизмички прорачун.

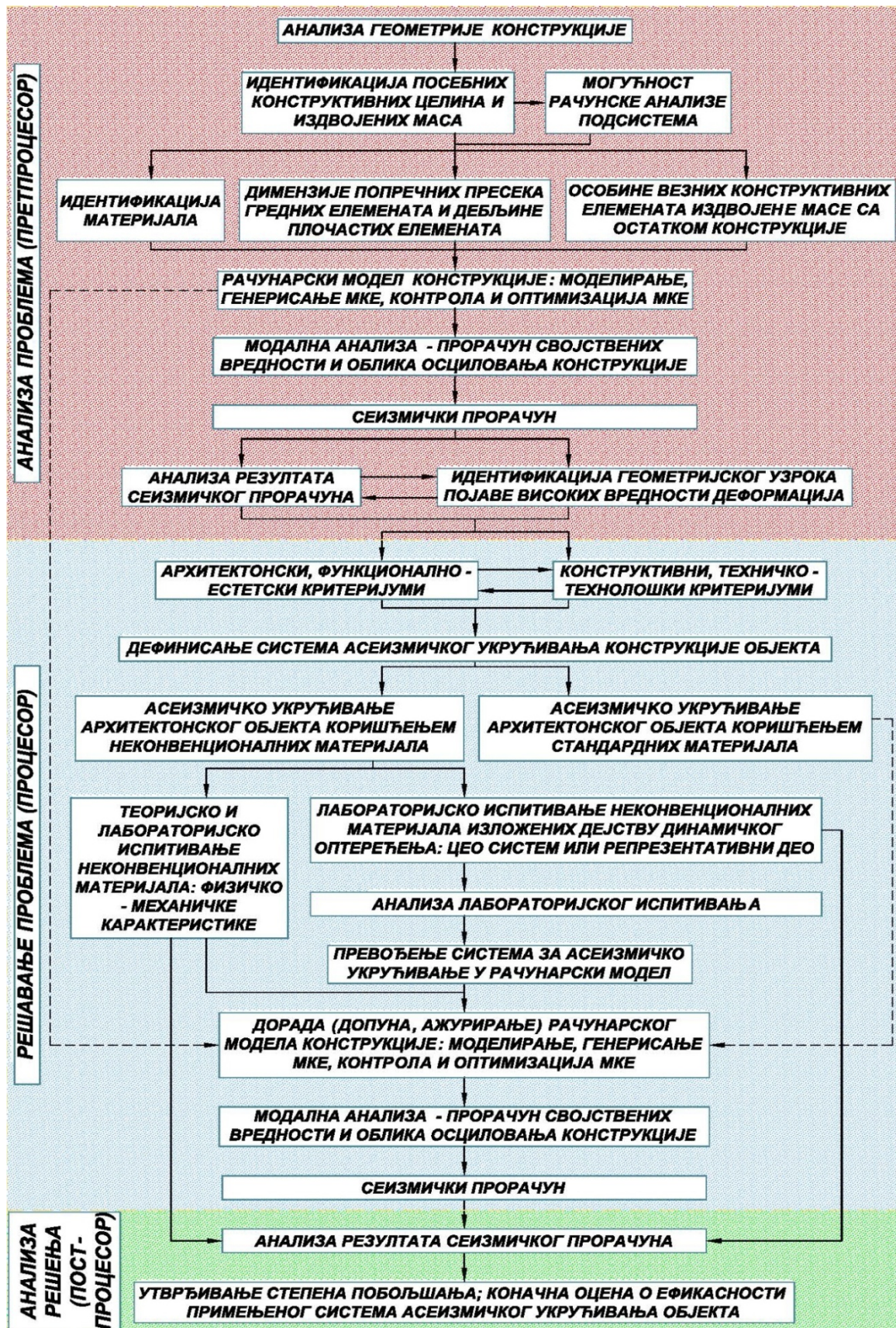
Анализа резултата (*постпроцесор*)

Упоредјују се резултати свих фаза две рачунске анализе – резултати који су добијени из изворног рачунарског модела конструкције у оквиру анализе проблема и резултати добијени анализом модификованог модела са новопроектваним асеизмичким укрућењима, у оквиру решавања проблема. Уочавају се разлике у вредностима периода осциловања и вредностима деформација (хоризонталних померања), пре и после примене укрућења – утврђује се степен побољшања. Даје се коначна оцена о ефикасности новопроектваног система асеизмичког укрућења.

На слици 5.1.1 на следећој страни, дат је графички приказ процедуре – *алгоритма* – за пројектовање сеизмички отпорних архитектонских објеката, коришћењем *неконвенционалних материјала* – стакла и клирита.

Дијаграм је подељен на три целине (анализа проблема, решавање проблема и анализа резултата), са редоследом корака, међузависностима и бочним везама.

Након дијаграма, следи студија случаја, на којој је показана примена описане процедуре, која је у директној вези са раније обављеним лабораторијским испитивањима.



Слика 5.1.1: процедура (алгоритам) пројектовања сеизмички отпорних објеката, коришћењем неконвенционалних материјала

5.2 СТУДИЈА СЛУЧАЈА– АСЕИЗМИЧКО УКРУЋИВАЊЕ ОБЈЕКТА КОРИШЋЕЊЕМ НЕКОНВЕНЦИОНАЛНОГ МАТЕРИЈАЛА

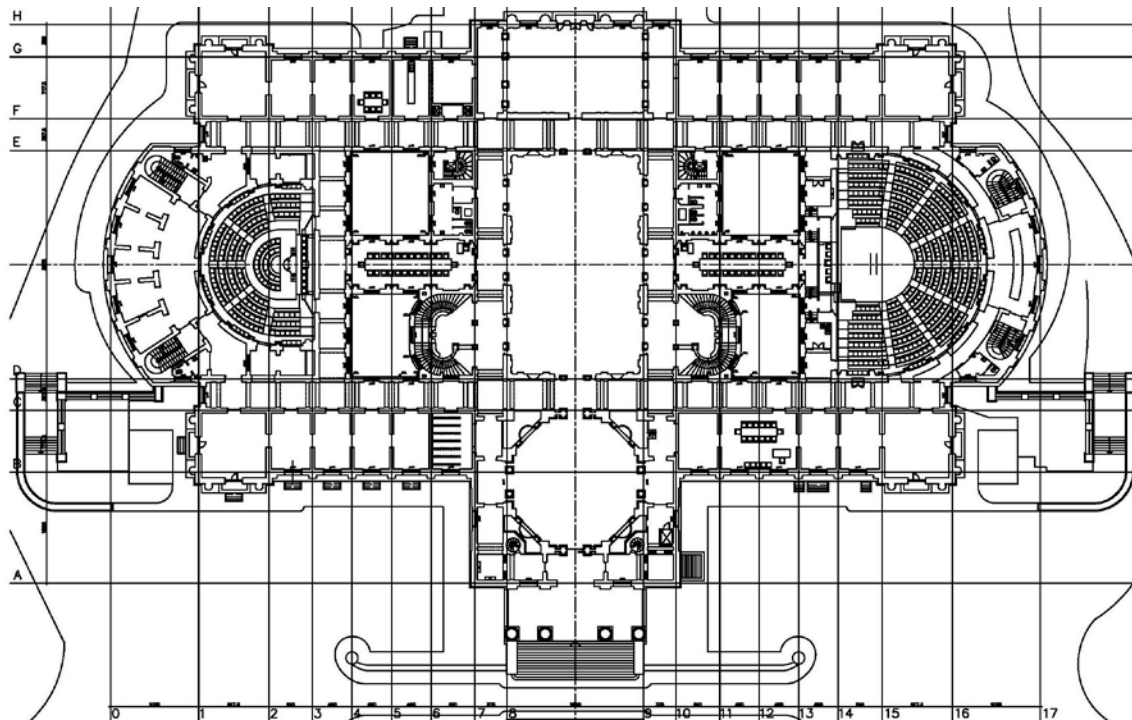
5.2.1 Анализа геометрије објекта (конструктивне целине, материјали)

За студију случаја, изабран је објекат Народне скупштине Републике Србије у Београду. Објекат је сачињен од три корпуса, који заједно чине једну конструктивну целину.

Средњи корпус (или средњи брод) се пружа дуж попречне осе симетрије објекта. Његове димензије су $24,60 \cdot 73,40$ метара. У основи приземља, на предњем делу средњег корпуса налази се главни улаз са улазним тремом, затим улазни хол или вестибил, изнад којег је велика купола, чији се врх налази на коти $+48,30$ метара у односу на плато испред главног улаза у објекат, што је уједно и највиша тачка објекта. У продужетку средњег корпуса је централни хол, да би се у задњем делу средњи корпус завршио правоугаоном просторијом чија дужа ивица захвата целу димензију ширине средњег корпуса, а која у приземљу има намену ресторана, док је на спрату у том простору смештена библиотека.

Бочни корпуси су правоугаоног облика, димензија $33,00 \cdot 53,10$ метара и у основи имају лучне избочине. У тим просторима су смештене скупштинске сале за заседање, које су организоване у облику амфитеатра, са концентричним редовима седишта, тако да се завршавају лучним зидовима. У односу на димензију ширине бочних корпуса ($33,00$ метра), бочни фасадни зидови према улицама Таковској и Влајковићевој “испадају” из фасадне равни укупно по $9,65$ метара, при чему је стрела лука $5,60$ метара, а тетива $28,20$ метара.

Према томе, цео габарит објекта има димензију по подужној оси укупно $109,90$ метара и димензију по поречној оси која одговара дужини средњег корпуса $73,40$ метара.



Слика 5.2.1: објекат Народне скупштине у основи

Кота кровног венца, који иде по обиму целог објекта, налази се на +18,30 метара у односу на коту платоа испред објекта, једино је у непосредној зони изнад сала за заседање, кота кровног венца виша и налази се на +22,20 метара, такође у односу на коту платоа испред објекта.

Објекат Народне скупштине Републике Србије је зидан у масивном конструктивном склопу, са носећим зидовима од опеке. Дебљине носећих зидова се крећу од 292,50 цм у неким зонама темељних зидова, док су уобичајене дебљине носећих зидова 200 цм, 180 цм, 160 цм, 120 цм, 105 цм, све до најтањих од 45 цм и 30 цм. На сучељавањима и укрштањима носећих зидова нема вертикалних армиранобетонских серклажа, јер у време када је објекат грађен (од 1906. до 1936. године), грађевинским прописима то није захтевано.

Међуспратне конструкције су армиранобетонске, најчешће ситноробрасте, са ребрима трапезастог попречног пресека укупне висине цца 70 цм, средње ширине 20 цм и плочом дебљине 8 цм. У неким просторијама где су распони релативно мали, таванице су пуне армиранобетонске плоче дебљине 15 цм.

Темељи носећих зидова су тракасти од опеке или ломљеног камена, а ширина им се креће од 250 цм до 80 цм, док је дубина фундарања на 6,00 до 9,00 метара у односу на коту терена у непосредној близини темеља.

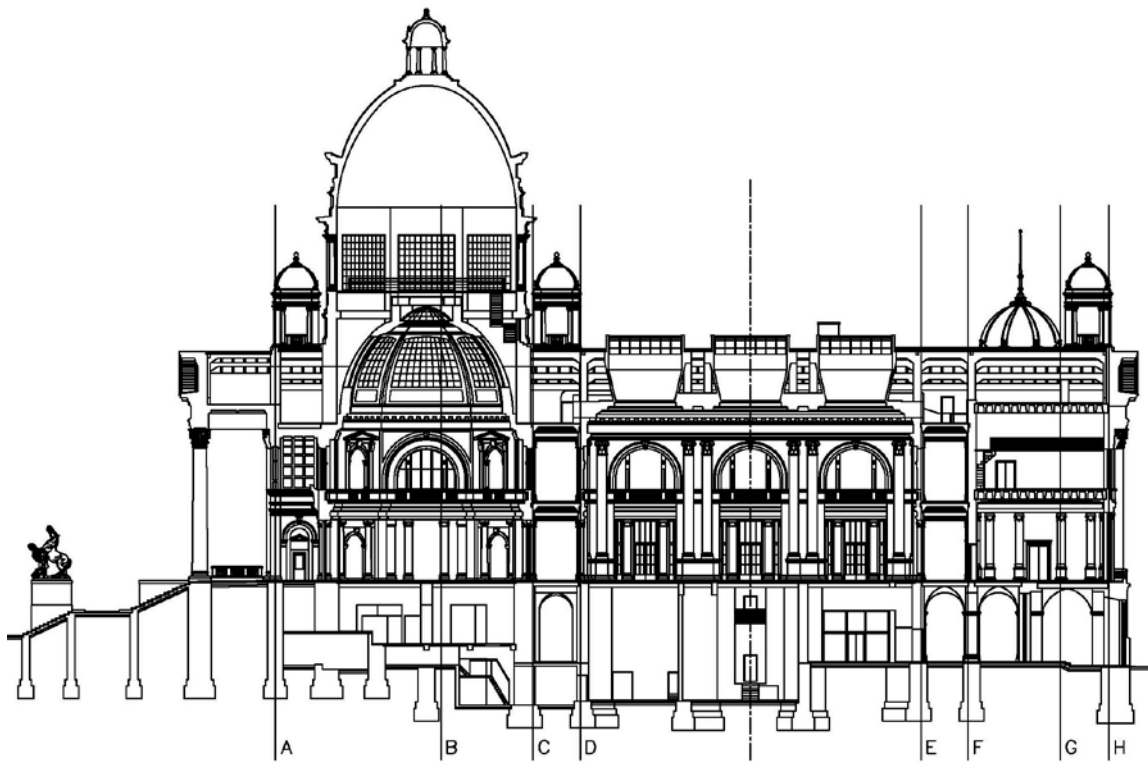
5.2.2 Карактеристике посебне конструктивне целине – масе

Као посебна конструктивна целина (маса), истиче се велика купола, која обухвата куполу као армиранобетонску љуску са ребрима, ивичну прстенасту греду љуске и систем од осам носећих бетонских стубова, правоугаоног попречног пресека, димензија $b/d=85/80$ цм. Уз сваки бетонски стуб, налазе се по два стуба од опеке, кружног попречног пресека, пречника $\varnothing 45$ цм. Обзиром на материјал од којег су изведени, ови стубови од опеке се не могу третирати као носећи. На доњем крају су ослоњени на соклу (подножје куполе), док на горњем крају само визуелно подупиру ивичну прстенасту греду венца куполе, али не учествују у њеном ношењу.

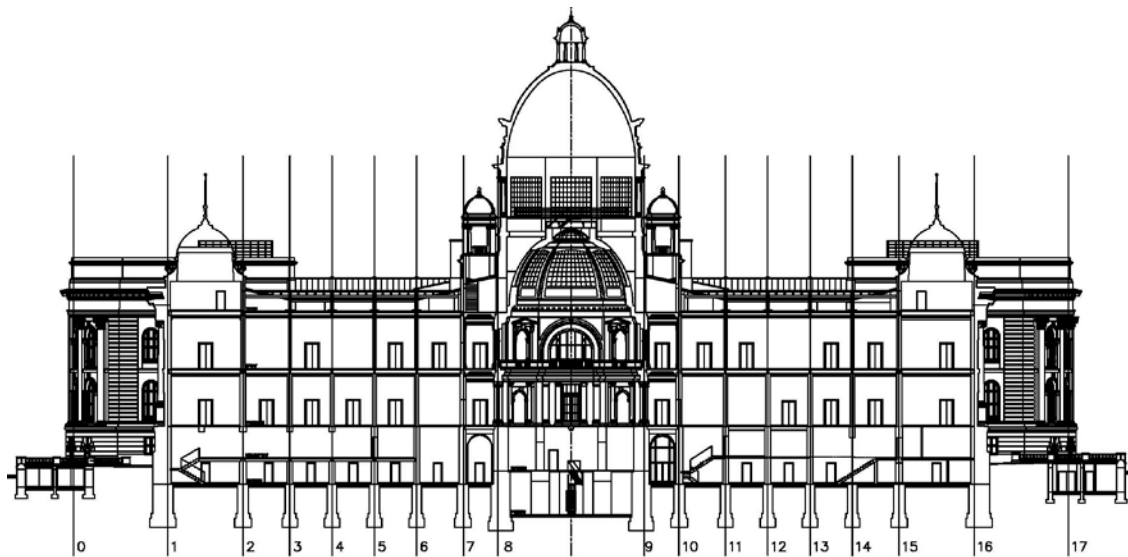
Купола у пречнику има 15,20 м, висина бетонских стубова правоугаоног попречног пресека износи 7,00 м, а висина (стрела) куполе је 11,25. На великој куполи је мала купола, пречника 2,85 м и укупне висине 3,70 м (осам стубова $\varnothing 30$ цм + љуска мале куполе), тако да, када се све сабере, висина целог система велике куполе, мерено од подножја – ослонца на соклу – па до врха мале куполе на врху, износи 21,95 м.

Посматрајући цео објекат зграде Дома Народне скупштине, врх мале куполе је на коти +48,30 метара у односу на коту платоа испред објекта, што значи да је подножје велике куполе на коти +26,35 м у односу на плато.

Велика купола пре свега има намену спољног сагледавања, у циљу наглашавања визуелних маса објекта и дефинисања његове архитектонике. Велика купола не ограђује никакав користан простор. Она наткриљује улазни хол у објекат који се налази у нивоу партера тако што се испод ње, а изнад хола, налази стаклени свод. У самој куполи постоји само сервисна челична конструкција са стазама за одржавање и приступ инсталацијама и за излазак на врх велике куполе, у отворени простор који је наткривен малом куполом.



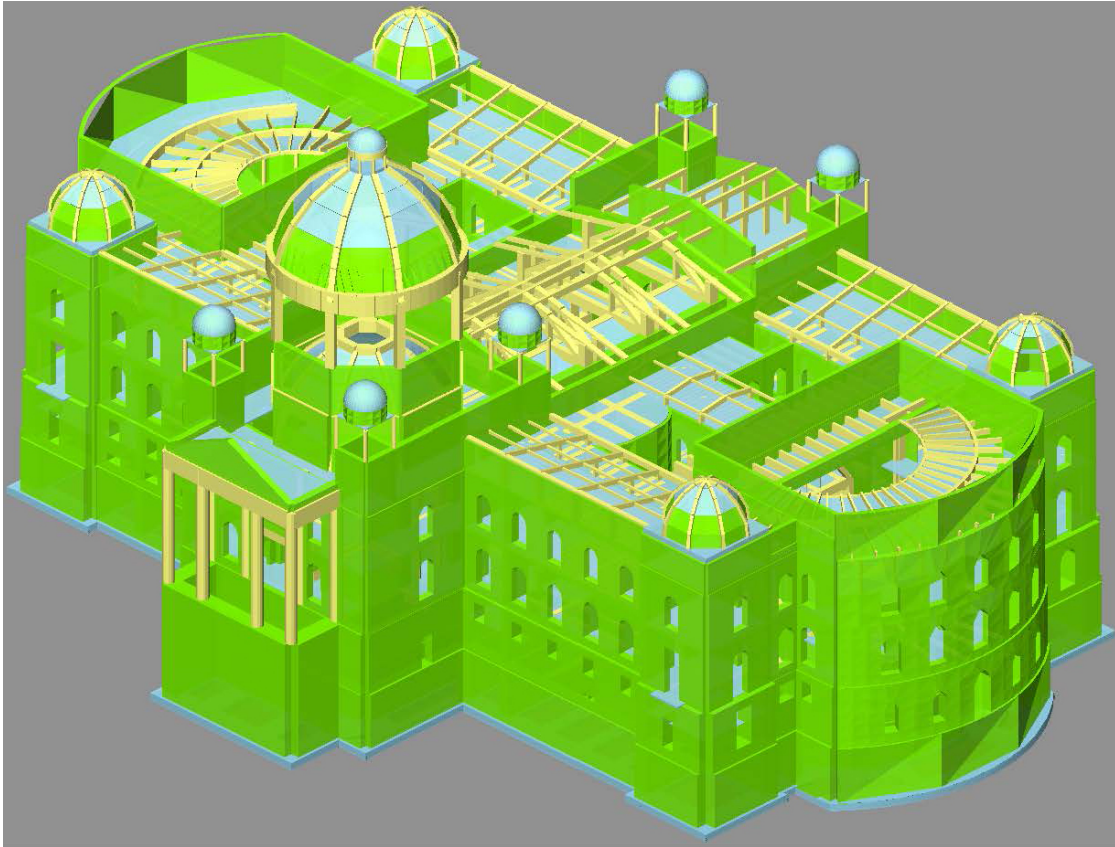
Слика 5.2.2: попречни пресек кроз објекат Народне скупштине (пресекпролази кроз простор велике куполе)



Слика 5.2.3: подужни пресек кроз објекат Народне скупштине (пресек пролази кроз простор велике куполе)

5.2.3 Рачунска анализа проблема издвојене масе

У циљу утврђивања макро проблема велике куполе, креиран је рачунарски модел објекта, помоћу софтверског пакета TOWER (верзија 6.0)⁸⁴.



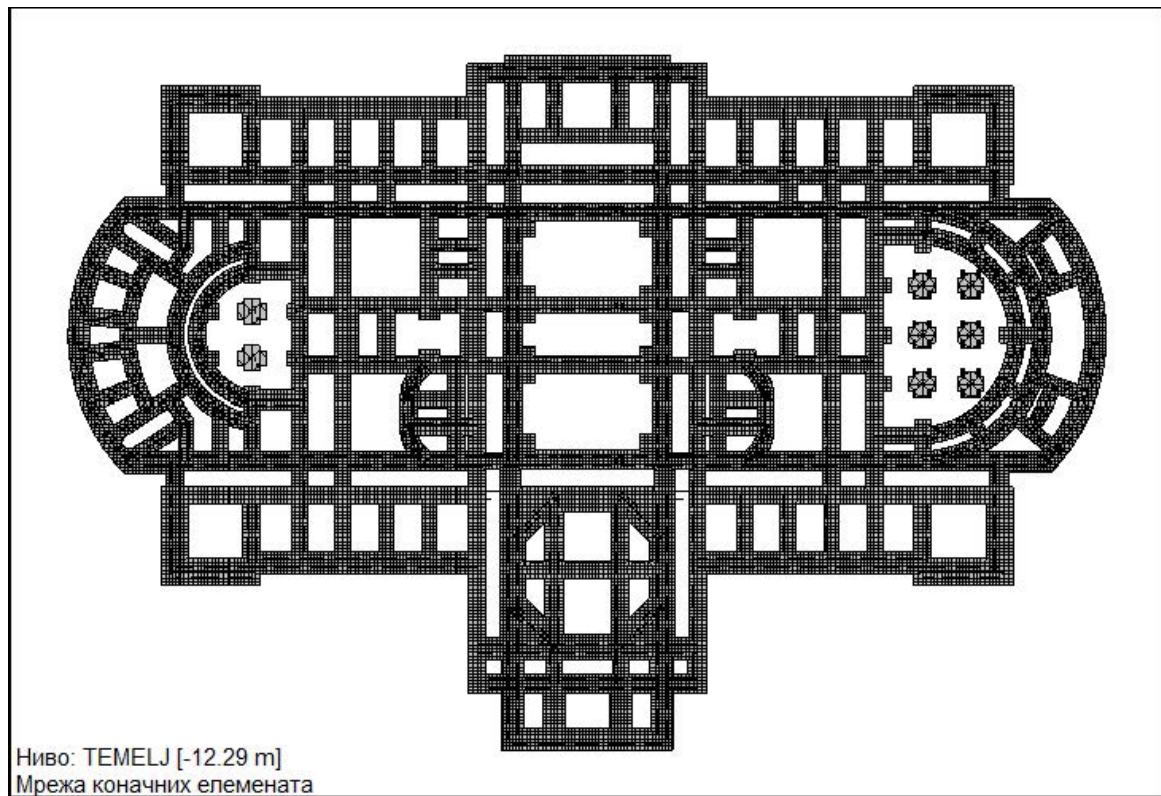
Слика 5.2.4: рачунарски модел објекта Народне скупштине у програмском пакету TOWER, верзија 6.0⁸⁵

Софтверски пакет TOWER се базира на Методи коначних елемената, на основу које се на моделу генерише мрежа коначних елемената, да би се модел подвргао различитим фазама рачунске анализе.

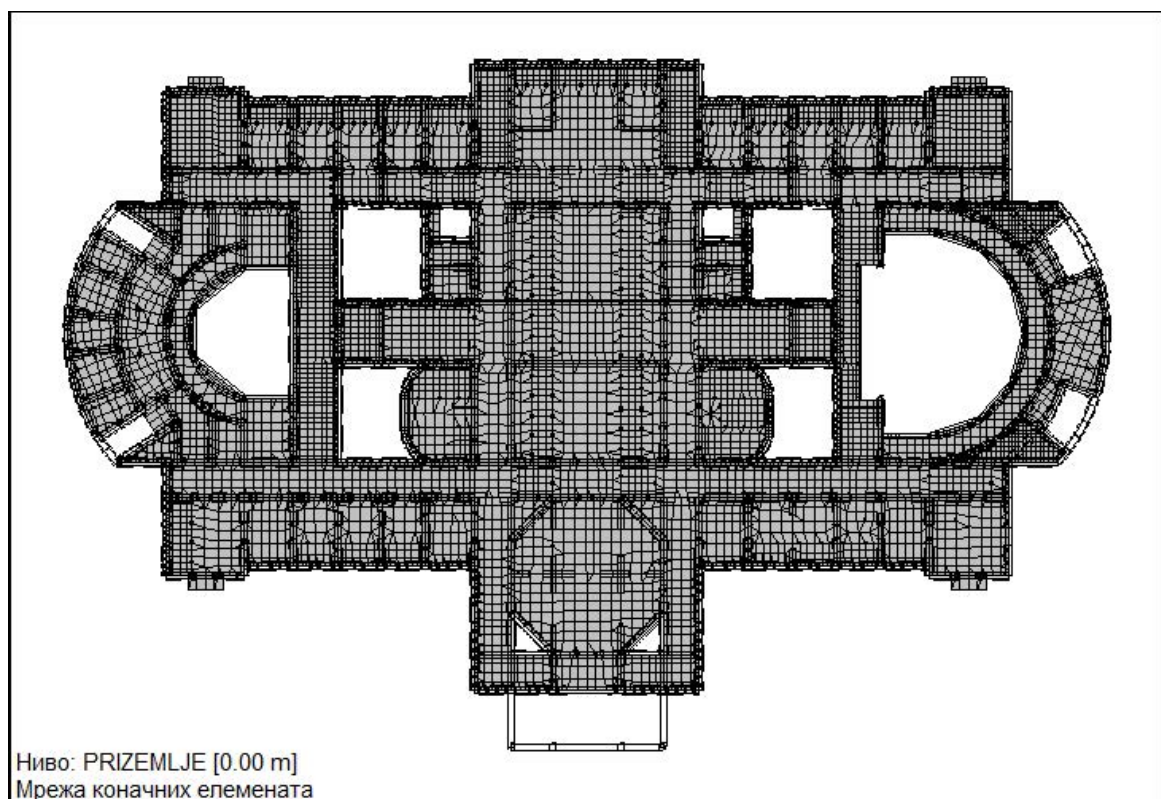
Модел конструкције објекта садржи 132820 чворова мреже коначних елемената, а на следећим сликама је приказана мрежа коначних елемената (МКЕ) за поједине сегменте конструкције.

⁸⁴ www.radimpex.rs, приступљено 18. 01. 2015.

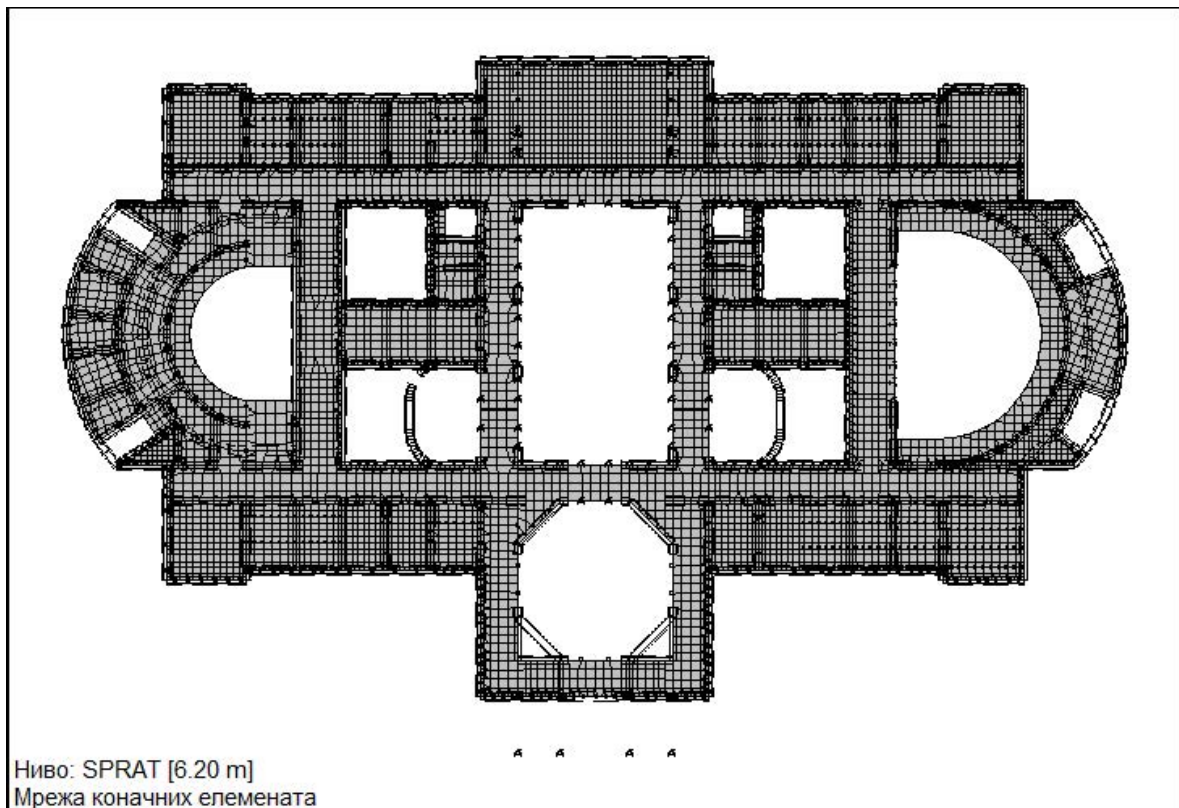
⁸⁵ Аутори рачунарског модела: Драган Дингарац, дипл. инж. грађ., Милан Живадиновић, дипл. инж. грађ. и Јефто Терзовић, дипл. инж. арх.



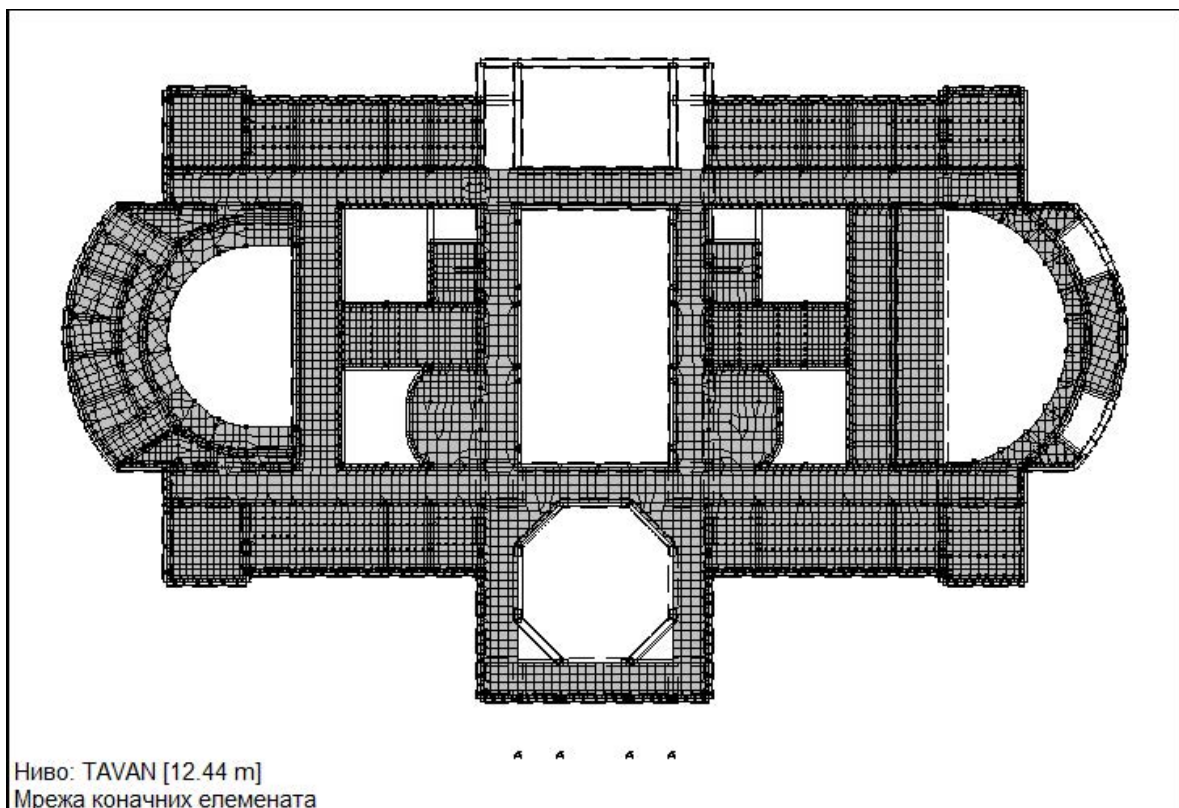
Слика 5.2.5: МКЕ у нивоу “темељна конструкција”



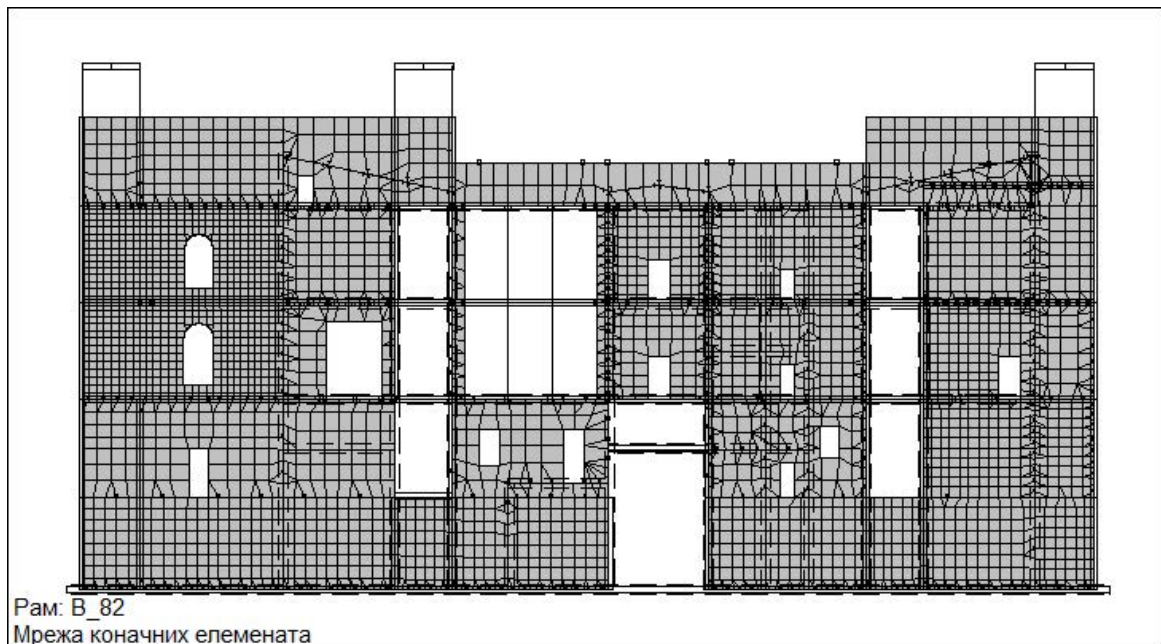
Слика 5.2.6: МКЕ у нивоу “приземље”



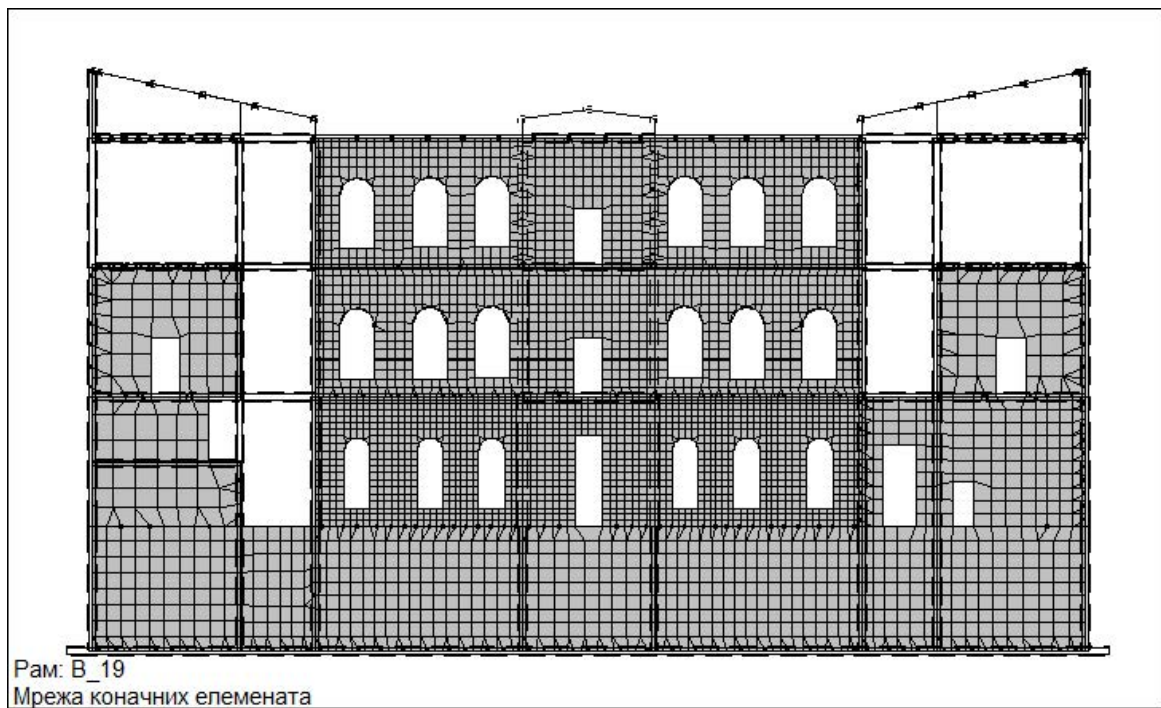
Слика 5.2.7: МКЕ у нивоу “спрат”



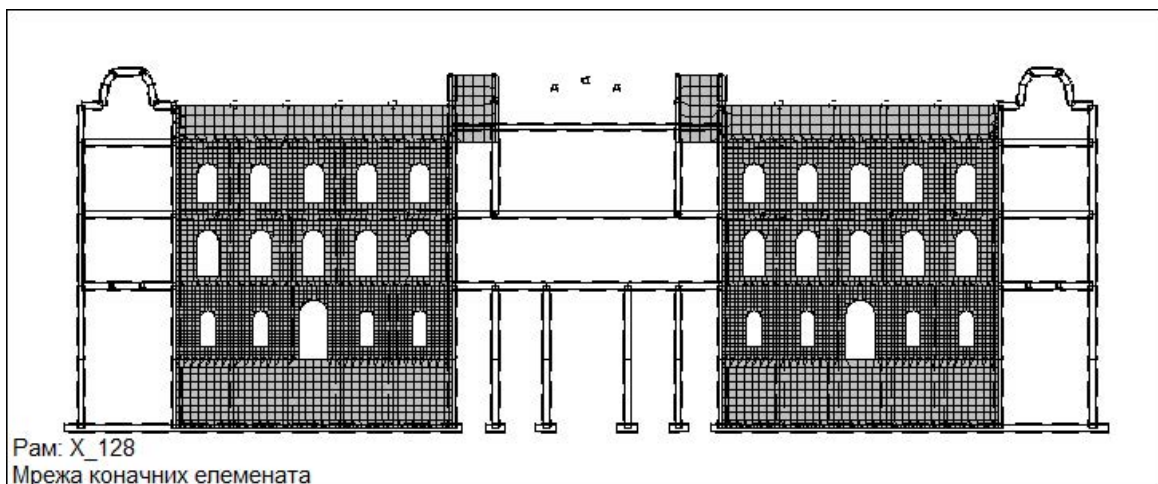
Слика 5.2.8: МКЕ у нивоу “таван”



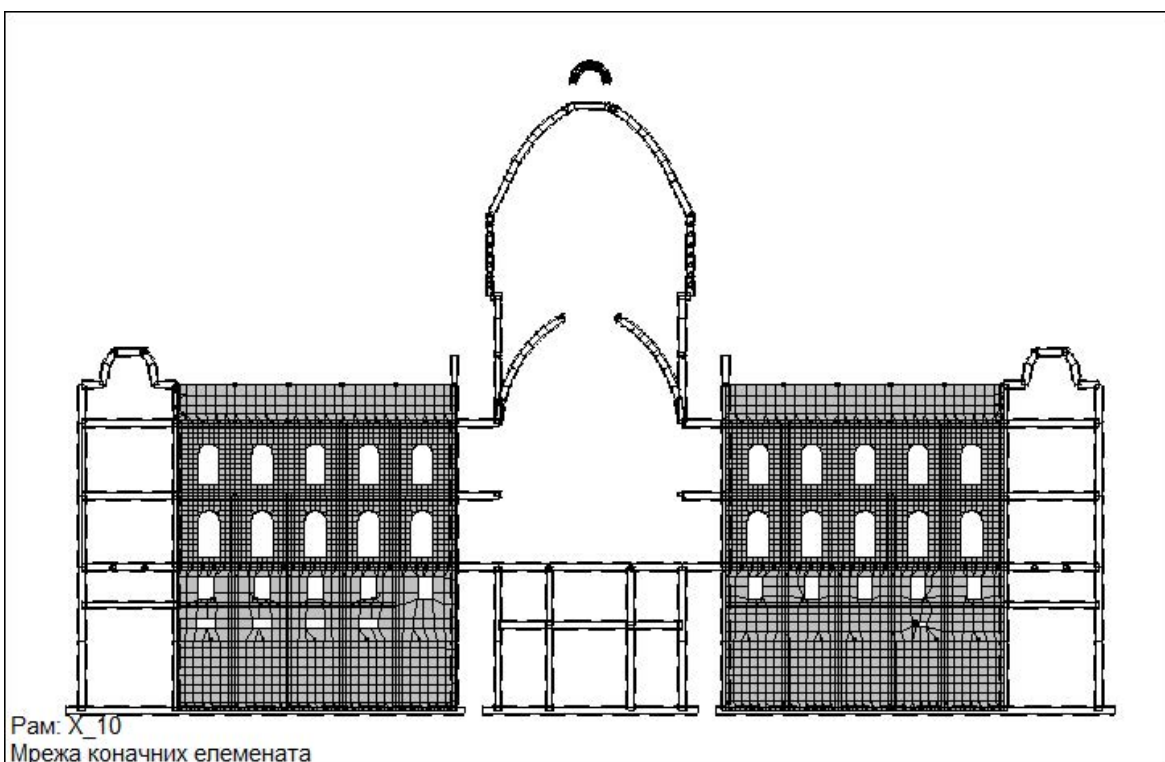
Слика 5.2.9: МКЕ у карактеристичном пресеку (раму) “В_82”



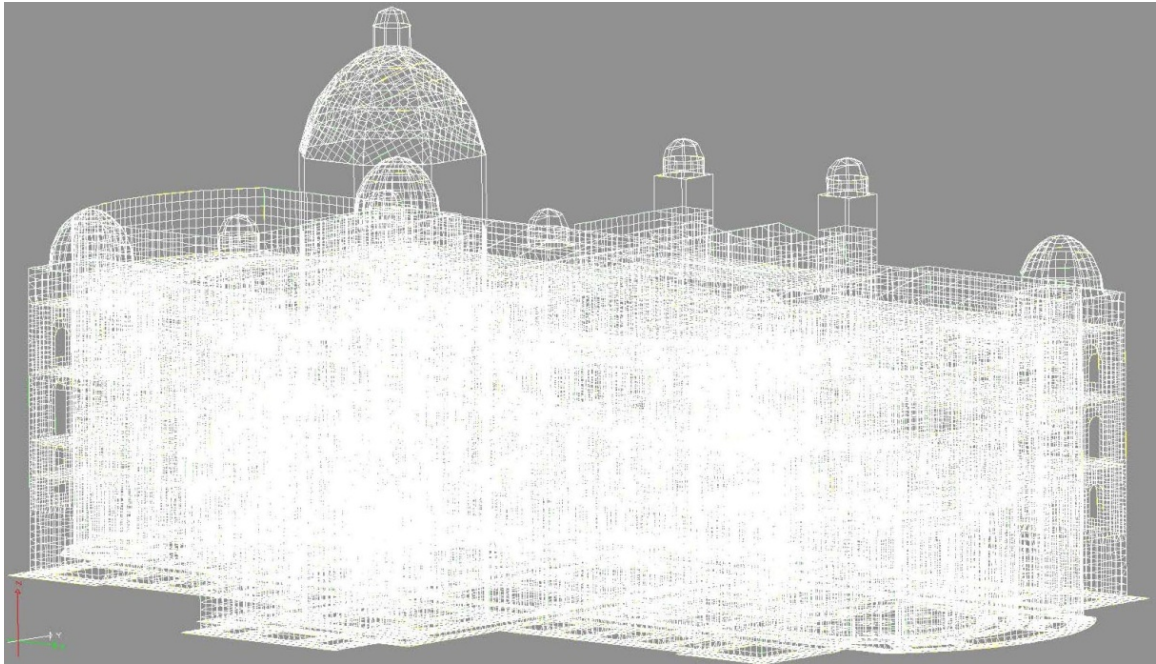
Слика 5.2.10: МКЕ у карактеристичном пресеку (раму) “В_19”



Слика 5.2.11: МКЕ у карактеристичном пресеку (раму) “X_128”



Слика 5.2.12: МКЕ у карактеристичном пресеку (раму) “X_10”



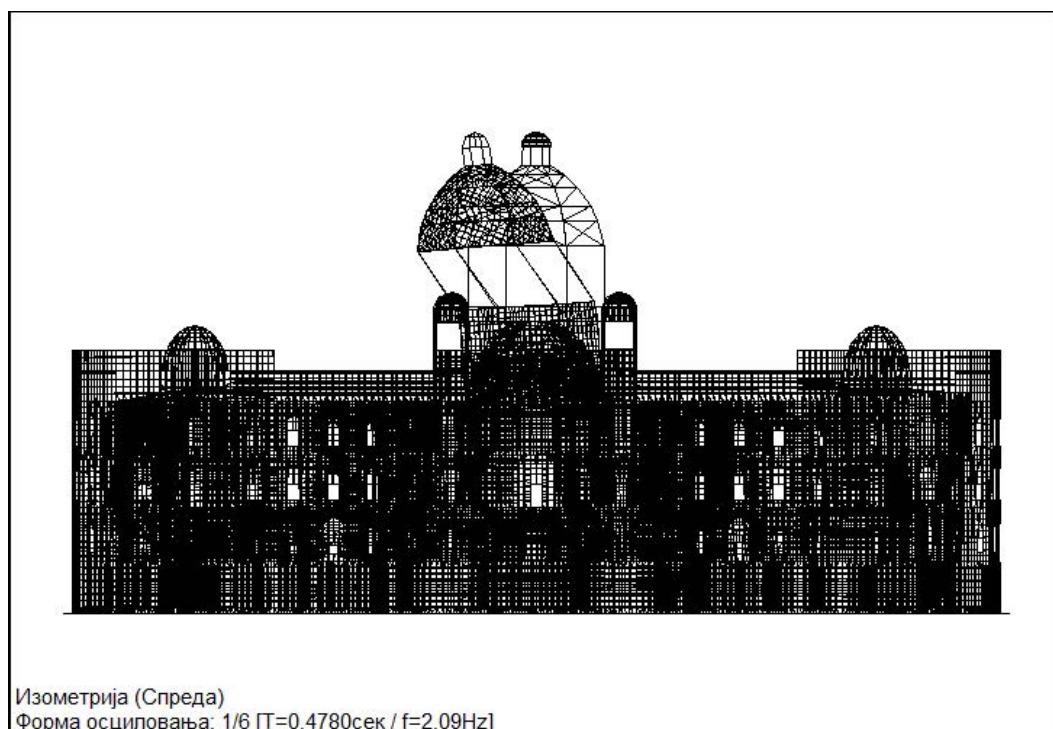
Слика 5.2.13: рачунарски модел са генерисаном мрежом коначних елемената, 3D приказ

У првој фази рачунске анализе, спроведена је модална анализа, кроз шест тонова, чије су вредности приказане у следећој табели.

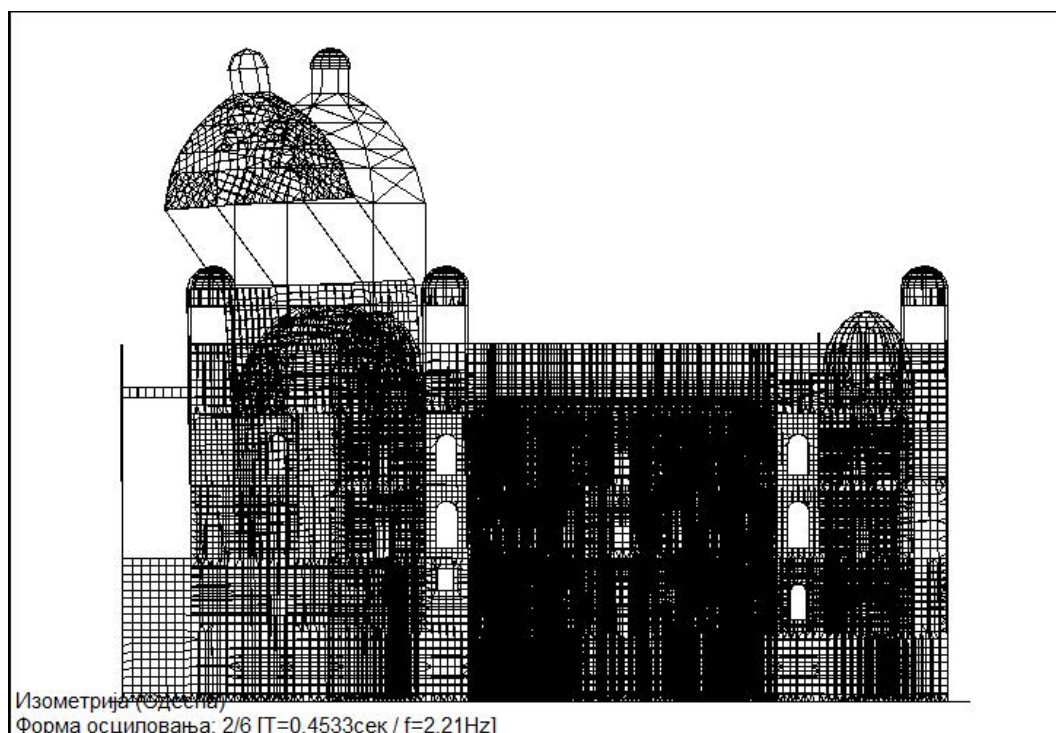
Табела 5.2.1: вредности периода осциловања

Периоди осциловања конструкције			
No	T [s]	f [Hz]	
1	0.4780	2.0920	
2	0.4533	2.2062	
3	0.3698	2.7044	
4	0.3109	3.2169	
5	0.3087	3.2395	
6	0.3007	3.3254	

Могу се уочити два прва тона, са релативно малом међусобном разликом у трајању периоде, а анализом је модела је утврђено да се ради управо о тоновима осциловања конструкције велике куполе у основним ортогоналним “X” и “Y” правцима, као што је приказано на следећим сликама.



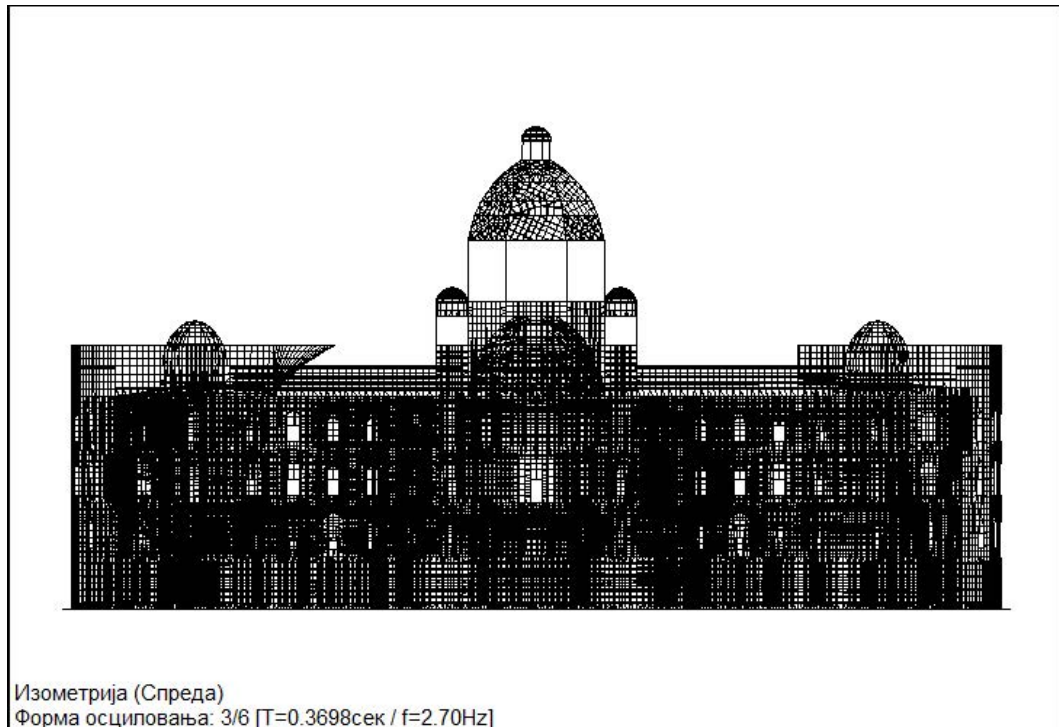
Слика 5.2.14: први тон осциловања – доминантан ортогонални “X” правац



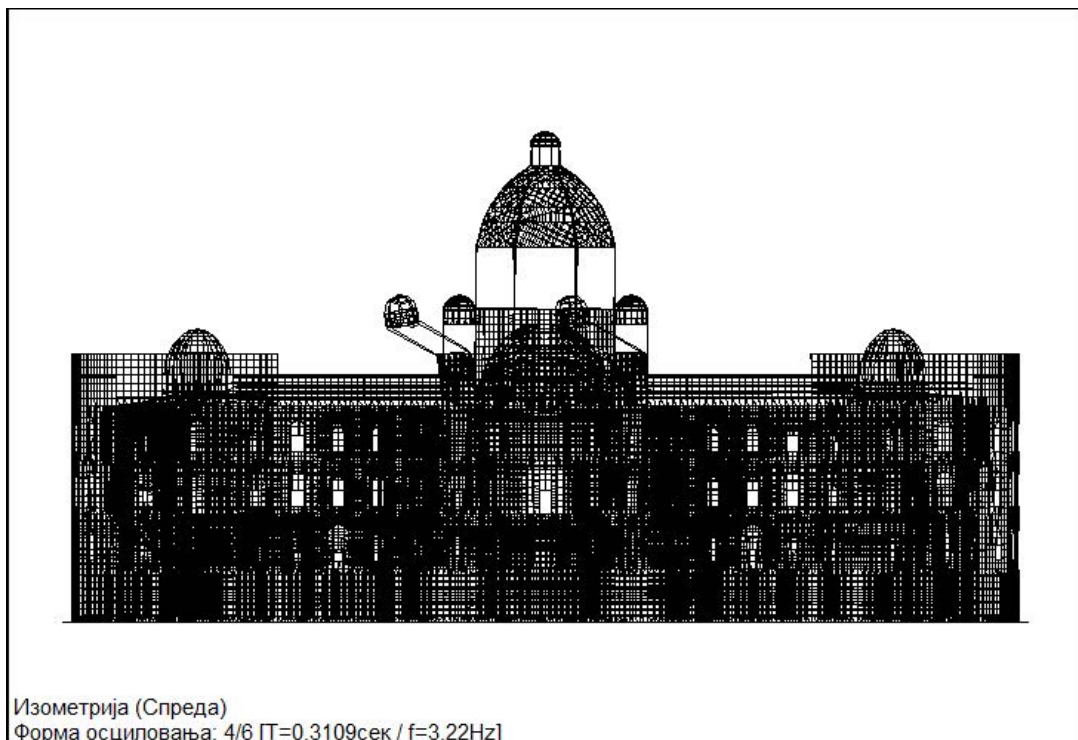
Слика 5.2.15: други тон осциловања – доминантан ортогонални “Y” правац

Такође треба приметити какво понашање конструкције објекта описују тонови модалне анализе од другог до шестог, да би се касније могли упоредити са

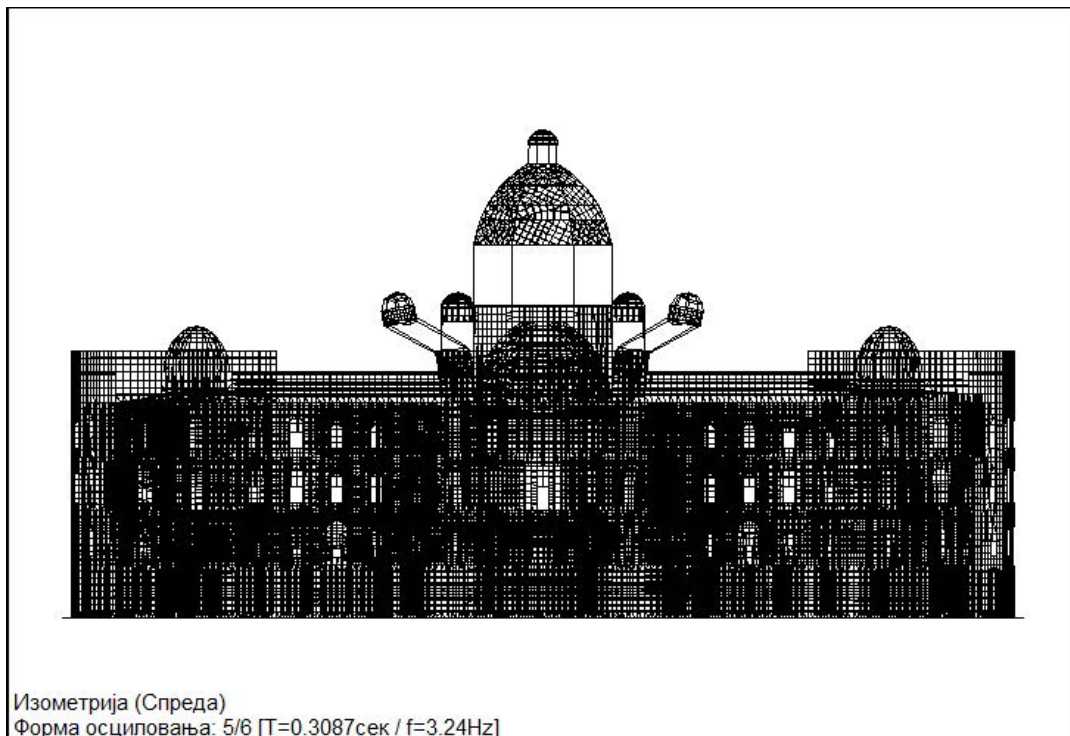
одговарајућим тоновима модалне анализе која ће бити спроведена над модификованим моделом.



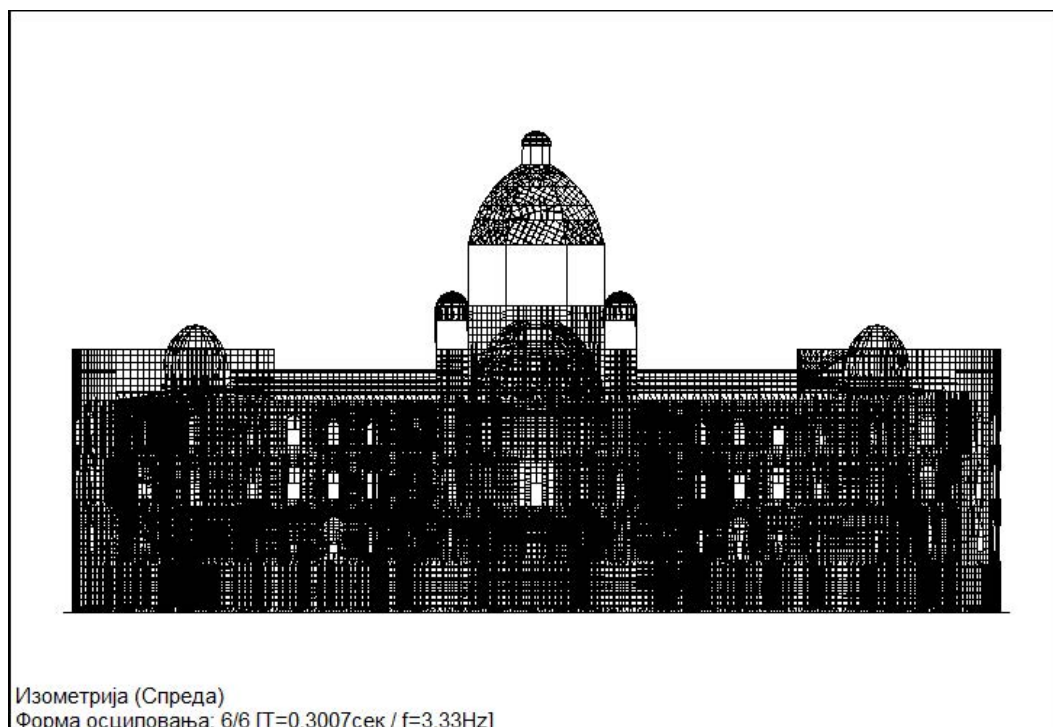
Слика 5.2.16: трећи тон осциловања – “слободни” зид у нивоу кровне конструкције, на левом крилу објекта



Слика 5.2.17: четврти тон осциловања – четвртасте кровне куполе –осцилације блиске углу 45° у основи



Слика 5.2.18: пети тон осциловања – четвртасте кровне куполе – слично као четврти тон, осцилације блиске углу 45° у основи



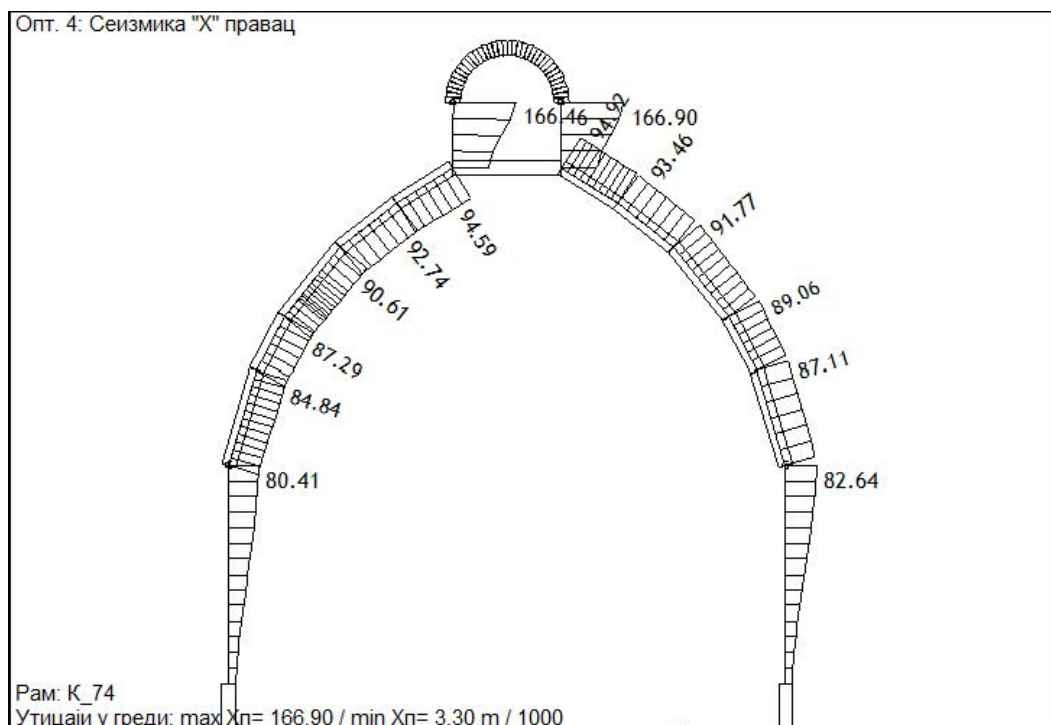
Слика 5.2.19: шести тон осциловања – “слободни” зид у нивоу кровне конструкције, на десном крилу објекта, слично трећем тону

Након модалне анализе изведен је сеизмички прорачун, по методи еквивалентног статичког оптерећења. Објекат је сврстан у VIII сеизмичку зону, по важности је класификован у I категорију, а обзиром да се ради о зиданој конструкцији без система вертикалних армиранобетонских серклажа, објекат се може класификовати као врста конструкције тип 4 (Конструкције са флексибилним приземљем или спратом, односно наглом променом крутости, као и конструкције од обичних зидова)⁸⁶. Вредности добијене кроз поступак модалне анализе, употребљене су засеизмички прорачун конструкције, кроз дефинисање угла дејства земљотреса.

Табела 5.2.2: углови дејства земљотреса, са периодама осциловања

Угао дејства земљотреса:		
Назив	T [sec]	α [°]
Сеизмика "X" правац	0.478	0.00
Сеизмика "Y" правац	0.453	90.00

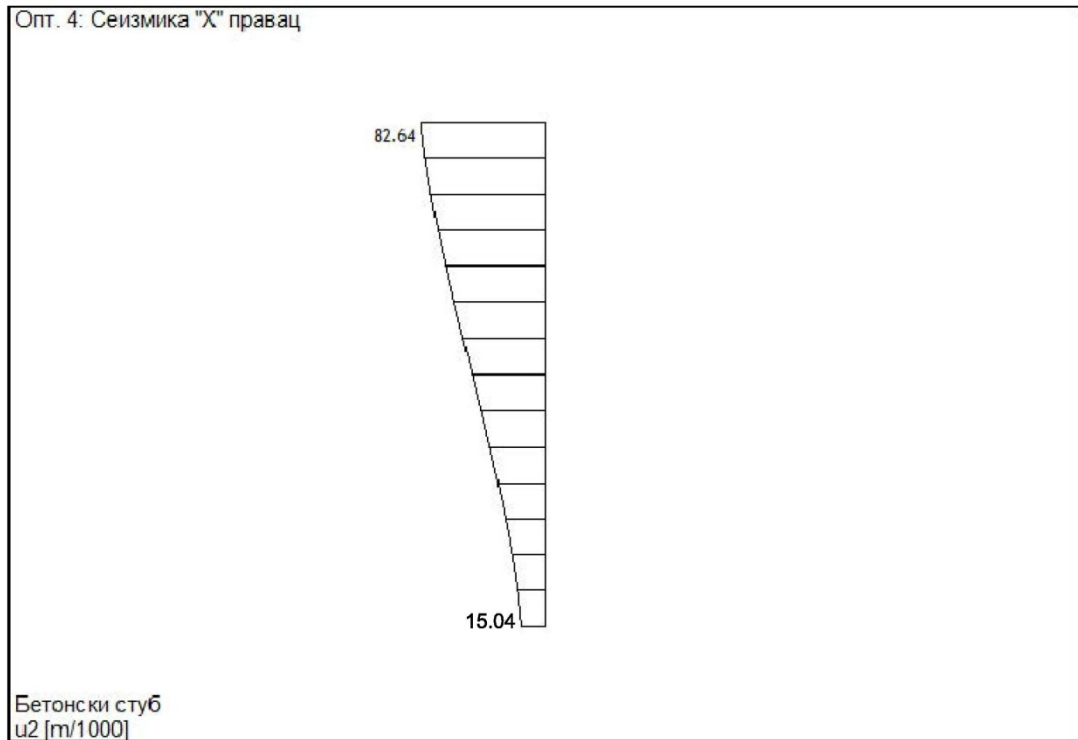
Резултати добијени сеизмичким прорачуном, показују значајне вредности деформација врха објекта, у оба главна ортогонална правца, при чему су померања у "X" правцу за око 10% већа од померања у "Y" правцу.



Слика 5.2.20: деформација врха објекта (велике куполе и мале куполе навеликој куполи) у "X" правцу, за случај оптерећења земљотресом у "X" правцу

⁸⁶ЂОРИЋ, Бранислав, САЛАТИЋ, Ратко, ДИНАМИКА ГРАЂЕВИНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА, Грађевинска књига, Београд, 2011 (стр. 246)

Основни корпус објекта обухвата целину објекта гледано од његовог подножја до сокле на коју је ослоњена велика купола. Да би се стекла јасна представа о различитим степенима крутости велике куполе и основног корпуса објекта, треба посматрати померање по висини бетонског стуба, на који је ослоњен венца велике куполе, што је приказано на следећој слици.



Слика 5.2.21: деформација у "X" правцу по висини бетонског стуба, случај оптерећења земљотресом у "X" правцу

Може се уочити да померање подножја стуба износи свега 15,04 мм, што уједно представља померање врха основног корпуса објекта. Тада ће релативно померање венца велике куполе износити:

$$X_{п,вк,рел} = 82,64 - 15,04 = 67,60 \text{ мм}$$

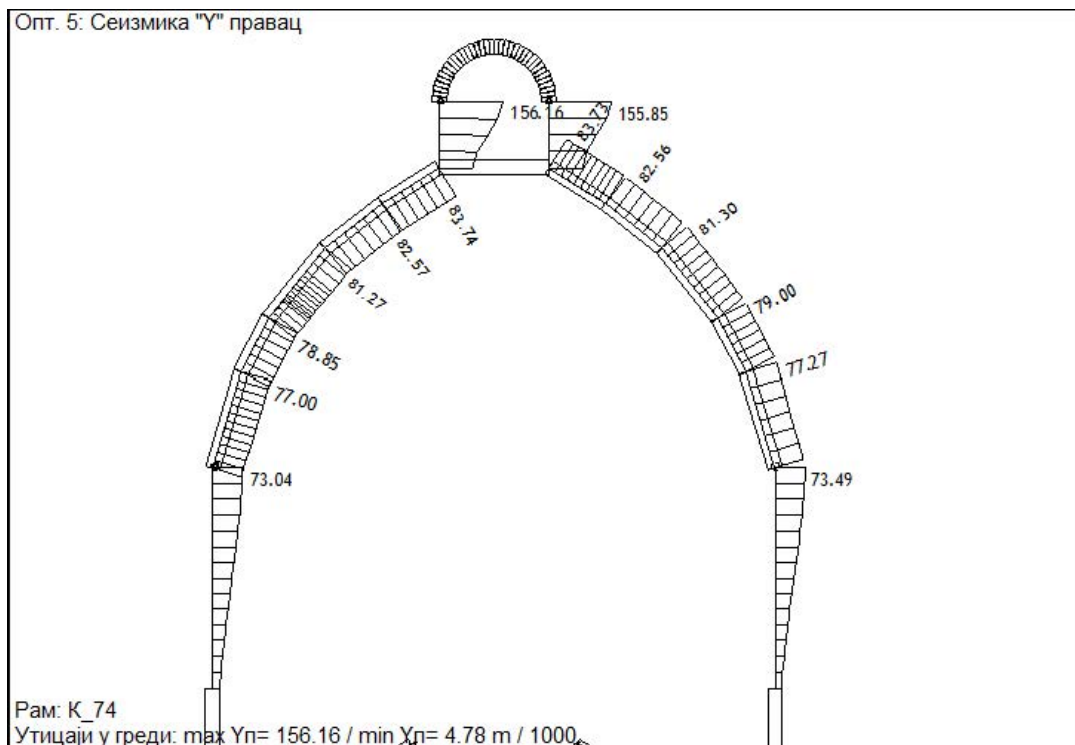
То даље значи да релативно померање венца мале куполе, у односу на подножје велике куполе, износи:

$$X_{п,мк,рел} = 166,90 - 15,04 = 151,86 \text{ мм.}$$

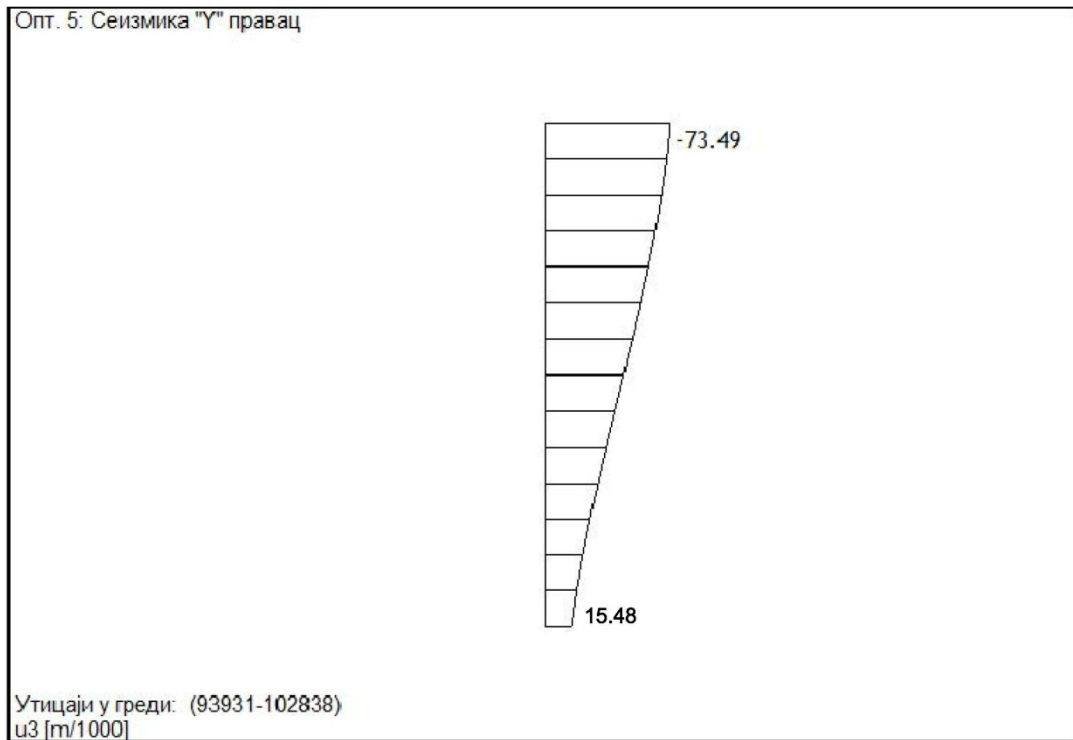
Треба уочити и да померање врха велике куполе износи 94,92 мм, а да померање кровног венца мале куполе износи 166,90 мм, што значи да релативно померање венца мале куполе, у односу на врх велике куполе, износи 71,98 мм.

Кључни параметар за сагледавања разлике крутости основног корпуса објекта и велике куполе јесте вредност релативног померања венца велике куполе $X_{п,вк,рел} = 67,60$ мм, из разлога што се ради о прираштају хоризонталног померања конструкције на висини од 7 м – од подножја велике куполе, до њеног венца. На то се још надовезује прираштај померања од венца до врха велике куполе, као и посебан проблем померања мале куполе на врху, који овде неће бити посебно обрађиван, иако је веома индикативан.

Код деформација велике куполе за дејство земљотреса у “Y” правцу, важе исти закључци као и за случај деформација од дејства земљотреса у “X” правцу, а напоменуто је да су вредности ових деформација за око 10% мање од вредности деформација за “X” правац.



Слика 5.2.22: деформација врха објекта (велике куполе и мале куполе на великој куполи) у “Y” правцу, за случај оптерећења земљотресом у “Y” правцу



Слика 5.2.23: деформација у “Y” правцу по висини бетонског стуба, за случај оптерећења земљотресом у “Y” правцу

Аналогно претходно приказаним вредностима померања за дејство земљотреса у “X” правцу, могу се израчунати релативне вредности и за “Y” правац.

Померање венца велике куполе износи:

$$Y_{п,вк,рел} = 73,49 - 15,48 = 58,01 \text{ мм}$$

Релативно померање венца мале куполе, у односу на подножје велике куполе, износи:

$$Y_{п,мк,рел} = 155,85 - 15,48 = 140,37 \text{ мм.}$$

Померање врха велике куполе износи 83,74 мм, а померање кровног венца мале куполе износи 155,85 мм, што значи да релативно померање венца мале куполе, у односу на врх велике куполе, износи 72,11 мм.

Наведени резултати показују веома велике вредности померања врха објекта проузроковане земљотресом. Приметно је да се конструктивни систем велике куполе, услед дејства сеизмичких сила, понаша у великој мери независно и

асинхроно у односу на објекат чији је саставни део. Потребно је пронаћи решење које ће померања свести на прихватљиву меру и које ће, пре свега, интегрисати конструктивни систем велике куполе у конструктивни систем остатка објекта.

Велика купола као армиранобетонска љуска, заједно са ивичном прстенастом гредом, за дејство хоризонталних (сеизмичких) сила, представља значајну инерцијалну масу.

5.2.4 Решење система за сеизмичко укрућење

Интеграција структуре велике куполе са остатком конструкције објекта, постиже *секонструкционим клиритом* и челичним рамом. Конструкциони клирит се поставља у залученим површима постојеће стаклене фасаде велике куполе, управо уместо постојеће стаклене опне. Постојећа стаклена опна је направљена на класичан начин: црна браварија од витких профила формира мрежу – роштиљ, односно фасадну поделу, у коју су смештена окна од обичног прозорског стакла, дебљине 3 до 4 мм.

Појам конструкционог клирита, односи се на клирит који на фасади има носећу улогу, а не само функцију преграђивања унутрашњег простора од спољног, уз подразумевану провидност. У том смислу, “конструкциони” значи *носећи*, насупротив уобичајеном значењу у грађевинским, односно бетонским конструкцијама, где се слична реч “конструктивно”, обично користи за неносеће елементе, који се тада конструктивно армирају.

Конструкциони клирит има дебљину $d_{ст} = 60$ мм и састављен је од окана димензија 400/500 мм. Клирит је смештен у челични роштиљ, кога чини 9 хоризонталних пречки и 11 вертикалних пречки “Т” пресека. Свака хоризонтална пречка има полигоналну подужну осу и то тако да је оса уписана у обличасту површ провидне фасаде. Вертикалне челичне пречке роштиља су на међусобном осном удаљењу од $\lambda_{вер} = 420$ мм, а хоризонталне пречке су на међусобном осном удаљењу од $\lambda_{хор} = 520$ мм. Ивични профили челичног роштиља су круто везани за бетонску

конструкцију на коју су наслоњени целом својом дужином, тако што су типловани можданицима, а можданици су на међусобном осном растојању $\lambda_m = 300$ мм.

Описани систем којег чини челични рам – роштиљ – у који је смештено 80 окана конструкционог клирита, што је све заједно чини “мозаик” габарита 4200 / 4400 мм у фронталном изгледу, попуњава свих осам поља између стубова правоугаоног попречног пресека на фасади велике куполе. Свако окно клирита је круто у својој равни, а посредством челичног рама, заједно са суседним окнима формира круту обличасту површ, континуално круто везану за постојеће конструктивне бетонске елементе велике куполе. На тај начин, конструкција велике куполе постаје јединствени крути систем, сачињен од:

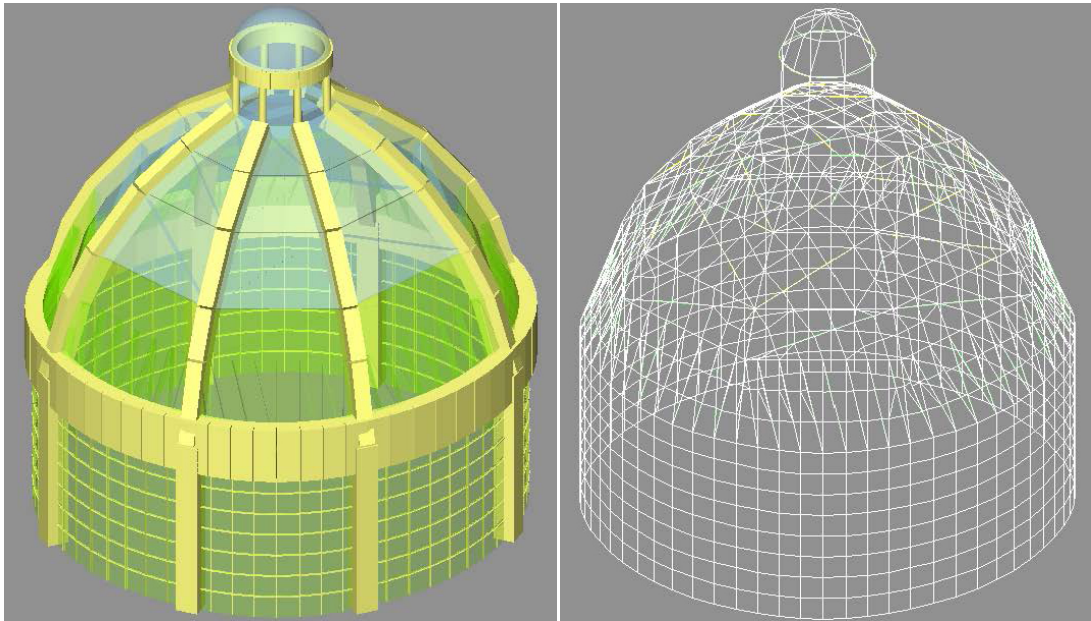
- постојеће бетонске конструкције (осам стубова правоугаоног попречног пресека, прстенаста греда правоугаоног попречног пресека по врху стубова у висини фриза велике куполе);
- челичног роштиља који по геометрији и подели одговара постојећој фасадној браварији велике куполе;
- конструкционог клирита из правоугаоних сегмената, који по облику одговарају постојећим стакленим окнима на фасади велике куполе.

Рачунарски модел, третиран у претходном поглављу, сада је допуњен плочастим елементима – окнима од конструкционог, ламелираног клирита. Физичко-механичке карактеристике ламелираног клирита су дефинисане у бази материјала и као такве су придружене плочастим елементима у рачунарском моделу. Претходно су подаци о физичко-механичким својствима ламелираног клирита добијени кроз лабораторијска испитивања, о чему ће бити речи у следећим поглављима.⁸⁷

Табела 5.2.3: физичко-механичка својства клирита, која су придружена плочастим елементима на великој куполи у рачунарском моделу

Табела материјала				
No	Назив материјала	E[kN/m ²]	μ	γ [kN/m ³]
		E_m [kN/m ²]	μ_m	α_t [1/°C]
1	КЛИРИТ	3.800e+6	0.20	11.70
		3.800e+6	0.20	6.560e-7

⁸⁷Мурављов, М., Јевтић, Д. (2013). *Извештај о лабораторијским испитивањима физичко – механичких својстава ламелираног стакла и клирита*. Институт за материјале и конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду



Слике 5.2.24 и 5.2.25: рачунарски модел велике куполе – рендерован и са мрежом коначних елемената; остатак конструкције објекта је на графичком режиму “невидљиво”

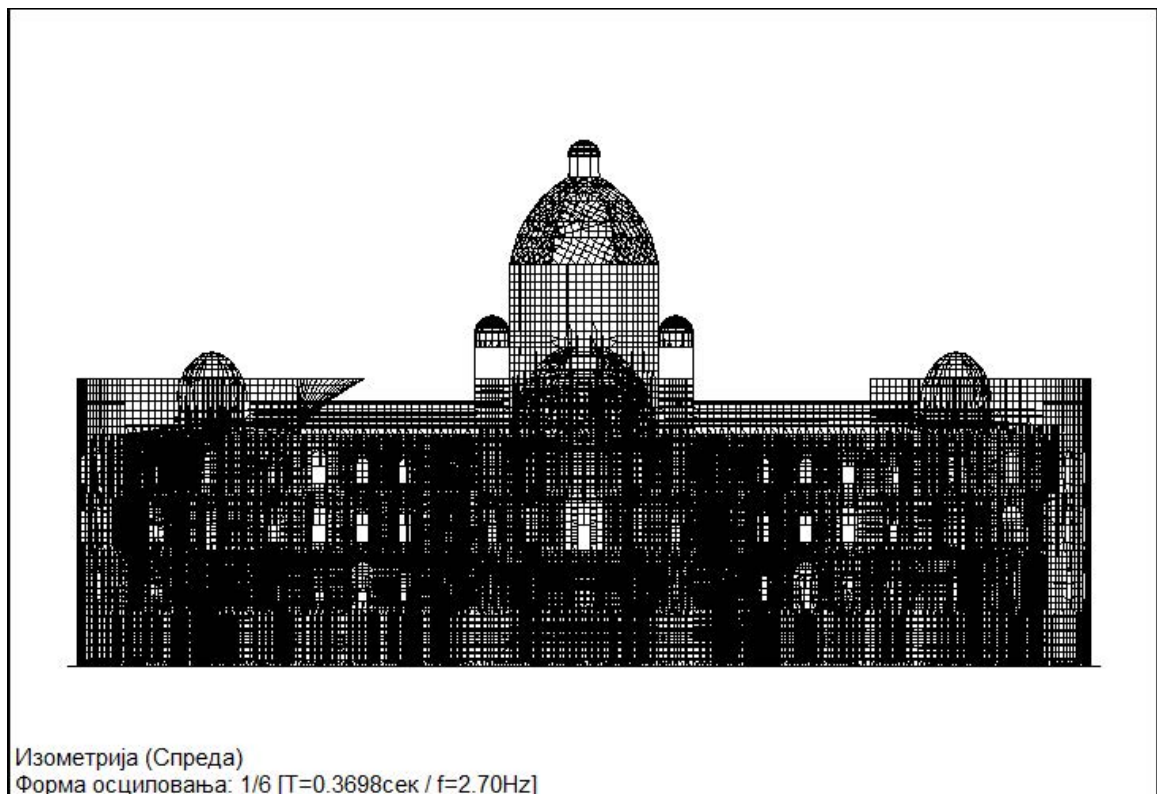
Конструкција велике куполе, са ојачањима у виду панела од конструкционог клирита, моделирана је као полиедарска структура. То одговара реалној геометрији објекта, јер панели нису залучени, већ су смештени између две суседне вертикале челичног рама, који има додатке за обезбеђивање пуног налегања бочне стране панела. О овом проблему и његовом утицају на носивост панела у односу на силе паралелне његовој равни, већ је било речи у поглављу 4.

5.2.5 Рачунска анализа система за асеизмичко укрупњење

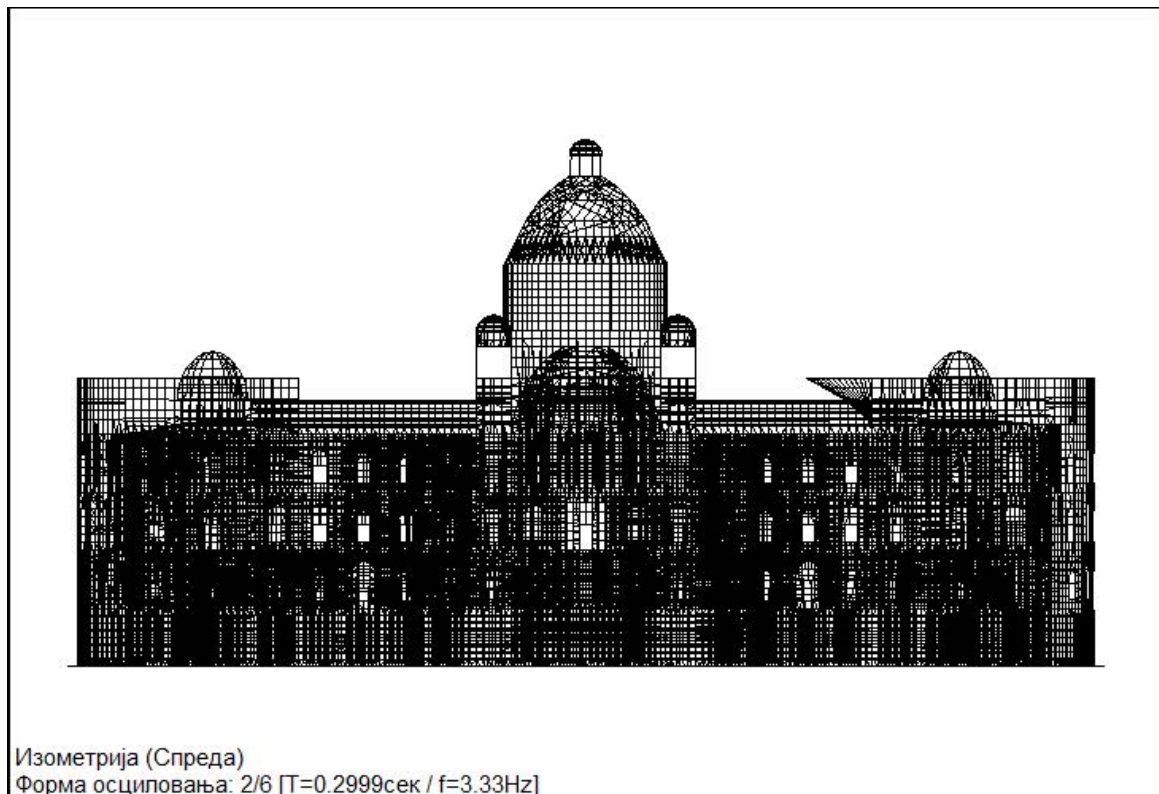
Да би се утврдио ефекат увођења елемената од конструкционог ламелираног стакла у конструкцију куполе, изведена је рачунска анализа у потпуности аналогна оној из претходног поглавља. Модална анализа је спроведена кроз шест тонова, а добијене вредности су приказане у следећој табели.

Табела 5.2.4: вредности периода осциловања, из рачунарског модела саукрућењима у виду конструкционог ламелираног стакла

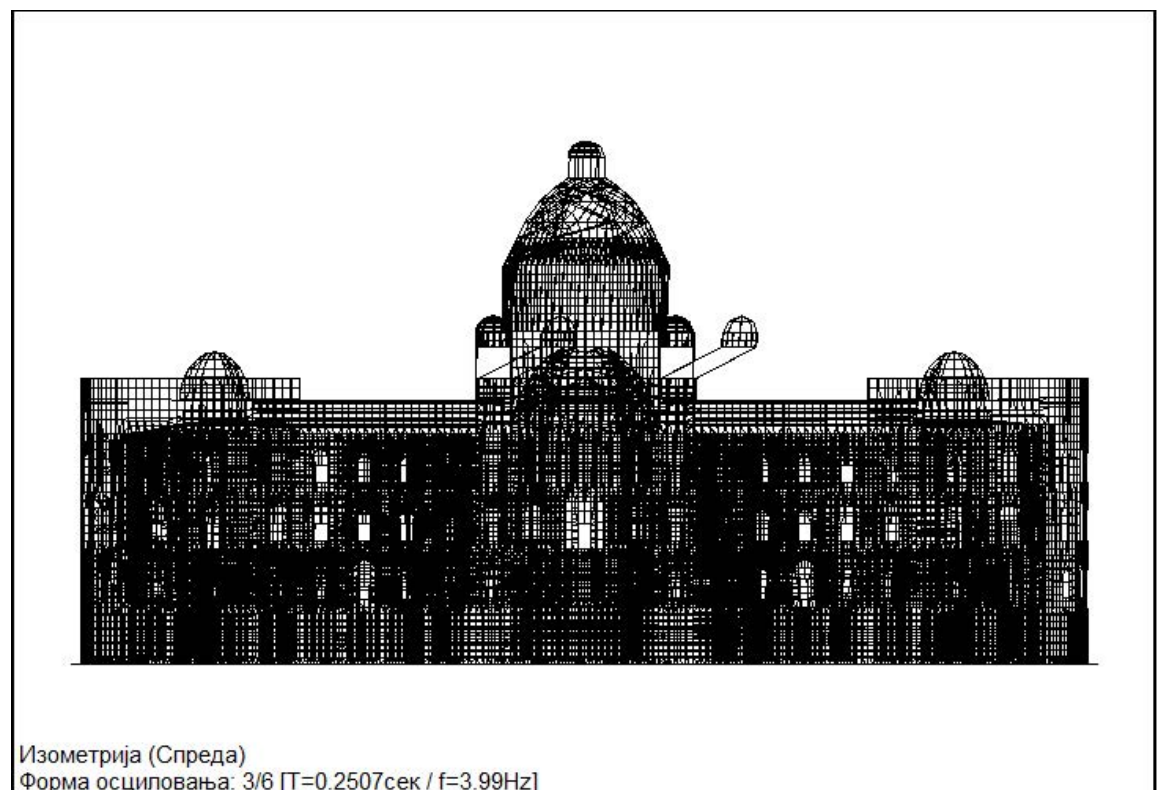
Периоди осциловања конструкције		
No	T [s]	f [Hz]
1	0.3698	2.7041
2	0.2999	3.3342
3	0.2507	3.9892
4	0.2495	4.0082
5	0.2429	4.1162
6	0.2424	4.1249



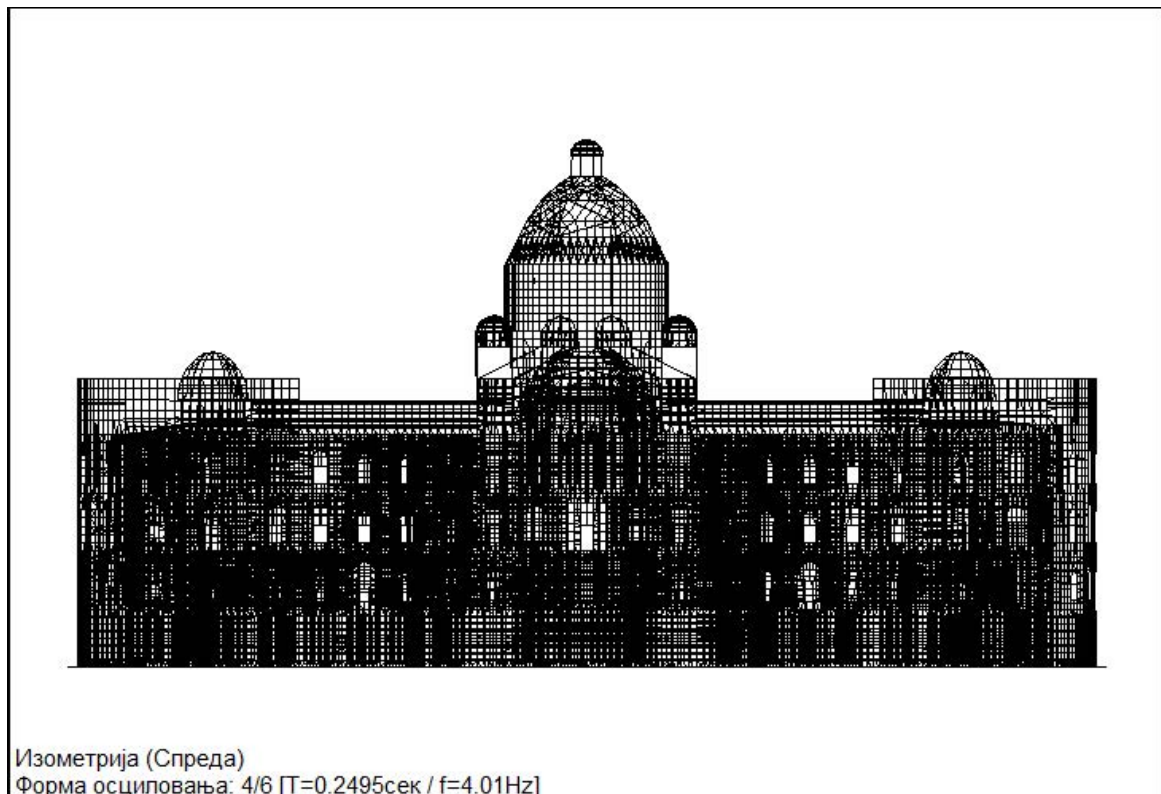
Слика 5.2.26: први тон осциловања – “слободни” зид у нивоу кровнеконструкције, на левом крилу објекта



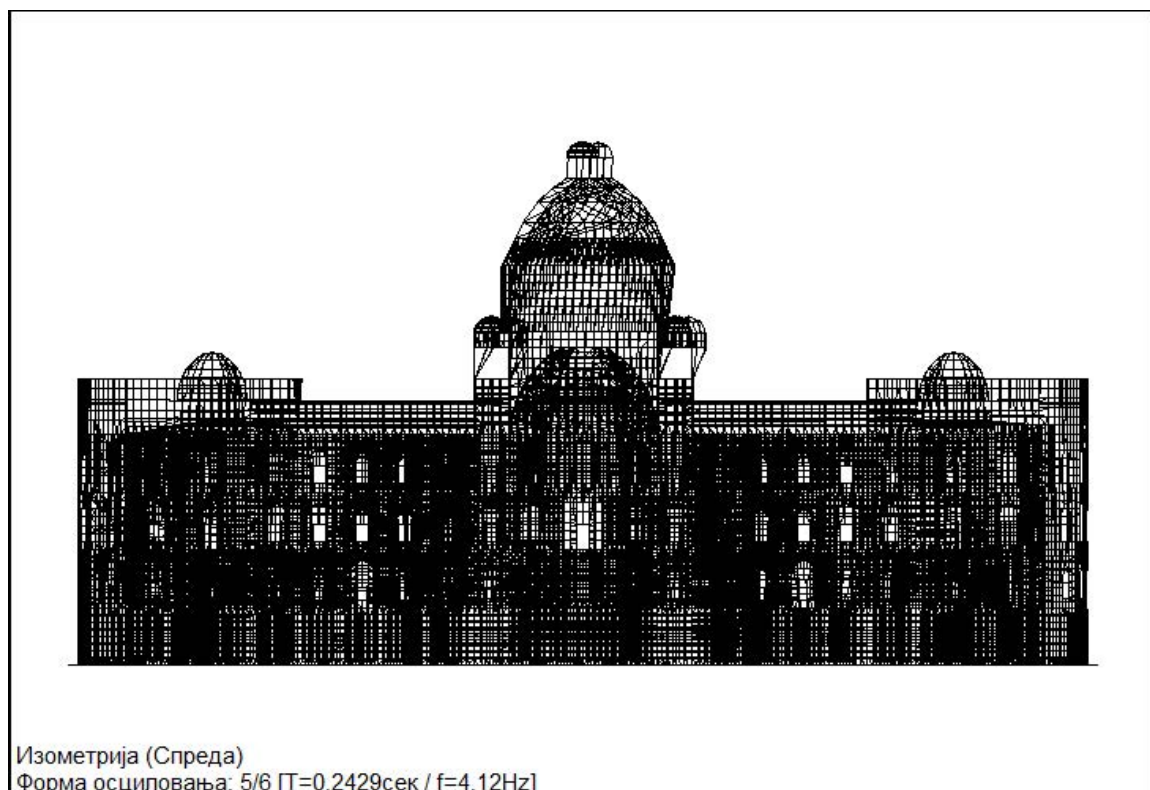
Слика 5.2.27: други тон осциловања – “слободни” зид у нивоу кровне конструкције, на десном крилу објекта, слично првом тону



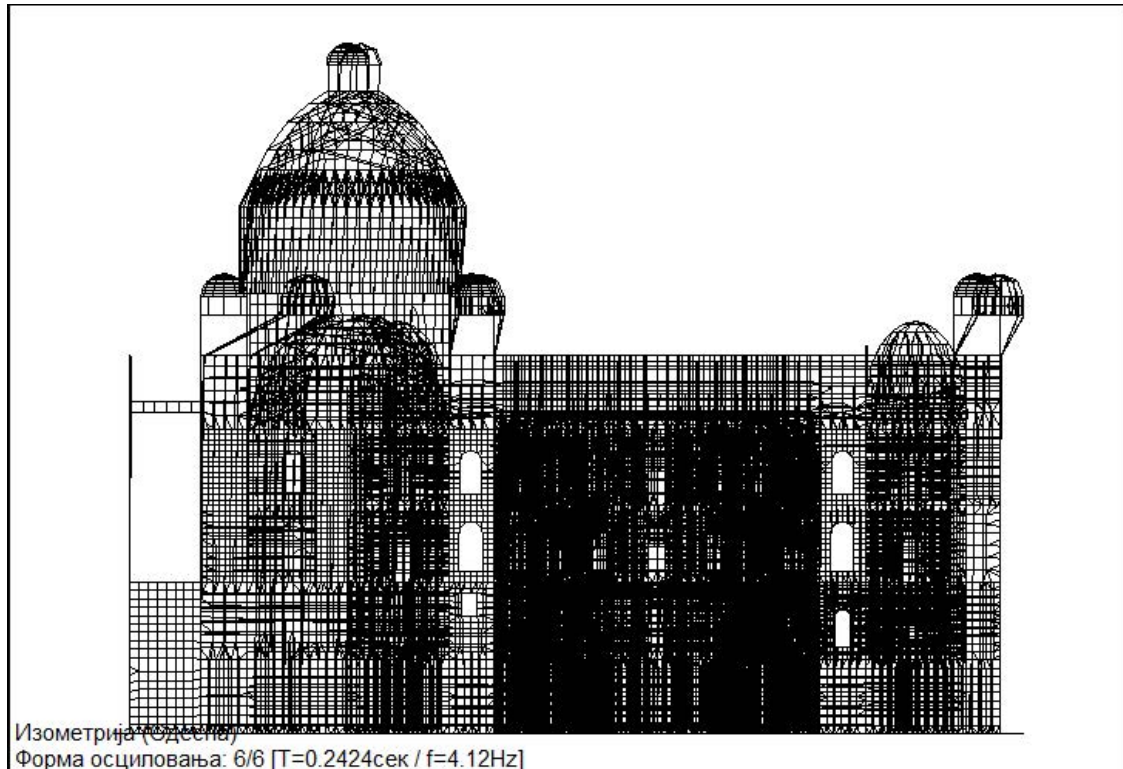
Слика 5.2.28: трећи тон осциловања – четвртасте кровне куполе – осцилације блиске углу 45° у основи



Слика 5.2.29: четврти тон осциловања – четвртасте кровне куполе – осцилације блиске углу 45° у основи, слично трећем тону



Слика 5.2.30: пети тон осциловања – одражава се на мале четвртасте куполе, али и на велику куполу, за коју је доминантан ортогонални “X” правац



Слика 5.2.31: шести тон осциловања; аналогно петом тону – одражава се на мале четвртасте куполе, али и на велику куполу, за коју је доминантан ортогонални “Y” правац

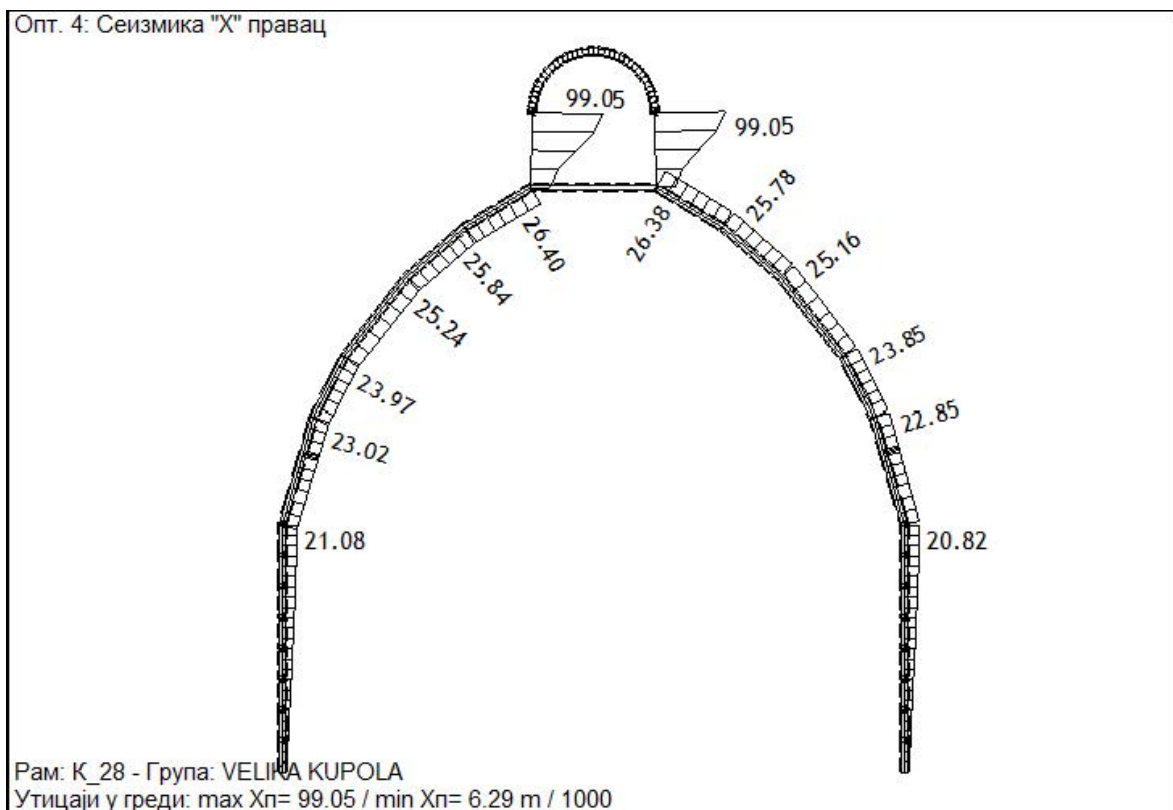
Упоредивањем резултата модалне анализе првобитног рачунарског модела, са резултатима из другог рачунарског модела на којем је примењен конструкциони ламелирани клирит као укрућење конструктивног система велике куполе, може се уочити да су се дословце својства прва два тона из првог модела, померила на крај листе тонова у другом моделу. Наравно, пошто су својства осциловања која су у првом случају описивала први и други тон, постала својства која описују пети и шести тон, њихове бројне вредности периода осциловања и фреквенције су сасвим другачије (период осциловања је краћи, а фреквенција је виша). Иако у коментару испод слика на којима су приказане осцилације у петом и шестом тону пише да су то доминантне осцилације велике куполе, приметно је да су исто толико, ако не и више, у тим тоновима изражене осцилације четвртастих купола, које очигледно имају посебан проблем мањка крутости.

Закључак је да се упоређењем резултата две модалне анализе, може уочити да је примена конструкционог ламелираног клирита у циљу укрућења конструктивног система велике куполе и његове интеграције у конструктивни систем остатка објекта, постигла пун ефекат.

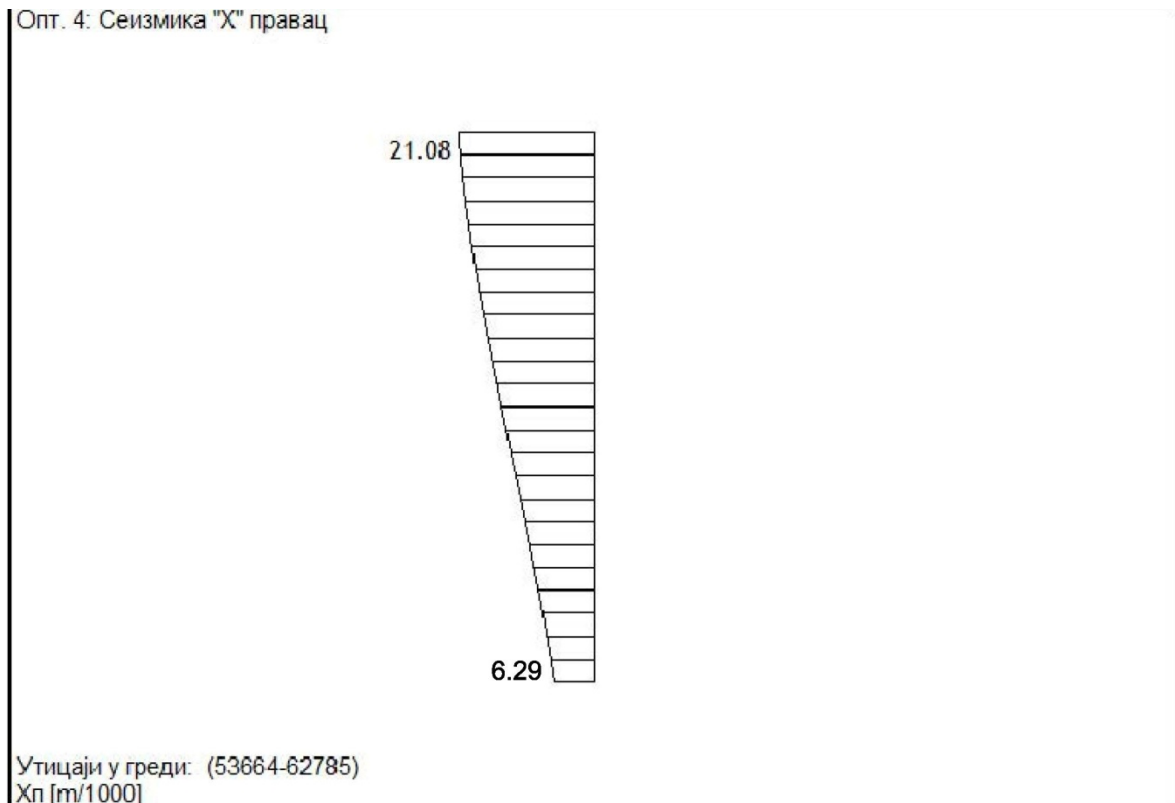
Да би ефекти употребе конструкционог ламелираног клирита до краја били испитани, потребно је проверити какав је утицај његова примена имала на вредности померања врха велике куполе. За то је, аналогно анализи првобитног модела, спроведен сеизмички прорачун, по истим критеријумима као и у првом случају (I категорија објекта, VIII сеизмичка зона, конструкција тип 4).

Табела 5.2.5: углови дејства земљотреса, са периодама осциловања; пети и шести период осциловања се користе за карактеристичне углове дејства земљотреса у “X” и “Y” правцу

Угао дејства земљотреса:		
Назив	T [sec]	α [°]
Сеизмика "X" правац	0.243	0.00
Сеизмика "Y" правац	0.242	90.00



Слика 5.2.32: деформација врха објекта (велике куполе и мале куполе навеликој куполи) у “X” правцу, за случај оптерећења земљотресом у “X” правцу, са примењеним укрућењима од конструкционог ламелираног стакла



Слика 5.2.33: деформација у “X” правцу по висини бетонског стуба, случај оптерећења земљотресом у “X” правцу, у моделу са укрућењем велике куполе помоћу конструкционог стакла

На претходним сликама, може се уочити да, у “X” правцу, померање подножја стуба износи 6,29 мм, што уједно представља померање врха основног корпуса објекта, а то је и исто померање као у првобитном моделу, у којем није било укрућења велике куполе. Сада релативно померање венца велике куполе износи:

$$X_{п,вк,рел,1} = 21,08 - 6,29 = 14,79 \text{ мм}$$

Релативно померање венца мале куполе, у односу на подножје велике куполе, износи:

$$X_{п,мк,рел,1} = 99,05 - 6,29 = 92,76 \text{ мм.}$$

У моделу куполе са укрућењима, померање врха велике куполе износи 26,40 мм, а померање кровног венца мале куполе износи 99,05 мм, што значи да релативно померање венца мале куполе, у односу на врх велике куполе, износи 72,65 мм. Ако је у моделу без укрућења велике куполе релативно померање венца мале куполе у односу на венац велике куполе износило 71,98 мм, то значи да је сада ово релативно

померање веће за 0,67 мм, пошто нису примењена никаква укрућења на малој куполи.

Кључни параметар који показује колики ефекат има примена укрућења велике куполе у виду конструкционог клирита, јесте величина релативног померања венца велике куполе у односу на подножје велике куполе, а тај параметар има вредност $X_{п,вк,рел,1} = 14,79$ мм. Ако се вредност овог параметра упореди са вредношћу тог параметра из модела без укрућења, добија се:

$$X_{п,вк,рел} - X_{п,вк,рел,1} = 67,60 \text{ мм} - 14,79 \text{ мм} = 52,81 \text{ мм}$$

Изражено у процентима:

$$(X_{п,вк,рел} - X_{п,вк,рел,1} / X_{п,вк,рел}) \cdot 100 = (52,81 / 67,60) \cdot 100 = 78,12\%$$

То значи да, за случај дејства сеизмичких сила у “X” правцу, ефекат укрућивања велике куполе панелима од конструкционог клирита, смањење хоризонталног померања велике куполе у процентима износи чак 78,12%.

Да би анализа ефеката укрућивања велике куполе конструкционим клиритом била комплетна, у наставку је дат преглед резултата за случај оптерећења земљотресом у “Y” правцу. На следећим сликама се може видети да је померање подножја стуба 5,12 мм – знатно мање него што је износило у првобитном моделу без укрућења велике куполе, а померање венца велике куполе у “Y” правцу сада износи свега 24,64 мм.

Сада релативно померање венца велике куполе износи:

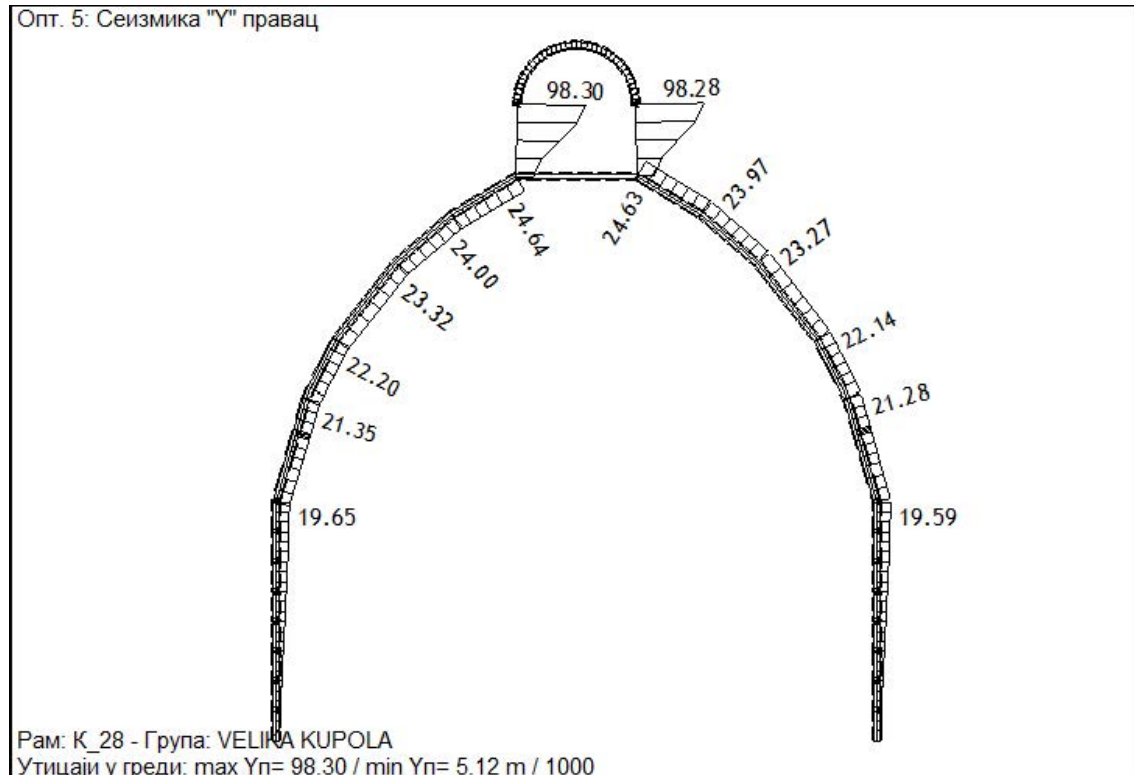
$$Y_{п,вк,рел,1} = 24,64 - 5,12 = 19,52 \text{ мм}$$

Такође се може израчунати и релативно померање венца мале куполе, у односу на подножје велике куполе, које износи:

$$Y_{п,мк,рел,1} = 98,30 - 5,12 = 93,18 \text{ мм.}$$

За “Y” правац, у моделу куполе са укрућењима, померање врха велике куполе износи 24,64 мм, а померање кровног венца мале куполе износи 98,30 мм, што значи да релативно померање венца мале куполе, у односу на врх велике куполе, износи 73,66 мм. Ако је у моделу без укрућења велике куполе релативно померање венца

мале куполе у односу на венца велике куполе износило 72,11 мм, то значи да је сада ово релативно померање веће за 1,55 мм



Слика 5.2.34: деформација врха објекта (велике куполе и мале куполе на великој куполи) у "Y" правцу, за случај оптерећења земљотресом у "Y" правцу

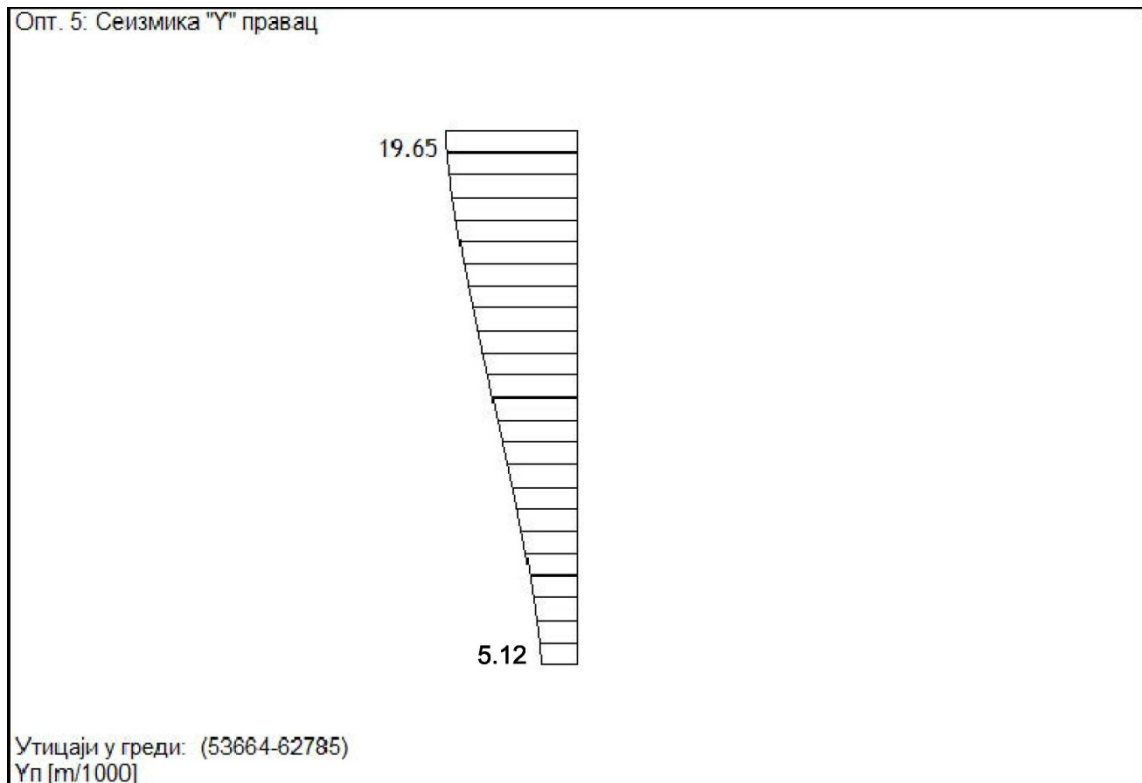
Вредност параметра релативног померања венца велике куполе у односу на подножје велике куполе има вредност $Y_{п,вк,рел,1} = 19,52$ мм. Ако се вредност овог параметра упореди са вредношћу тог параметра из модела без укрућења, добија се:

$$Y_{п,вк,рел} - Y_{п,вк,рел,1} = 58,01 \text{ мм} - 19,52 \text{ мм} = 38,49 \text{ мм}$$

Изражено у процентима:

$$(X_{п,вк,рел} - X_{п,вк,рел,1} / X_{п,вк,рел}) \cdot 100 = (38,49 / 58,01) \cdot 100 = 66,35\%$$

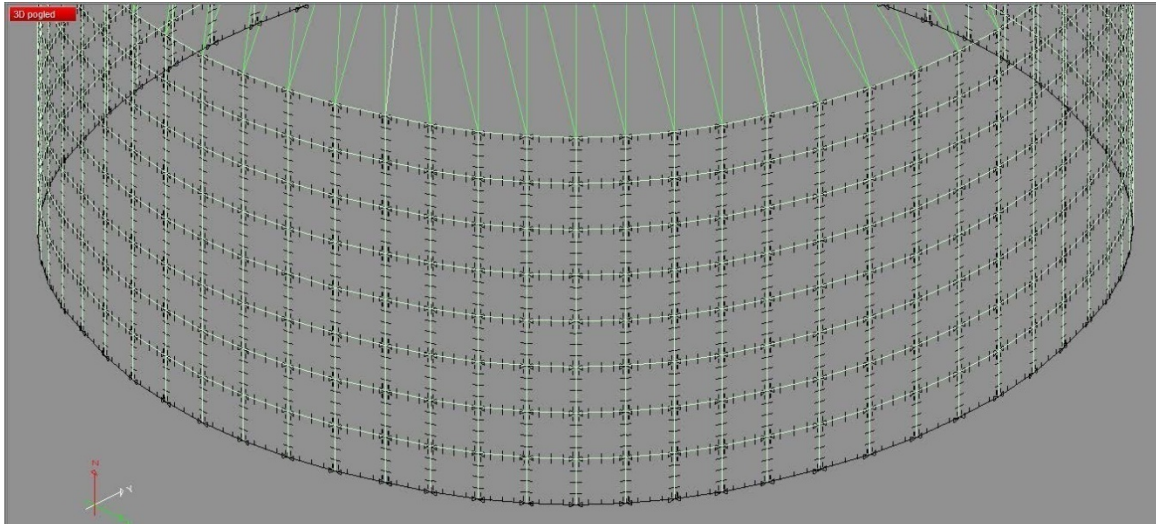
То значи да је, за случај дејства сеизмичких сила у "Y" правцу, ефекат укрућивања велике куполе панелима од конструкционог стакла, умањење хоризонталног померања велике куполе у проценту од 66,35%.



Слика 5.2.35: деформација у “Y” правцу по висини бетонског стуба, случај оптерећења земљотресом у “Y” правцу, у моделу са укрупњеном куполом помоћу конструкционог стакла

5.2.6 Интензитети пресечних сила и напрезања у елементима асеизмичког укрупњења

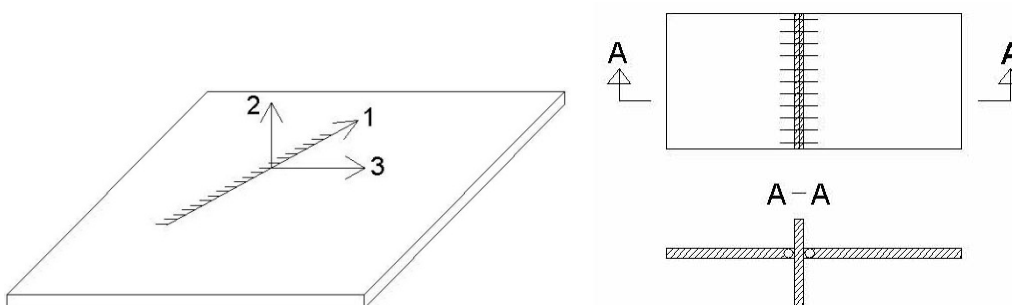
У рачунарском моделу велике куполе, гранични услови између суседних панела конструкционог стакла задати су тако да нема преношења момента савијања са једног панела на други, из разлога што је сваки панел конструкционог стакла зглобно ослоњен на челични рам којим је оивичен. Панел од конструкционог стакла представља испуну, која прима оптерећење искључиво паралелно својој равни.



Слика 5.2.36: фасадне површине велике куполе у рачунарском моделу; симболи са кратким црним линијама представљају зглобне везе по ивицама појединачних панела од конструкционог стакла

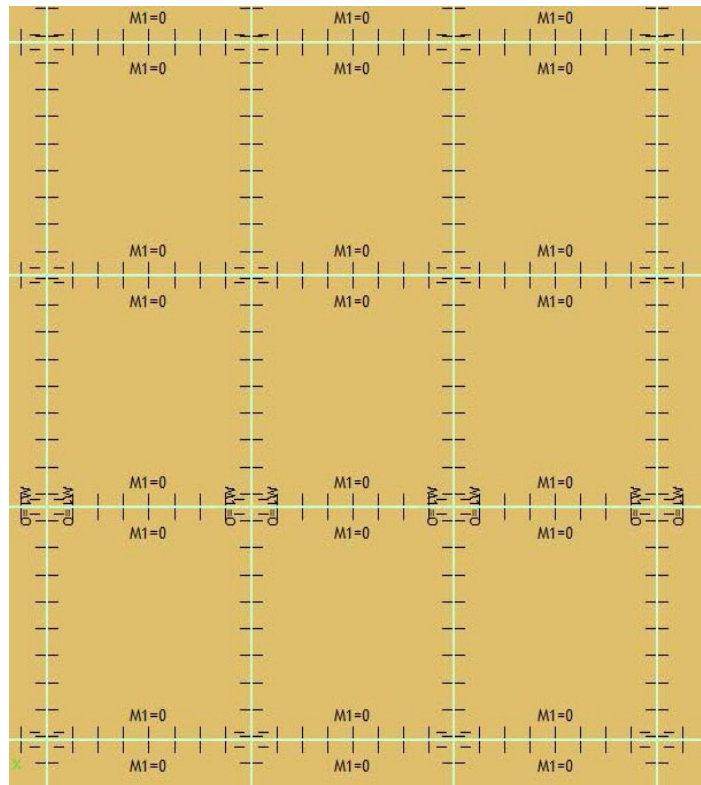
На овај начин, помоћу граничних услова ослобађања момента $M1$ (момент савијања око подужне осе линије контакта два панела од конструкционог клирита, рачунски је симулирана зглобна веза два суседна панела од конструкционог клирита.

Овај начин моделирања подужне везе два суседна панела, омогућава да се са једног панела на други преносе све силе паралелне равнима панела, али се не преносе моменти савијања, проузроковани евентуалним оптерећењем које је управно на раван панела.



Слике 5.2.37 и 5.2.38: гранични услови плочастих елемената – конвенције и начин графичког представљања у рачунарском моделу (софтверски пакет TOWER)⁸⁸

⁸⁸Tower 6, Програм за статичку и динамичку анализу конструкција, упутство за рад са програмом [ажурирано за Build 1300], с. 154-155, www.radimpex.rs, приступљено 25. 01. 2014.



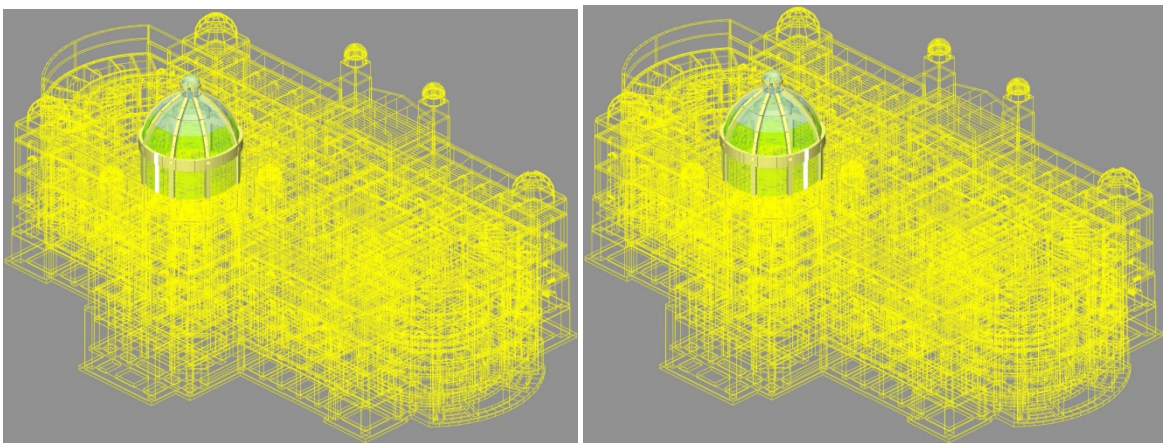
Слика 5.2.39: издвојен сегмент фасадне површи велике куполе, на коме се види подела – детаљ граничних услова дуж налегања плочастих елемената на штапове роштиља; момент “M1” око осе “1” се не преноси са једног на други плочасти елемент (“M1=0”)

У претходном поглављу, кроз приказ рачунске анализе, проверен је степен смањења деформације, као директан ефекат укрућивања велике куполе помоћу панела од конструкционог клирита. Смањење деформације је толико да у потпуности потврђује ефикасност примене ове врсте укрућења.

У овом поглављу, истражују се резултати рачунске анализе, у циљу утврђивања величина пресечних сила у елементима укрућења велике куполе – у челичним штаповима који формирају фасадну поделу – у *роштиљу* – и у самим панелима који представљају испуну тог роштиља.

И код аксијалних сила у штапастим елементима и код сила у попречном пресеку плочастих елемената, меродавне су пресечне силе у хоризонталном правцу, као реактивне силе на дејство сеизмичког оптерећења.

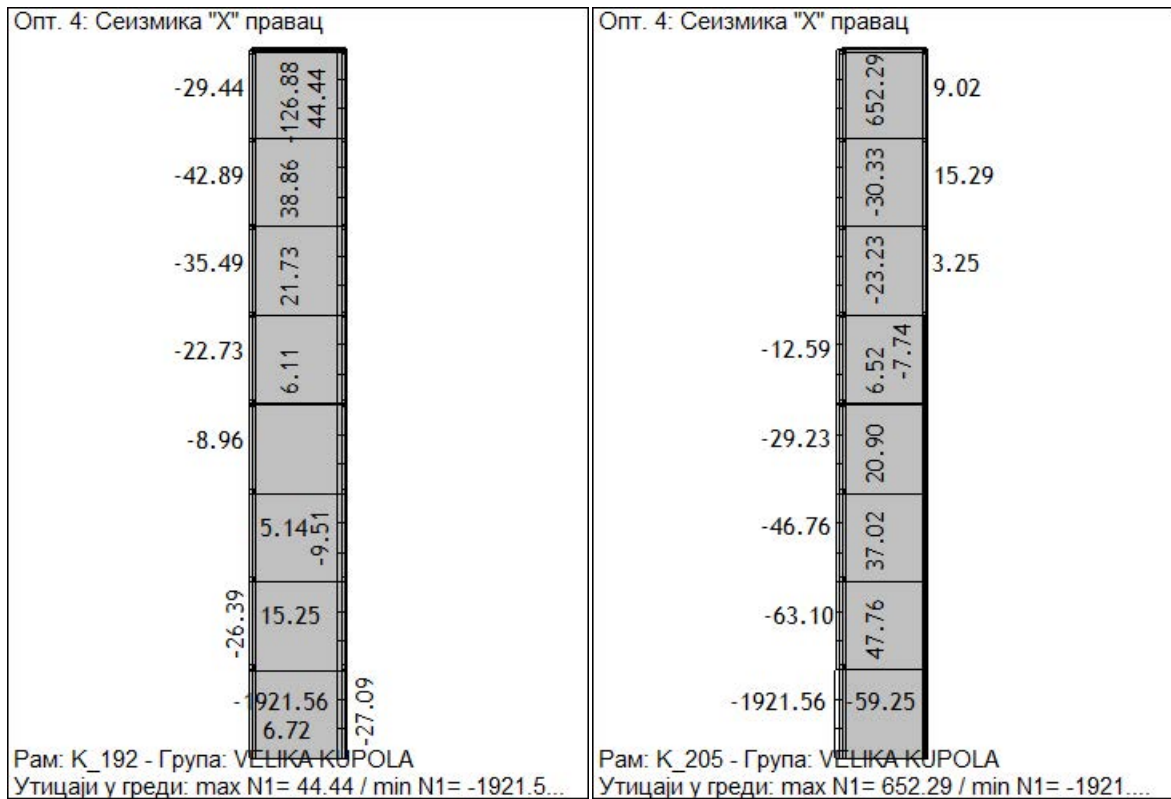
Рачунарски модел је третиран на два основна правца деловања земљотреса: “X” и “Y” правац. “X” правац је паралелан подужној оси објекта, а “Y” правац је паралелан попречној оси објекта. У циљу анализе појединачног елемента конструкције којом је велика купола укрућена – панела конструкционог клирита – за сваки од два основна правца деловања земљотреса, посматра се једна карактеристична фасадна површина.



Слике 5.2.40 и 5.2.41:

рачунски модел, са бело означеним карактеристичним фасадним површинама на великој куполи – у “X” и “Y” правцу; на овим површинама се испитују вредности пресечних сила у штаповима и плочастих елементима укрућења велике куполе

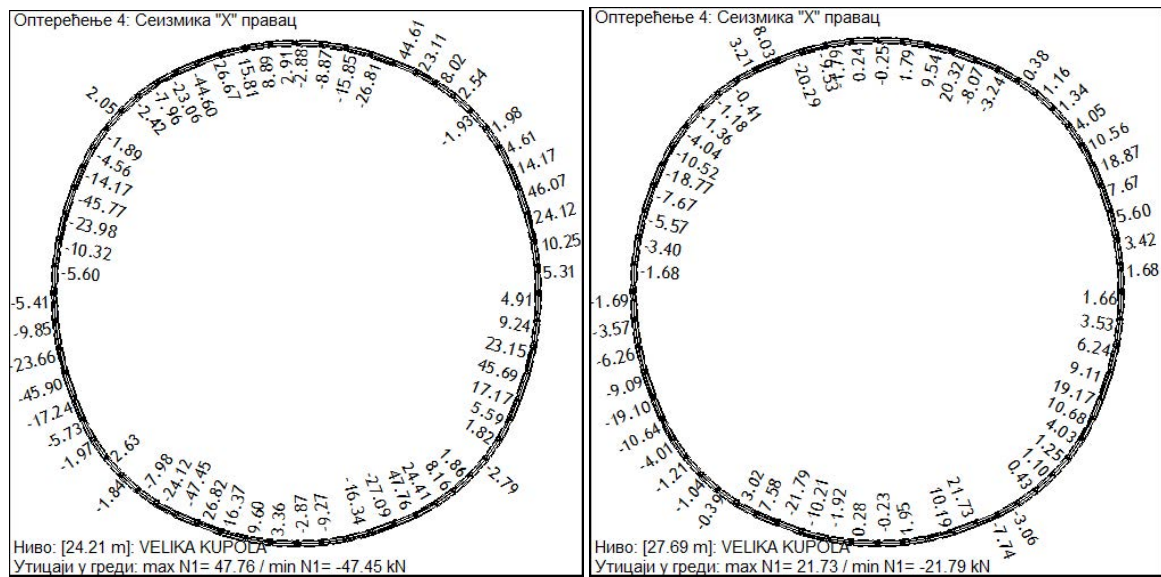
За дејство земљотреса у “X” правцу, анализирају се интензитети пресечних сила у фасадној површи са слике 5.2.40, која је паралелна подужној оси објекта, а то је уједно и оса “X” глобалног координатног система.



Слике 5.2.42 и 5.2.43: интензитети аксијалних (нормалних) сила у штаповима фасадног роштиља [kN], произведени дејством земљотреса у "X" правцу, на релевантним деловима фасадне површи велике куполе која је паралелна подужној оси објекта (површи означене на слици 3.17)

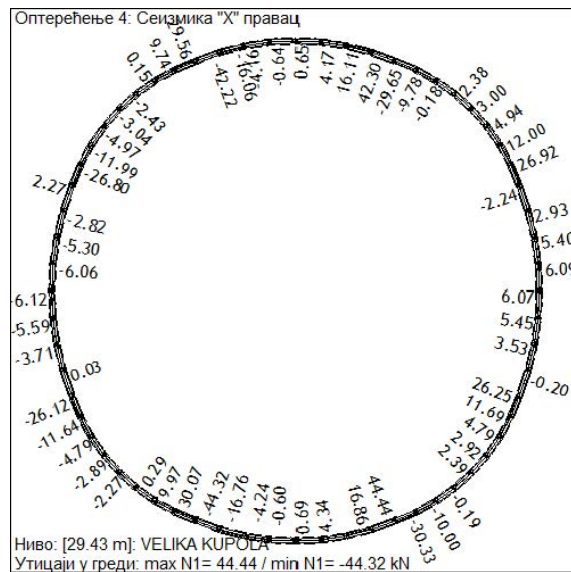
Може се уочити да је максимални интензитет аксијалне силе у хоризонталним штаповима **44,44 kN**, односно **47,76 kN**. Интензитет сваке аксијалне силе, исписан је управно на подужну осу штапа. Вредности сила при дну и при врху, односе се на елементе бетонске конструкције.

Још бољи преглед ових сила дат је на следећим сликама, где су приказани интензитети аксијалне силе у хоризонталним штаповима челичног рама који уоквирује испуну од ламелираног клирита, у подножју, на половини висине и при врху велике куполе.



Слике 5.2.44 и 5.2.45:

интензитети аксијалне силе у хоризонталним штаповима челичног рама који уоквирује испуну од ламелираног клирита, у подножју и на половини висине велике куполе, за случај земљотреса у "X" правцу



Слика 5.2.46:

интензитети аксијалне силе у хоризонталним штаповима челичног рама при врху велике куполе, за случај земљотреса у "X" правцу

Осим наведених вредности сила у попречним пресецима штапова, за даље истраживање су посебно важне вредности главних напона који се јављају у попречном пресеку панела од конструкционог клирита, чија је дебљина 60 мм. Главни напони су у дијаграмима прорачунати и приказани само за горњу и доњу страну плочастог елемента, где су вредности смичућих напона од трансверзалних

сила једнаке нули, тако да напонска слика за сложено напрезање у потпуности одговара равном стању напона.⁸⁹

Главни напон σ_1 представља максималну, а σ_2 минималну вредност напона у посматраној тачки и ове вредности се, за равно стање напона, рачунају из следећих израза:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad [5.1]$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad [5.2]$$

Вредности компоненталних напона, који учествују у изразима [3.1] и [3.2], прорачунавају се из израза који такође одговарају равном стању напона:

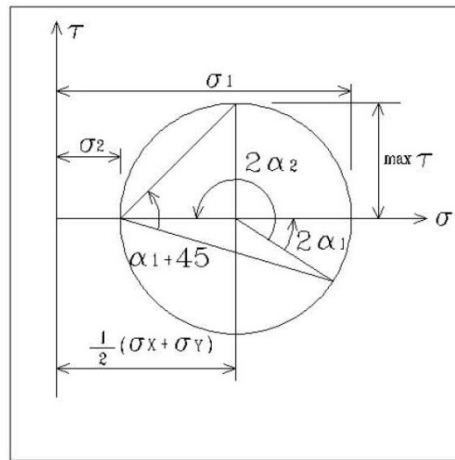
$$\sigma_x = \frac{N_x}{d} \pm \frac{6 \cdot M_x}{d^2} \quad [5.3]$$

$$\sigma_y = \frac{N_y}{d} \pm \frac{6 \cdot M_y}{d^2} \quad [5.4]$$

$$\tau = \frac{N_{xy}}{d} \pm \frac{6 \cdot M_{xy}}{d^2} \quad [5.5]$$

⁸⁹Tower 6, Програм за статичку и динамичку анализу конструкција, упутство за рад са програмом [ажурирано за Build 1300], с. 506-507, www.radimpex.rs, приступљено 25. 01. 2014.

Прегледну слику о распореду напона у произвољној тачки модела, за равно стање напона, пружа Моров (Christian Otto Mohr, 1835-1918) круг:



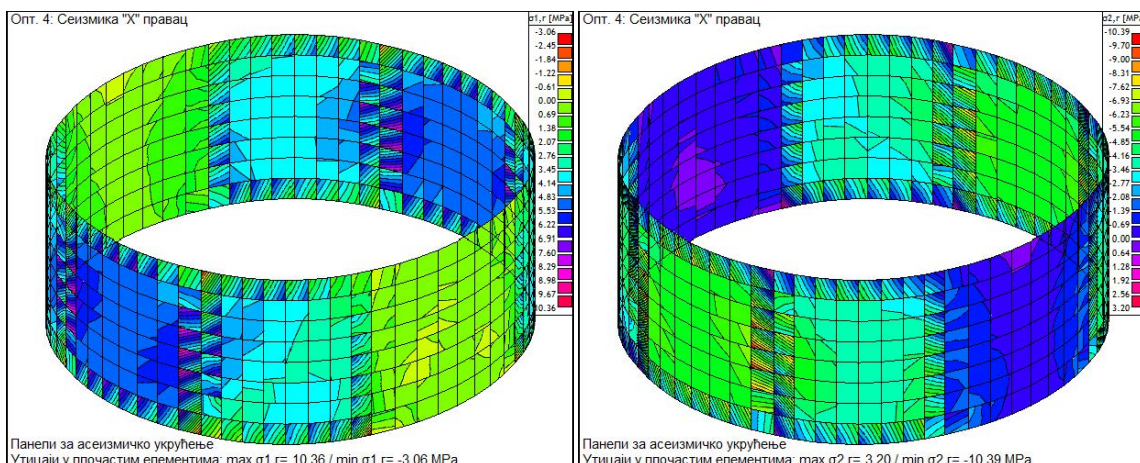
Слика 5.2.47: Распоред напона у произвољној тачки модела, на Моровом кругу

Угао који заклапа правац напона σ_1 са правцем глобалне “X” осе, одређен је следећим изразима, при чему равни у којима се јављају главни напони, леже управно једна на другу:

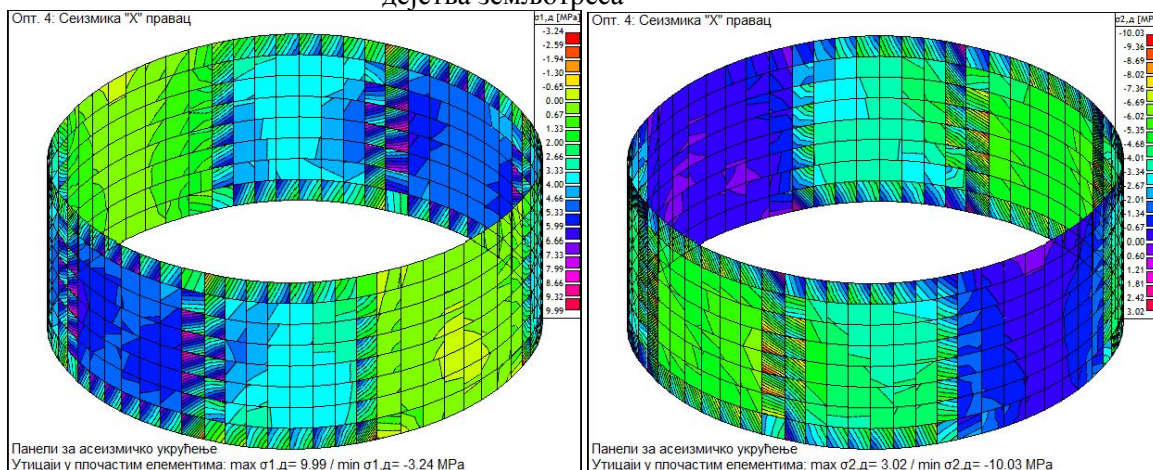
$$\sin 2\alpha_1 = \frac{\tau}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}} \quad [5.6]$$

$$\cos 2\alpha_1 = \frac{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}} \quad [5.7]$$

Помоћу претходних израза, израчунате су вредности главних напона на горњој ивици ($\sigma_{1,2,г}$) и на доњој ивици ($\sigma_{1,2,д}$) плочастих елемената у фасадним површинама од конструкционог клирита, за “X” правац дејства земљотреса.



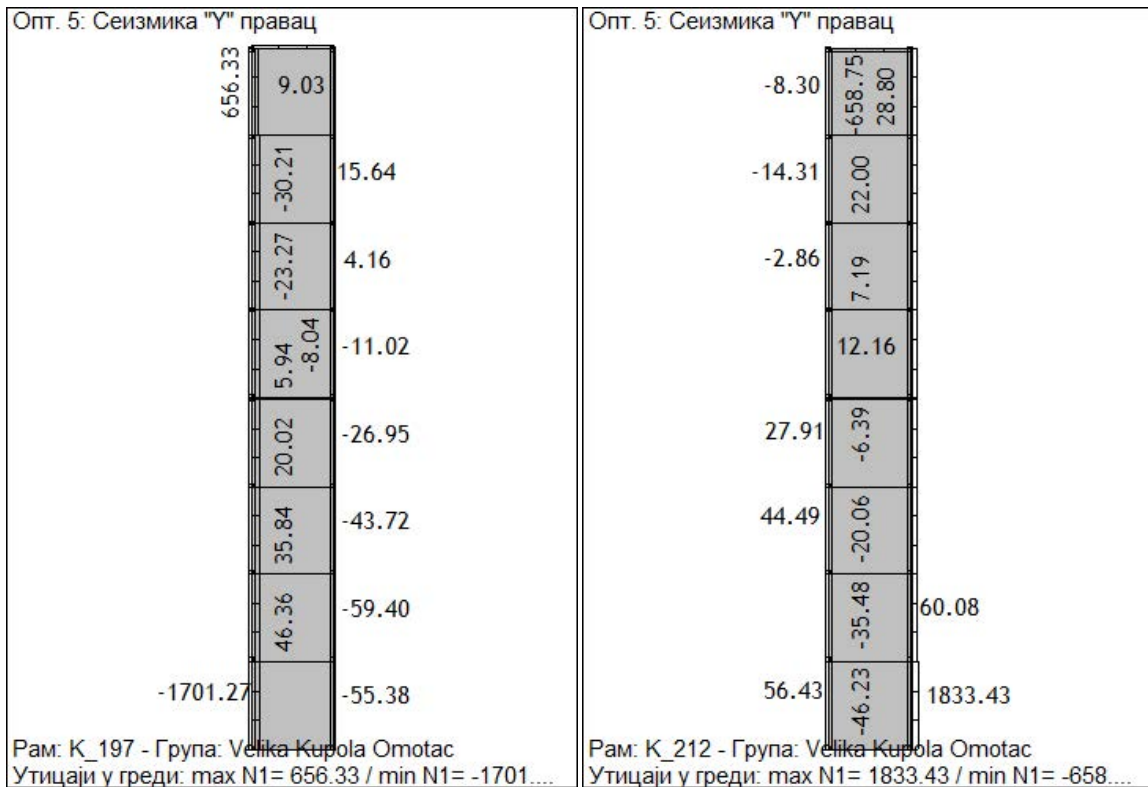
Слике 5.2.48 и 5.2.49: вредности главних напона на горњој ивици плочастих елемената, у фасадној површи карактеристичној за “X” правац дејства земљотреса



Слике 5.2.50 и 5.2.51: вредности главних напона на доњој ивици плочастих елемената, у фасадној површи карактеристичној за “X” правац дејства земљотреса

За даље испитивање понашања панела од конструкционог клирита, као испуне у челичном роштиљу, овде је добијен важан податак да максимални интензитет напрезања – главни напон – у попречном пресеку панела дебљине 60 мм, износи **10,39 МПа**.

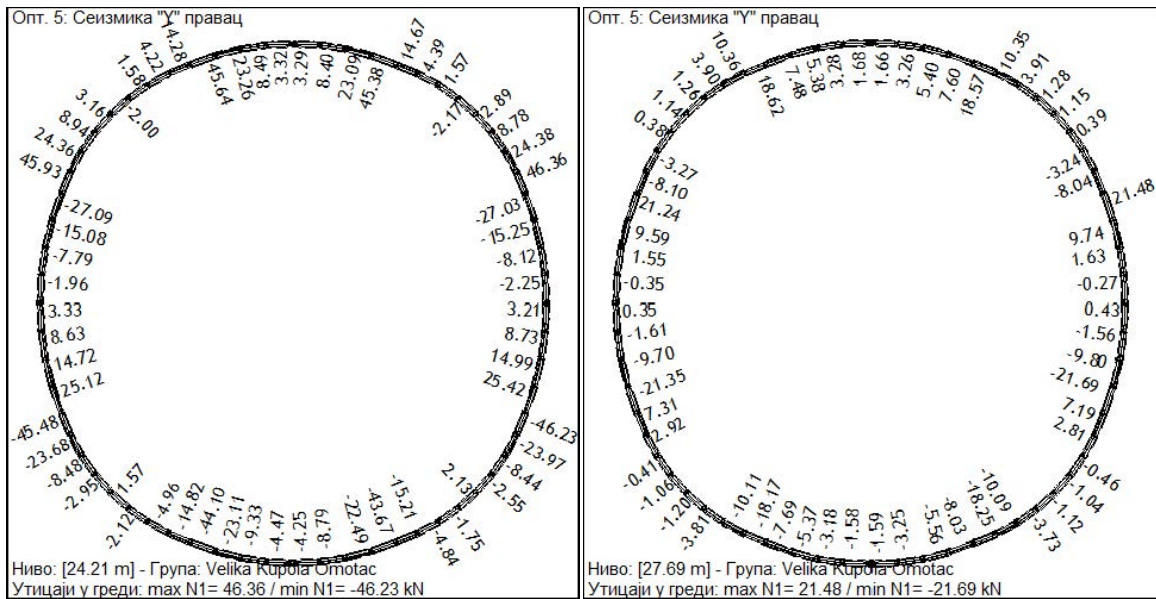
Као и у претходном случају за дејство земљотреса у “X” правцу, потребно је проверити и интензитета пресечних сила и напрезања и за дејство земљотреса у “Y” правцу, у плочастим елементима у фасадној равни са слике 5.2.42, која је паралелна попречној оси објекта, а то је оса “Y” глобалног координатног система.



Слике 5.2.52 и 5.2.53:

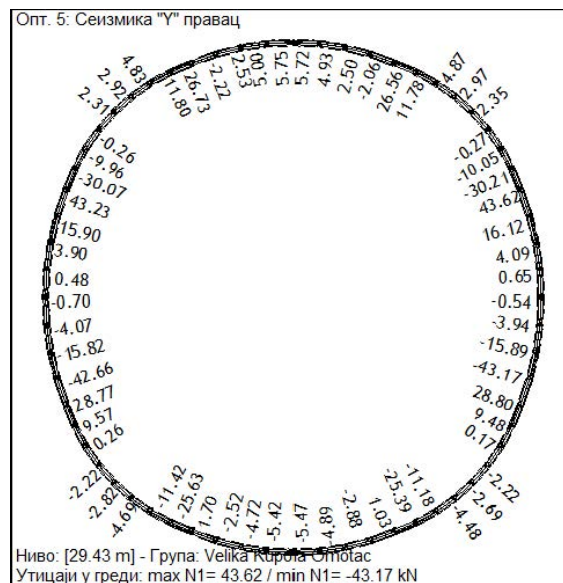
интензитети аксијалних (нормалних) сила у штаповима фасадног роштиља [kN], произведени дејством земљотреса у "Y" правцу, на карактеристичним деловима фасадне површине велике куполе која је паралелна попречној оси објекта (површина означена на слици 3.18)

Као и за X правац, треба уочити да су силе у подножју и при врху, двоструко веће од сила на половини висине. То се може видети и на следећим сликама, које приказују интензитете сила по целом обиму омотача велике куполе.



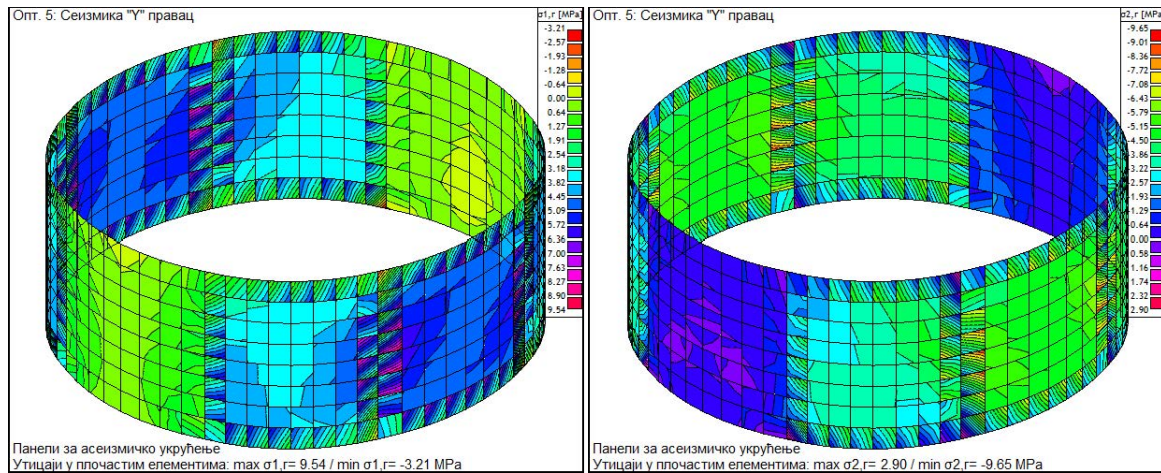
Слике 5.2.54 и 5.2.55:

интензитети аксијалне силе у хоризонталним штаповима челичног рама који уоквирује испуну од ламелираног клирита, у подножју и на половини висине велике куполе, за случај земљотреса у "Y" правцу

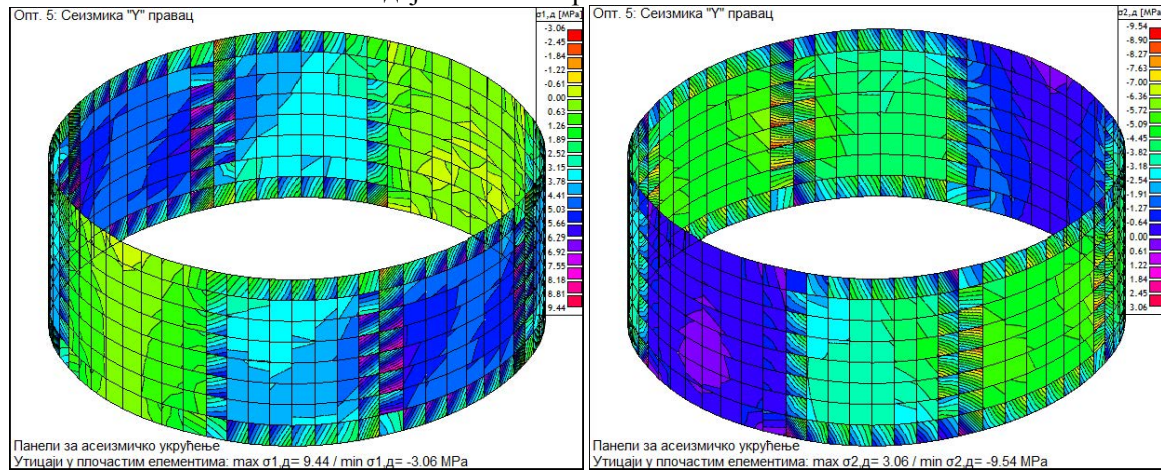


Слика 5.2.56: интензитети аксијалне силе у хоризонталним штаповима челичног рама при врху велике куполе, за случај земљотреса у "Y" правцу

И за "Y" правац дејства земљотреса, израчунати су главни нормални (σ) напони, у складу са наведеним изразима (од [5.1] до [5.7]).



Слика 5.2.57 и 5.2.58: вредности главних напона на горњој ивици плочастих елемената, у фасадној површи карактеристичној за “Y” правац дејства земљотреса



Слика 5.2.59 и 5.2.60: вредности главних напона на доњој ивици плочастих елемената, у фасадној површи карактеристичној за “Y” правац дејства земљотреса

За даље испитивање, важно је такође и констатовати да нема значајнијих одступања у понашању панела од конструкционог клирита, ако се упореде добијени резултати за панеле у карактеристичним фасадним површинама за дејства земљотреса у “X” и “Y” правцу. Док је у “X” правцу главни напон имао максимални интензитет 10,39 MPa, у “Y” правцу максимални интензитет главног напона износи **9,54 MPa**.

5.2.7 Резиме решења система за асеизмичко укрућење

У поглављу (5) је приказан предлог решења за укрућивање конструкције велике куполе, као истакнутог (издвојеног) дела масе објекта, у циљу њеног оспособљавања за ефикасан пријем сеизмичких сила, које представљају врсту динамичког оптерећења. Рачунске анализе спроведене у поглављу (5), служе да се утврди ред величине интензитета напрезања код појединачних елемената конструкције за укрућивање и то напрезања која су настала под дејством сеизмичког оптерећења.

У току лабораторијског испитивања на дејство динамичког оптерећења, које је приказано раније у посебном поглављу овог рада, третира се појединачни елемент конструкције за укрућивање велике куполе: издвојени панел конструкционог стакла односно клирита дебљине $d = 60$ мм, димензија 400/500 мм, смештен у челични рам, који је сачињен од штапова “Т” пресека, на које панел належе посредством слоја од тврде гуме – кедера. Такав **композитни конструктивни склоп**, издвојен је из остатка конструкције – фасадне површине велике куполе – и испитује се његово понашање на дејство динамичког оптерећења.

Интензитети оптерећења који су примењени на изоловани панел у лабораторијским условима, послужили су као рачунски оквир, односно референтна вредносна граница за резултате рачунске анализе приказане у поглављу (5).

Напрезања, односно силе добијене као резултати рачунске анализе, могу се упоредити са интензитетом силе која је по динамичком обрасцу саопштена експерименталном моделу појединачног елемента конструкције – композитном конструктивном склопу на бази стакла / клирита.

Може се уочити да се све вредности добијене рачунском анализом (аксијалне силе у штаповима “N1“, као главни напони “ $\sigma_{1,2,г}$ “ и “ $\sigma_{1,2,д}$ “ у плочастим елементима), крећу у границама резултата лабораторијског испитивања експерименталних модела. Рачунска анализа је чак показала да постоји знатна резерва у искоришћености напона, ако се упореде њени резултати са резултатима добијеним у лабораторији приликом одређивања физичко – механичких карактеристика основних материјала. Позитивне вредности главних напона, које

представљају напоне затезања су толике да се могу анулирати преднапрезањем приликом монтаже испуне од клирита (стакла) у челични рам. Преднапрезање у фази монтаже је омогућено коришћењем интермедијалног слоја гуме.

Рачунарски модел је креиран у оквиру софтверског пакета за анализу грађевинских конструкција TOWER, и комплетан третман модела је спроведен помоћу Методе коначних елемената. Резултати у рачунарском моделу увек показују и неизбежне, али очекиване концентрације напона⁹⁰, али је суштина резултата лако препознатљива и употребљива као систем улазних параметара за лабораторијско испитивање.

Тежиште овог рада је испитивање понашања појединачног (репрезентативног) елемента конструкције – изолованог композитног конструктивног склопа, сачињеног од панела од конструкционог стакла / клирита, челичног рама и интермедијалног слоја гуме, на дејство **динамичког оптерећења**. Као увод у испитивање динамичком силом, спроведено је базично лабораторијско испитивање, које је имало за циљ да се утврде физичко – механичка својства ламелираног стакла и клирита. То испитивање је приказано поглављу (3) овог рада. На тај начин су добијени експериментални подаци, који се упоређују са резултатима касније рачунске анализе, спроведене у поглављу (5).

Рачунска анализа куполе са укрућењима у виду панела на бази конструкционог стакла, у циљу оспособљавања конструкције објекта за пријем сеизмичких сила, представља студију случаја могућности примене таквог система, чији је појединачни (репрезентативни) елемент конструкције – композитни панел – претходно испитан у лабораторијским условима. Рачунском анализом из поглавља (5), заокружена је процедура пројектовања сеизмички отпорног објекта, коришћењем неконвенционалног материјала.

Идеја о примени таквих материјала, је и настала управо током разматрања конкретног проблема укрућења куполе.

⁹⁰ FROELING, Maria, *STRENGTH DESIGN METHOD FOR LAMINATED GLASS*, Structural Mechanics, LTH, Lund University, Sweden, 2011 (13, 17, paper 3 9, 10)

6. ЗАКЉУЧАК

У раду је приказано експериментално лабораторијско истраживање, спроведено на композитним панелима, који су изложени дејству цикличног оптерећења. Композитни панели су формиран на бази испуне од ламелираног стакла или ламелираног клирита. Испуна је уоквирена у челични рам, на који налаже посредством интермедијалног слоја од гуме. Композитни панели, над којима је вршено експериментално лабораторијско испитивање, представљају појединачне елементе ширег система формираног од низа панела, чија улога треба да буде стабилизација конструкције изложене сеизмичком оптерећењу. На тај начин, класична стаклена фасада направљена од витких профила, која формира мрежу (роштиљ) у коју су смештена окна од обичног прозорског стакла, може се заменити роштиљем и испуном од ламелираног конструкцијског стакла, односно ламелираног клирита. Систем формиран по том принципу, интегрише се у носећи конструктивни систем објекта, омогућава његову стабилизацију са аспекта хоризонталних померања, као и у смислу пријема сеизмичких сила.

Од ламелираног стакла, односно ламелираног клирита, формирају се равански елементи конструкције, чија је функција укрућење објекта за дејство сеизмичких сила. Пошто се ради о материјалима који се у градитељској пракси најчешће користе за сасвим друге намене, може се рећи да се ради о њиховом неконвенционалном коришћењу. Из тог разлога, они су најпре лабораторијски испитани на дејство динамичке силе паралелне равни експерименталних модела, чиме је утврђен капацитет њихове носивости за ту врсту оптерећења.

Први део лабораторијских испитивања, са циљем утврђивања физичко – механичких карактеристика, показао је значајне разлике у особинама ламелираних пакета, у зависности од оријентације ламела у попречном пресеку. При томе су разлике у величинама чврстоће на савијање и модула еластичности израженије код ламелираног стакла, него код ламелираног клирита, који тиме испољава особине хомогенијег материјала.

Централни део рада су испитивања опитних тела изложених дејству динамичког оптерећења, извршена са аспекта упоређивања ефикасности две

различите врсте испуна: ламелираног стакла и ламелираног клирита. Резултати ових испитивања су приказани на упоредним табелама и дијаграмима са хистерезисним петљама.

Код склопова са ламелираним стаклом, уочљиво је веће расипање резултата него код склопова са испуном од ламелираног клирита. Већа деформација склопова са стаклом, последица је механизма деформације целог склопа. Ту се, пре свега, мисли на могуће проклизавање између панела са гумом и оквира, које, због веће крутости испуне, пре може да се очекује код панела са ламелираним стаклом, него код панела са ламелираним клиритом. При силама већим или једнаким од 22 kN присутан је ефекат ојачања, односно повећане крутости. Тај ефекат је израженији код панела са стаклом него код панела са клиритом (нарочито уочљиво ако се упореде резултати од 24.04. 2014 и 08.05.2014., односно од 09.04. 2014. и 28.02.2014.). Ефекат ојачања је последица активирања притиснуте дијагонале панела при контакту оквира и угла панела преко притиснуте гуме, али исто тако и вискоеластичних својстава саме гуме. Код панела са ламелираним стаклом, хистерезисне петље показују већу диспацију енергије. Уочено је да по једном циклусу код панела са ламелираним стаклом у односу на панеле са ламелираним клиритом, повећање дисипације енергије износи од 30% до 80%. Јасније изражен ефекат ојачања код композитних панела са испуном од ламелираног стакла, послужио је за извођење закључка о бољој интегрисаности испуне од ламелираног клирита у композитни склоп. Код испуне од ламелираног клирита, ефекат ојачања је знатно мање изражен, што сведочи о ранијем активирању те врсте испуне унутар композитног склопа. Ако се посматра удео испуне у пријему силе у испитиваном домену, део силе који преузима испуна од клирита износи око 58% за амплитуду силе од 11 kN, око 60% за амплитуду силе од 22 kN и око 67% за силу од 33 kN.

На основу анализе добијених резултата из лабораторијског испитивања композитних склопова изложених дејству динамичког оптерећења, може се закључити да композитни склопови са испуном од ламелираног клирита показују:

1. бољу интегрисаност испуне у композитни склоп;
2. мања померања у односу на склопове са испуном од ламелираног стакла.

Поред формирања роштиља одређене крутости, приказани композитни панели омогућавају уношење додатног пригушења у конструкцијски систем. Пригушење се, пре свега, реализује кроз дисипацију енергије у интермедијалном слоју између испуне и оквира, у чему одлучујућу улогу игра гума, посредством које испуна (ламелирано стакло / ламелирани клирит) налаже на челични рам. Функцију амортизације, односно пригушења, интермедијални слој гуме остварује дефинисаним степеном тврдоће. Лабораторијски испитивани експериментални модели на бази ламелираног клирита, су затим у студији случаја представљени кроз рачунарски модел, као елементи конструкције архитектонског објекта.

Студија случаја је изведена кроз сложени рачунарски модел конструкције објекта, креиран у специјализованом софтверском пакету, који се базира на Методи коначних елемената. У рачунарском моделу, особине композитних панела претходно испитаних у лабораторији, као и њихов однос са осталим елементима конструктивног система објекта, описани су преко физичко – механичких карактеристика и граничних услова.

Резултати добијени анализом кроз рачунарски модел, показују ефикасност укрућења конструктивног система помоћу система композитних панела са испуном од клирита. Ефикасност укрућења се, пре свега, огледа у виду:

1. промене модалних карактеристика анализираног објекта;
2. смањења померања изазваних сеизмичким дејствима.

Сеизмичка анализа је спроведена на бази еквивалентног статичког оптерећења, а добијене силе у елементима конструкције који су креирани према експерименталним моделима, налазе се у оквирима вредности из лабораторијског испитивања. Тиме је показано да капацитет носивости експерименталног модела, исказан у лабораторијским условима, може бити довољан за пријем одговарајућег дела сеизмичке силе у реалној конструкцији.

Анализа рачунарског модела представља и полазну и завршну фазу у процедури – *алгоритму* – пројектовања сеизмички отпорних објеката коришћењем стакла и клирита. У полазној фази, анализом рачунарског модела се утврђује проблем, за који се затим предлаже решење, које се, због примене

неконвенционалних материјала, проверава у лабораторијским условима. У завршној фази се наставља третман рачунарског модела, допуњеног предложеним решењем, за које су улазни параметри утврђени лабораторијским испитивањем.

Анализом рачунарског модела, пре свега се проверава интензитет сила и напрезања, према критеријумима који су такође дефинисани у испитивању експерименталног модела. Потребно је да силе и напрезања буду у границама резултата лабораторијских испитивања, а да се истовремено конструкција ефикасно украти, у смислу промене (побољшања) модалних карактеристика и смањења деформације. Анализа рачунарског модела и лабораторијска испитивања у приказаној процедури пројектовања сеизмички отпорних архитектонских објеката, дају нови концепт примене неконвенционалних материјала.

Истраживање представљено у овом раду, као резултат даје *прилог пројектовању сеизмички отпорних архитектонских објеката, дефинисањем концепта сеизмичког укрућења помоћу испуне од ламелираног стакла / клирита, уоквирене у челични рам*. Концепт обухвата формирање ефикасног композитног склопа, у коме сваки од елемената склопа, има улогу у пријему и третману сеизмичке силе. Испуна (ламелирано стакло / ламелирани клирит) прихвата већи део сеизмичке силе и смањује деформацију конструкције целог објекта, челични рам уоквирује систем укрућења и интегрише га у глобални конструктивни систем објекта, а гума врши функцију амортизације – пригушења. Такво решење би могло да буде веома применљиво тамо где није могућа другачија интервенција, у смислу обавезе очувања естетских вредности објекта, где се првенствено мисли на културно историјске споменике, или на било коју врсту грађевине под неким видом заштите. Тада се може извести *пренамена* постојећих површина са стаклом – од функције преграђивања простора, у функцију конструктивне носивости, или се, евентуално, могу увести нове (носиве) површине од стакла / клирита. Тиме секундарни неносећи елементи постају носећи.

Како се ради о примени неконвенционалних материјала, односно о примени у неконвенционалне сврхе материјала који су широко распрострањени и доступни, била је неопходна верификација таквог општег концепта сеизмичког укрућења архитектонских објеката и та верификација је изложена у овом раду, најпре кроз лабораторијска испитивања, а затим и у рачунарском моделу.

7. ПРЕГЛЕД ОЗНАКА

ρ	запреминска маса
$HK_{0,1/20}$	тврдоћа
E	модул еластичности
ν	Поасонов коеф.
α_T	коефицијент термичког ширења
c_p	специфични термички капацитет
λ	термичка проводљивост
n	просечни индекс преламања у видљивом спектру
G	модул смицања
f_t	чврстоћа на затезање
ϵ_t	издужење у фази лома
σ_m	Орованов напон
γ	површинска енергија лома
σ_t	концентрација напона у темену уског прекида
a	дужина прслине
U	укупна енергија система
U_M	механичка енергија
U_S	слободна енергија
σ_f	номинални напон лома
a_c	критична дужина прслине
K_I	фактор интензитета напона
σ_n	номинални напон затезања управан на раван прслине
Y	фактор корекције
K_{Ic}	критични фактор интензитета напона

σ_E	површински напон изазван спољним деловањем
σ_T	заостали напон изазван каљењем (преднапрезањем)
σ_P	површински напон изазван граничним условима – ослањањем
елемента	
τ	време
\vec{r}	положај прслине
φ	оријентација прслине
σ_c	критични напон који изазива лом прслине
a_f	дубина прслине у тренутку лома
$\sigma(t_f)$	напон лома
t_f	време до лома у животном веку стакленог елемента
$\tilde{a}_c(\tau)$	почетна дубина прслине до чијег лома долази у тренутку времена τ
σ_1, σ_2	главни напони
σ_x, σ_y	компонентални напони

8. ПРЕГЛЕД ИЛУСТРАЦИЈА

Слика 2.1.1:	шематски приказ неправилне структуре содно-кречног стакла	22
Слика 2.1.2:	поређење понашања обичног и каљеног стакла под дејством момента савијања, чиме се објашњава основни принцип каљења.....	24
Слика 2.1.3:	начин лома обичног и ојачаног стакла (делимично каљеног).....	25
Слика 2.1.4:	поређење начина лома обичног, потпуно каљеног и делимично каљеног стакла	25
Слика 2.1.5:	расподела напонских стања у пресеку стакленог елемента током хлађења, у процесу каљења	26
Слика 2.1.6:	брзина удара ветра и дневне температуре ваздуха у Ахену, Немачка, дневни максимум за период од 100 година	29
Слика 2.1.7:	корелација оптерећења од удара ветра и температуре материјала	29
Слика 2.1.8:	корелација оптерећења од ветра и температуре материјала	30
Слика 2.1.9:	дијаграм карактеристичног дејства експлозије	32
Слика 2.1.10:	дијаграм односа оптерећење / деформација за плочу од потпуно ламелираног стакла димензија 1676.4 · 1676.4 · 5.66 мм, која је оптерећена управно на раван	35
Слика 2.1.11:	чврстоћа прслине у инертним условима, у функцији њене дубине	41
Слика 2.1.12:	чврстоћа површинске прслине у функцији трајања оптерећења и дубине прслине	43
Слика 2.2.1:	прелазак мономера у полимер – <i>ПОЛИМЕРИЗАЦИЈА</i>	45
Слика 2.2.2:	ланчана полимеризација етилена у полиетилен	46
Слика 2.2.3:	пластични полимер	46
Слика 2.2.4:	полимерски ланци под оком микроскопа	46
Слика 2.2.5:	деформација узорка од пластичне масе – клирита, приликом испитивања у лабораторији	47
Слика 2.2.6:	исти узорак од пластичне масе – клирита, који је приказан на претходној слици, у фази извођења лабораториског испитивања; након демонтаже из лабораторијске опреме, деформација је нестала у потпуности	48
Слика 2.2.7:	оптичка микрографија тропроцентног MWNT/PC, у три различита циклуса – степена дисперзије карбонских наноцеви	51
Слика 2.2.8:	чврстоћа на затезање и модул еластичности тропроцентног композита MWNT/PC, у три различита циклуса – степена дисперзије карбонских наноцеви	52
Слика 2.2.9:	хемијска реакција између бисфенола А и фосгена	53
Слика 2.2.10:	структуре приказане електронским микрографским скенирањем: (a) – PP/PC (70/30), (b) – PP/PC/PP-g-MA (90/5/5), (c) – PP/PC/PP-g-MA (80/15/5), (d) – PP/PC/PP-g-MA (70/25/5), (e) – PP/PC/PP-g-MA (60/35/5)	55

Слика 2.2.11: Функционална шема уређаја за ултразвучно заваривање	56
Слика 2.2.12: топлотно спајање уз повишену температуру и притисак	57
Слика 2.2.13: шема микроталасног заваривања: 1 – микроталасна комора; 2 – компоненте које се заварују; 3 – слој проводног материјала	57
Слика 2.2.14: тачкасто заваривање трењем	58
Слика 2.2.15: смицајне чврстоће заварених спојева, добијене различитим методама: 1 – тачкасто заваривање трењем, 2 – микроталасно заваривање, 3 – топлотно спајање, 4 – ултразвучно заваривање	58
Слика 2.2.16: утицај температуре на однос напон / дилатација	59
Слика 2.2.17: утицај температуре и степена дилатације на модул еластичности	59
Слика 2.2.18: утицај температуре и степена дилатације на тачку границе течења	59
Слика 3.3.1: диспозиција испитивања коефицијента термичког ширења	61
Слике 3.4.1 и 3.4.2: ламелирано стакло – узорак на почетку испитивања чврстоће при притиску и исти узорак на крају испитивања – у фази лома	64
Слике 3.4.3 и 3.4.4: ламелирани клирит – узорак на почетку испитивања чврстоће при притиску и исти узорак на крају испитивања – у фази лома	65
Слика 3.5.1: диспозиција испитивања чврстоће при савијању ($W = 4,5 \text{ cm}^3$)	66
Слика 3.5.2: диспозиција испитивања у циљу израчунавања модула еластичности при савијању ($I = 6,75 \text{ cm}^4$)	67
Слика 3.5.3: један од узорака ламелираног стакла а., у фази отказа – лома (“преломљен” узорак)	68
Слика 3.5.4: један од узорака ламелираног клирита а., у фази отказа – лома; види се врло изражен угиб – узорак више није у стању да прихвати силу, али нема случаја класичног “прелома”	69
Слика 3.6.1: узорак – епрувета – за испитивање чврстоће ламелираног клирита при затезању	70
Слика 3.6.2: испитивање чламелираног клирита на “чисто” затезање	70
Слика 3.6.3: узорак – епрувета – за испитивање чврстоће ламелираног стакла при затезању	71
Слика 3.6.4: испитивање ламелираног стакла на “чисто” затезање – лом око средине узорка – епрувете	72
Слике 3.6.5 и 3.6.6: одређивање радног дијаграма: диспозиција испитивања; изглед узорка (епрувете) на крају испитивања	73
Слика 3.6.7: радни дијаграм ламелираног клирита → σ - ϵ зависност	74
Слика 3.6.8: радни дијаграм ламелираног стакла → σ - ϵ зависност	75
Слика 4.1.1: шематски приказ издвојеног основног елемента укрућења велике куполе – композитног панела – из матичног конструктивног система	77
Слика 4.1.2: скица прозорског окна, са правцем и смером хоризонталне силе	78

Слика 4.1.3:	први механизам – померање стакленог панела у оквиру челичног рама; други механизам – правац скраћења стакленог панела по дијагонали, под дејством притискујуће силе	79
Слика 4.2.1:	детал – фронтални изглед готовог композитног панела од ламелираног стакла / клирита (изглед “изнутра”)	80
Слика 4.2.2:	Челична конструкција рама – детаљ хоризонталног пресека: прва фаза монтаже панела од ламелираног стакла / клирита	81
Слика 4.2.3:	Челична конструкција рама – детаљ хоризонталног пресека: друга фаза монтаже панела од ламелираног стакла / клирита	82
Слика 4.2.4:	Челична конструкција рама – детаљ вертикалног пресека, готов композитни панел, са монтираном испуном	83
Слика 4.2.5:	Испуна од ламелираног стакла, припремљена за монтажу у челични рам – детаљ хоризонталног пресека	83
Слика 4.2.6:	положај лима за изравнање, покривног лима и клинастог лима – детаљ хоризонталног пресека	85
Слика 4.2.7:	положај лима за изравнање, који се лепи за ребро вертикале челичног рама – детаљ хоризонталног пресека	85
Слика 4.2.8:	попречни пресек кроз алтернативно решење лима за изравнање	86
Слика 4.2.9:	лим за изравнање (алтернативни степенести склоп) – детаљ хоризонталног пресека кроз вертикалу експерименталног модела	86
Слика 4.3.1:	диспозиције за испитивања експерименталних лабораторијских панела	87
Слика 4.3.2:	серво хидраулична машина за динамичко и статичко испитивање материјала ZWICK Roell HB – 250	88
Слика 4.3.3:	радионички цртежи главног сегмента прихватног алата – радног стола, који је посредник између експерименталног панела и лабораторијске опреме	89
Слика 4.3.4:	тродимензионални прикази главног сегмента прихватног алата – радног стола	89
Слика 4.3.5:	Изглед зглобног адаптера за везу лабораторијске опреме и сегмената прихватног алата за увођење оптерећења	90
Слика 4.3.6:	Изглед прихватног алата за увођење оптерећења (за испитивање савијањем у бочној равни)	90
Слика 4.3.7:	Изглед прихватног алата за увођење оптерећења (за испитивање савијањем у нормалној равни и испитивање увијањем)	90
Слика 4.3.8:	положај експерименталног панела у прихватном алату у машини, за испитивање силом која је паралелна равни панела	91

Слика 4.3.9:	положај експерименталног панела у прихватном алату у машини, за испитивање силом која је управна на раван панела	91
Слика 4.3.10:	положај експерименталног панела у прихватном алату у машини, за испитивање увијањем око подужне осе панела (торзија)	92
Слика 4.3.11:	Конусни чешљеви за компензацију угла нагиба профила испитног панела	92
Слика 4.3.12:	Чешљеви различитих дебљина за анулирање зазора	92
Слика 4.3.13:	Чешљеви у склопу алата и испитног профила	93
Слика 4.4.1:	експериментални панел пре почетка статичког испитивања	94
Слика 4.4.2:	пробно статичко испитивање панела, оптерећење 1 kN (дијаграм сила деформација)	95
Слика 4.4.3:	пробно статичко испитивање панела, оптерећење 1 kN (дијаграм сила време)	95
Слика 4.4.4:	пробно статичко испитивање панела, оптерећење 2.5 kN (дијаграм: сила / деформација)	96
Слика 4.4.5:	пробно статичко испитивање панела, оптерећење 2.5 kN (дијаграм сила време)	96
Слика 4.4.6:	пробно статичко испитивање притискивањем, оптерећење 86 kN (дијаграм: сила / деформација)	97
Слика 4.4.7:	пробно статичко испитивање притискивањем, оптерећење 86 kN (дијаграм: сила / време)	97
Слика 4.4.8:	пробно статичко испитивање затезањем, оптерећење 86 kN (дијаграм: сила / деформација)	98
Слика 4.4.9:	пробно статичко испитивање затезањем, оптерећење 86 kN (дијаграм: сила / време)	98
Слика 4.4.10:	експериментални панел након испитивања (поглед са леве стране)	99
Слика 4.4.11:	експериментални панел након испитивања (поглед са десне стране)	99
Слика 4.4.12:	експериментални панел након испитивања (поглед са задње стране)	100
Слика 4.4.13:	Положај ламеле стакла на којој су се јавиле прслине.....	100
Слика 4.4.14:	Мехурови – раслојавање везивног средства између ламела стакла.....	101
Слика 4.4.15:	скица новог конструкционог решења са уметнутом клинастом челичном плочом	102
Слика 4.4.16:	Уметнута клинаста плоча за постизање равномерне расподеле оптерећења	102

Слика 4.4.17: Статичко испитивање затезањем панела са клиритом, $F_{max} = 35 \text{ kN}$ (дијаграм: сила / деформација)	103
Слика 4.4.18: гранични услови по обиму стакленог панела у истраживању Хувернеса, Хервијнена, Сетенса и Хофмајера; најприближнији условима приказаним у овом раду су крајње лево – са належућим слојем од полиуретана	104
Слика 4.4.19: дијаграм сила / деформација за први случај граничних услова код Хувернеса, Хервијнена, Сетенса и Хофмајера	104
Слика 4.4.20: Статичко испитивање притискивањем панела са клиритом, $F_{max} = 35 \text{ kN}$ (дијаграм: сила / деформација)	106
Слика 4.4.21: Статичка испитивања затезањем и притискивањем панела са испуном од клирита, $F_{max} = 35 \text{ kN}$ (дијаграм: сила / деформација)	106
Слика 4.4.22: Положај експерименталног панела у прихватном алату и изглед самог алата за испитивање увијањем	107
Слика 4.4.23: Испитивање панела увијањем (дијаграм: угао / момент)	108
Слика 4.4.24: Испитивање панела увијањем (дијаграм: време / момент)	108
Слика 4.4.25: Испитивање панела увијањем (дијаграм: време / угао)	109
Слика 4.4.26: Начин укрупњења и тачка деловања оптерећења за испитивања динамичким дејством силе за случај деловањем оптерећења паралелно равни експерименталног модела (затезање и притискивање)	110
Слика 4.4.27: дијаграм односа спектралне акцелерације и периоде, добијен од републичког сеизмолошког завода	110
Слика 4.4.28: динамичко испитивање на фреквенцији 1.66 Hz , почетни део	111
Слика 4.4.29: програм динамичког испитивање на фреквенцији 1.66 Hz , у целини	112
Слика 4.4.30: програм динамичког испитивања на фреквенцији 2.5 Hz	113
Слика 5.4.31: програм динамичког испитивања на фреквенцији 10 Hz	114
Слике 4.4.32 и 4.4.33: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита $v_1 = 0,5 \text{ Hz}$, $FD = 11 \text{ kN}$, 15 циклуса	116
Слике 4.4.34 и 4.4.35: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита $v_1 = 0,5 \text{ Hz}$, $FD = 22 \text{ kN}$, 15 циклуса	117
Слике 4.4.36 и 4.4.37: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита $v_1 = 0,5 \text{ Hz}$, $FD = 33 \text{ kN}$, 15 циклуса	118
Слике 4.4.38 и 4.4.39: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита $v_2 = 1,6 \text{ Hz}$, $FD = 11 \text{ kN}$, 48 циклуса	119
Слике 4.4.40 и 4.4.41: Динамичко испитивање панела са испуном од клирита $v_2 = 1,6 \text{ Hz}$, $FD = 22 \text{ kN}$, 48 циклуса	120

Слике 4.4.42 и 4.4.43:Динамичко испитивање панела са испуном од клирита	
$v_2 = 1,6 \text{ Hz}$, $FD = 33 \text{ kN}$, 48 циклуса	121
Слике 4.4.44 и 4.4.45:Динамичко испитивање панела са испуном од клирита	
$v_3 = 2,5 \text{ Hz}$, $FD = 11 \text{ kN}$, 150 циклуса	122
Слике 4.4.46 и 4.4.47:Динамичко испитивање панела са испуном од клирита	
$v_3 = 2,5 \text{ Hz}$, $FD = 22 \text{ kN}$, 150 циклуса	123
Слике 4.4.48 и 4.4.49:Динамичко испитивање панела са испуном од клирита	
$v_3 = 2,5 \text{ Hz}$, $FD = 33 \text{ kN}$, 150 циклуса	124
Слике 4.4.50 и 4.4.51:Динамичко испитивање панела са испуном од клирита	
$v_4 = 2,6 \text{ Hz}$, $FD = 11 \text{ kN}$, 150 циклуса	125
Слике 4.4.52 и 4.4.53:Динамичко испитивање панела са испуном од клирита	
$v_4 = 2,6 \text{ Hz}$, $FD = 22 \text{ kN}$, 150 циклуса	126
Слике 4.4.54 и 4.4.55:Динамичко испитивање панела са испуном од клирита	
$v_4 = 2,6 \text{ Hz}$, $FD = 33 \text{ kN}$, 150 циклуса	127
Слика 4.4.56: хистерезисна петља за експериментални модел са испуном од стакла (испитиван 28. 03. 2014.)	130
Слике 4.4.57 и 4.4.58:оштећења на угловима челичног рама, након излагања дејству силе интензитета 50 kN, при фреквенцији 1,6 Hz, у трајању 60 секунди	131
Слике 4.4.59 и 4.4.60:температурне вредности на угловима челичног рама у току динамичког испитивања, снимљене термовизијском камером	131
Слике 4.4.61 и 4.4.62: хистерезисне петље са испитивања обичних прозорских фасадних панела	132
Слика 4.4.63: хистерезисна петља, дијаграм сила / померање, за везу са једним Завртњем	133
Слика 4.4.64: хистерезисна петља, дијаграм сила / померање, за везу са једним завртњем и металним конектером	133
Слика 4.4.65: оштећење на вези штапова дрвеног рама, за други случај (један завртањ и метални конектер) – виде се трајна деформација металног конектера и пукотина на хоризонталном дрвеном штапу.....	133
Слика 4.4.66: хистерезисна петља, дијаграм сила / померање, за везу са два завртња	134
Слика 4.4.67: хистерезисне петље са испитивања панела са испуном од стакла (плава, 09. 04. 2014.) и испуном од клирита (црвена, 28. 02. 2014.), изложених дејству динамичке силе интензитета 50 kN, при фреквенцији 1,6 Hz	136
Слика 4.4.68: хистерезисне петље са испитивања панела са испуном од стакла (лево, 24. 04. 2014.) и испуном од клирита (десно, 08. 05. 2014.), изложених дејству динамичке силе интензитета 33 kN, при фреквенцији 2,5 Hz	138

Слика 5.1.1:	процедура (алгоритам) пројектовања сеизмички отпорних објеката, коришћењем неконвенционалних материјала	150
Слика 5.2.4:	објекат Народне скупштине у основи	152
Слика 5.2.5:	попречни пресек кроз објекат Народне скупштине (пресек пролази кроз простор велике куполе)	154
Слика 5.2.6:	подужни пресек кроз објекат Народне скупштине (пресек пролази кроз простор велике куполе)	154
Слика 5.2.4:	рачунарски модел објекта Народне скупштине у програмском пакету TOWER, верзија 6.0	155
Слика 5.2.5:	МКЕ у нивоу “темелна конструкција”	156
Слика 5.2.6:	МКЕ у нивоу “приземље”	156
Слика 5.2.7:	МКЕ у нивоу “спрат”	157
Слика 5.2.8:	МКЕ у нивоу “таван”	157
Слика 5.2.9:	МКЕ у карактеристичном пресеку (раму) “B_82”	158
Слика 5.2.10:	МКЕ у карактеристичном пресеку (раму) “B_19”	158
Слика 5.2.11:	МКЕ у карактеристичном пресеку (раму) “X_128”	159
Слика 5.2.12:	МКЕ у карактеристичном пресеку (раму) “X_10”	159
Слика 5.2.13:	рачунарски модел са генерисаном мрежом коначних елемената, 3D приказ	160
Слика 5.2.14:	први тон осциловања – доминантан ортогонални “X” правац	161
Слика 5.2.15:	други тон осциловања – доминантан ортогонални “Y” правац	161
Слика 5.2.16:	трећи тон осциловања – “слободни” зид у нивоу кровне конструкције, на левом крилу објекта	162
Слика 5.2.17:	четврти тон осциловања – четвртасте кровне куполе –осцилације блиске углу 45° у основи	162
Слика 5.2.18:	пети тон осциловања – четвртасте кровне куполе – слично као четврти тон, осцилације блиске углу 45° у основи	163
Слика 5.2.19:	шести тон осциловања – “слободни” зид у нивоу кровне конструкције, на десном крилу објекта, слично трећем тону	163
Слика 5.2.20:	деформација врха објекта (велике куполе и мале куполе на великој куполи) у “X” правцу, за случај оптерећења земљотресом у “X” правцу	164
Слика 5.2.21:	деформација у “X” правцу по висини бетонског стуба, за случај оптерећења земљотресом у “X” правцу	165
Слика 5.2.22:	деформација врха објекта (велике куполе и мале куполе на великој куполи) у “Y” правцу, за случај оптерећења земљотресом у “Y” правцу.....	166
Слика 5.2.23:	деформација у “Y” правцу по висини бетонског стуба, за случај оптерећења земљотресом у “Y” правцу	167

Слике 5.2.24 и 5.2.25: рачунарски модел велике куполе – рендерован и са мрежом коначних елемената; остатак конструкције објекта је на графичком режиму “невидљиво”	170
Слика 5.2.26: први тон осциловања – “слободни” зид у нивоу кровне конструкције, на левом крилу објекта	171
Слика 5.2.27: други тон осциловања – “слободни” зид у нивоу кровне конструкције, на десном крилу објекта, слично првом тону	172
Слика 5.2.28: трећи тон осциловања – четвртaste кровне куполе – осцилације блиске углу 45° у основи	172
Слика 5.2.29: четврти тон осциловања – четвртaste кровне куполе – осцилације блиске углу 45° у основи, слично трећем тону	173
Слика 5.2.30: пети тон осциловања – одражава се на мале четвртaste куполе, али и на велику куполу, за коју је доминантан ортогонални “X” правац	173
Слика 5.2.31: шести тон осциловања; аналогно петом тону – одражава се на мале четвртaste куполе, али и на велику куполу, за коју је доминантан ортогонални “Y” правац	174
Слика 5.2.32: деформација врха објекта (велике куполе и мале куполе на великој куполи) у “X” правцу, за случај оптерећења земљотресом у “X” правцу, са примењеним укрућењима од конструкционог ламелираног стакла	175
Слика 5.2.33: деформација у “X” правцу по висини бетонског стуба, за случај оптерећења земљотресом у “X” правцу, у моделу са укрућењем велике куполе помоћу конструкционог стакла	176
Слика 5.2.34: деформација врха објекта (велике куполе и мале куполе на великој куполи) у “Y” правцу, за случај оптерећења земљотресом у “Y” правцу	178
Слика 5.2.35: деформација у “Y” правцу по висини бетонског стуба, за случај оптерећења земљотресом у “Y” правцу, у моделу са укрућењем велике куполе помоћу конструкционог стакла	179
Слика 5.2.36: фасадне површине велике куполе у рачунарском моделу; симболи са кратким црним линијама представљају зглобне везе по ивицама појединачних панела од конструкционог стакла	180
Слике 5.2.37 и 5.2.38: гранични услови плочастих елемената – конвенције и начин графичког представљања у рачунарском моделу (софтверски пакет TOWER)	180
Слика 5.2.39: издвојен сегмент фасадне површи велике куполе, на коме се види подела – детаљ граничних услова дуж налегања плочастих елемената на штапове роштиља; момент “M1” око осе “1” се не преноси са једног на други плочасти елемент (“M1=0”)	181
Слике 5.2.40 и 5.2.41: рачунски модел, са бело означеним карактеристичним фасадним површинама на великој куполи – у “X” и “Y” правцу; на овим површинама се испитују вредности пресечних сила у штаповима и плочастим елементима укрућења велике куполе	182

Слике 5.2.42 и 5.2.43: интензитети аксијалних (нормалних) сила у штаповима фасадног роштиља [kN], произведени дејством земљотреса у “X” правцу, на релевантним деловима фасадне површи велике куполе која је паралелна подужној оси објекта (површи означене на слици 3.17)	183
Слике 5.2.44 и 5.2.45: интензитети аксијалне силе у хоризонталним штаповима челичног рама који уоквирује испуну од ламелираног клирита, у подножју и на половини висине велике куполе, за случај земљотреса у “X” правцу	184
Слика 5.2.46: интензитети аксијалне силе у хоризонталним штаповима челичног рама при врху велике куполе, за случај земљотреса у “X” правцу	184
Слика 5.2.47: Расопоред напона у произвољној тачки модела, на Моровом кругу	186
Слике 5.2.48 и 5.2.49: вредности главних напона на горњој ивици плочастих елемената, у фасадној површи карактеристичној за “X” правац дејства земљотреса	187
Слике 5.2.50 и 5.2.51: вредности главних напона на доњој ивици плочастих елемената, у фасадној површи карактеристичној за “X” правац дејства земљотреса	187
Слике 5.2.52 и 5.2.53: интензитети аксијалних (нормалних) сила у штаповима фасадног роштиља [kN], произведени дејством земљотреса у “Y” правцу, на карактеристичним деловима фасадне површине велике куполе која је паралелна попречној оси објекта (површина означена на слици 3.18)	188
Слике 5.2.54 и 5.2.55: интензитети аксијалне силе у хоризонталним штаповима челичног рама који уоквирује испуну од ламелираног клирита, у подножју и на половини висине велике куполе, за случај земљотреса у “Y” правцу	189
Слика 5.2.56: интензитети аксијалне силе у хоризонталним штаповима челичног рама при врху велике куполе, за случај земљотреса у “Y” правцу	189
Слика 5.2.57 и 5.2.58: вредности главних напона на горњој ивици плочастих елемената, у фасадној површи карактеристичној за “Y” правац дејства земљотреса	190
Слика 5.2.59 и 5.2.60: вредности главних напона на доњој ивици плочастих елемената, у фасадној површи карактеристичној за “Y” правац дејства земљотреса	190

9. ПРЕГЛЕД ТАБЕЛА

Табела 2.1.1:	хемијски састав содно-кречног и боросиликатног стакла	21
Табела 2.1.2:	физичке особине содно-кречног и боросиликатног стакла	22
Табела 2.1.3:	физичке особине ПВБ фолије	28
Табела 2.1.4:	дозвољене температурне разлике на површини стакла	34
Табела 2.2.1.:	физичке особине поликарбоната	53
Табела 2.2.2:	поређење особина легуре PP/PP-g-MA/PC, са различитим уделима градивних компоненти у структури	54
Табела 3.1.1:	програм испитивања физичко механичких својстава ламелираног стакла и клирита	60
Табела 3.2.1:	резултати испитивања запреминске масе (запремина узорка 648 cm ³)	61
Табела 3.3.1:	резултати испитивања коефицијента термичког ширења ламелираног стакла	62
Табела 3.3.2:	резултати испитивања коефицијента термичког ширења ламелираног клирита	63
Табела 3.4.1:	резултати испитивања чврстоће при притиску	64
Табела 3.5.1:	резултати испитивања чврстоће при савијању	66
Табела 3.5.2:	резултати испитивања модула еластичности при савијању	67
Табела 3.6.1:	резултати испитивања ламелираног клирита на затезање	71
Табела 3.6.2:	резултати испитивања ламелираног стакла на затезање	72
Табела 3.7.1	Укупни табеларни преглед резултата испитивања	76
Табела 4.4.1:	поређење резултата лабораторијских испитивања експерименталних модела са испуном од стакла (28. 03. 2014.) и клирита (03. 04. 2014.); видети дијаграме са ознаком “1-“ у Прилогу 1 на крају рада	135
Табела 4.4.2:	поређење резултата лабораторијских испитивања експерименталних модела са испуном од стакла (09. 04. 2014.) и клирита (28. 02. 2014.) .); видети дијаграме са ознаком “2-“ у Прилогу 1 на крају рада	135
Табела 4.4.3:	поређење резултата лабораторијског испитивања експерименталних модела са испуном од клирита (28. 02. 2014.) и челичног рама без испуне (13. 03. 2014.) .); видети дијаграме са ознаком “3-“ у Прилогу 1 на крају рада	137
Табела 4.4.4:	поређење резултата лабораторијског испитивања експерименталних модела са испуном од стакла (24. 04. 2014.) и клирита (08. 05. 2014.) .); видети дијаграме са ознаком “4-“ у Прилогу 1 на крају рада	137
Табела 4.4.5:	поређење резултата лабораторијских испитивања експерименталних модела са испуном од клирита (08. 05. 2014) и челичног рама без испуне (27. 06. 2014.) .); видети дијаграме са ознаком “5-“ у Прилогу 1 на крају рада	139

Табела 4.4.6:	резултати лабораторијског испитивања експерименталног модела са испуном од клирита (17. 04. 2014.); видети дијаграме са ознаком “К-“ у прилогу 1 на крају рада	139
Табела 5.2.1:	вредности периода осциловања	160
Табела 5.2.2:	углови дејства земљотреса, са периодама осциловања	164
Табела 5.2.3:	физичко-механичка својства клирита, која су придружена плочастим елементима на великој куполи у рачунарском моделу	169
Табела 5.2.4:	вредности периода осциловања, из рачунарског модела са укрућењима у виду конструкционог ламелираног стакла	171
Табела 5.2.5:	углови дејства земљотреса, са периодама осциловања; пети и шести период осциловања се користе за карактеристичне углове дејства земљотреса у “X” и “Y” правцу	175

10. РЕФЕРЕНЦЕ

Sucuoglu, H., Vallabhan, C. V. G. (1997). *Behaviour of window glass panels during earthquakes*. Elsevier Science Ltd, Engineering structures, Vol. 19, No. 8.

Huvernes, E. M. P., van Herwijnen, F., Soetens, F., Hofmeyer, H. (2007). *Glass panes acting as shear wall*. Technische Universiteit Eindhoven, Faculty of Architecture, Building and Planning Group, Structural Design Heron, Vol. 52.

Bedon, C., Amadio, C. (2012). *Buckling of flat laminated glass panels under in-plane compression or shear*. Elsevier Science Ltd, Engineering structures 36.

Bedon, C., Amadio, C. (2015). *Effect of circumferential sealant joints and metal supporting frames on the buckling behaviour of glass panels subjected to in-plane shear loads*. Springer International Publishing, Glass Structure Engineering.

Krstevska, L., Taškov, Lj., Rajčić, V. (2013). *Seismic Behaviour of Composite Panel Composed of Laminated Wood and Bearing Glass – Experimental Investigation*. Trans Tech Publications Switzerland, Advanced Materials Research, Vol. 778.

Štrukelj, A., Ber, B., Premrov, M. (2015). *Racking resistance of timber-glass wall elements using different types of adhesives*. Elsevier Science Ltd, Construction and Building Materials 93.

Haldimann, Dr M., Luible, Dr A., Overend, Dr M. (2008). *Structural use of glass*. Zürich, International Association for Bridge and Structural Engineering.

Мурављов, М., Јевтић, Д. (2013). *Извештај о лабораторијским испитивањима физичко – механичких својстава ламелираног стакла и клирита*. Институт за материјале и конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду

Mitrović, R., Stamenić, Z., Mišković, Ž., Ćorić, B., Terzović, J., Mandić, R., Srećković, G. (2014). *Izveštaj o laboratorijskom ispitivanju eksperimentalnog modela sa ispunom od lameliranog stakla / polikarbonata na dejstvo dinamičkog opterećenja*. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.

Bathe, K-J. (1982). *Finite element procedures in engineering analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

- EN 572-1:2004. *Glass in building – Basic soda lime silicate glass products – Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties*. CEN, 2004.
- EN 1748-1-1:2004. *Glass in building – Special basic products – Borosilicate glasses – Part 1-1: Definition and general physical and mechanical properties*. CEN, 2004.
- Sekulović, Dr. Miodrag. (1984). *Metod konačnih elemenata*. Beograd, Građevinska knjiga.
- Wellershoff, F. (2006). *Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebaudehullen*. Ph.D. thesis, RWTH Aachen / Shaker Verlag.
- Abarca, A. M. (2003). *Tests performed on Laminated Glass Bonded With a New Interlayer Composition*. Texas Tech University, A Thesis in Civil Engineering
- Bezuhov, N. I., Lužin, O. V., Kolkunov, N. V. (1973). *Stabilnost i dinamika konstrukcija u primerima i zadacima*. Beograd, Građevinska knjiga.
- Timošenko, S. P., Jang, D. H. (1968). *Teorija konstrukcija*. Beograd, Građevinska knjiga.
- El-Shami, M., Norville, S., Ibrahim, Y. E. (2012). *Stress Analysis of Laminated Glass With Different Interlayer Materials*. Alexandria Engineering Journal, 51.
- Шумарац, Д., Крајчиновић, Д. (1990). *Основи механике лома*. Београд, Научна књига, Грађевински факултет Универзитета у Београду.
- Jalham, I. S., Alsaed, O. (2011). *The Effect of Glass Plate Thickness and Type and Thickness of Bonding Interlayer on the Mechanical Behavior of Laminated Glass*. New Journal of Glass and Ceramics, 1.
- Bennison, DrS. J. (2001). *Strength of Laminated Safety Glass*. Glass Processing Days, Proceedings of the 7th international glass conference in Tampere.
- Mihailidi, M., Stanković, I., Paštrakuljić, M., Stojanović, A., Tatić, J., Janać, S. (1971). *Inženjersko tehnički priručnik – Materijali*. Beograd, IP Rad.
- Roiter, Y.; Minko, S.(2005). *AFM Single Molecule Experiments at the Solid-Liquid Interface: In Situ Conformation of Adsorbed Flexible Polyelectrolyte Chains*. Journal of the American Chemical Society, 127 (45).

- Ćirić-Marjanović, dr G. (2013). *Fizička hemija makromolekula – uvodno predavanje*, Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju.
- Takahashi, K., Aggag, G., Mada, T. (1997). *Rate Dependent Impact Fracture Toughness Analysis for Brittle Materials*. Journal de Physique IV, (C3).
- Maneski, T. (1998). *Kompjutersko modeliranje i proračun struktura*. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Maneski, T., Milošević-Mitić, V., Ostrić, D. (2002). *Postavke čvrstoće konstrukcija*. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Maneski, T. (2002). *Rešeni problemi čvrstoće konstrukcija*. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Leer, C., Carneiro, O. S., Covas, J. A., Maia, J. M., van Hattum, F. W. J., Bernardo, C. A., Biro, L. P., Horvath, Z. E., Kiricsi, I. (2006). *Dispersion of Carbon Nanotubes in Polycarbonate and Its Effect on the Composite Properties*. Trans Tech Publications, Switzerland, Materials Science Forum Vols. 514-516.
- Gao, Y., He, P., Lian, J., Wang, L., Qian, D., Zhao, J., Wang, W., Schulz, M. J., Zhang, J., Zhou, X., Shi, D. (2006). *Improving the Mechanical Properties of Polycarbonate Nanocomposites with Plasma-Modified Carbon Nanofibers*. Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics, 45.
- Poręba, R., Špírková, M., Hrdlička, Z. (2011). *Mechanical and thermomechanical properties of polycarbonate-based polyurethane-silica nanocomposites*. Processing and Application of Ceramics 5 [3].
- Boyer, R. F. (1968). *Dependence of Mechanical Properties on Molecular Motion in Polymers*. Polymer Engineering and Science, July 1968, Vol. 8, No. 3.
- Oromiehie, A., Ebadi-Dehaghani, H., Mirbagheri, S. (2014). *Chemical Modification of Polypropylene by Maleic Anhydride: Melt Grafting, Characterization and Mechanism*. International Journal of Chemical Engineering and Applications, Vol. 5, No. 2.
- Mat Shayuti, M., Abdullah, M. Z., Yusoff, M., Puteri S. M. (2011). *Compressive Properties and Morphology of Polypropylene / Polycarbonate Blends*. Singapore,

International Conference on Environment and Industrial Inovation IPCBEE vol. 12, IACSIT Press.

Ambrose, J., Vergun, D. (1990). *Simplified building design for wind and earthquake forces*. New York, John Wiley & Sons.

Balos, S., Sidjanin, L., Sabo, B., Grabulov, V. (2010). *Tehnologija zavarivanja polimetilmetakrilata (PMMA)*. Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 4/2010.

Sahputra, I.H., Echtermeyer, A.T. (2013). *Molecular Dynamics Simulation of Polycarbonate Deformation: Effect of Temperature and Strain Rate*. International Conference on Computational Mechanics (CM13) 25-27, Durham, UK.

Veer, F. A. (2012). *The Strength of Glass, a Nontransparent Value*. Faculty of Architecture, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, HERON, Vol. 52, No. 1/2.

Wu, Y.-F. (2009). *The Structural Behavior and Design Methodology for a New Building System Consisting of Glass Fiber Reinforced Gypsum Panels*. Construction and Building Materials, Elsevier Ltd.

Blaauwendraad, J. (2007). *Buckling of Laminated Glass Columns*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, HERON Vol. 52, No. 1/2.

Bedon, C., Amadio, C. (2012). *Buckling of Flat Laminated Glass Panels under In-plane Compression or Shear*. Engineering Structures 36.

Lim, K. Y. S., King, A. B. (1991). *The Behaviour of External Glazing Systems Under Seismic in Plane Racking*. Study Report No. 39, BRANZ The Resource Centre for Building Excellence, Porirua, New Zealand.

Žarnić, R., Rajčić, V., Krstevska, L., Taškov, Lj., Stepinac, M., Antolinc, D. (2012). *Development of Seismic Resistant Wooden Frames With Laminated Glass Infill*. Belgrade, Proceedings of International Conference – Research in the Field of Building Materials and Structures, Society for Materials and Structures Testing of Serbia.

EN 1998-1:2004, CEN Brussels

Правилник о техничким нормама за изградњу објеката високоградње у сеизмичким подручјима. Сл. лист СФРЈ бр. 31, јуни 1981, бр. 52, септембар 1981

Торић, Б., Салатић, Р. (2011). *Динамика грађевинских конструкција*. Београд, Грађевинска књига, Београд.

Froeling, M. (2011). *Strength design method for laminated glass*. Structural Mechanics, LTH, Lund University, Sweden.

Clough, Ray W., Penzien, J. (1975). *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill Kogakusha.

Norville, H. S. (1998). *Laminated Glass: Glazing Material for all Conditions*. Texas Tech University, Solutia Inc., Continuing Education Supplement to Texas Architect.

Bharj, R. S., Kumar, S. (2014). *The Effect of Size, Thickness, and Type of the Bonding Interlayer on Bullet Proof Glass as per EN 1063*. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, Vol:8, No:2.

Timošenko, S., Gudier, J. N. (1962). *Teorija elastičnosti*. Београд, Грађевинска књига.

Bati, S., Ranocchiai, G., Reale, C., and Rovero, L. (2010). *Time-Dependent Behavior of Laminated Glass*. J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000032, 389-396.

Bong Hwan Kim, Kook Chan Ahn, Chi Woo Lee (2014). *Low Velocity Impact Behaviors of a Laminated Glass*. Smart Science, 2:4, 209-213.

Zemanová, A., Zeman, J., Šejnoha M. (2015). *Finite element model based on refined plate theories for laminated glass units*. Rio de Janeiro, Lat. Am. j. solids struct. vol.12, no.6.

Ji, F. S., Dharani, L. R., Behr, R. A. Damage probability in laminated glass subjected to low velocity small missile impacts. Journal of Materials Science 33.

Deretić-Stojanović, Dr. Biljana, Dunica, Dr. Šerif. (2008). *Otpornost materijala*. Београд, грађевински факултет Универзитета у Београду.

Jacob, Dr. L. (2003). *Understanding The Versatility Of Laminated Safety Glass As A Glazing Product Of The Future*. Glass Processing Days 2003, Jacob & Associates Pty Ltd.

- Hidallana-Gamage, H. D., Damruwan, H., Thambiratnam, David P., Perera, Nimal J. (2014). Failure analysis of laminated glass panels subjected to blast loads. *Engineering Failure Analysis*, 36, pp. 14-29.
- X. Wang, Q. L. Zhang, J. Chen, Z. X. Tao, J. Chen (2012). Research on Deflection Calculation of Laminated Glass Simply Supported on Four Sides. *Advanced Materials Research*, Vols. 341-342, pp. 833-837.
- Xu, X., Chen, J., Xu, J., Li, Y. et al. (2014). *Modeling and Experimental Studies of Crack Propagation in Laminated Glass Sheets*. *SAE Int. J. Mater. Manf.*7(2):328-336.
- Nawar, M., Salim, H., Lafta, M., and Elshihy, A. (2015). *Quasi-Static Performance of Interlayer Systems for Laminated Glass*. *J. Mater. Civ. Eng.*, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001348, 04015084.
- Gomes, C., Travitzky, N., Greil, P., Acchar, W., Birol, H. Novaes de Oliveira, A. P., Hotza, D. (2011). *Laminated object manufacturing of LZSA glass ceramics*. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 17 Iss: 6, pp.424 – 428
- Bennison, Dr. S. J., Anthony Smith, Dr. C., Van Duser, Mr. A., Jagota, Dr. A. (2001). *Strength of Laminated Safety Glass*. Glass Laminating Products, E.I. DuPont de Nemours & Co. Inc. Glass Processing Days, 18–21 June 2001
- Zemanová, A., Zeman, J., Šejnoha, M. (2014). *Numerical model of elastic laminated glass beams under finite strain*. *Cornel University Library, Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14 (4), 734—744.
- Sakai, S., Maenaka, K., Kakuda, H., Yamazaki, K. (2013). *Optimum Design of Impact Resistance of Laminated Glass Plate*. Orlando, Florida, USA, 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization.
- Hidallana-Gamage, H. D., Thambiratnam, David P. , Perera, Nimal J.(2013). *Computational Analysis of Laminated Glass Panels Under Blast Loads: A Comparison Of Two Dimensional And Three Dimensional Modelling Approaches*. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, Volume 2, Issue 8

Alsaeda, O. I., Jalhamb, S. (2012). *Polyvinyl Butyral (PVB) and Ethyl Vinyl Acetate (EVA) as a Binding Material for Laminated Glass*. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, JJMIE Volume 6, Number 2.

Shetty, Mahesh S., Dharani, Lokeswarappa R., Stutts, Daniel S. (2012). *Analysis of Laminated Architectural Glazing Subjected to Wind Load and Windborne Debris Impact*. SRN Civil Engineering.

Larcher, M., Gebbeken, N., Falcon, Grecia A. (2011). *Simulation of Laminated Glass Loaded by Air Blast Waves*. Article in Applied Mechanics and Materials.

Razi, H., Kobayashi, A. S. (1993). *Delamination in cross-ply laminated composite subjected to low-velocity impact*. AIAA Journal, Vol. 31, No. 8.

Reghunath, R., Lakshmanan, M., Mini, K. M. (2012). *Low velocity impact analysis on glass fiber reinforced composites with varied volume fractions*. International Conference on Materials Science and Technology (ICMST 2012) IOP Publishing

Dong-ki Seo, Jae Bem You, Sung Gap Im, Jooho Kim, Kyung-kook Kim, Yeon-Kyoung Jung, Ming Li, Chan Pil Park, Dong-Pyo Kim (2013). *Laminated film composites of multilayered plastic film and inorganic polymer binder as an alternative to transparent and hard glass*. Polymer Journal 45, 685-689.

Trajanoska, B., Gavriloski, Dr V., Bogatinoski, Dr Z., Zdraveski, F. (2015). *Glass – Steel Hybrid Elements Under Four Point Bending Test*. Journal of Applied Engineering Science.

Gunasekaran U., Premalatha E., Aruna Malini, T.P. (2010). *Facades of Tall Buildings – State of the Art*. Modern Applied Science Vol. 4, No. 12, Published by Canadian Center of Science and Education

Timmel, M., Kolling, S., Osterrieder, P., Du Bois, P.A. (2007). *A finite element model for impact simulation with laminated glass*. International Journal of Impact Engineering 34, 1465–1478

Kumar, K., Monga, I. (2014). *An Evaluation of Energy Absorption by Bullet Resistant Glass and its Mechanical Properties*. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET) Vol. 2 Issue VIII.

- DuralE. (2015). *Experimental and numerical treatment of delamination in laminated glass plate structures*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, January 2016. 35.
- Amadio, C., Bedon, C. (2013). *An Equivalent Thickness for Buckling Verification of Laminated Glass Panels Under In-Plane Shear Loads*. Journal of Civil Engineering and Science, Sept. 2013, Vol. 2 Iss. 3, PP. 108-123.
- Louter, C., Cupać, J., Lebet, J.-P. (2014). *Exploratory experimental investigations on post-tensioned structural glass beams*. Journal of Facade Design and Engineering, vol. 2, no. 1-2, pp. 3-18.
- Neugebauer J. (2014). *Applications for curved glass in buildings*. Journal of Facade Design and Engineering 2.
- Dispersyna, J., Santarsierob, M., Belisa J., Louterb, C. (2014). *A preliminary study of the nonlinearity of adhesive point-fixings in structural glass facades*. Journal of Facade Design and Engineering 2.
- Carvalho, P. L., Cruz P. J. S., Veer, F. A. (2014). *Connecting through the reinforcement – design, testing and construction of a folded reinforced glass structure*. Journal of Facade Design and Engineering 2.
- Nijse, R., Wenting, R. (2014). *Designing and constructing corrugated glass facades*. Journal of Facade Design and Engineering 2.
- Teotia, M., Soni, R. K. (2012). *Polymer Interlayers for Glass Lamination-A Review*. International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online), Volume 3 Issue 8.
- Fam, A., Rizkalla, S. (2007). *Laboratory Simulation of Impact Loading on Laminated Glass for Ice Hockey Arenas*. Experimental Techniques, Society for Experimental Mechanics.
- Gorde, P., More, K. (2015). *Simulation of laminated windshield in automobile crash analysis*. International Journal of Engineering Development and Research, Volume 3, Issue 3.

Sik Jung, D., Chan Ahn, K. (2015). *Response of Monolithic and Laminated Glass under Impact Loading*. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol:15 No:02.

Amadio, C., Bedon, C. (2013). *A buckling verification approach for monolithic and laminated glass elements under combined in-plane compression and bending*. Engineering structures, Elsevier, Vol. 52, p. 220-229.

Pankhardt, K. (2010). *Temperature dependent flexural stiffness of load bearing laminated glass panes*. Periodica polytechnica Civil Engineering 54/2, 117–126

Calnan, J. (2013). *Experimental Comparison Study of the Response of Polycarbonate and Laminated Glass Blast Resistant Glazing Systems to Blast Loading*. Theses and Dissertations -- Mining Engineering University of Kentucky.

Huo, S., Reis, H. (2008). *Estimation of adhesive bond strength in laminated safety glass using guided mechanical waves: Part I. An energy velocity approach*. British Institute of Non-Destructive Testing.

Overend, M., De Gaetano, S., Haldimann, M. (2007). *Diagnostic Interpretation of Glass Failure*. Science and Technology Structural Engineering International.

Huang, X.K., Liu, G., Liu, Q., Bennison, S.J. (2015). *Influence of Interlayers on the Flexural Performance of Four-Side Supported Laminated Glass at Room Temperature*. Advances in Structural Engineering Vol. 18 No. 1.

Rathnakar, G., Shivanand, H. K. (2012). *Effect of Thickness on Flexural Properties of Epoxy based Glass Fiber Reinforced Laminate*. International Journal of Science and Technology, Volume 2 No.6.

Louter, P.C. (2007). *Adhesively bonded reinforced glass beams*. HERON Vol. 52, No. 1/2.

Kumar, M. M., Colins, V. J., Lakshminarayana, N., Puneeth B. M., Nagabhushana, M. (2013). *Buckling Analysis of Woven Glass Epoxy Laminated Composite Plate*. American Journal of Engineering Research (AJER).

- Venu, V., Syed, S. (2014). *Structural Response of Laminated Composite Glass Panel under the Influence of Different Load Combinations*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Certified Journal, Volume 4, Issue 11.
- Kumar, P., Shukla, A. (2011). *Dynamic response of glass panels subjected to shock loading*. Elsevier, Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 357, Issue 24, Pages 3917–3923.
- Park, H., Chen, W. (2010). *Experimental Investigation on Dynamic Crack Propagation Through Interface in Glass*. Indianapolis, Indiana, USA, Proceedings of the SEM Annual Conference, Society for Experimental Mechanics.
- Wruk, Dr. N., Schutte, Prof. Dr.-Ing. habil. A, Hanenkamp, Dr.-Ing. W. (1999). *Load Bearing Behaviour of Laminated Glass Under Static and Dynamic Load*. Finland, Glass Processing Days.
- Uete, H., Caddell, Robert M. (1983). *Determination of the Fracture Toughness of Polycarbonate Using an Energy Approach*. Pergamon Press Ltd., J. Mech Sci. Vol. 25, No. 2.
- Tulleners, Frederic A., Thornton, J., Crim, D. (2010). *Determination of Unique Fracture Patterns in Glass and Glassy Polymers*. University of California – Davis.
- Rosakis, Ares J., Ravichandran, G. (2000). *Dynamic failure mechanics*. Pergamon, International Journal of Solids and Structures, 37, 331-348.
- Gao, G., Negahban, M. (2013). *Dynamic fracture analysis of aged glassy polycarbonate by the method of caustics*. Wuhan, China, AMSS Press, Acta Mechanica Solida Sinica, Vol. 26, No. 5.
- Zenkiewicz, M., Rytlewski, P., Moraczewski, K., Stepczyńska, M., Karasiewicz, T., Richert, J., Ostrowicki, W. (2009). *Effect of multiple injection moulding on some properties of polycarbonate*. World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, Volume 37, Issue 2, p. 94-101.
- Ronkay, F. (2013). *Effect of Recycling on the Rheological, Mechanical and Optical Properties of Polycarbonate*. Acta Polytechnica Hungarica Vol. 10, No. 1.

Rouabah, F., Bouguettoucha, A., Ibos, L., Haddaoui, N. (2014). *Effect of the Quenching Temperature on the Izod Impact Strength of Polycarbonate: Experimental Data and Empirical Modeling*. Materials and technology 48, 3, 315–319.

Bureau, M.N., Kumar, V. (2006). *Fracture Toughness of High Density Polycarbonate Microcellular Foams*. Journal of Cellular Plastics 42; 229.

Feldmann, M., Kasper, R. et al. (2014). *Guidance for European Structural Design of Glass Components - Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. European Commission, JRC Scientific and Policy Reports.

Raj, Mahendrasinh M. (2014). *Studies on mechanical properties of PC - ABS blends*. Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, Vol. 3, No. 2.

Gray III, George T., Maudlin, Paul J., Hull, Lawrence M., Zuo, Q. Ken, Chen, Shuh-Rong (2005). *Predicting Material Strength, Damage, and Fracture - The Synergy between Experiment and Modeling*. Los Alamos Science Number 29.

Masud, A., Chudnovsky, A. (1999). *A constitutive model of cold drawing in Polycarbonates*. International Journal of Plasticity 15, p. 1139-1157.

Rittel, D., Levin, R. (1998). *Mode-mixity and dynamic failure mode transitions in Polycarbonate*. Elsevier, Mechanics of Materials 30, p. 197-216.

Sahputra, I.H., Echtermeyer, A.T. (2013). *Molecular Dynamics Simulation of Polycarbonate Deformation: Effect of Temperature and Strain Rate*. Durham, Uk, International Conference on Computational Mechanics (CM13).

Moy, P., Weerasooriya, T., Hsieh, A., Chen, W. (2009). *Strain Rate Response of a Polycarbonate Under Uniaxial Compression*. GE Plastics Inc.

Évora, V., Jain, N., Shukla, A. (2004). *Static and Dynamic Fracture Toughness and Crack Propagation in Nanocomposites*. Conference: 2004 SEM X International Congress & Exposition on Experimental & Applied Mechanics.

Kilwon Cho, K., Yang, JaeHo, Yoon, S., Nair, Minku Hwang Sobha V. (2005). *Toughening of Polycarbonate: Effect of Particle Size and Rubber Phase Contents of the Core-Shell Impact Modifier*. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 95, 748–755.

Elgamal, A., Fraser, M. *Seismic Isolation & Energy Dissipation Systems*.

Torunbalci, N. (2004). *Seismic Isolation and Energy Dissipating Systems in Earthquake Resistant Design*. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 3273.

Fardis, Michael N. (2009). *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Building*. Springer Science+Business Media B. V.

Fenves, Gregory L., Huang, Wei-His, Whittaker, Andrew S., Clark, Peter W., Mahin, Stephen A. (1998). *Modeling and Characterization of Seismic Isolation Bearings*. U.S. Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges.

Iliadis, C. (2011). *Friction based Control System for Seismic Energy Dissipation with Isolated Stories*. Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering of Massachusetts Institute of Technology for the Degree of Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering.

Muravljov, M., Stevanović, B. Ed. (2012). *Zidane konstrukcije zgrada i tehnička regulativa – savremena građevinska praksa u Srbiji i Evropi*. Beograd, Udruženje inženjera građevinarstva, geotehnike, arhitekture i urbanista Izgradnja, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.

Cardone, D., Flora, A., Gesualdi, G. (2013). *Inelastic response of RC frame buildings with seismic isolation*. Earthquake Engng Struct. Dyn. 2013; 42:871–889.

Ishiyama, Dr. Eng. Y. (2011). *Introduction to Earthquake Engineering and Seismic Codes in the World*. NewsT Research Lab. Co. Ltd.

Kelly, Trevor E. (2001). *Base Isolation of Structures*. Wellington, New Zealand, Holmes Consulting Group Ltd.

Ching, Keneth A. (2008). *Base Isolation Case Study*. Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering of Massachusetts Institute of Technology for the Degree of Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering.

Kikuchi, M., Aiken, Ian D. (1997). An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, No. 2.

Naeim, F., Kelly, James M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures – From Theory to Practice*. New York, John Willey & Sons, Inc.

Nagarajaiah, S. Buckle, I. (2002). *Stability of Elastomeric Isolators: Critical Load Tests and Computations*. MCEER Bulletin, Vol. 16, No.1, Spring/Summer 2002.

Nagarajaiah, S., Ferrell, K. (1999). *Stability of Elastomeric Seismic Isolation Bearings*. *Journal of Structural Engineering*, September 1999.

Charmpis, Dimos C., Komodromos, P., Phocas, Marios C. (2012). Optimized earthquake response of multi-storey buildings with seismic isolation at various elevations. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2012; 41:2289–2310.

Constantinou¹, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M., Warn, G. P. (2007). *Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading*. State of California Department of Transportation Project 65A0174MCEER Highway Project TEA-21, ext-3A and ext-3C.

Ravari, Ali K., Othman, I., Ibrahim, Z., Hashamdar, H. (2011). *Variations of horizontal stiffness of laminated rubber bearings using new boundary conditions*. *Scientific Research and Essays* Vol. 6(14), pp. 3065-3071.

Kelly, James M. (1999). *The Role of Damping in Seismic Isolation*. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 28, 3-20 (1999).

Harris, Cyril M., Piersol, Allan G. (2002). *Harris' Shock and Vibration Handbook - Schaefer, Ronald J. Chapter 33, Mechanical Properties of Rubber*. New York, McGraw-Hill.

Референце аутора

Nestorović, M., **Terzović, J.**, Mandić, R. (2016) *Steel Frames with Klirit or Glass Infill Subjected to Cyclic Loading*. 4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering 2016, Faculty of Civil Engineering, Subotica. Conference Proceedings (pp. 221-228). ISBN 978-8680297-63-7.

Tekić, Z., Nenadović, A., Đorđević, S., **Terzovic, J.** (2015) *Metal connector plate – Experimental Determination of Plate Anchorage Capacity*. Tehnički vjesnik – Technical Gazette, 2015, vol. 12, br. 2 (pp. 375-381). (IF=0,579) DOI: 10.17559/TV-20140331200230.

Mišković, Ž., Stamenić, Z., **Terzović, J.**, Mitrović, R. (2014) *Mechanical testing of metal building construction in earthquake conditions*. 2nd International scientific Conference of Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA 2014, East Sarajevo, Bosnia and Hercegovina. Conference Proceedings (p. 491-496). ISBN 978-99976-623-1-6.

Krstić-Furundžić, A., Kosić, T., **Terzović, J.** (2014) *Konstruktivne karakteristike staklenih krovnih panela*. Peti međunarodni naučno–stručni simpozijum Instalacije & Arhitektura 2014. Arhitektonski fakultet Univerzitet u Beogradu. Zbornik radova (p. 6-12). ISBN: 978-86-7924-133-7.

Krstic-Furundzic, A., Kopic, T., **Terzovic, J.**, (2013) “*Architectural Aspect of Structural Glass Roof Design*”. COST Action TU0905, Mid-term Conference of Structural Glass – Belis, Louter & Mocibob (Eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00044-5.

Tekić, Ž, Đorđević, S., **Terzović, J.**, Adžić, N. (2012). *Drvena konstrukcija rekreativnog centra u Smedervskoj Palanci*. 4. Internacionalni naučno – stručni skup “Građevinarstvo – nauka i praksa”GNP 2012, Žabljak, Crna Gora(str. 591 – 598).

Krstic-Furundzic, A., Kopic, T., **Terzovic, J.**, (2012) “*Architectural Aspect of Structural Design of Glass Facades /Glass Skin Applications*”, in *Challenging Glass 3*, Proceedings of the Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Editors: Bos, Louter, Nijssen, Veer, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, IOS Press BV, The Netherlands, June 2012, str. 891-900 (ISBN 978-1-61499-060-4, print, ISBN 978-1-61499-061-1, online).

Terzović, J. (2009). *Beogradska konstruktorska škola i formiranje urbanog portreta Beograda*. Institut za građevinarstvo Niš. Nacionalni skup PhIDAC09.NAUKA + PRAKSA, vol. 12.2/2009(str. 33-36). ISSN: 1451-8341.

Tekić, Ž, Đorđević, S., **Terzović, J.** (2009). *Krovna drvena konstrukcija višenamenske sportske dvorane u Pančevu – čvorne veze*. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo. Internacionalni skup iNDiS 2009. Zbornik radova (p. 443-450). ISBN: 978-86-7892-220-6.

Arsić-Paljić, Lj., **Terzović, J.** (2009). *Prikaz konstrukcije stambenog objekta Nova Aleksandrija u Sočiju, Rusija*. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo. Internacionalni skup iNDiS 2009. Zbornik radova (p. 53-58). ISBN: 978-86-7892-220-6.

Nestorović, M., Ilić, B., **Terzović, J.** (2009). *Ispitivanje eksperimentalnog kompjuterskog modela hale br. 3 Beogradskog sajma u kontekstu razvoja savremenih trodimenzionalnih struktura*. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo. Internacionalni skup iNDiS 2009. Zbornik radova (p. 337-344). ISBN: 978-86-7892-220-6.

Arsić-Paljić, Lj., **Terzović, J.** (2008). *Prikaz konstrukcije sportskog centra u Kuvajtu*. Društvo građevinskih konstruktora Srbije. Simpozijum 2008, Zbornik radova (s. 225-230). ISBN: 978-86-85073-04-5.

Tekić, Ž, Đorđević, S., **Terzović, J.** (2008). *Prikaz krovne konstrukcije sportske dvorane u Pančevu*. Društvo građevinskih konstruktora Srbije. Simpozijum 2008, Zbornik radova (s. 261-265). ISBN: 978-86-85073-04-5.

Рад на научно-истраживачким пројектима

Развој и примена научних метода у пројектовању и грађењу високо економичних конструктивних система применом нових технологија. (пројекат број 36008

Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије).

Руководилац пројекта др Миодраг Несторовић, редовни професор Архитектонског факултета Универзитета у Београду

Примена савремених мерних и прорачунских техника за израчунавање струјних параметара вентилационих система на моделу енергетски изузетно ефикасног (пасивног) објекта. (пројекат број 35046 Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије). Руководилац пројекта др Милан Лечић, доцент на Машинском факултету Универзитета у Београду (2011. – 2015.)

Примена резултата напредног развоја просторних структура у области 3Д трансформација, конструисања, нових материјала – Симпролита и технологија. (пројекат бр. 16-009 Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије). Руководилац пројекта др Миодраг Несторовић, редовни професор Архитектонског факултета Универзитета у Београду (2008. – 2011.)

Примена резултата истраживања елемената од симпролита код просторних конструкција великих распона. [Министарство за науку технологију и развој Републике Србије (евиденциони број: ТР - 6509А)]. Руководилац пројекта др Миодраг Несторовић, редовни професор Архитектонског факултета Универзитета у Београду (2005. – 2008.)

11. БИОГРАФИЈА АУТОРА

Јефто Т. Терзовић, рођен је у Дубровнику, Република Хрватска, 1975. године.

Основну школу завршио у Херцег-Новом, Црна Гора, 1990. године.

Средњу школу завршио у Херцег-Новом 1994. године, стекавши звање *Математичко-програмерски сарадник*.

Архитектонски факултет Универзитета у Београду уписао 1994. године.

Током студија на Архитектонском факултету, слушао курс *Архитектонско инжењерство*.

Дипломирао на Архитектонском факултету у септембру 2003. године, под менторством доц. арх. Борислава Петровића, са оценом 10 (десет) на дипломском испиту и сапросечном оценом током студија 8,31.

Од 2000. године, још за време студија, радио као сарадник у настави – *демонстратор* – на предметима са Катедре за статику конструкција.

Стално запослен на Архитектонском факултету Универзитета у Београду у периоду од 2004. до 2015. године.

Укупно петнаест година активно учествовао у настави, у извођењу вежби на свим предметима са Катедре за статику конструкција, а затим на истој групи предмета, у оквиру Департамана за архитектонске технологије.

Докторске академске студије на Архитектонском факултету Универзитета у Београду уписао 2013. године.

Објављује научне радове, уз учешће на научним скуповима.

У досадашњем делу стручне професионалне каријере, сарађивао са већим бројем пројектантских бироа, у изради пројеката конструкције, за објекте разних намена, у својству одговорног пројектанта конструкције.

Члан је Инжењерске коморе Србије и поседује лиценце одговорног пројектанта и одговорног извођача радова.

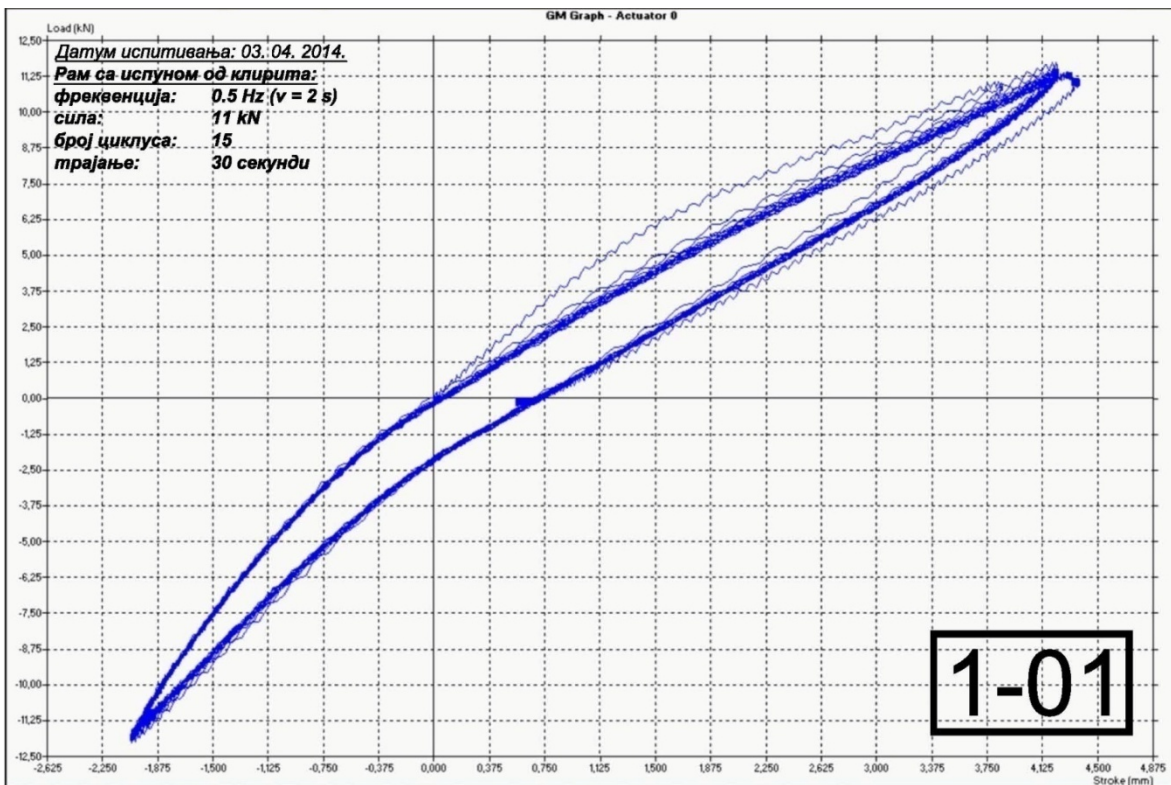
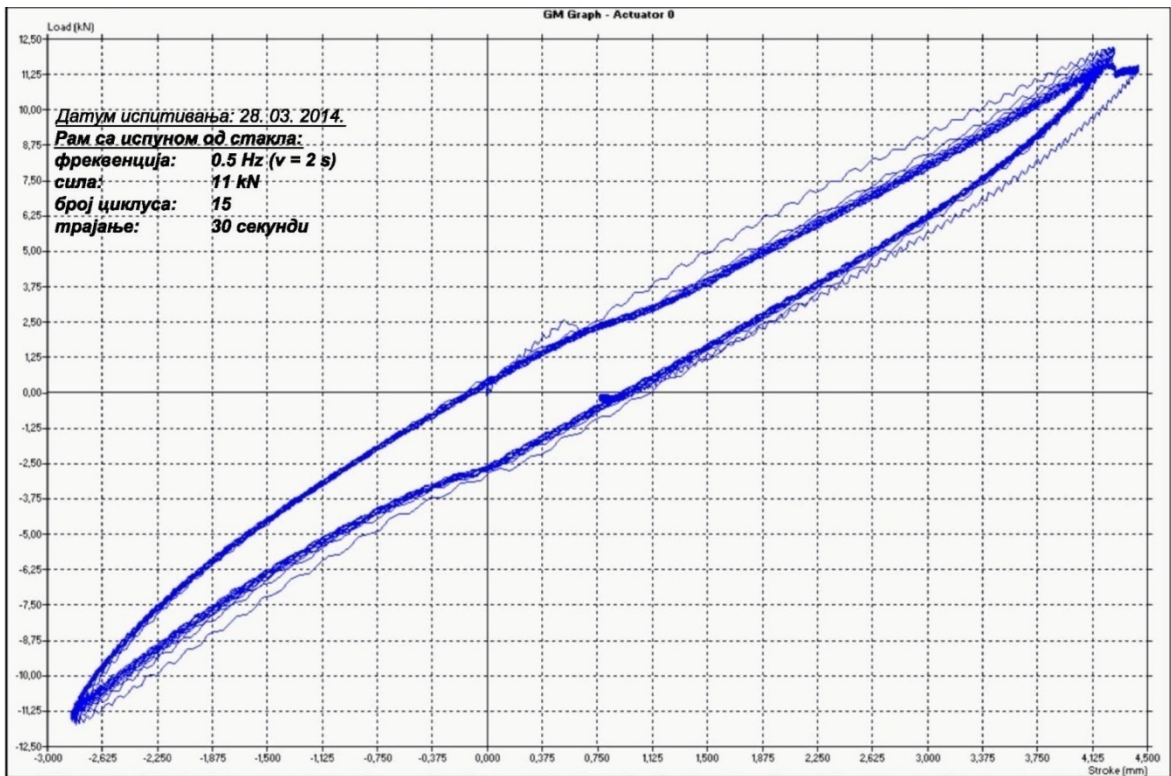
12. ПРИЛОЗИ

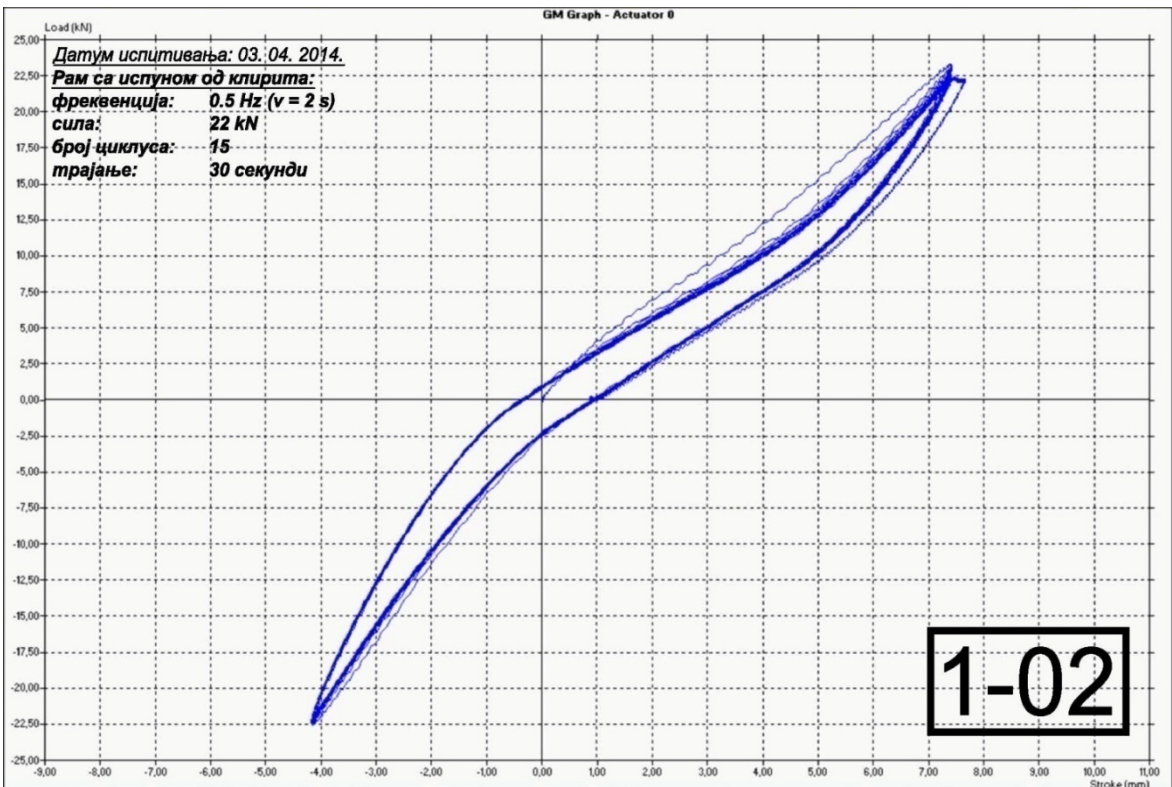
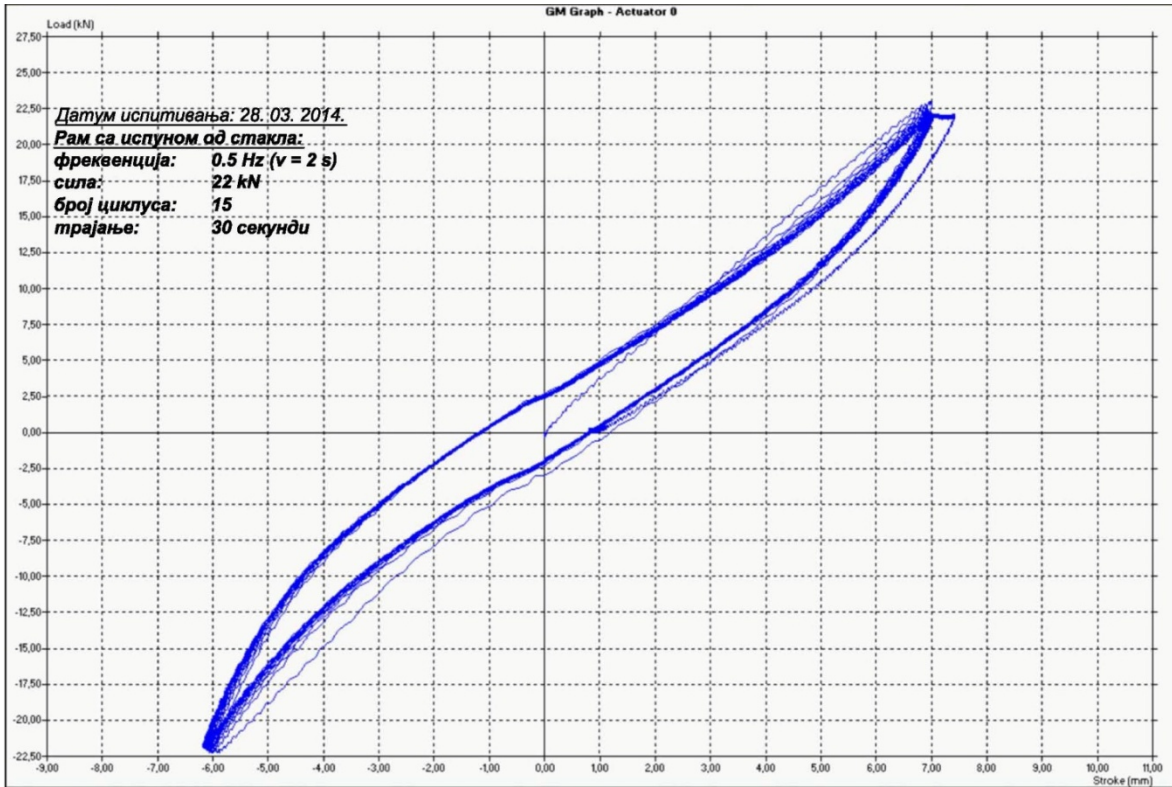
Прилог 1.

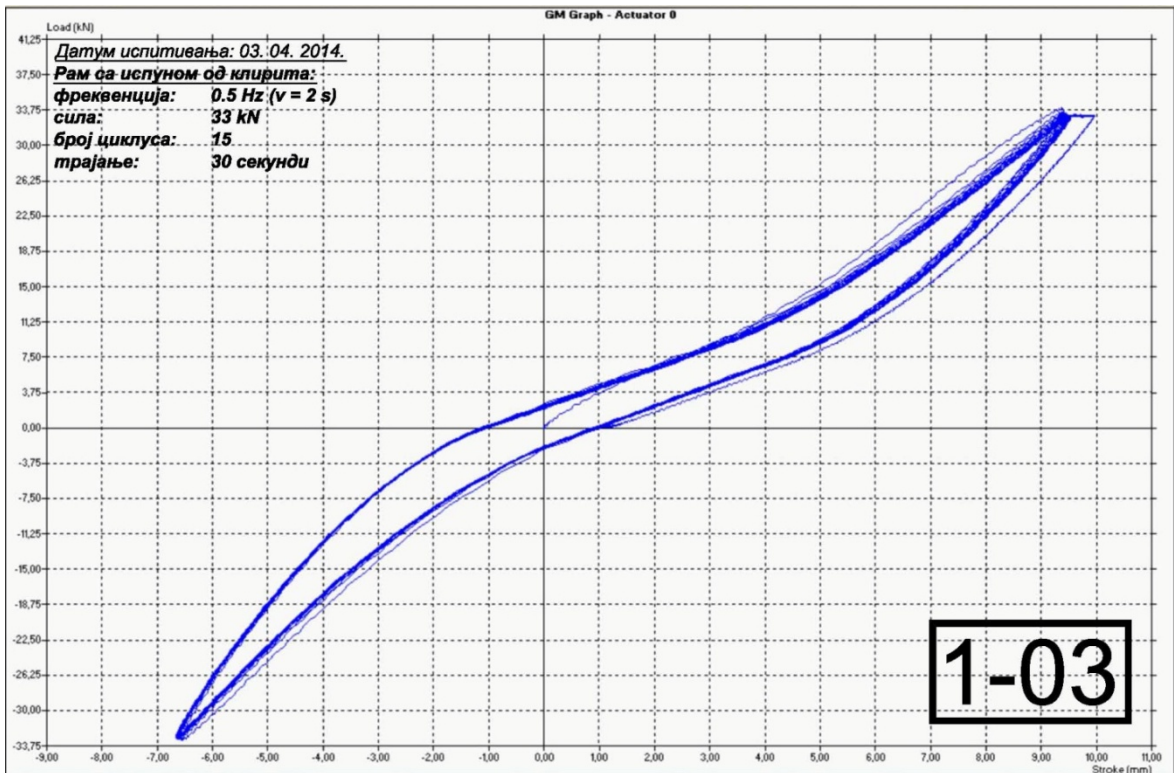
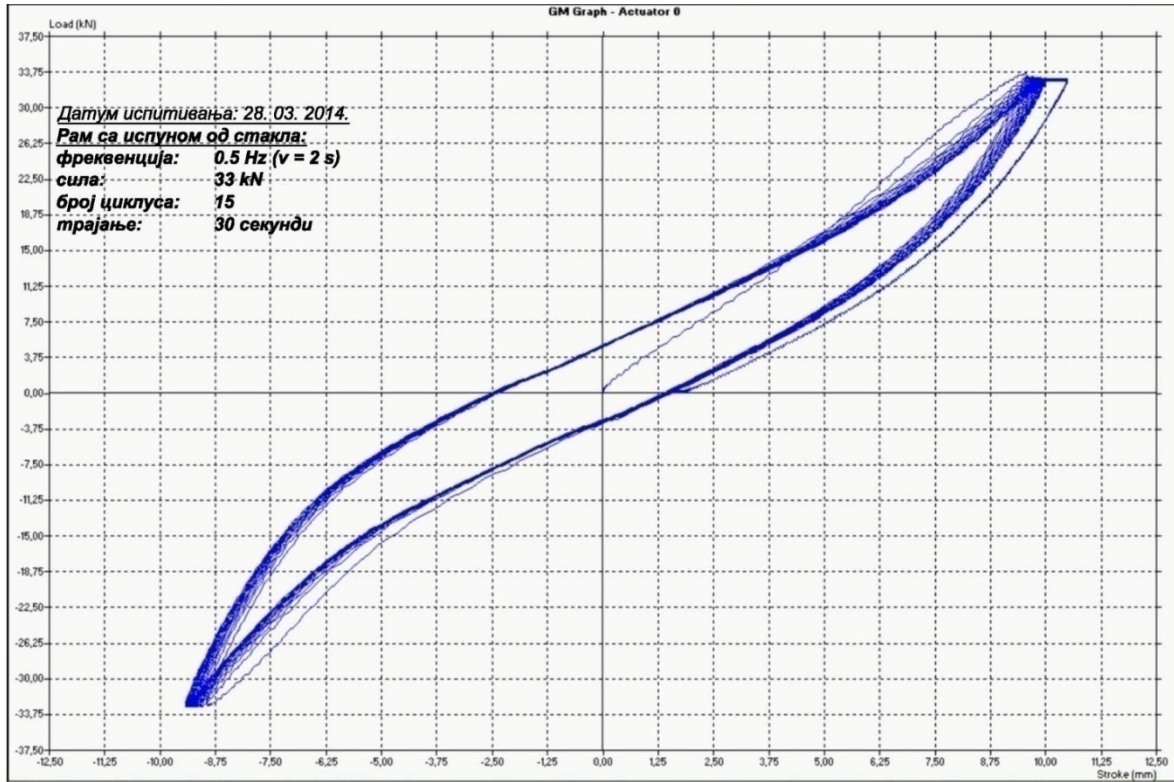
ДИЈАГРАМИ ИЗ ЛАБОРАТОРИЈСКИХ ИСПИТИВАЊА ЛАМЕЛИРАНОГ СТАКЛА И ЛАМЕЛИРАНОГ КЛИРИТА НА ДИНАМИЧКО ОПТЕРЕЋЕЊЕ

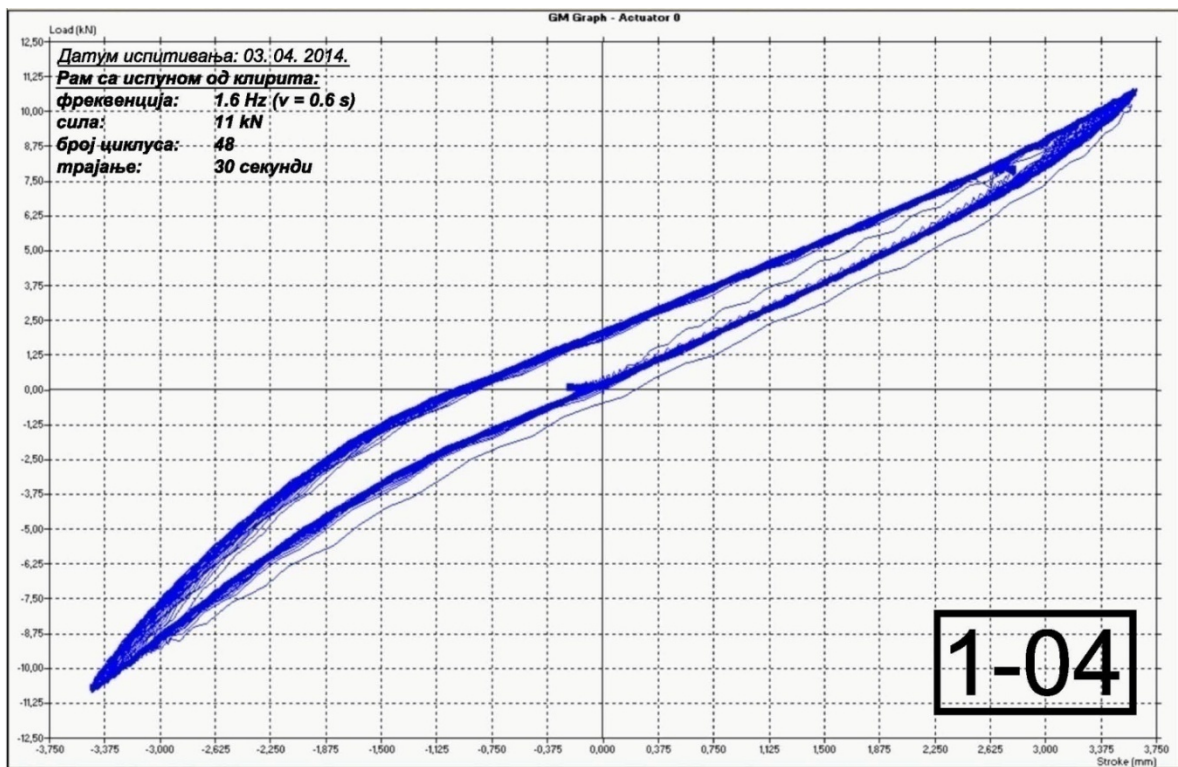
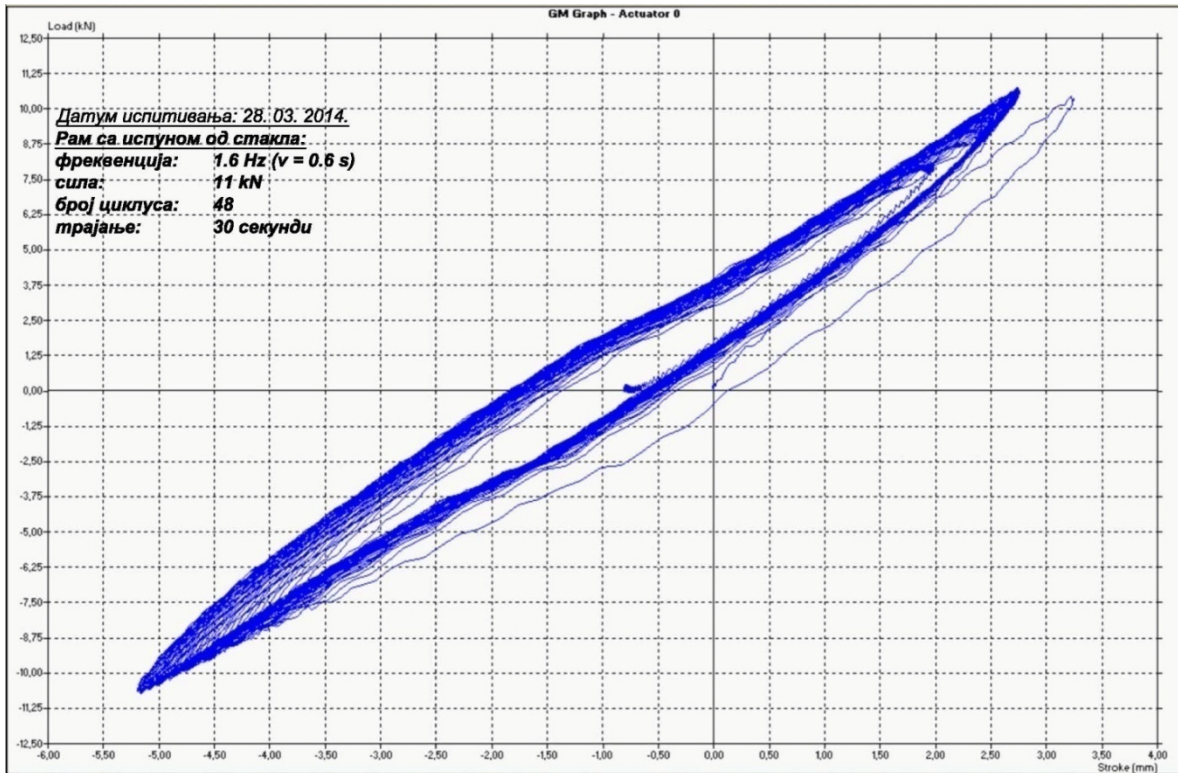
Дијаграми из испитивања експерименталних модела на бази стакла (28. 03. 2014.) и клирита (03. 04. 2014.)

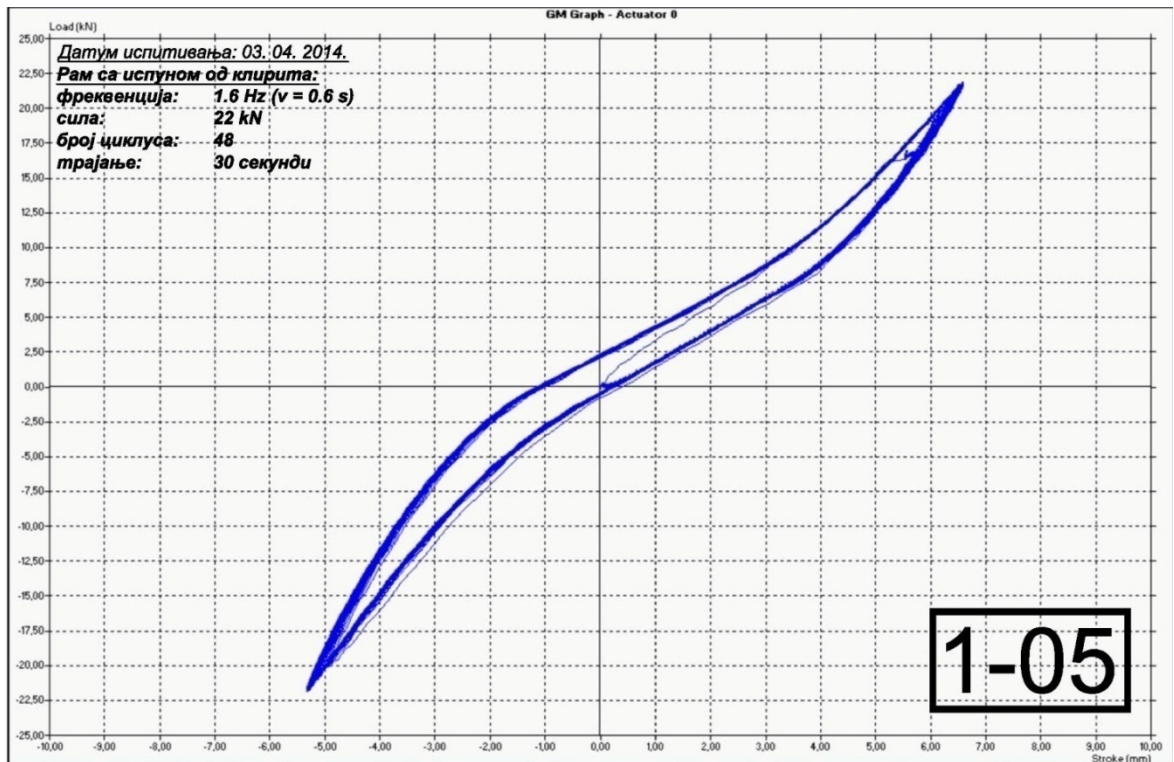
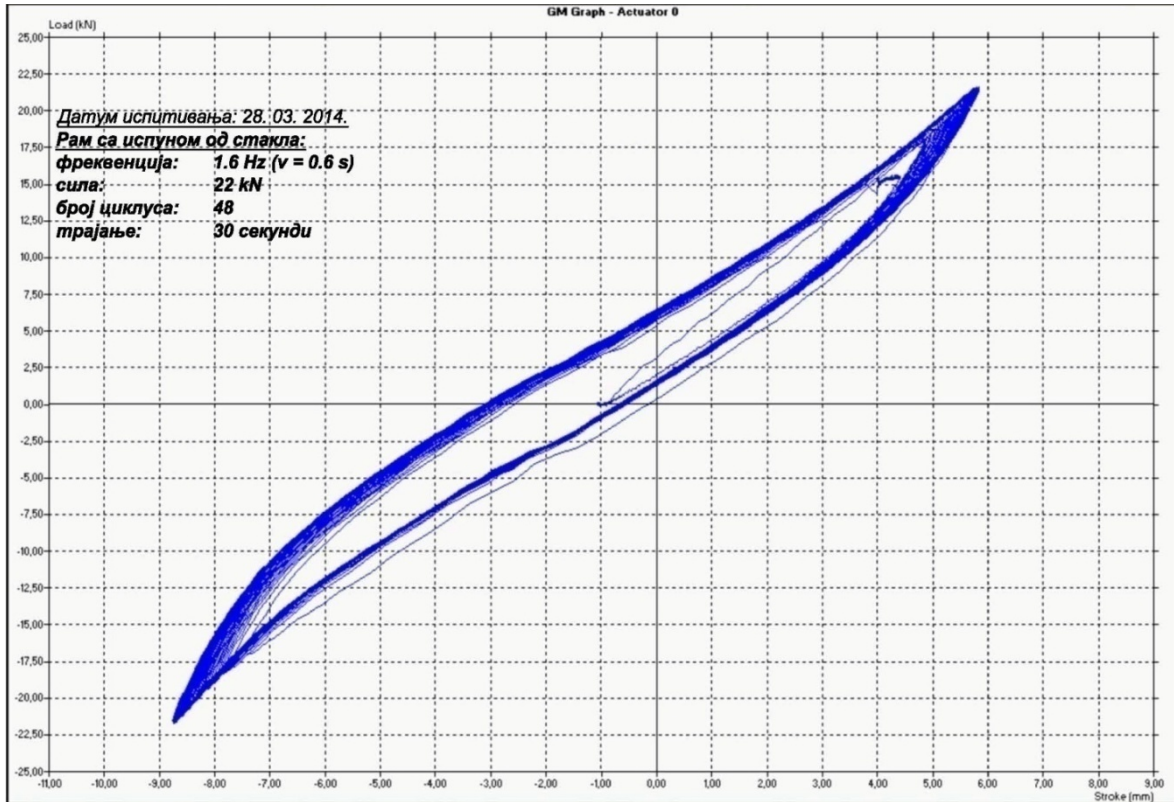
Дијаграми са ознаком "1-..."

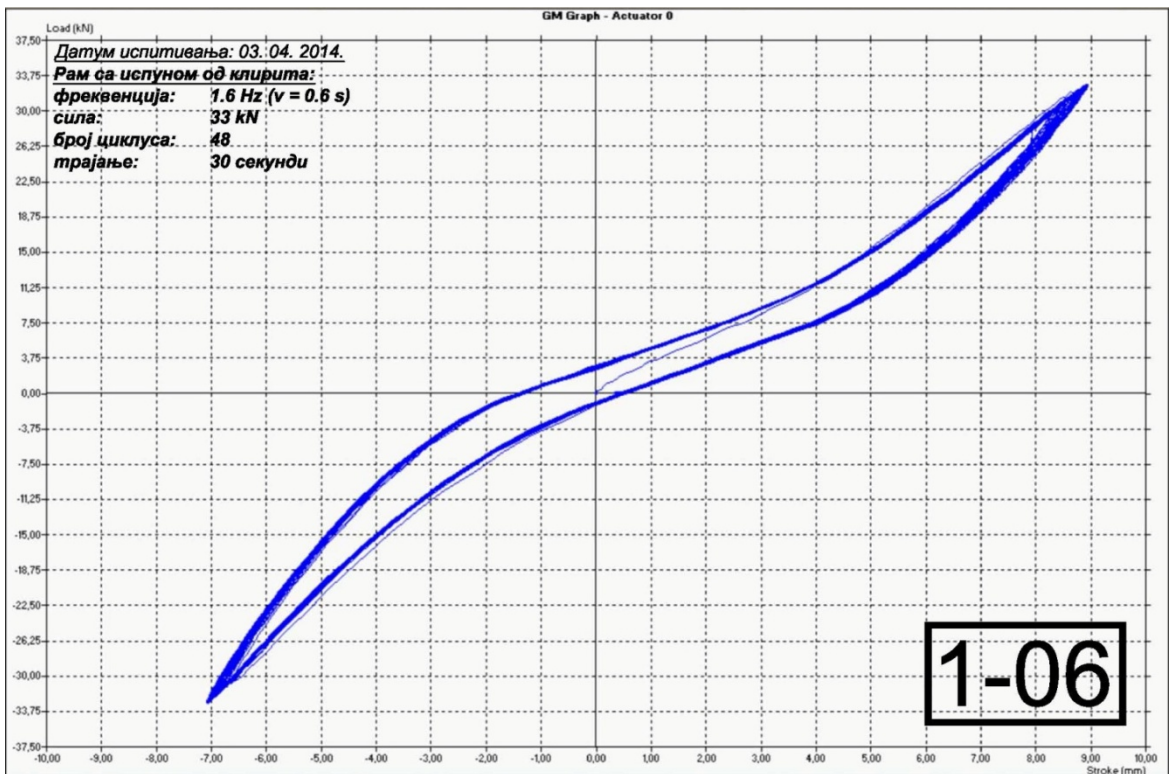
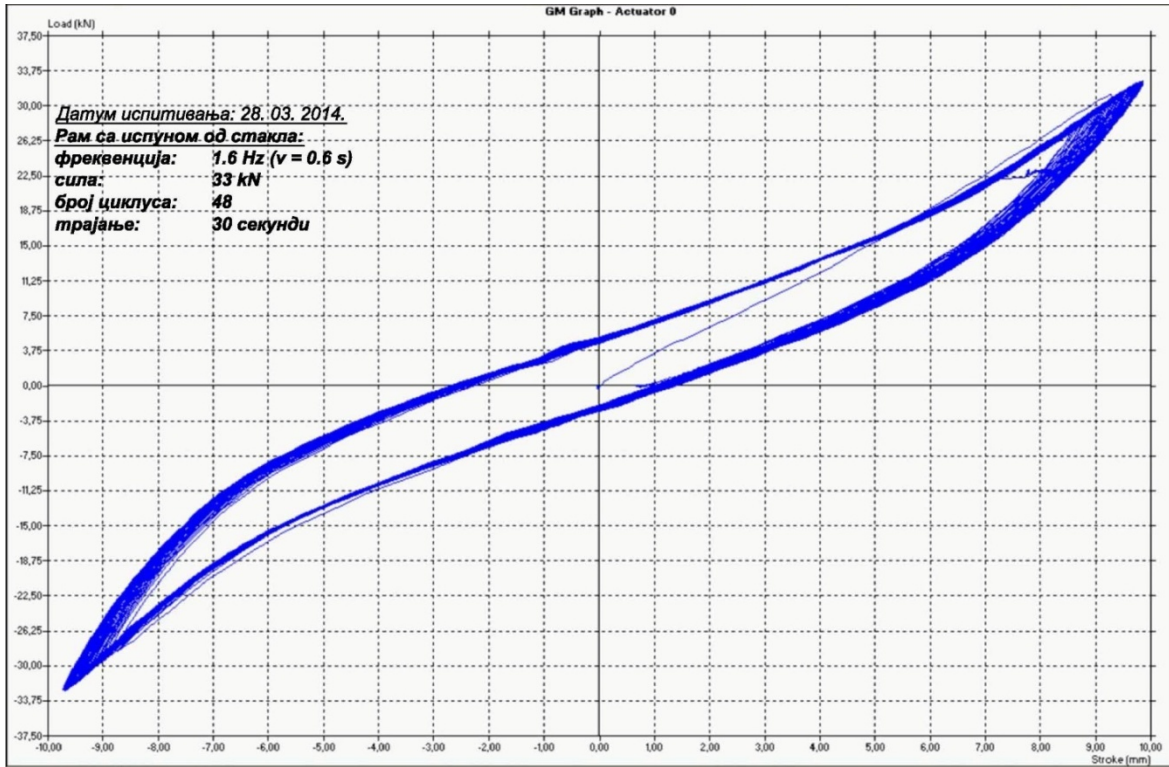


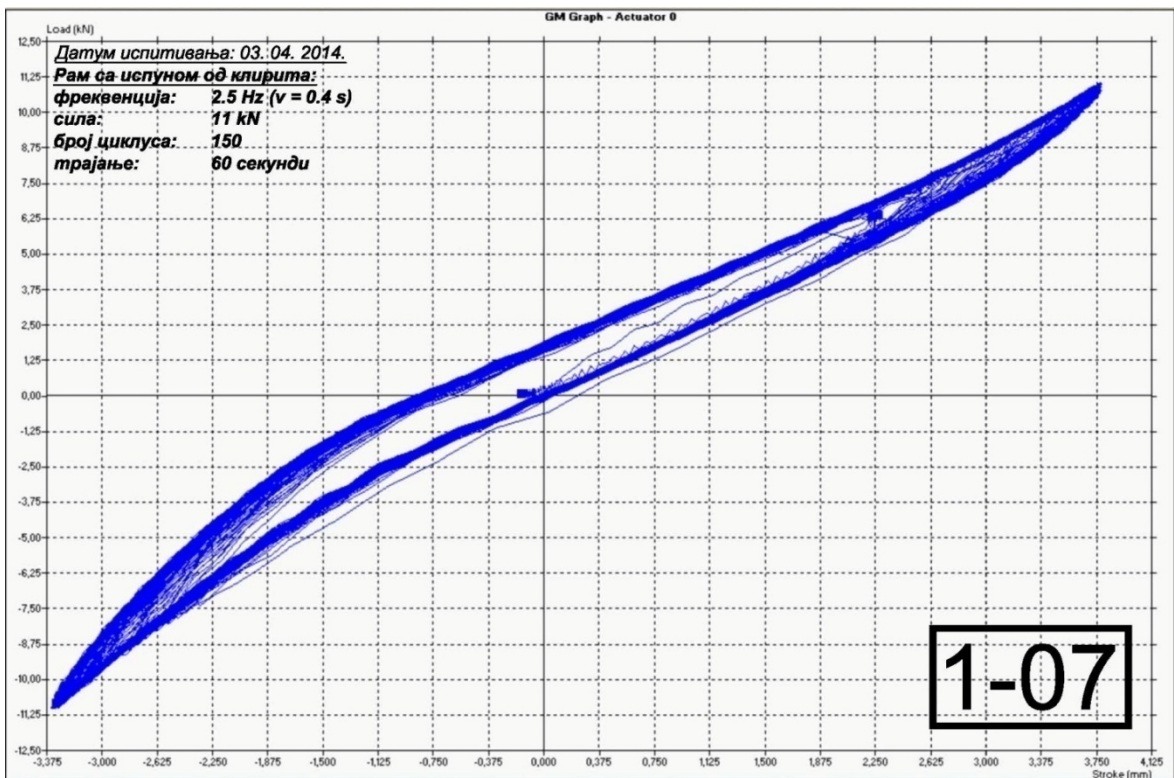
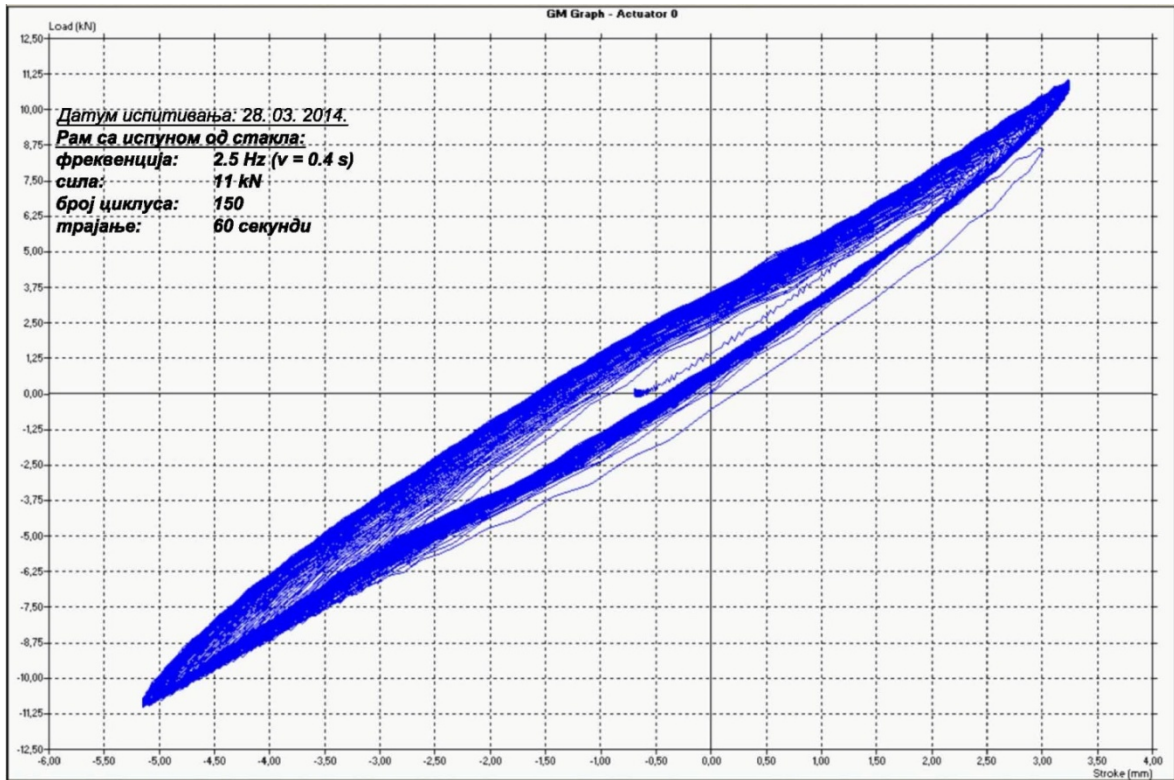


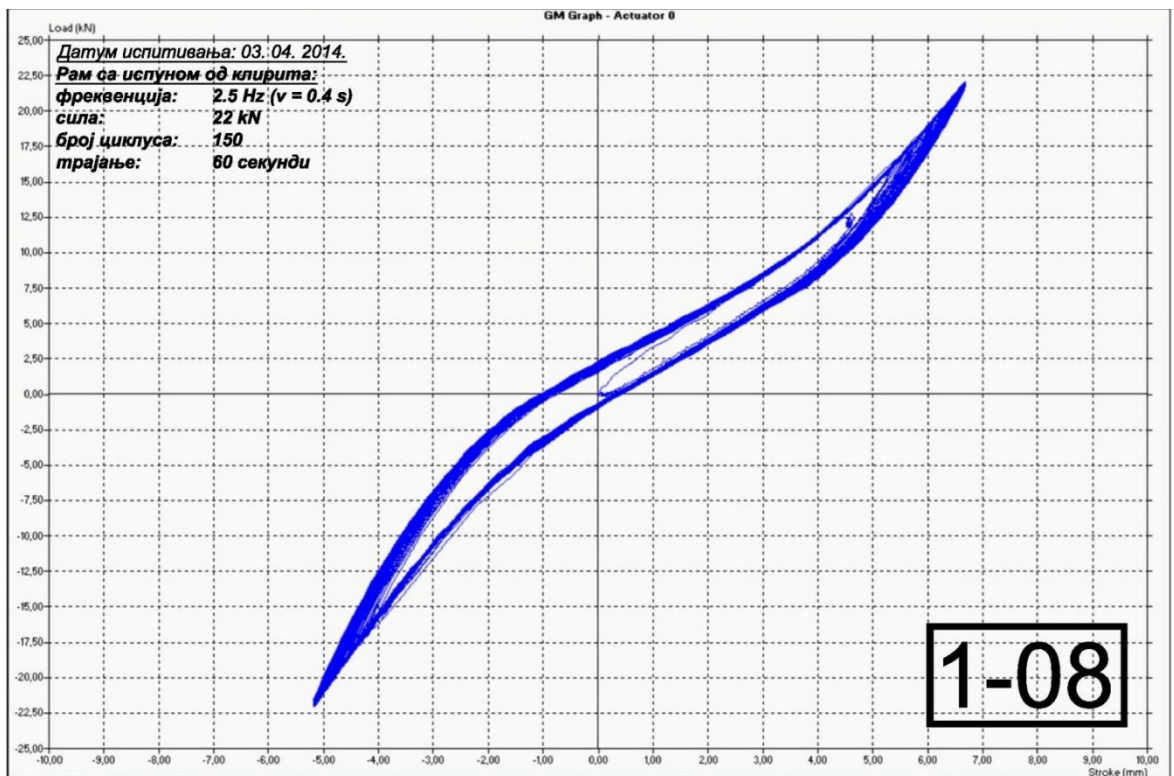
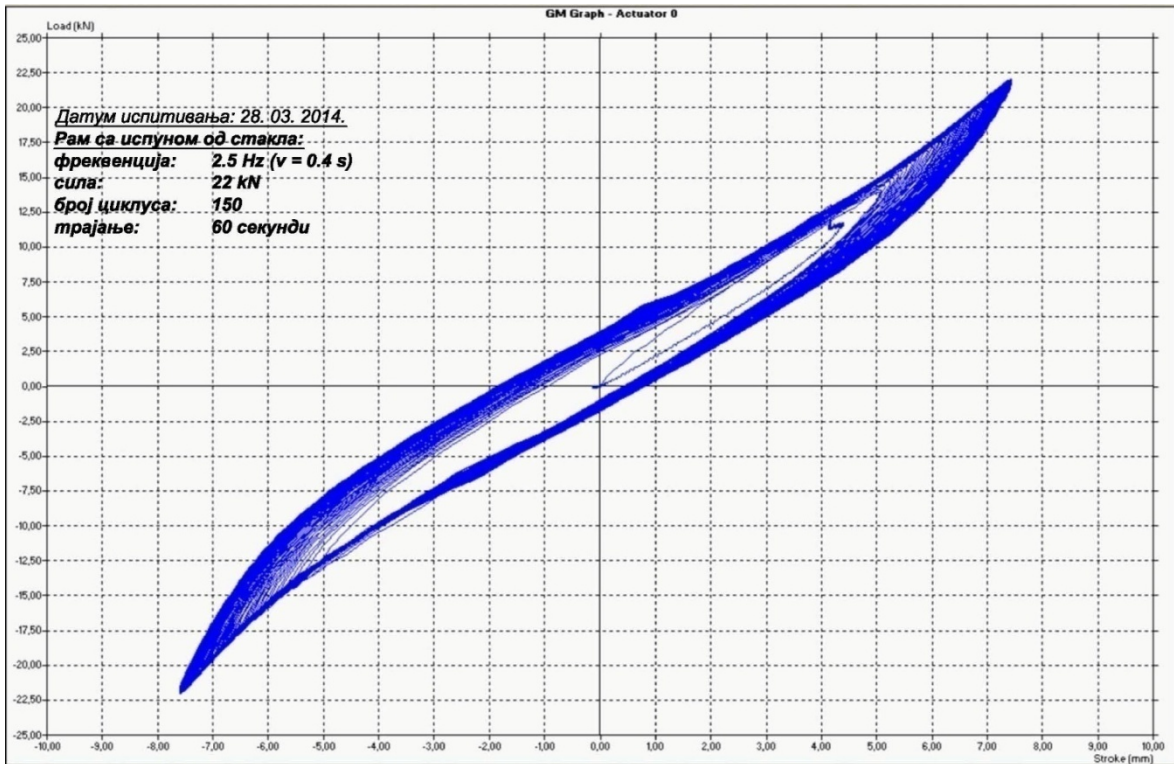


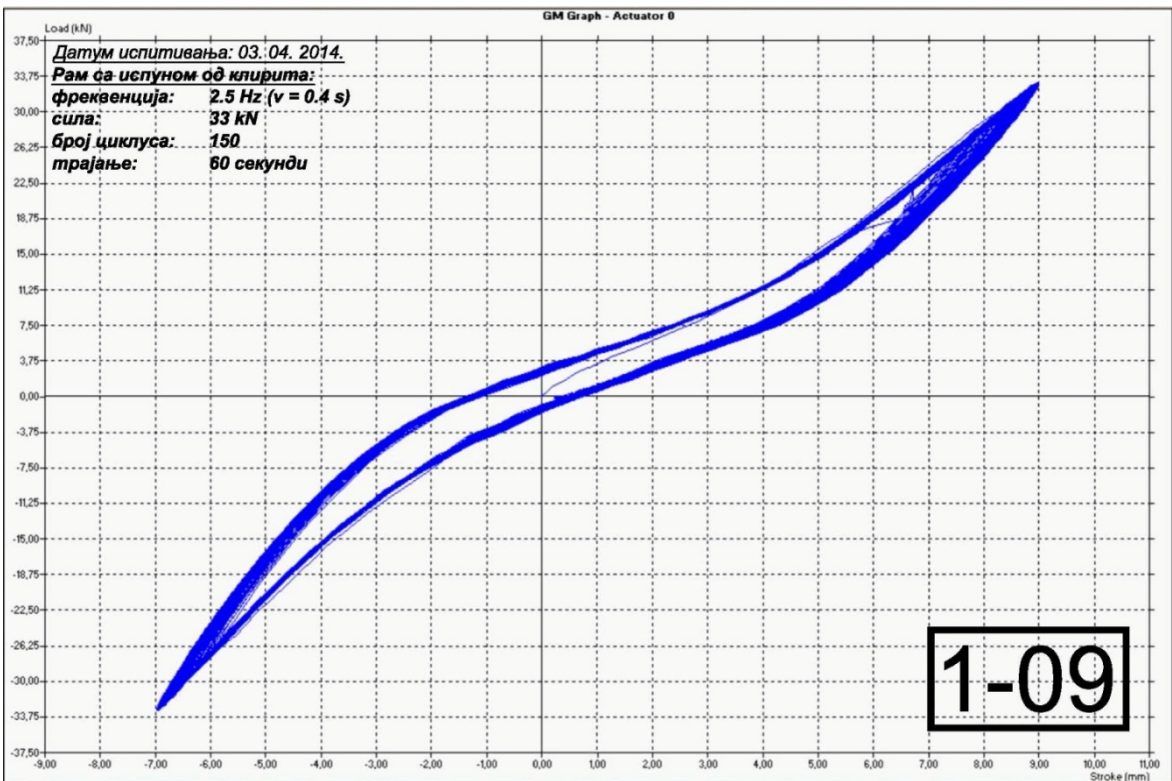
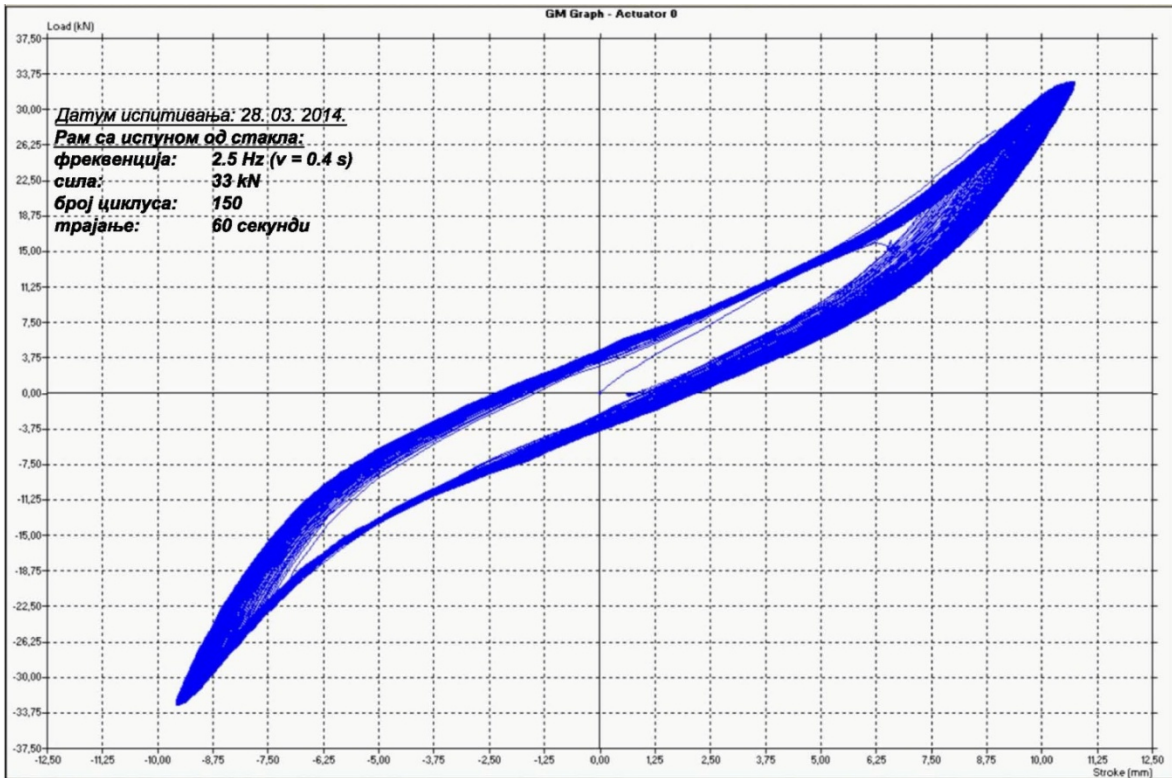


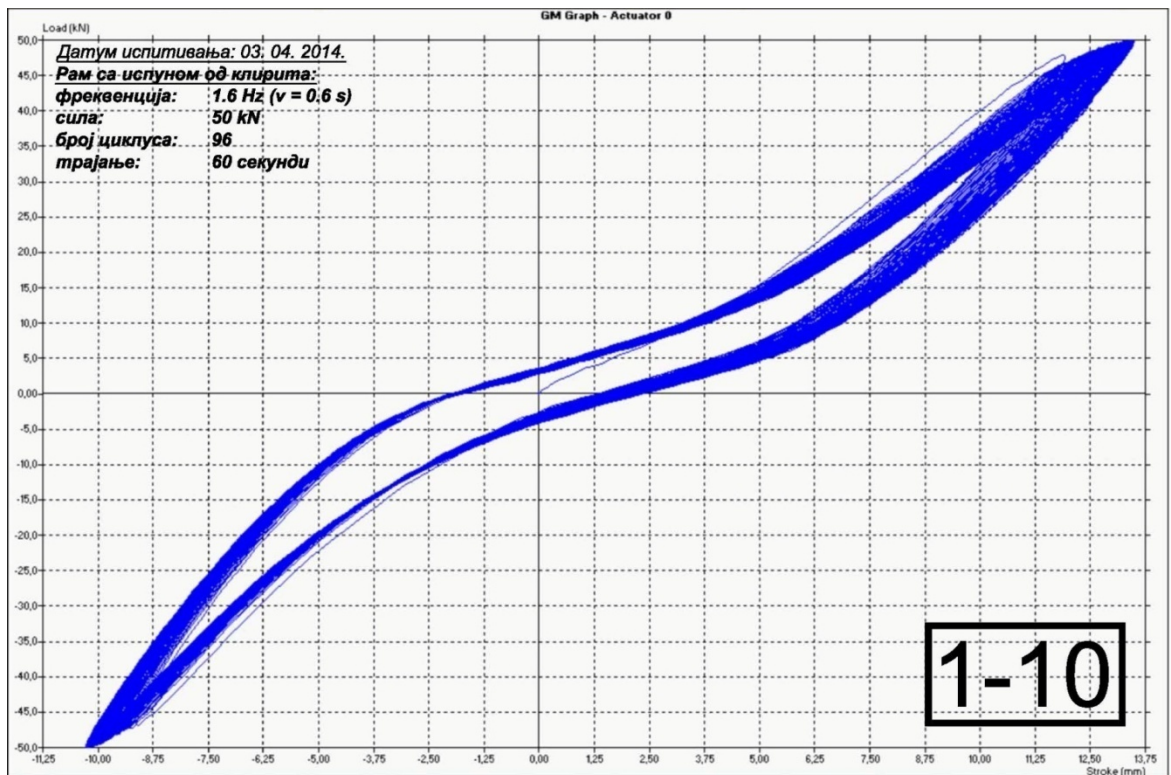
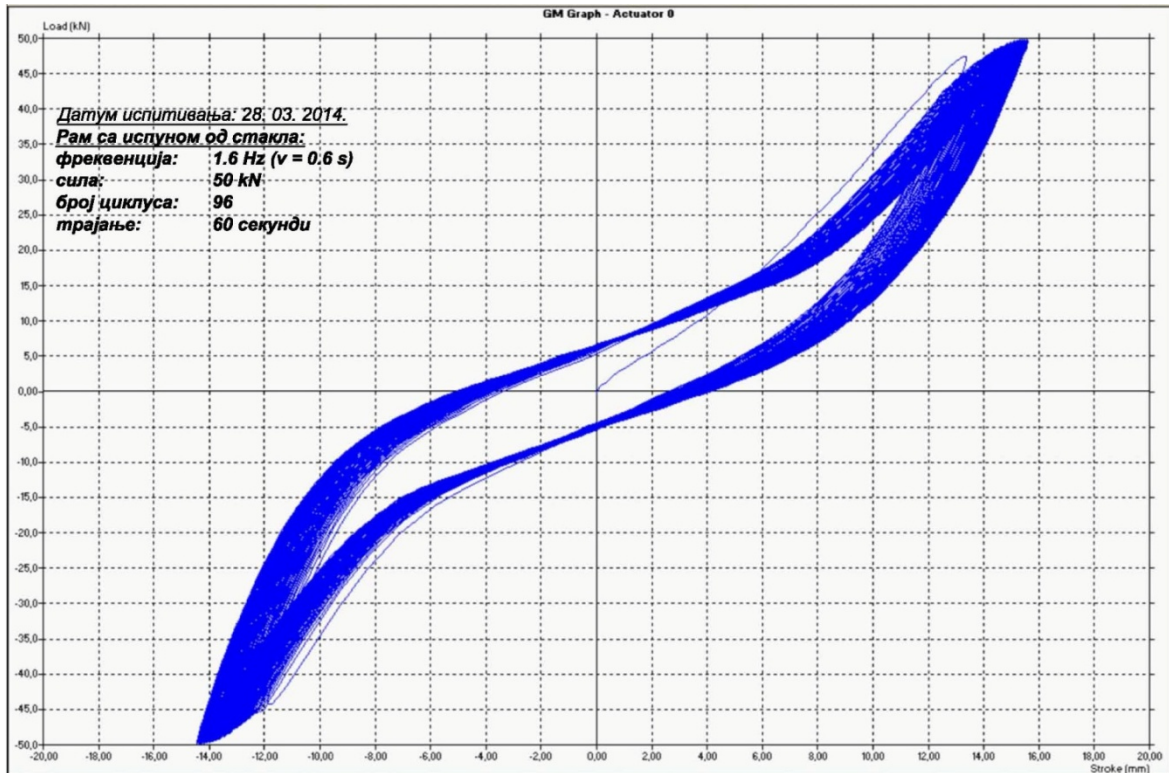






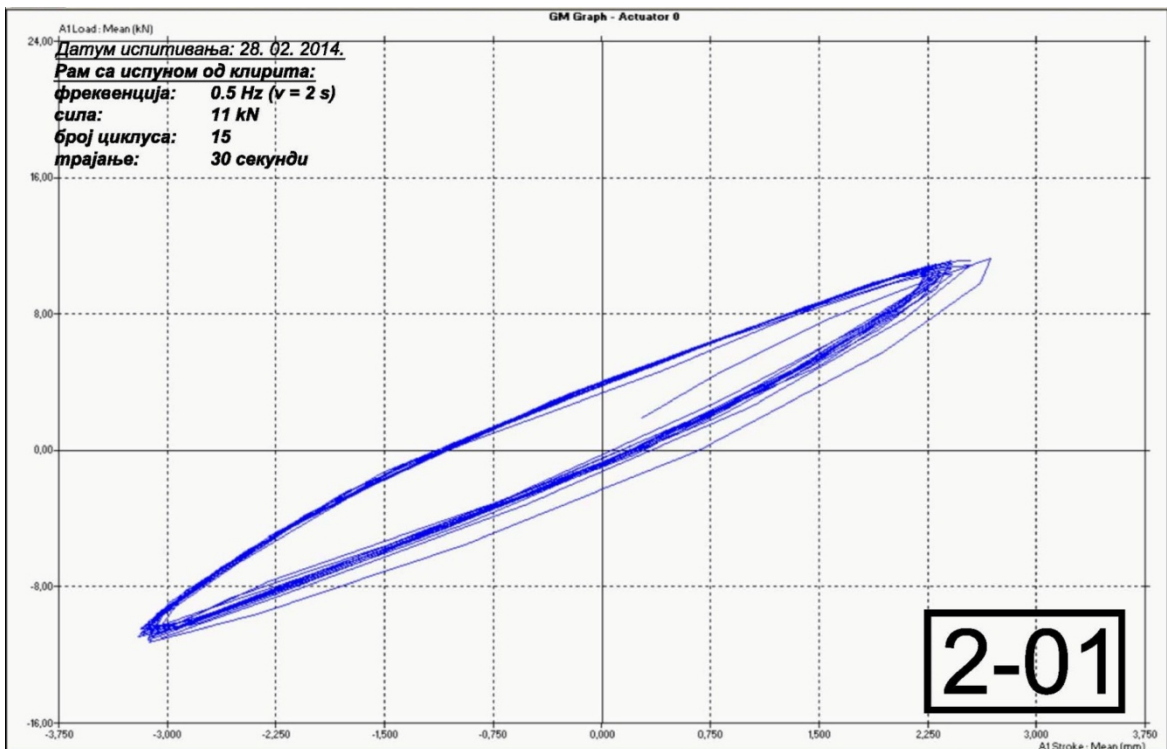
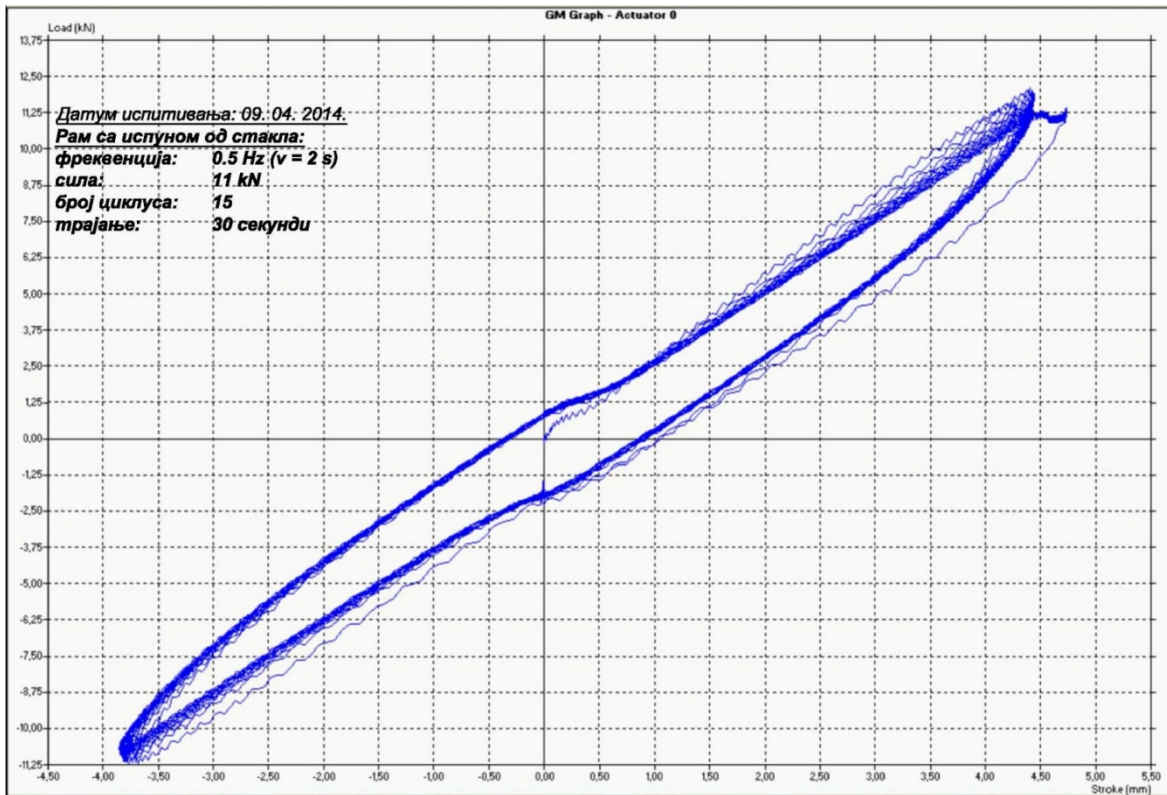


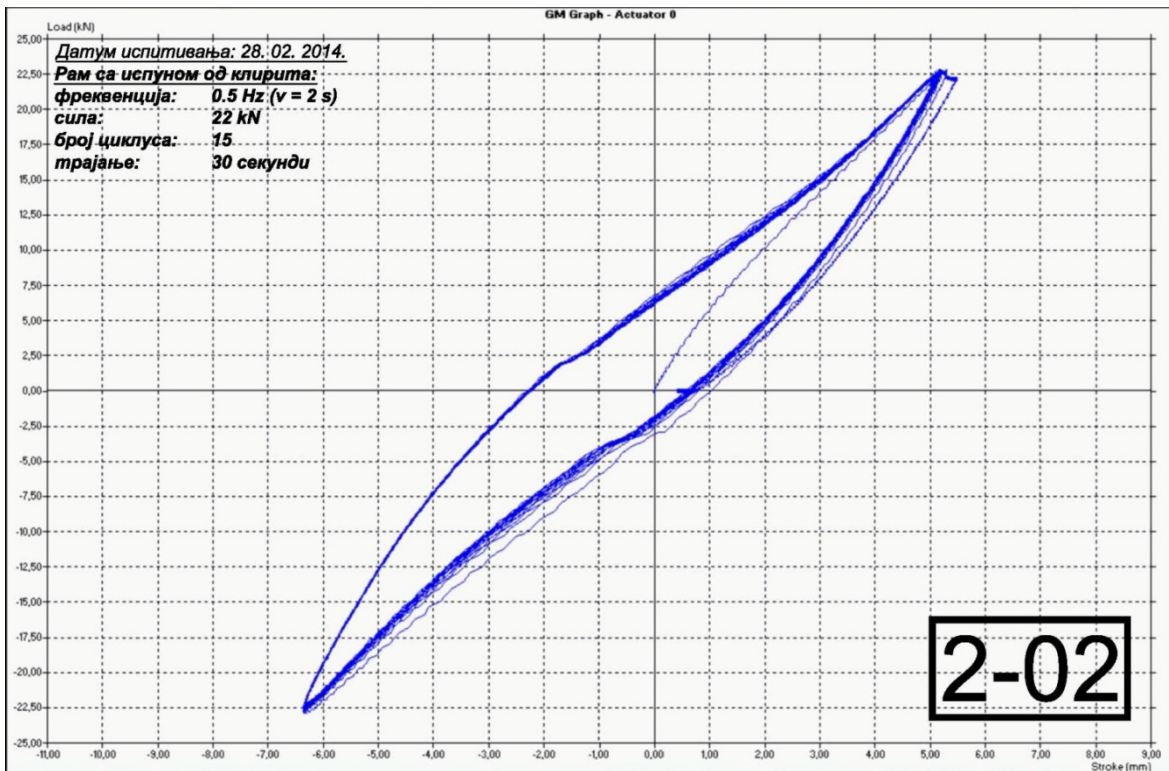
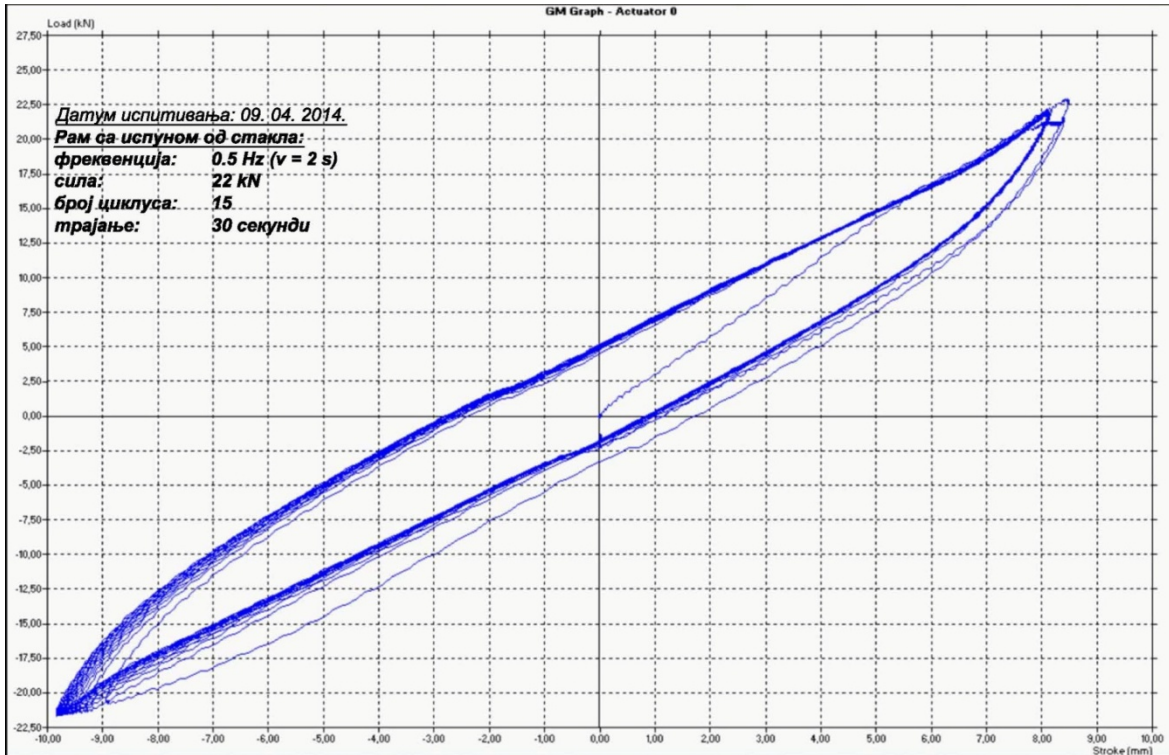


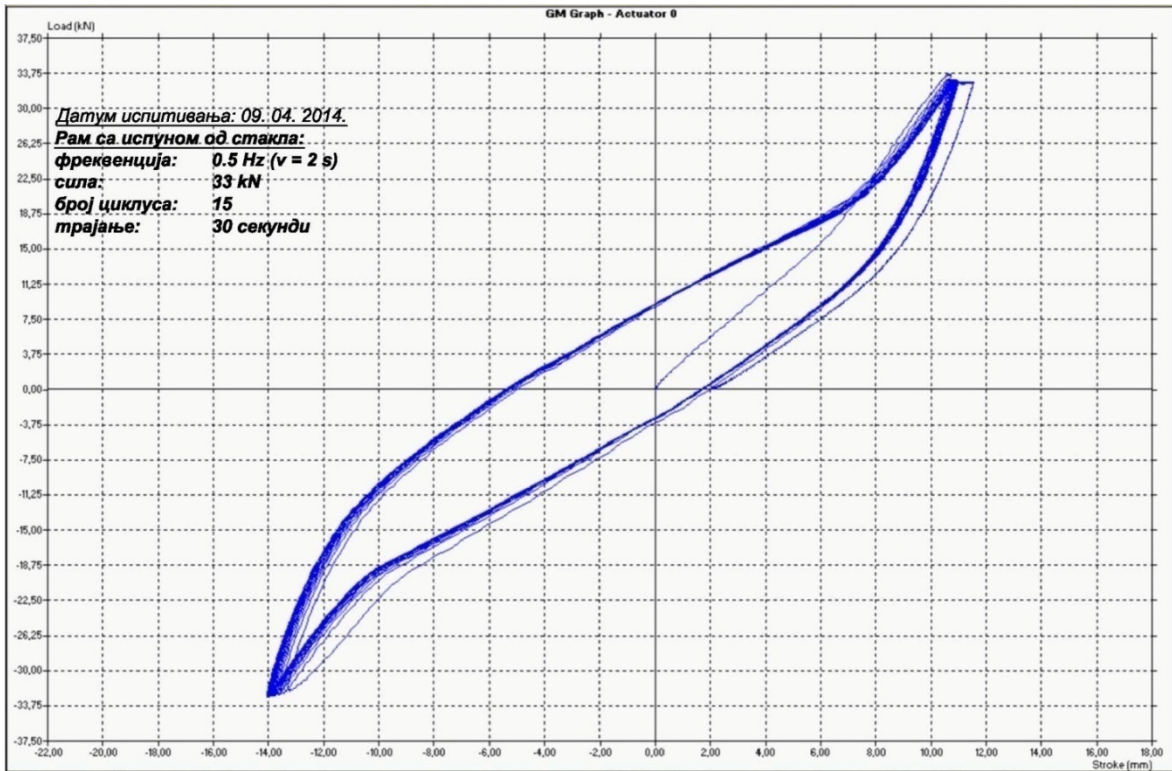


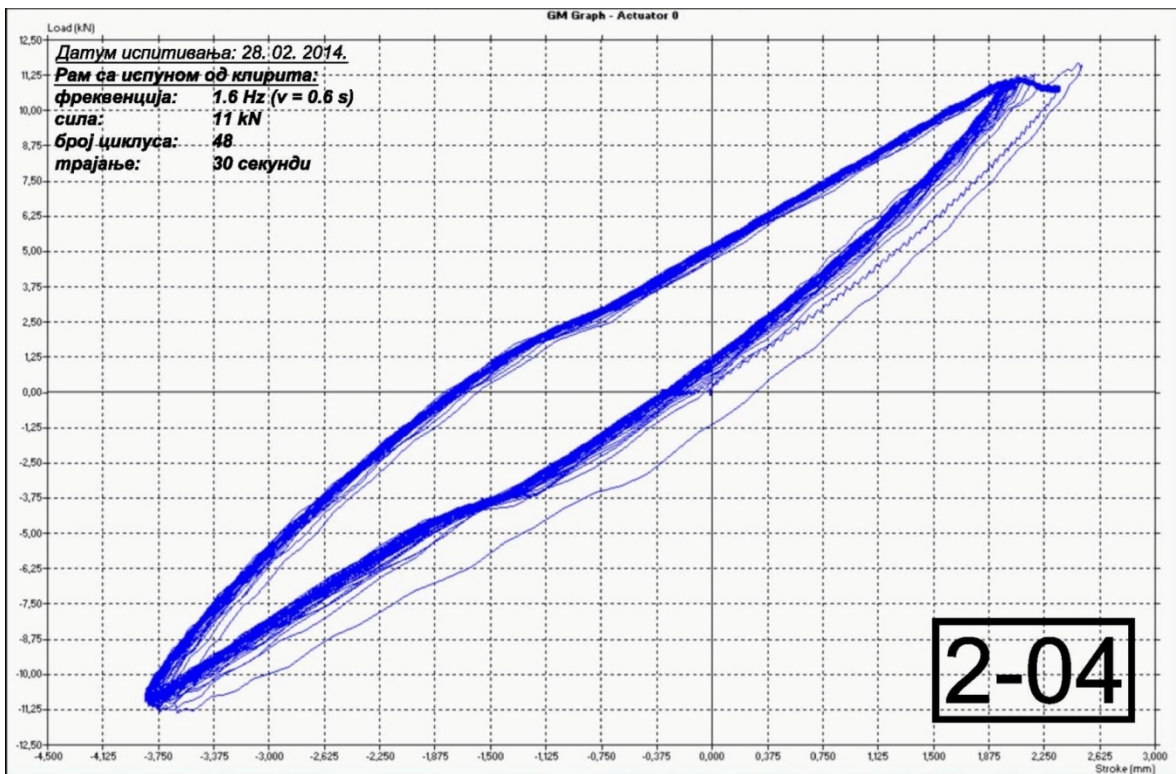
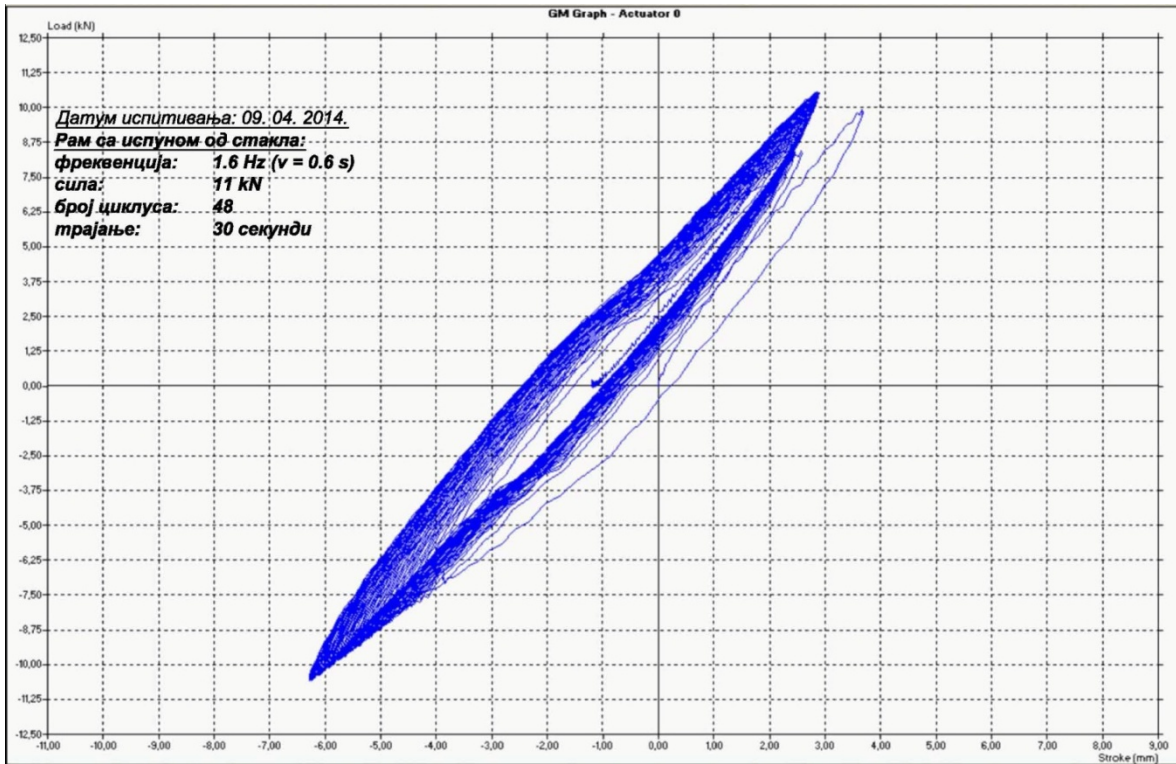
Дијаграми из испитивања експерименталних модела на бази стакла (09. 04. 2014.) и клирита (28. 02. 2014.)

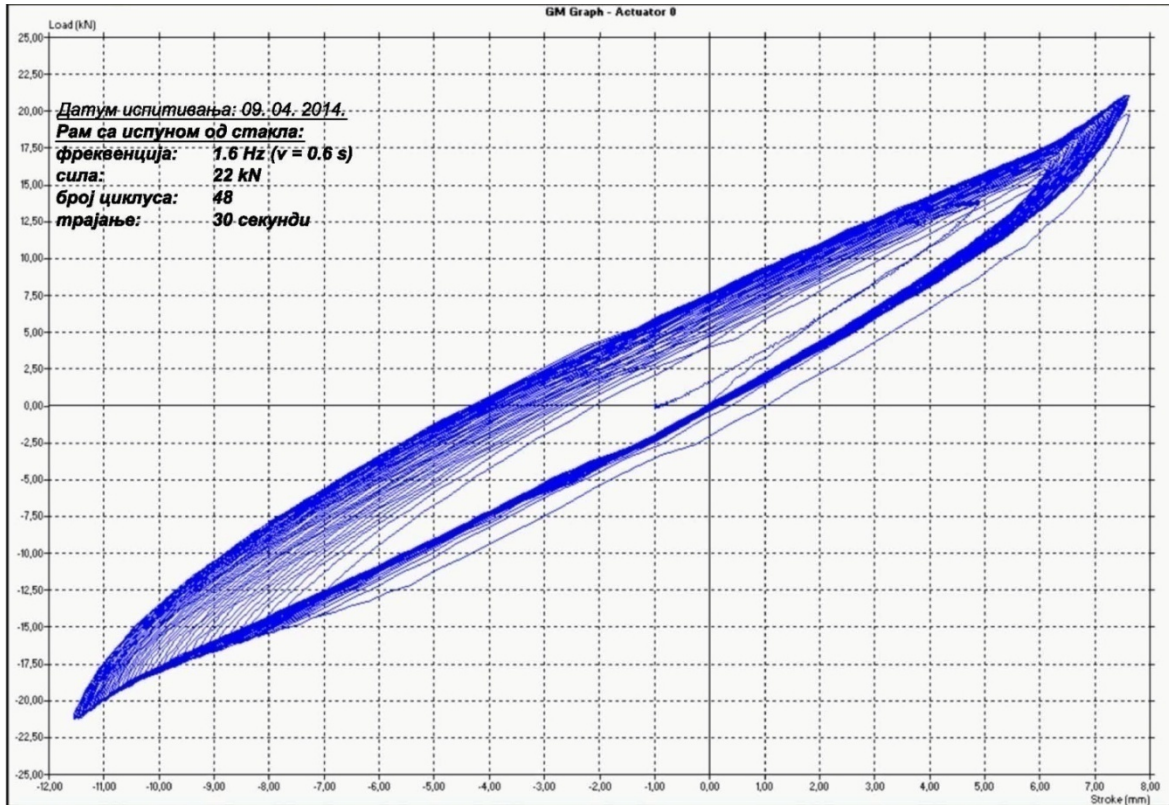
Дијаграми са ознаком “2-...”

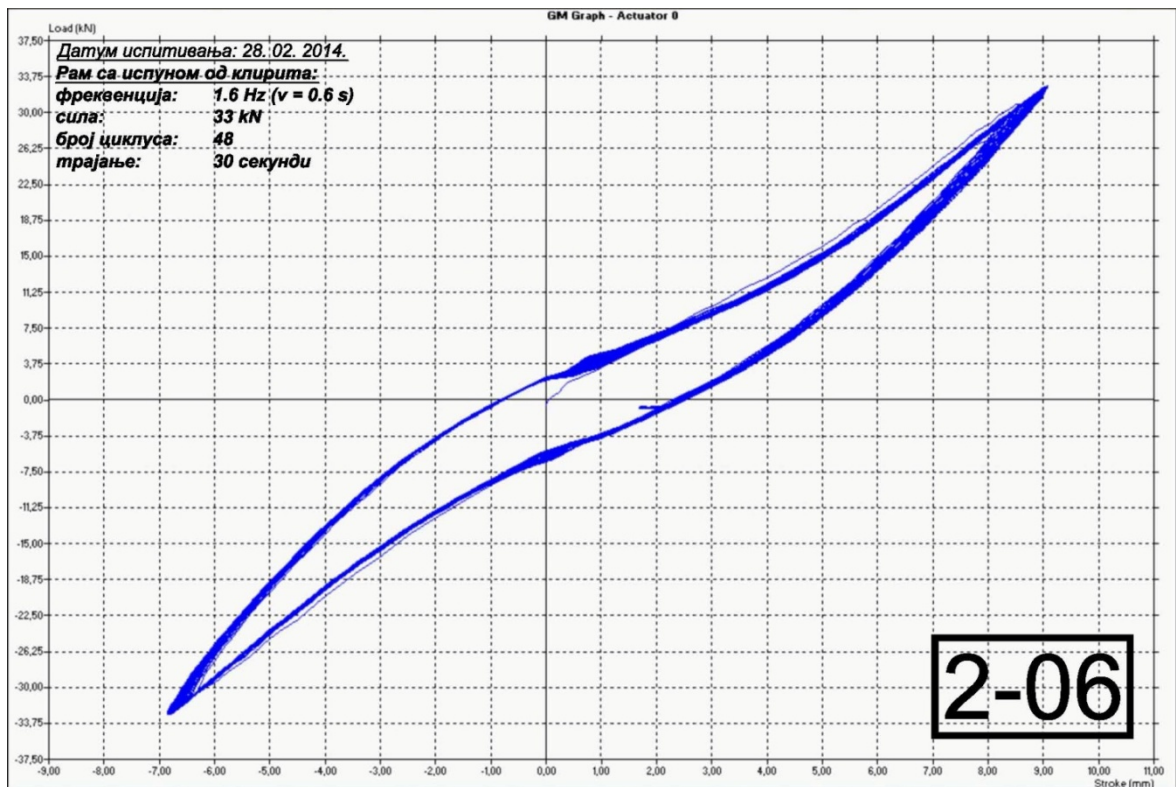
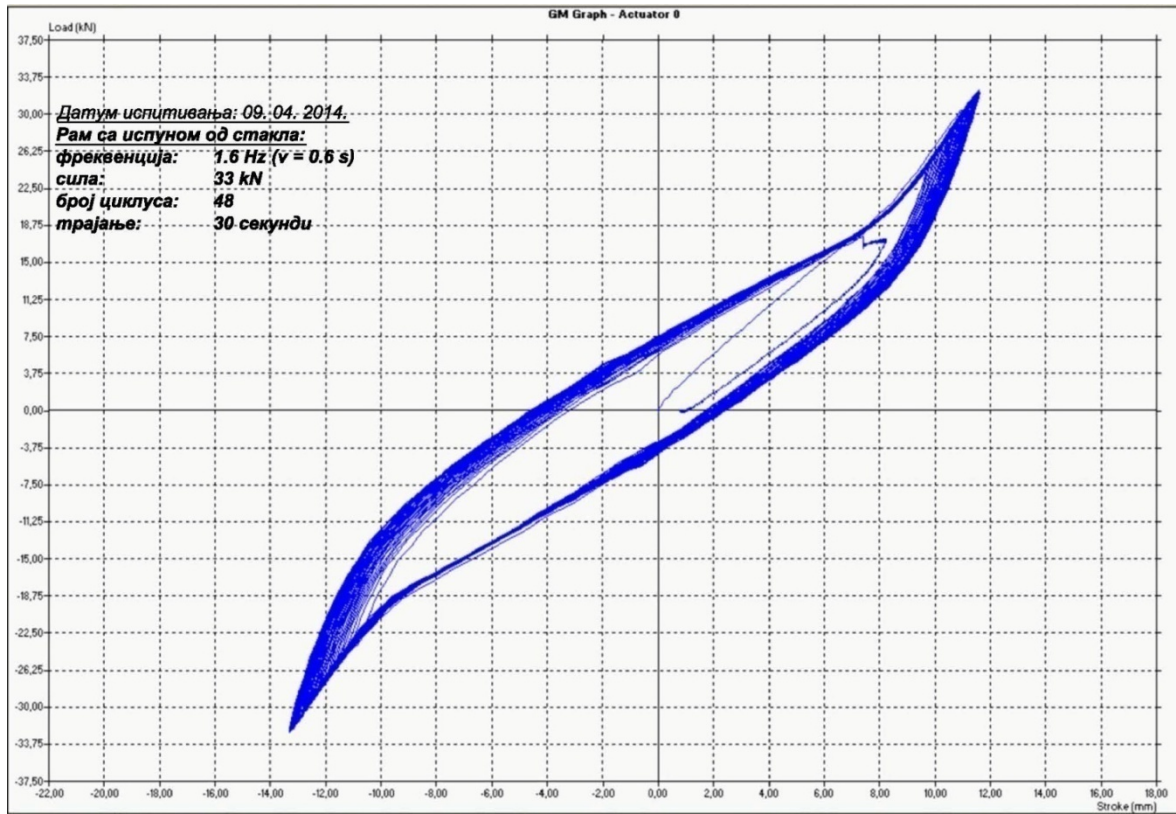


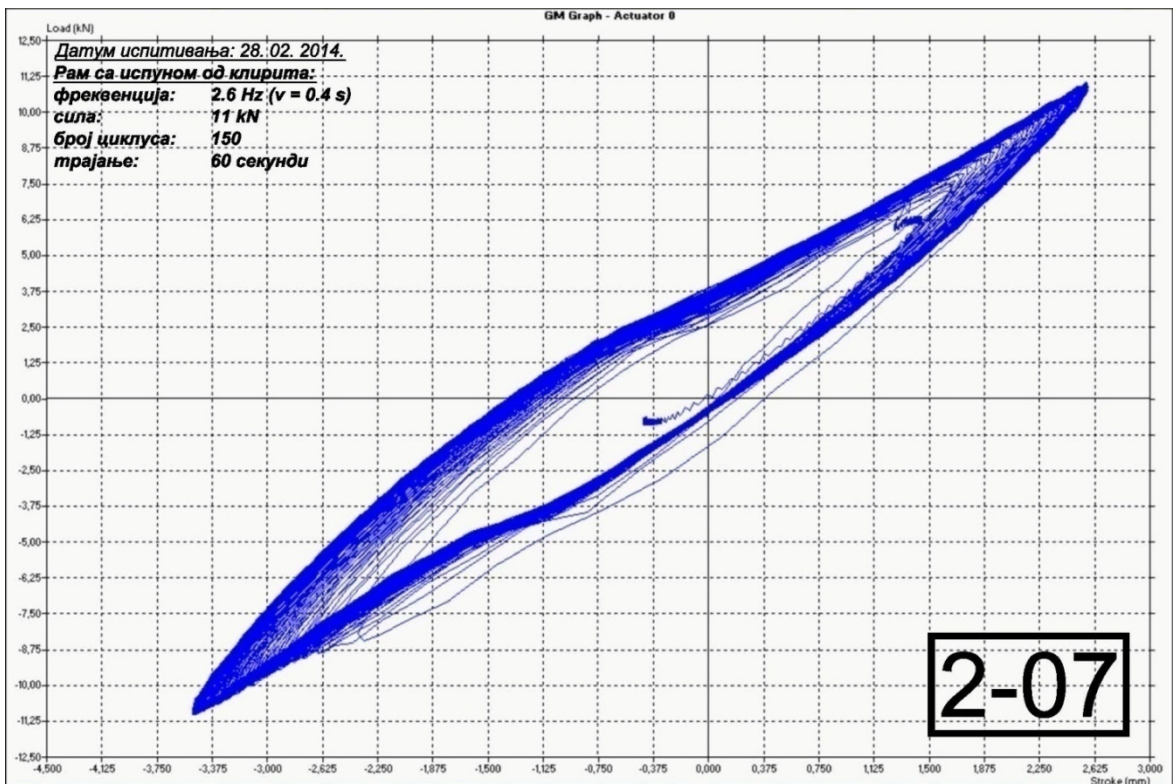
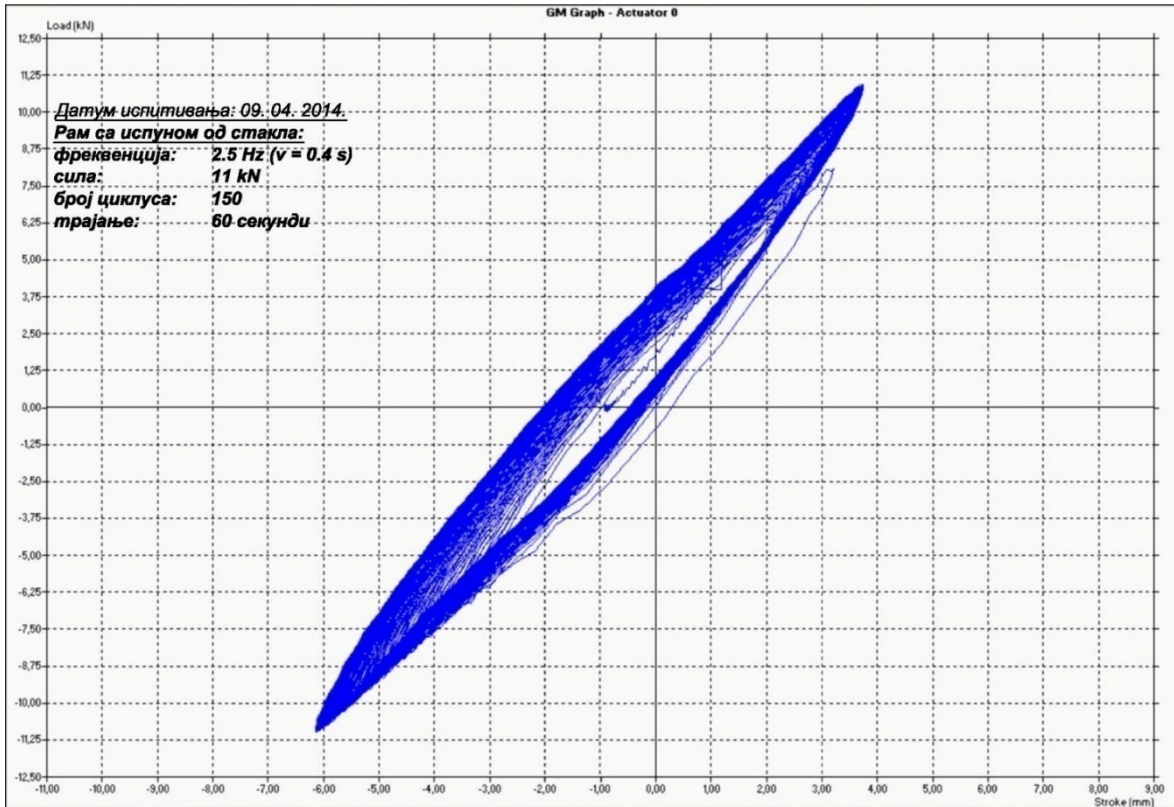


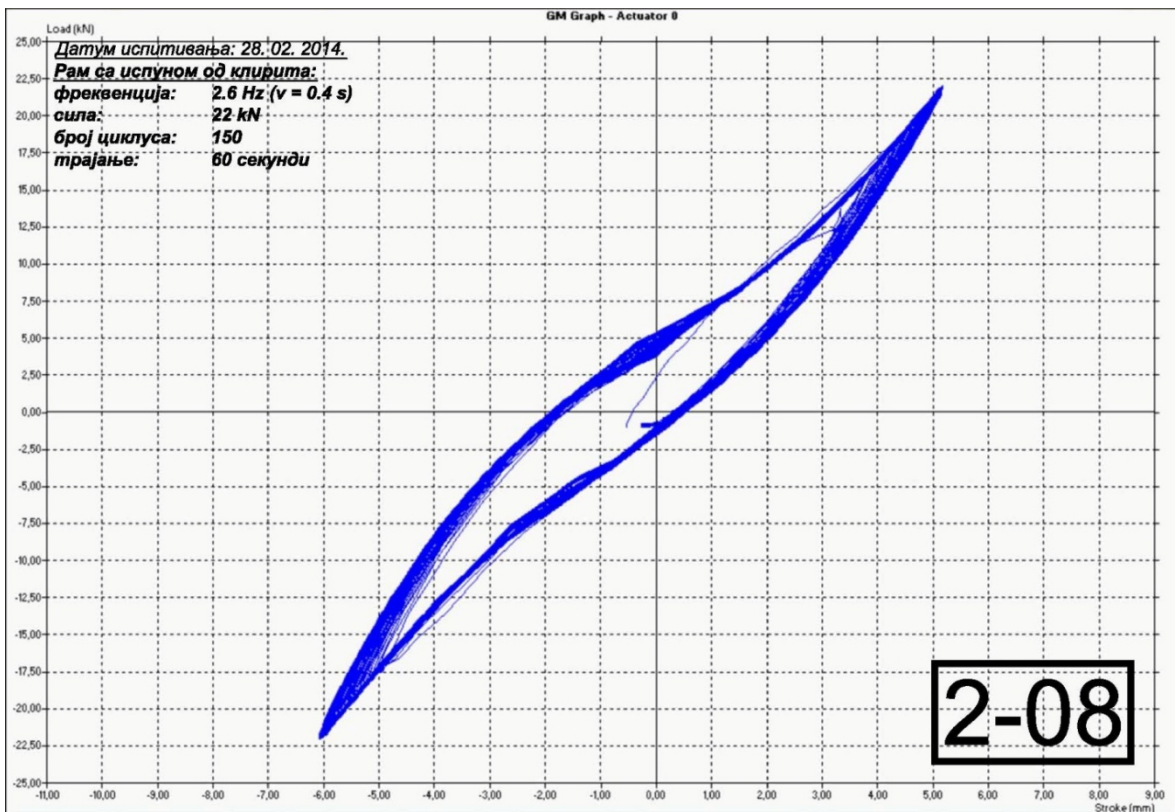
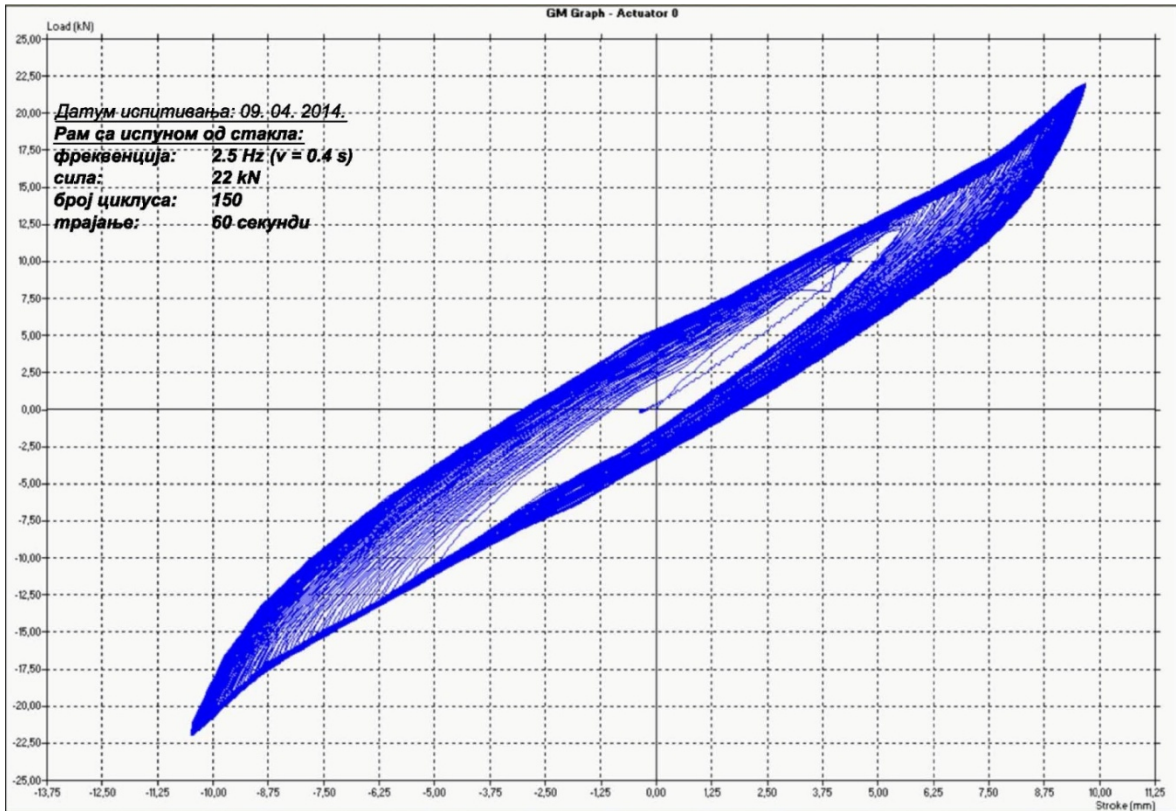


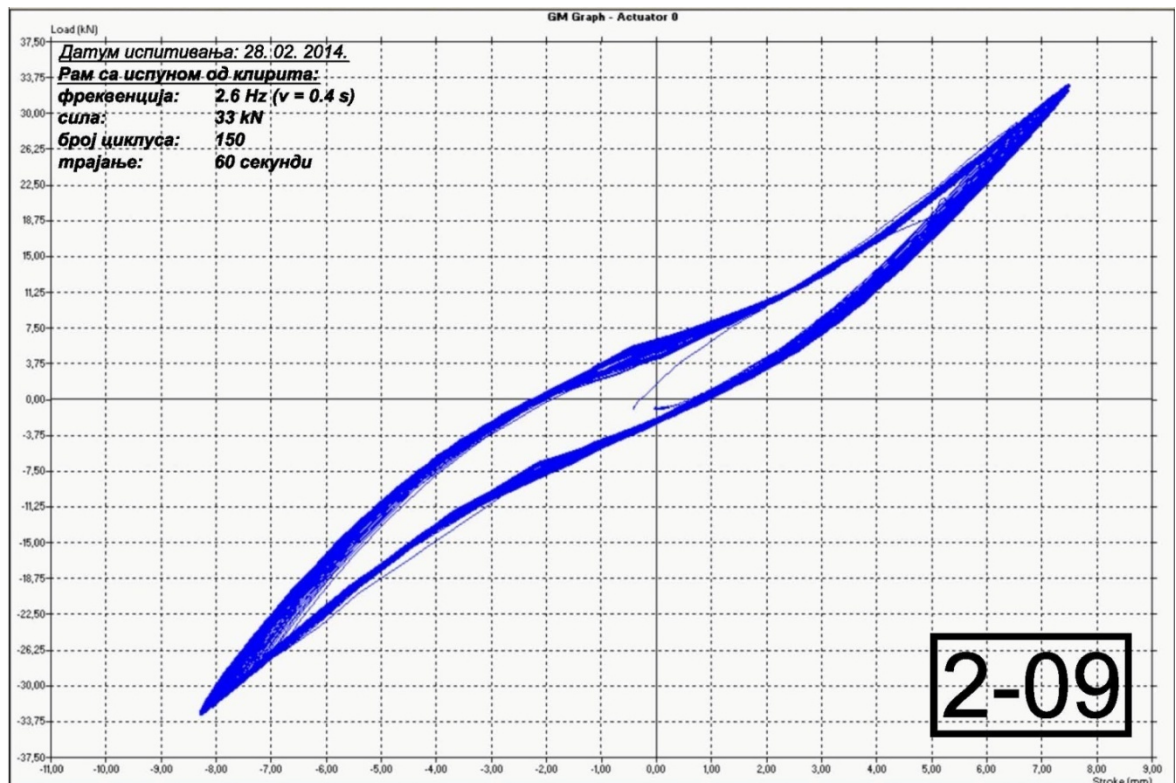
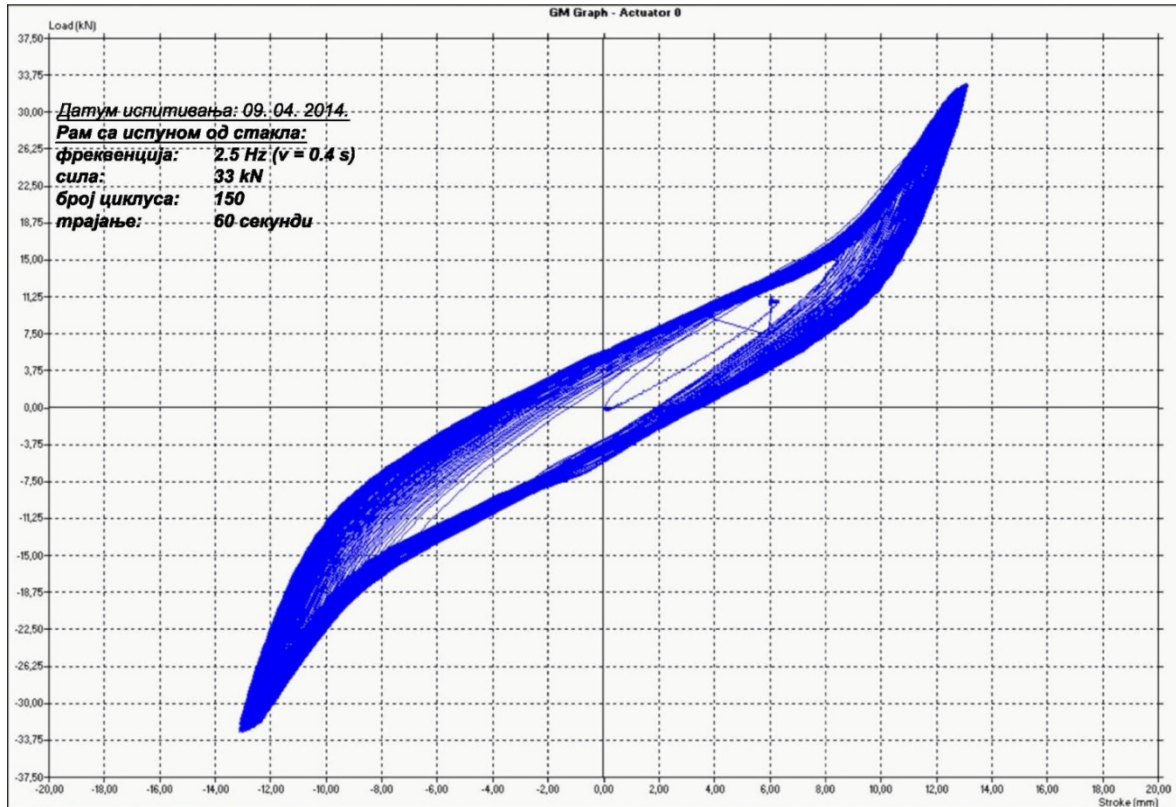


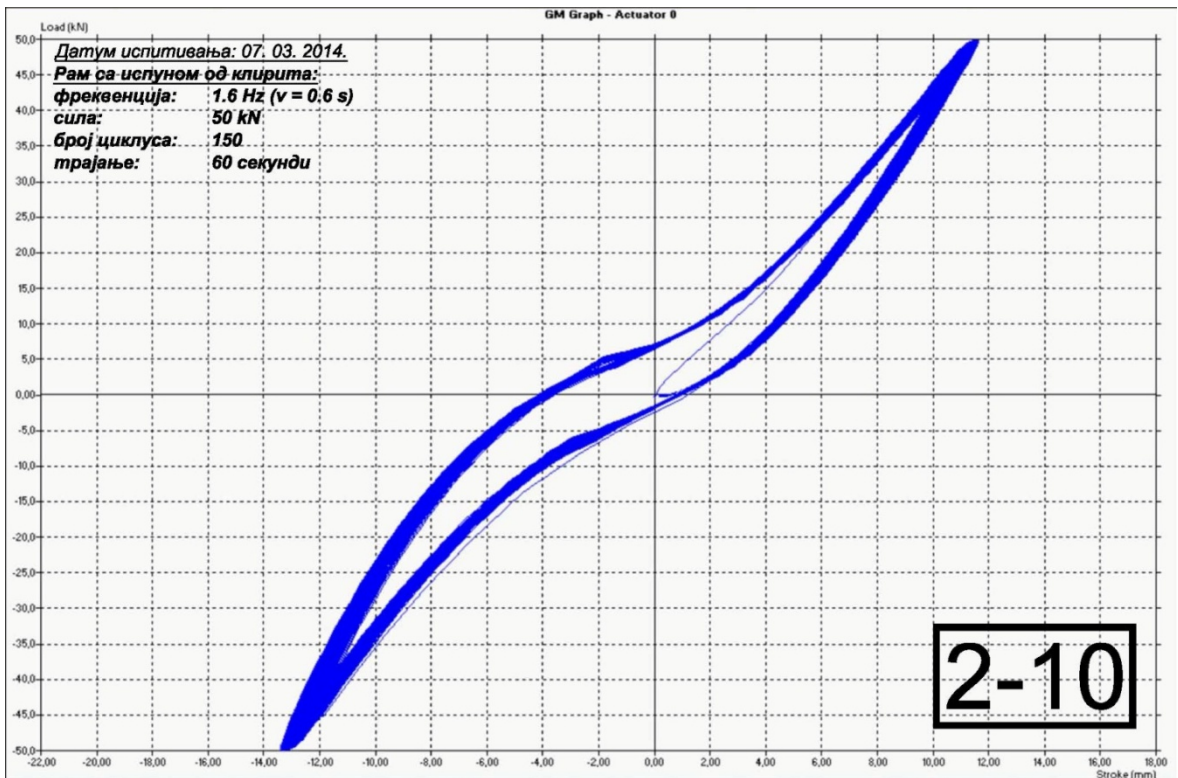
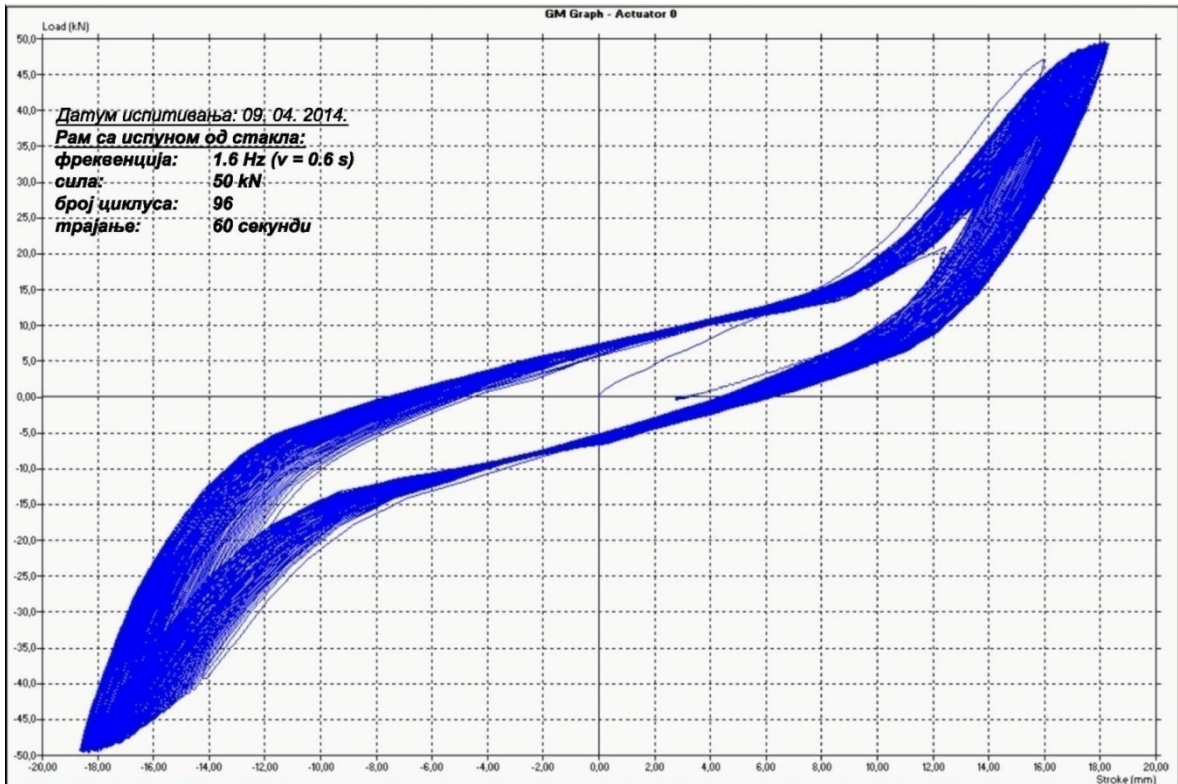






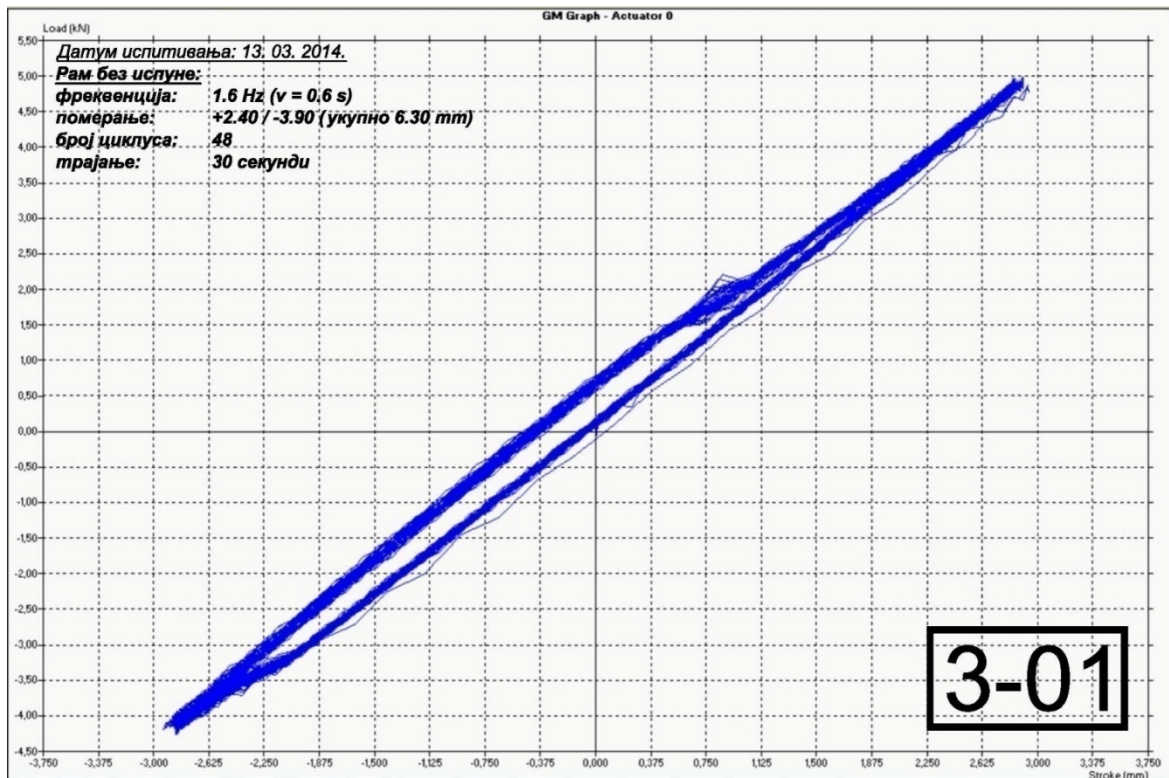
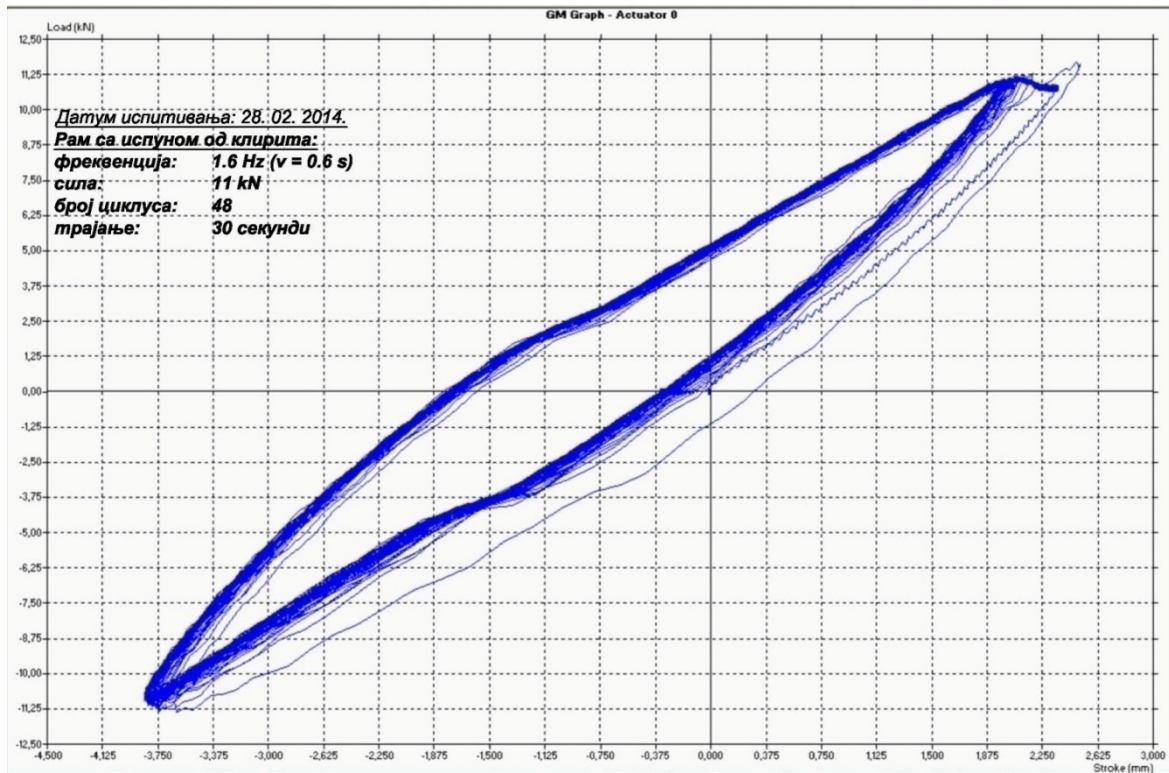


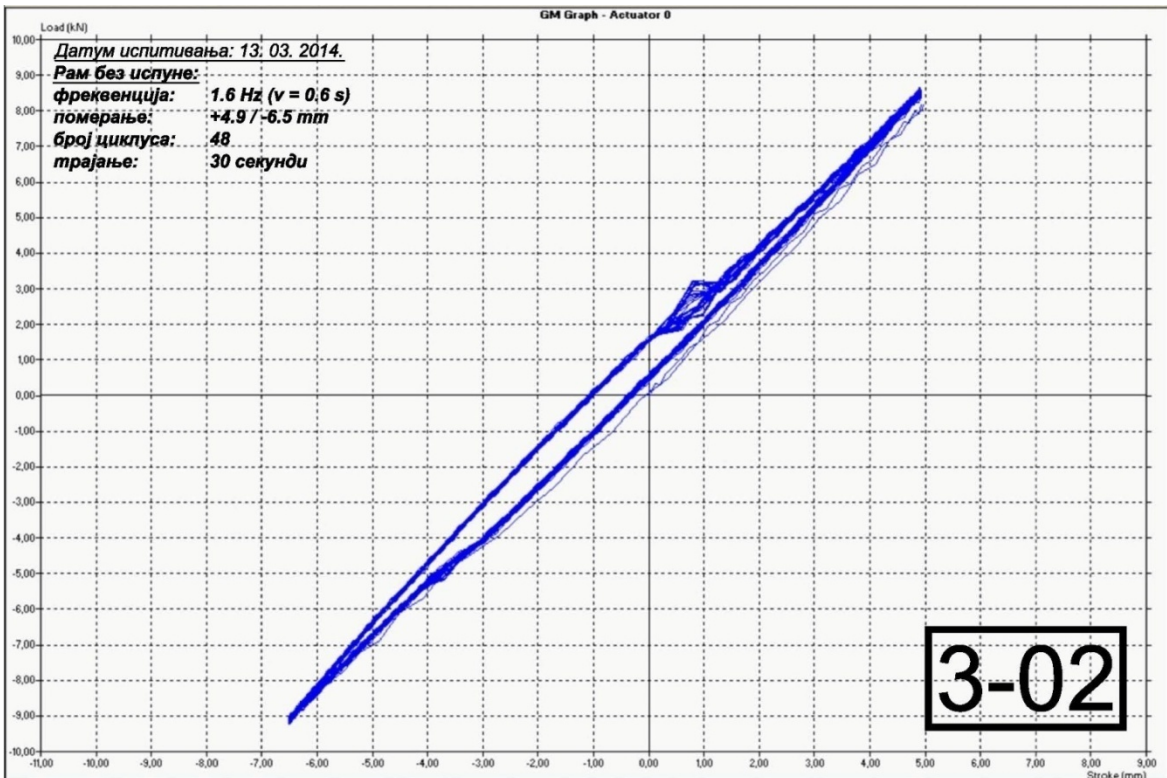
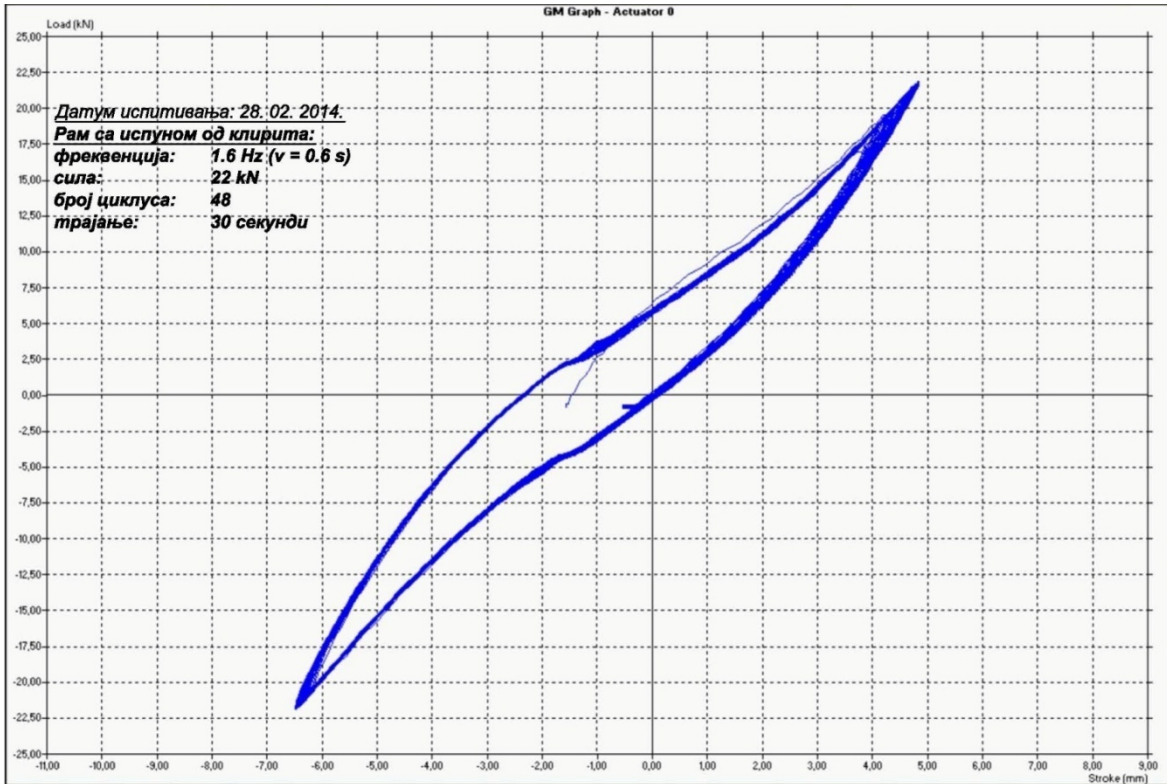


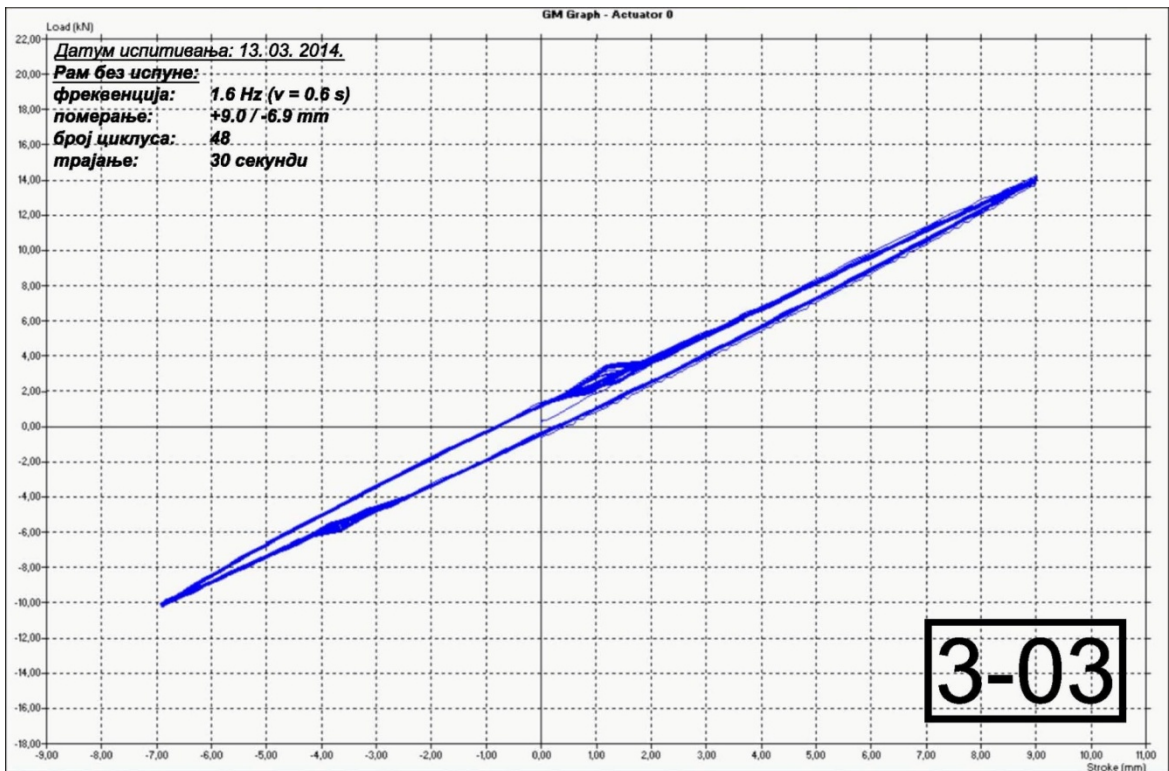
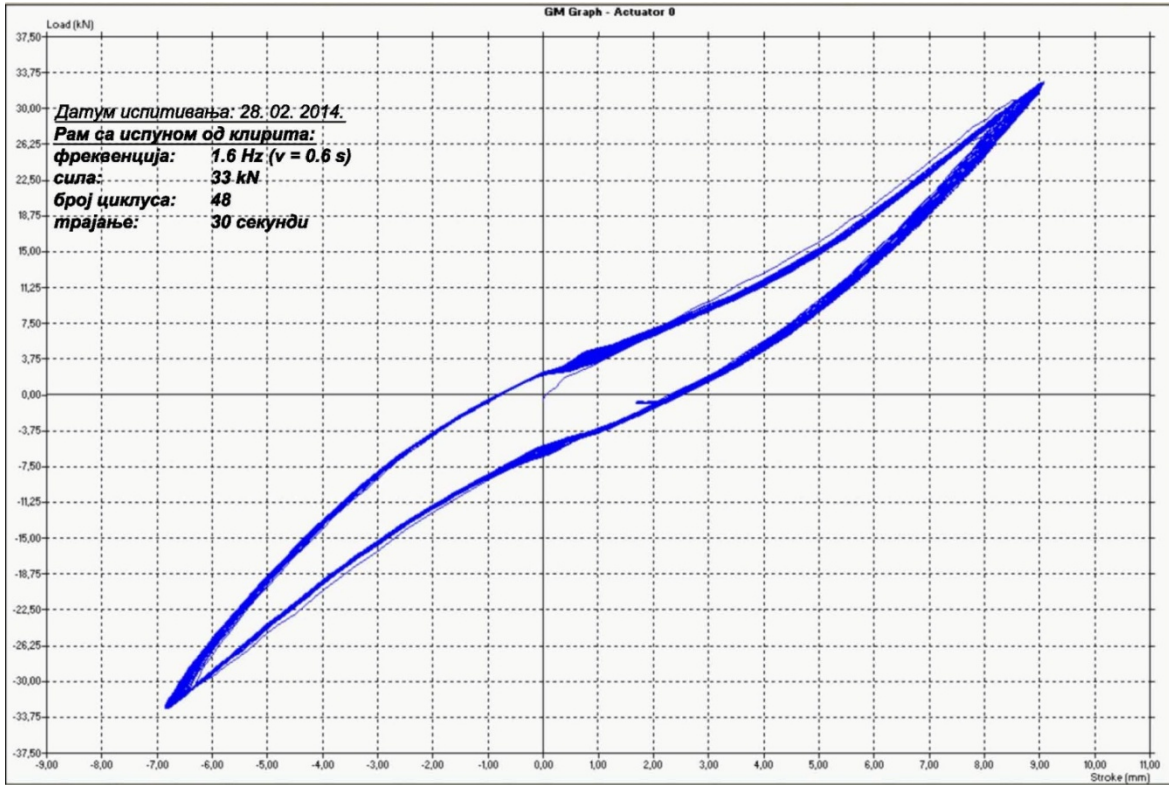


Дијаграми из испитивања експерименталних модела на бази клирита (28. 02. 2014.) и челичног рама без испуне (13. 03. 2014.)

Дијаграми са ознаком “3-...”

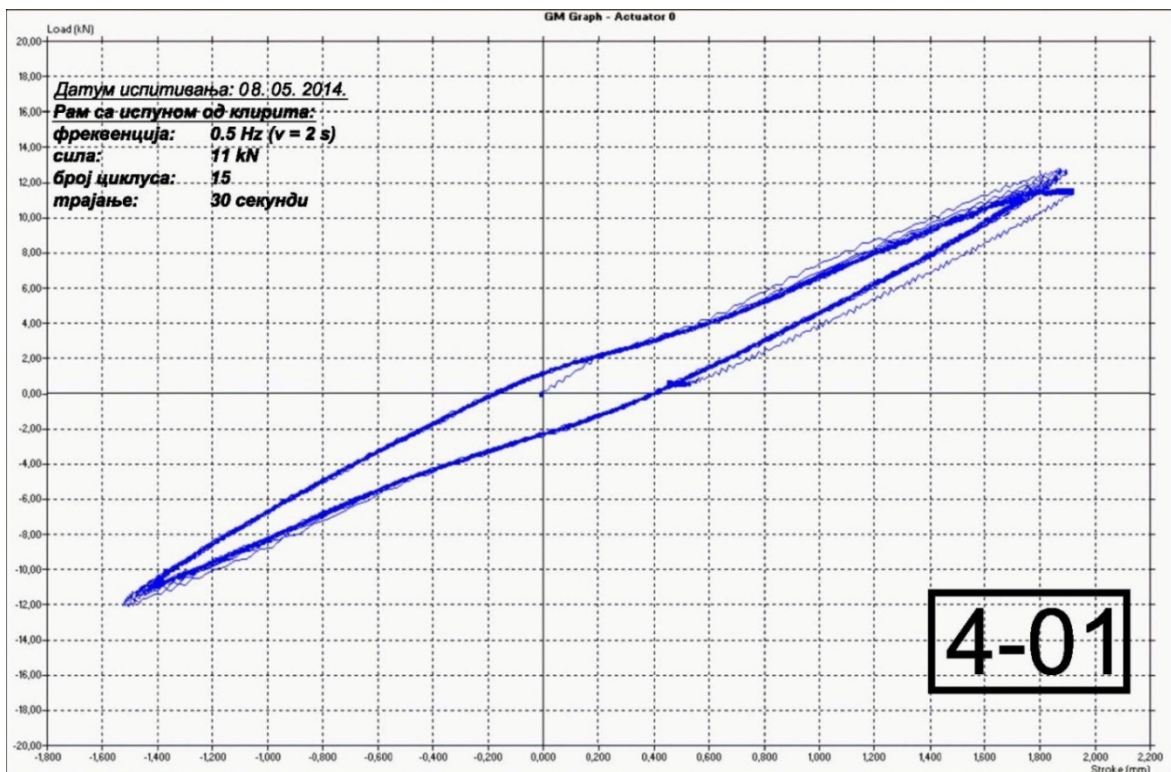
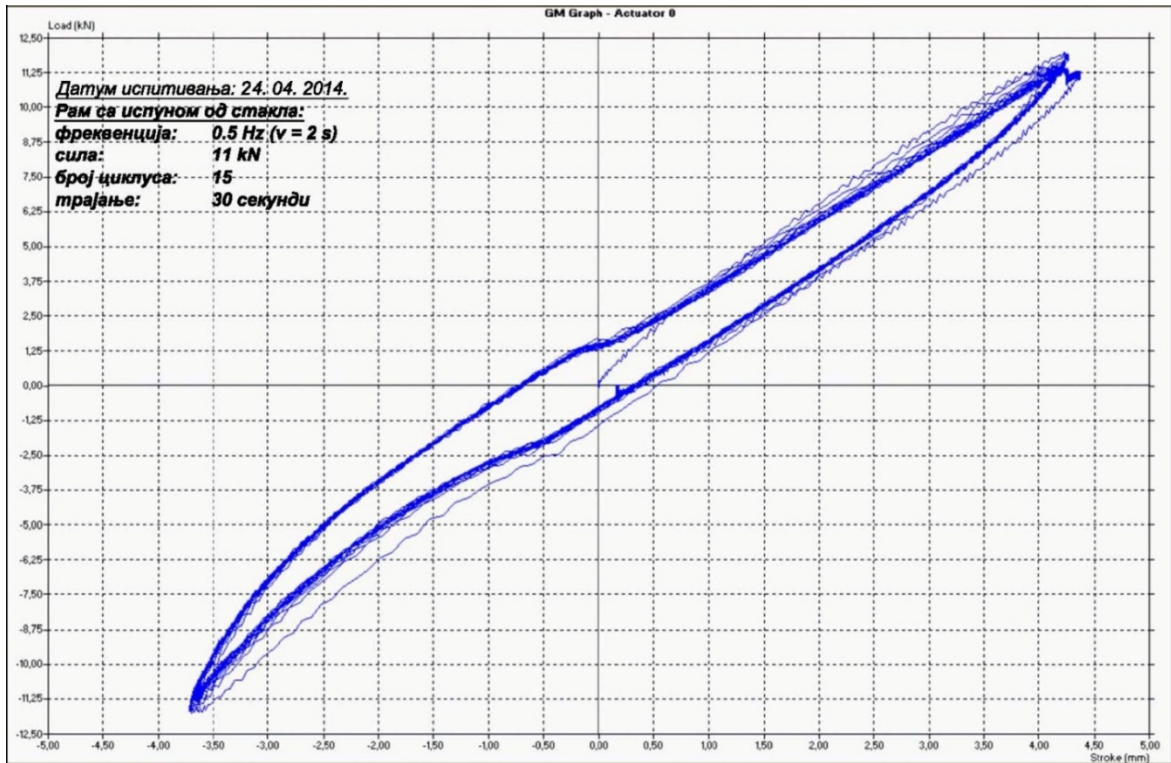


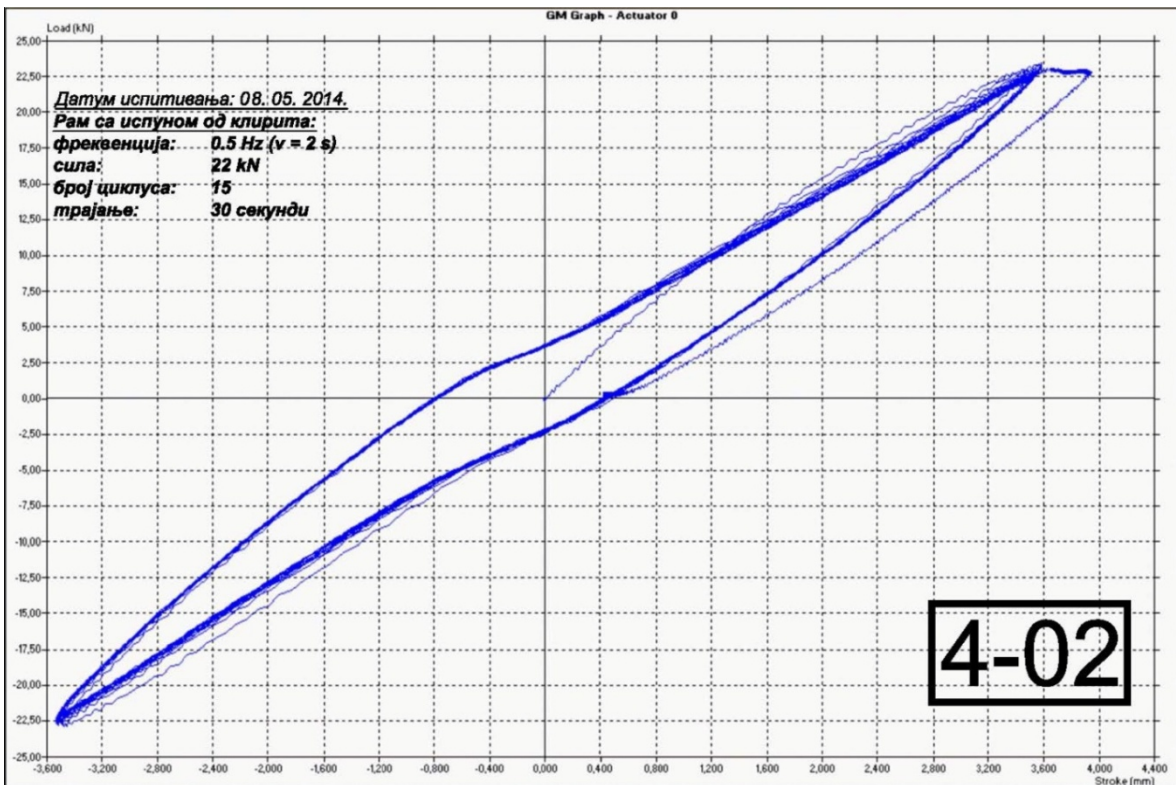
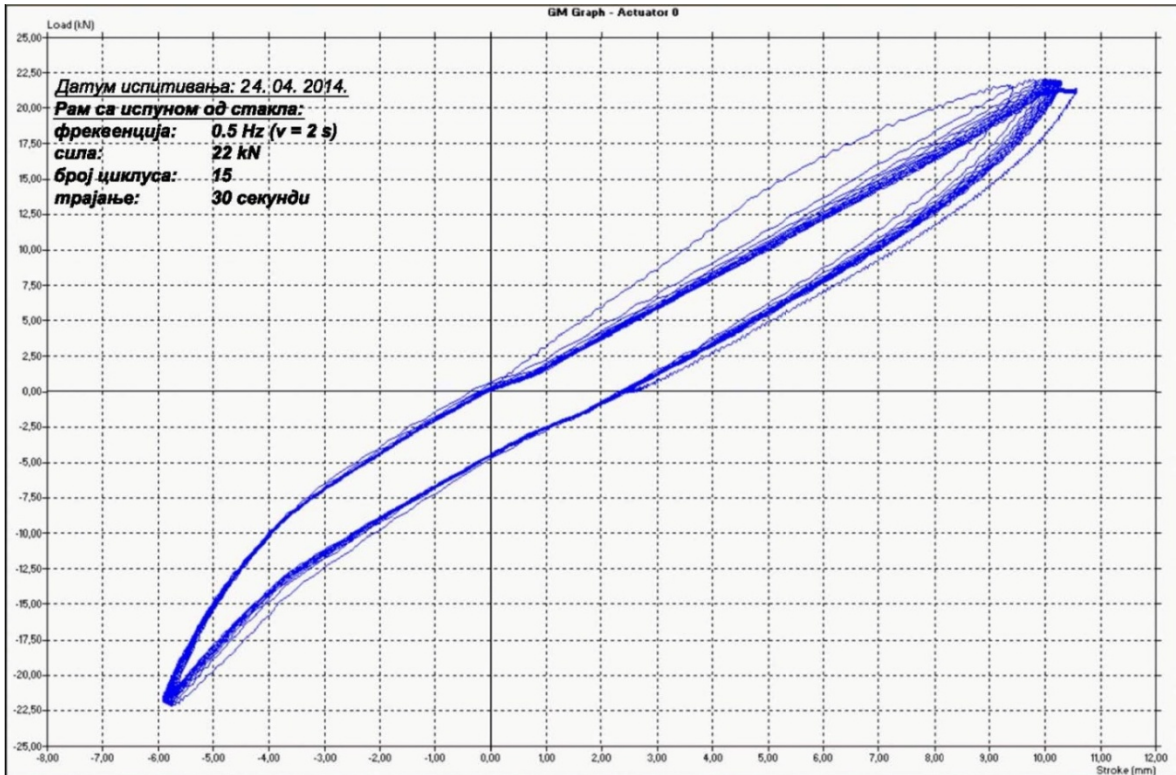


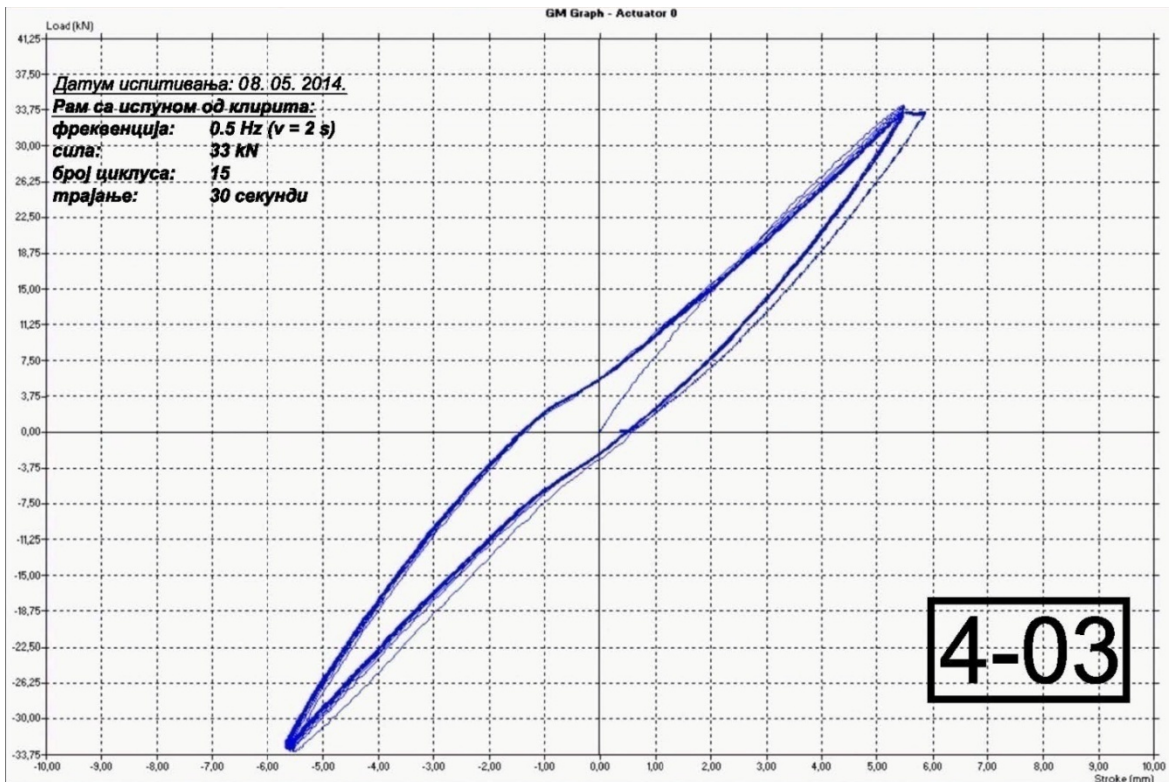
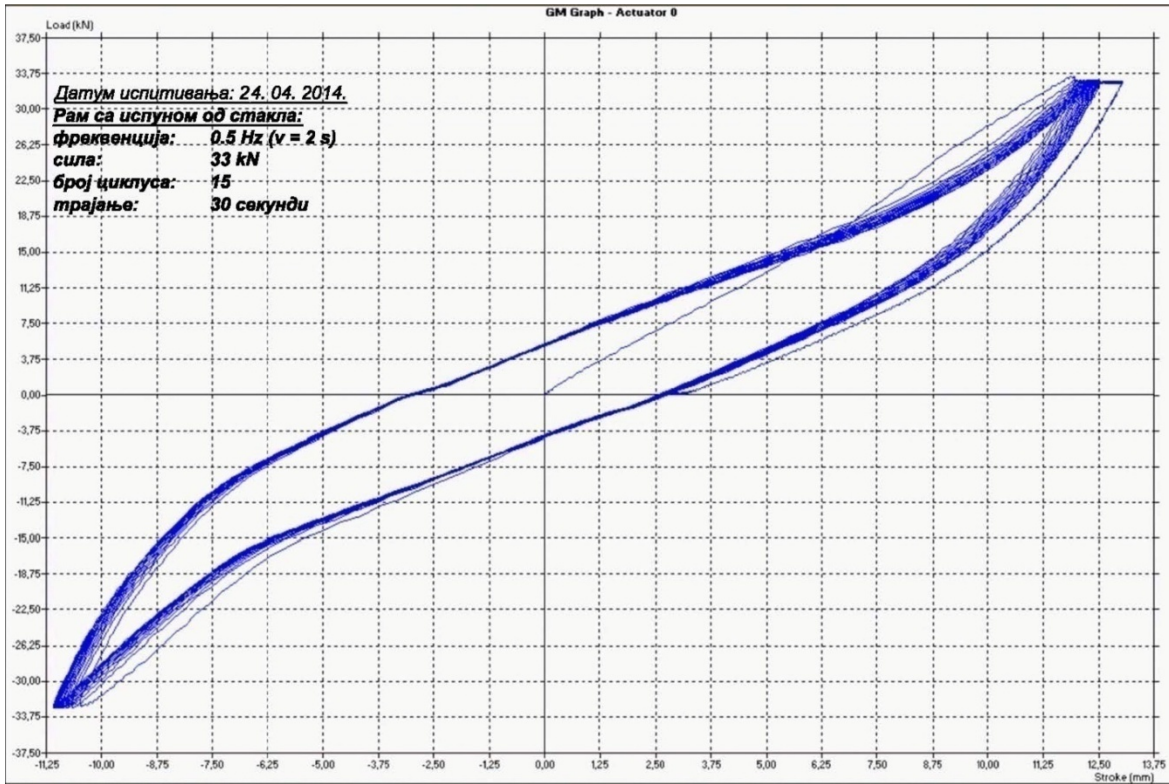


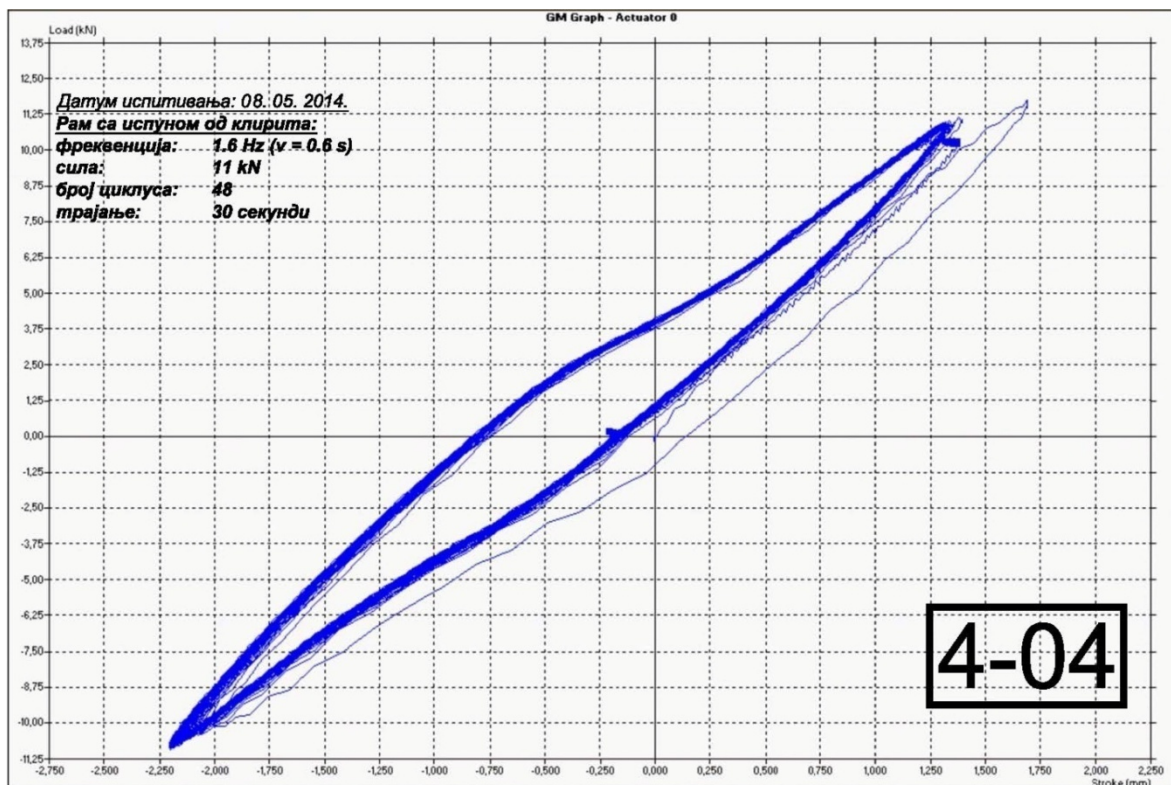
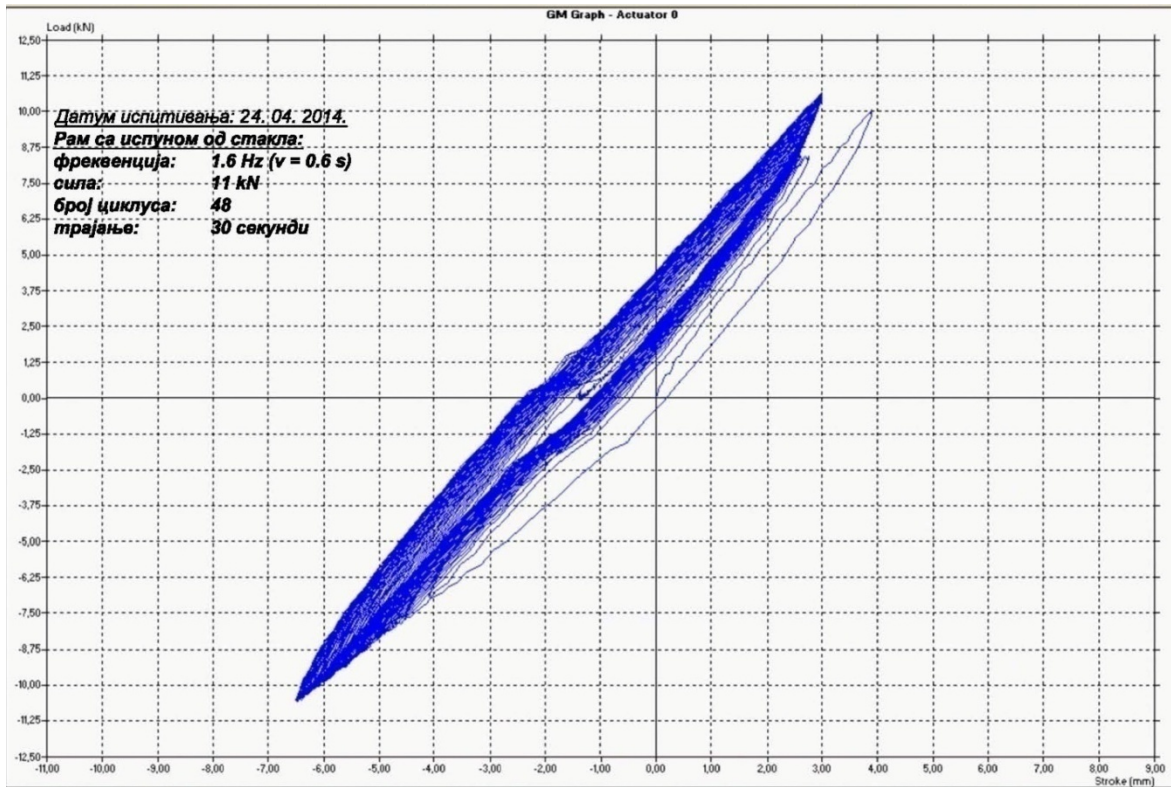
Дијаграми из испитивања експерименталних модела на бази стакла (24. 04. 2014.) и клирита (08. 05. 2014.)

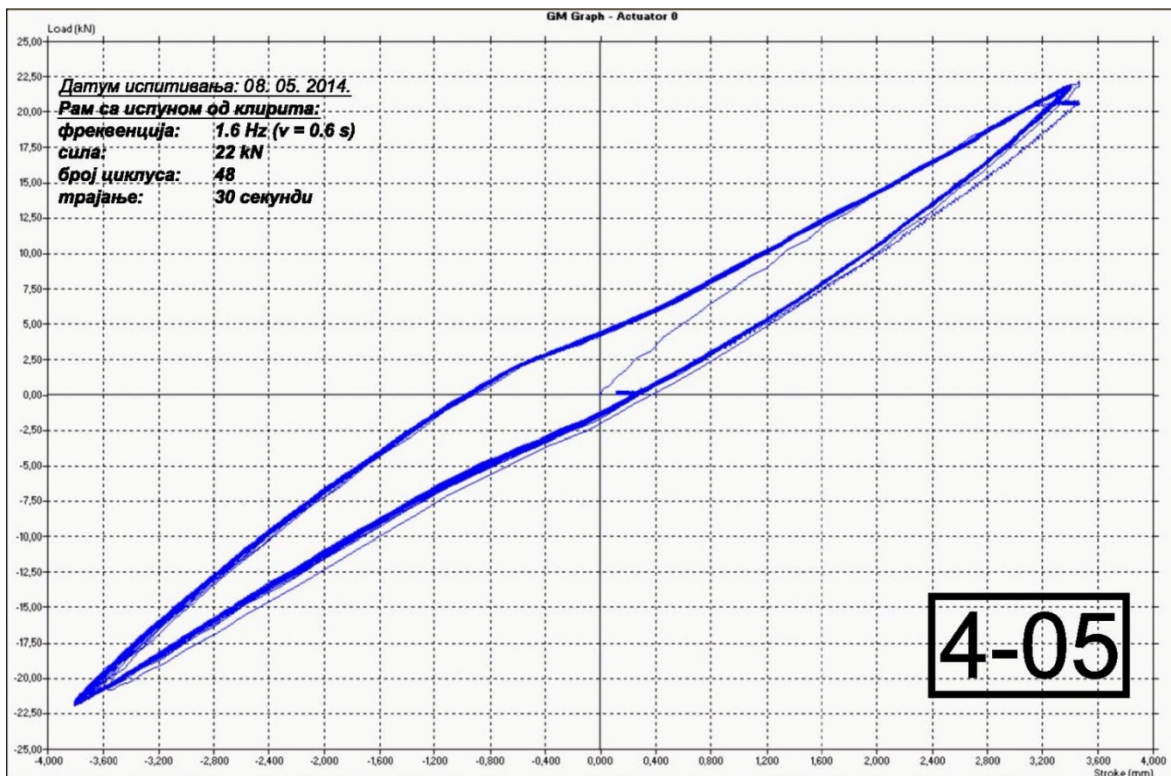
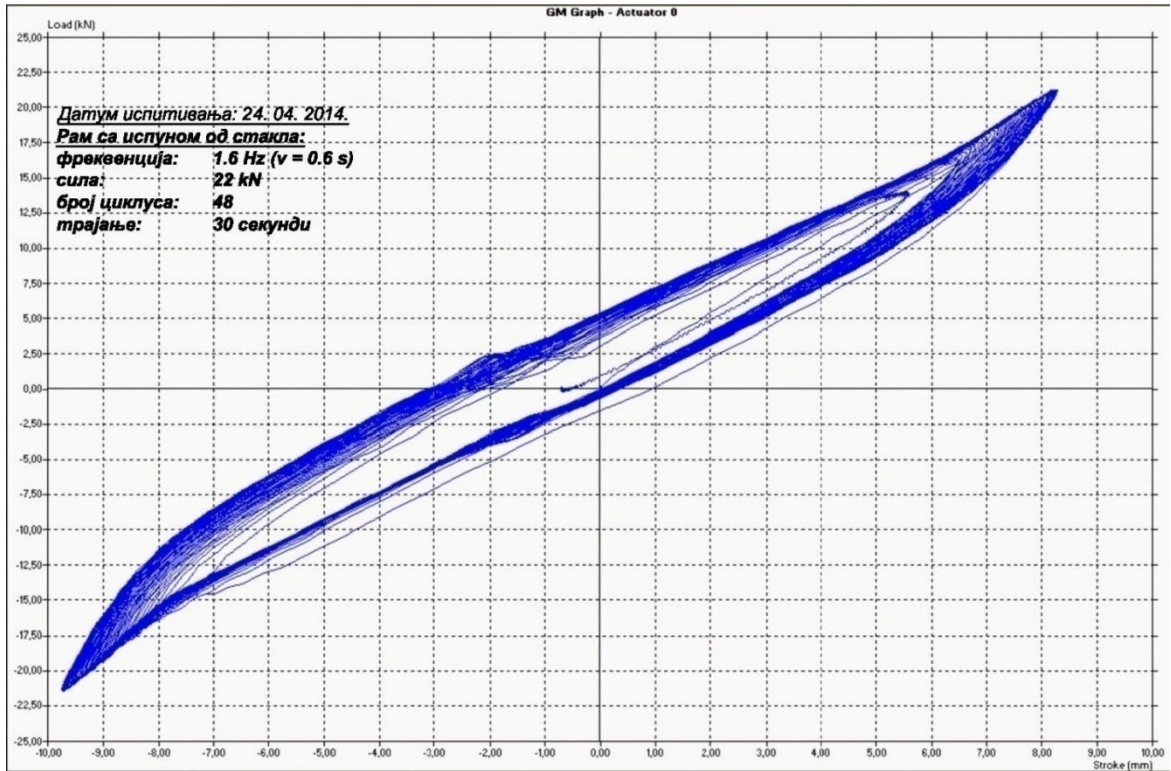
Дијаграми са ознаком “4-...”

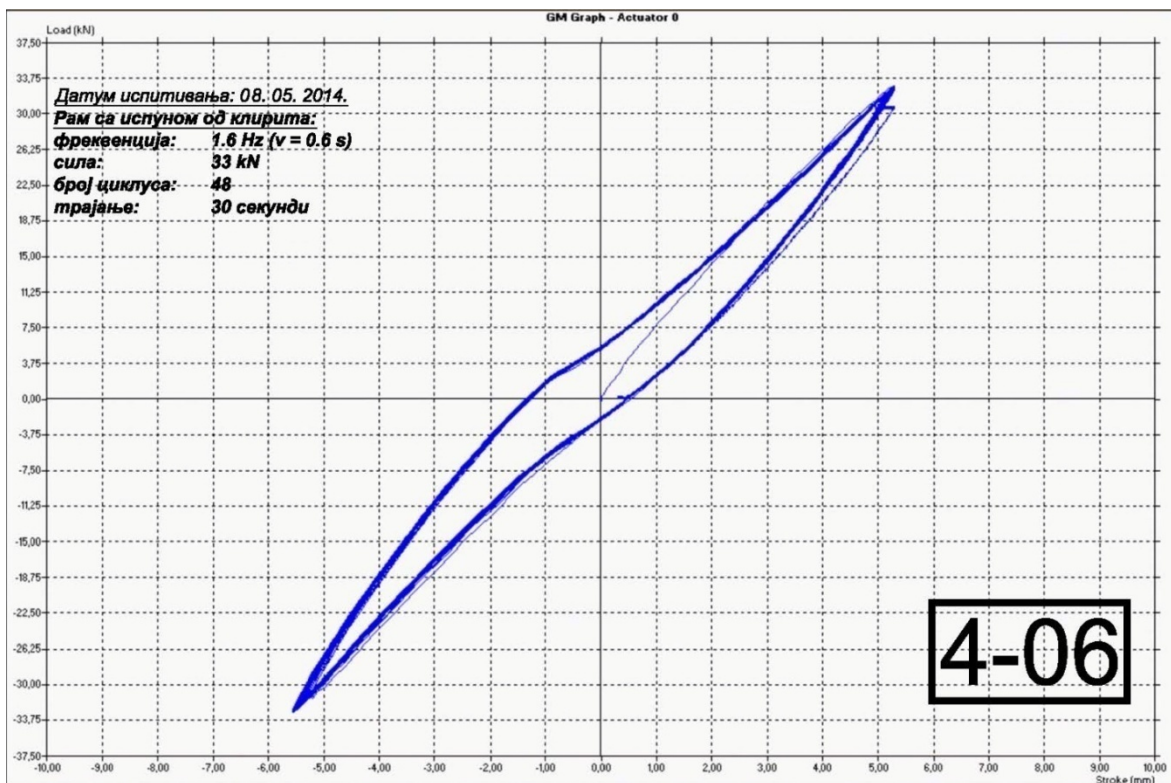
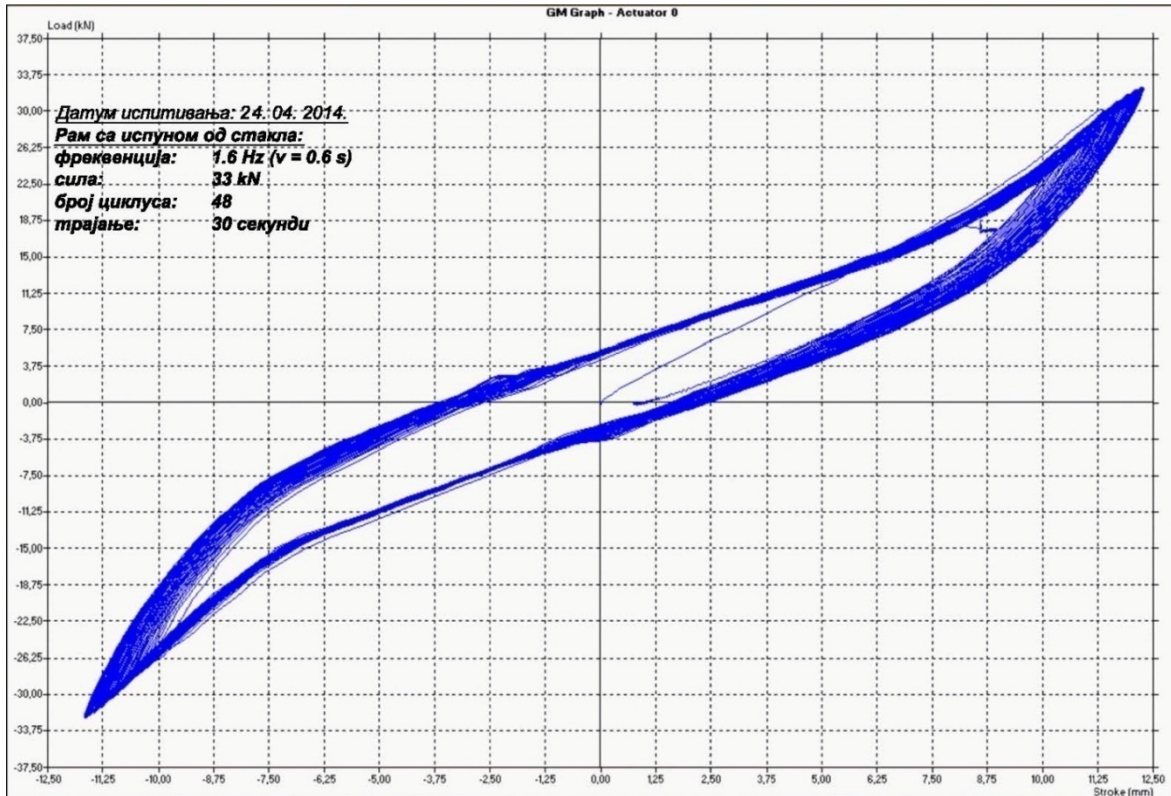


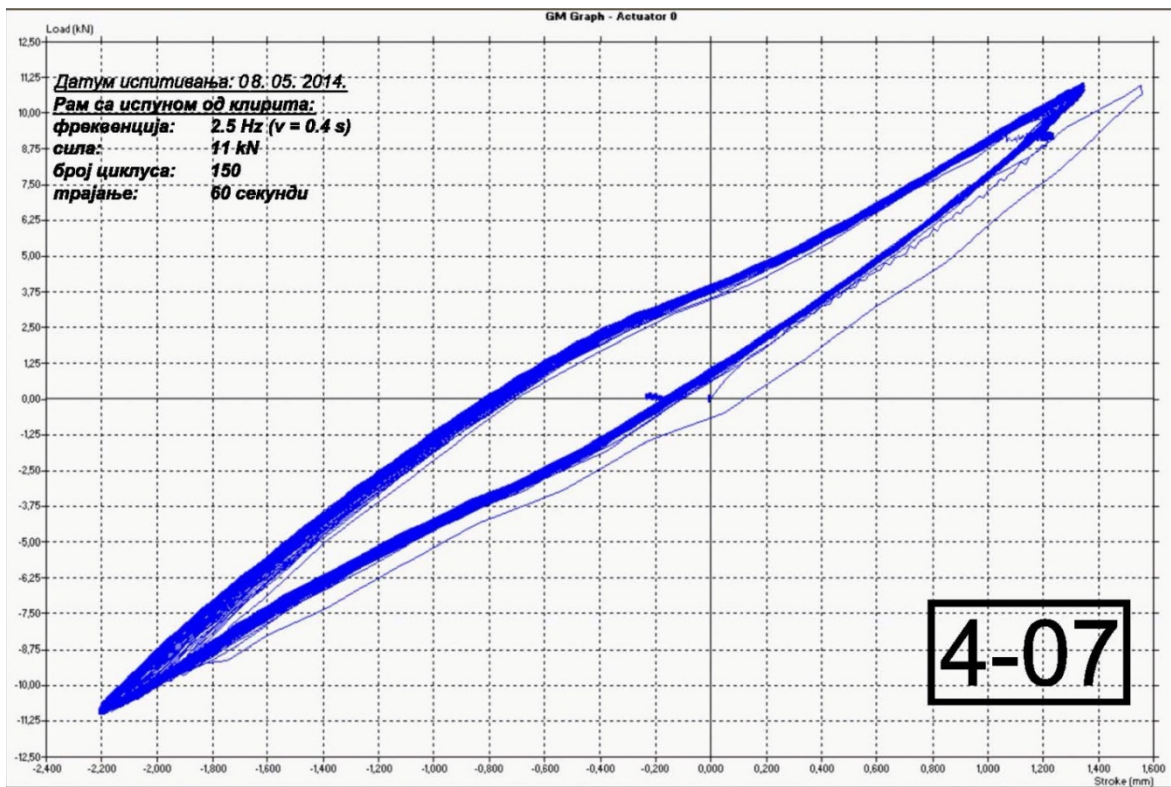
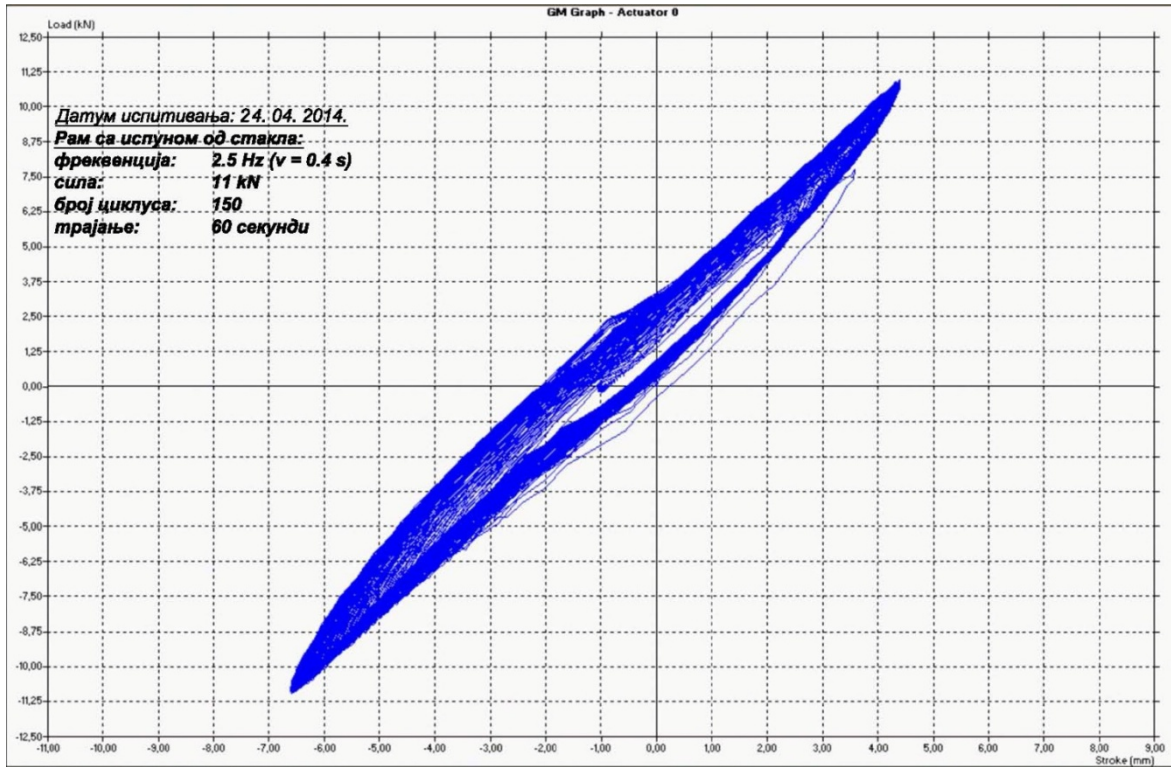


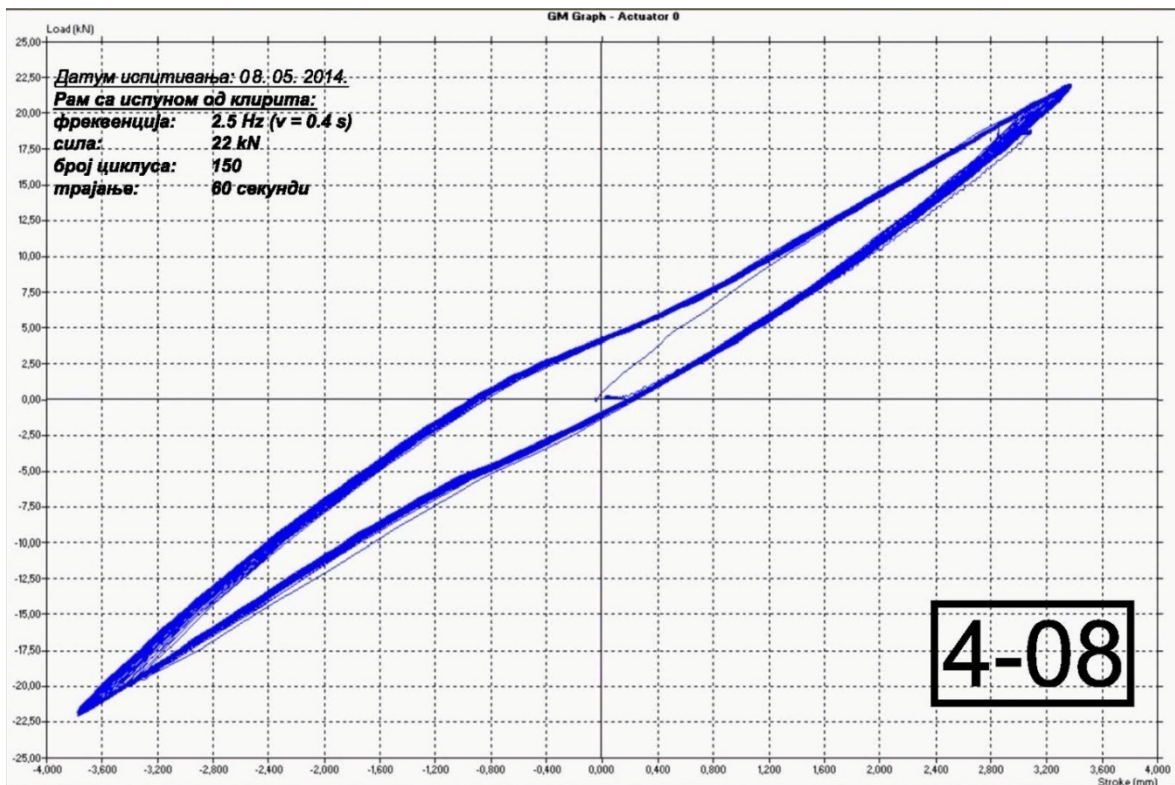
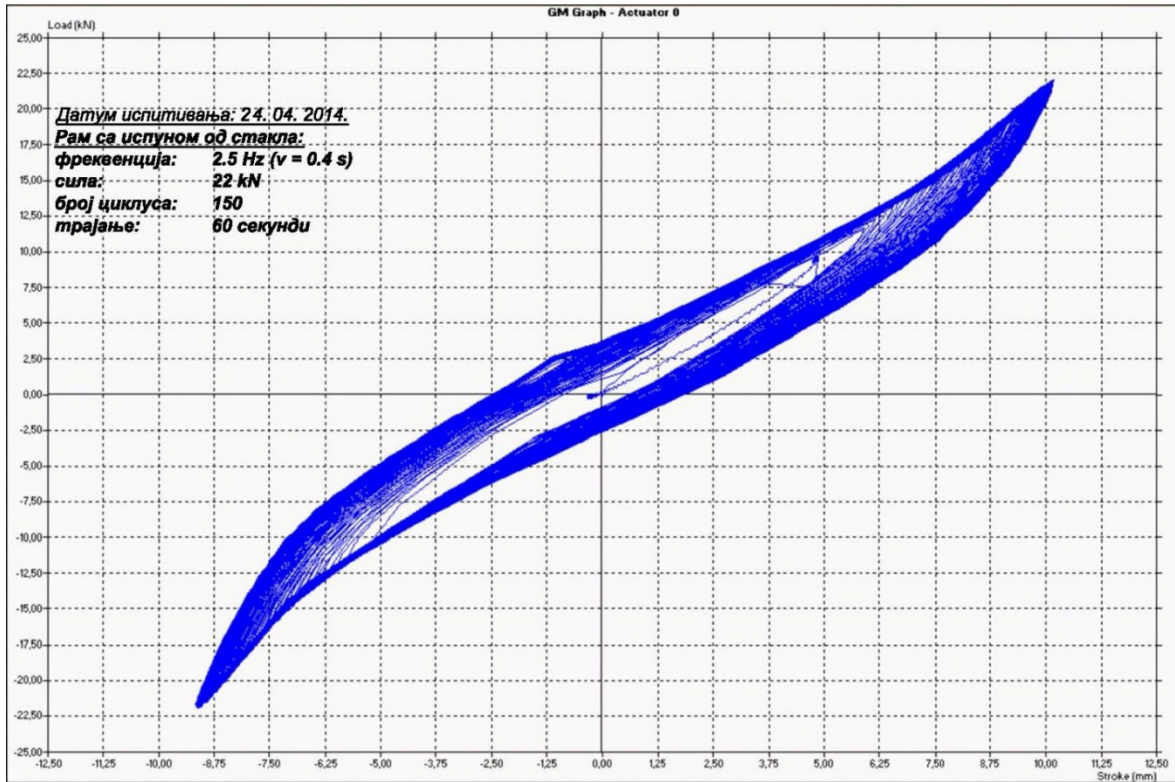


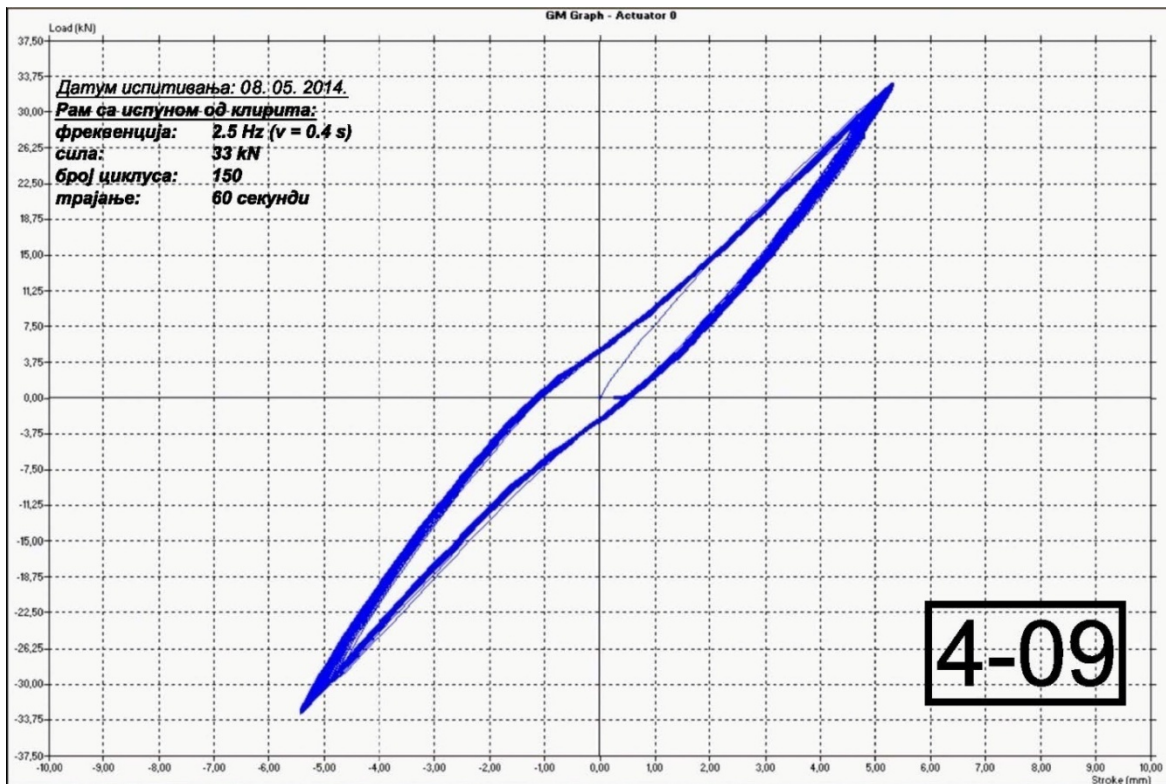
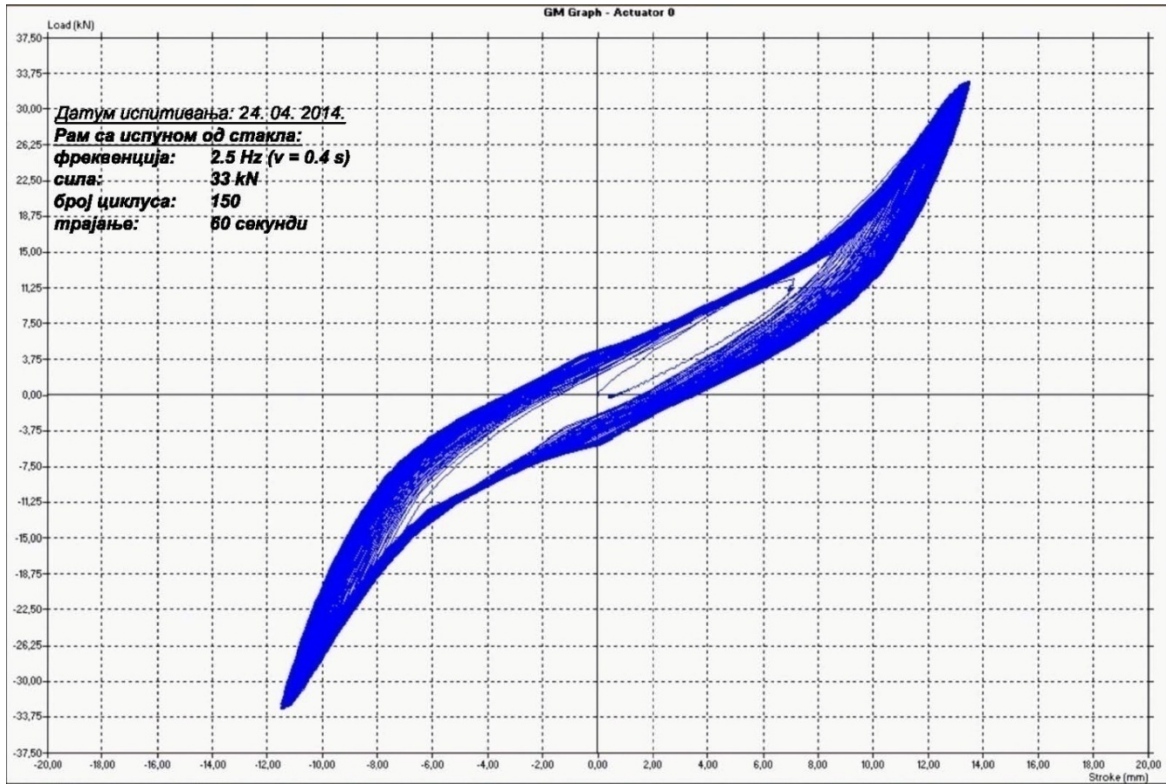






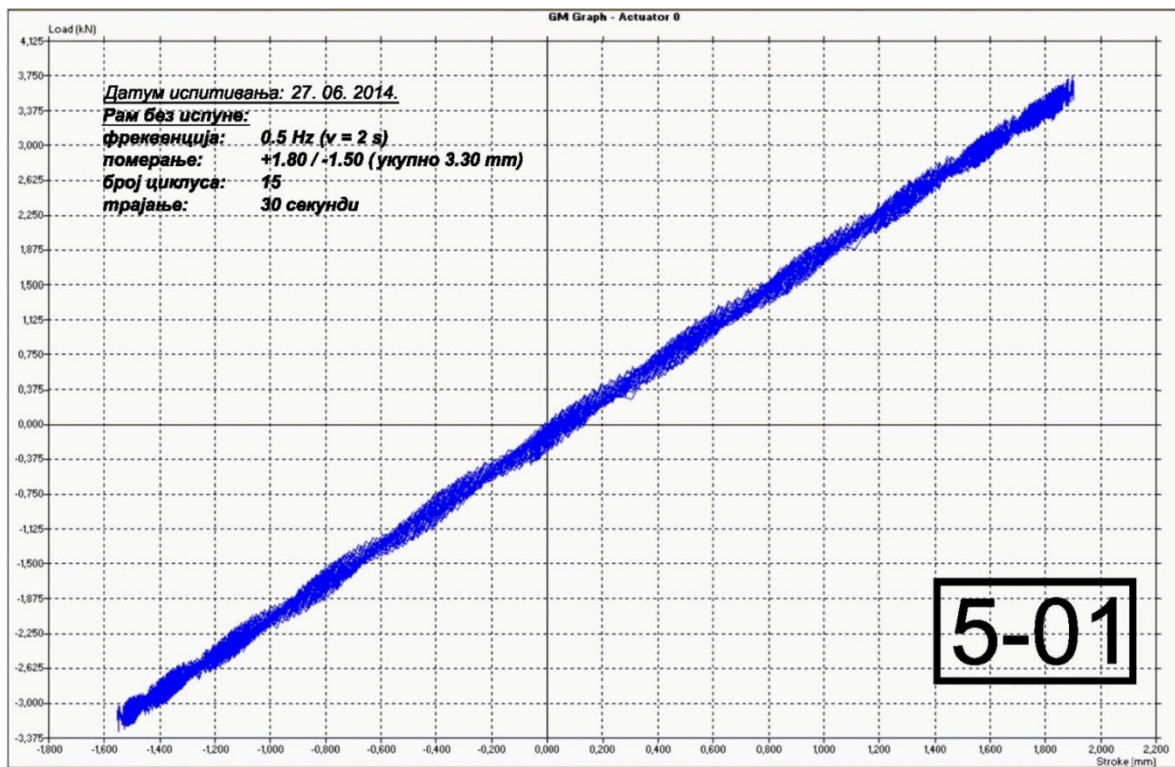
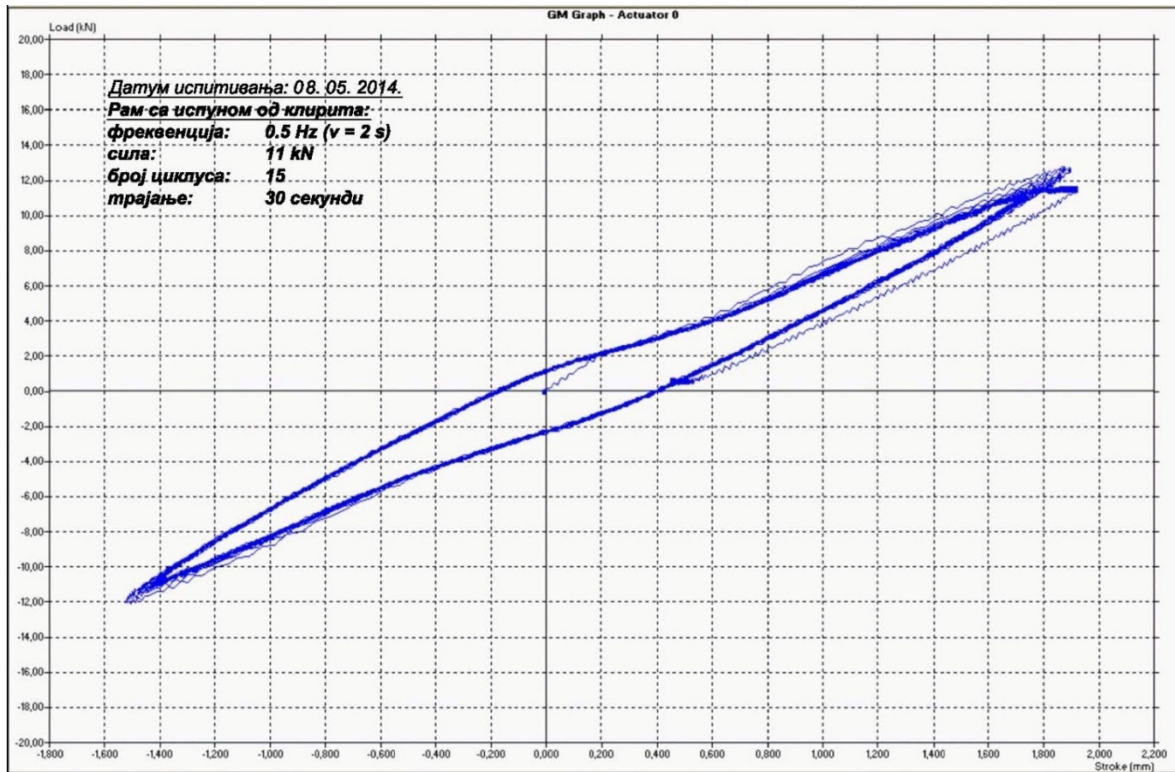


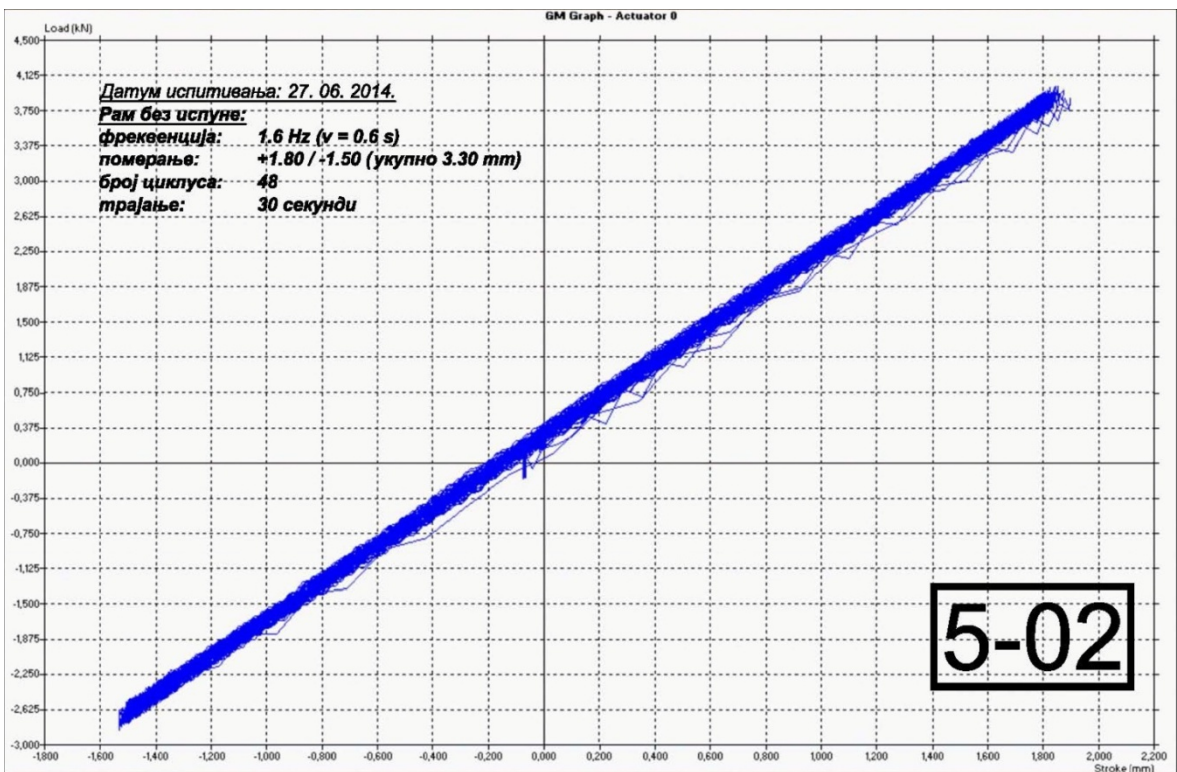
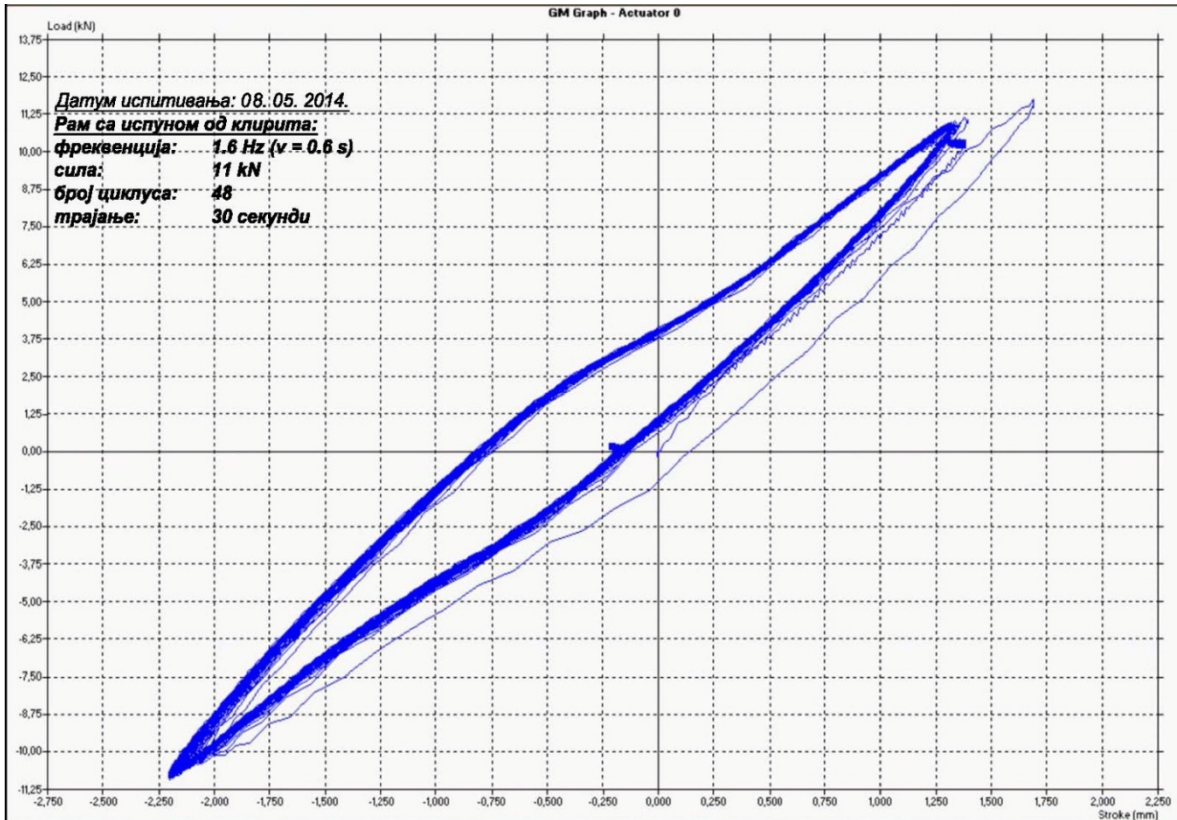


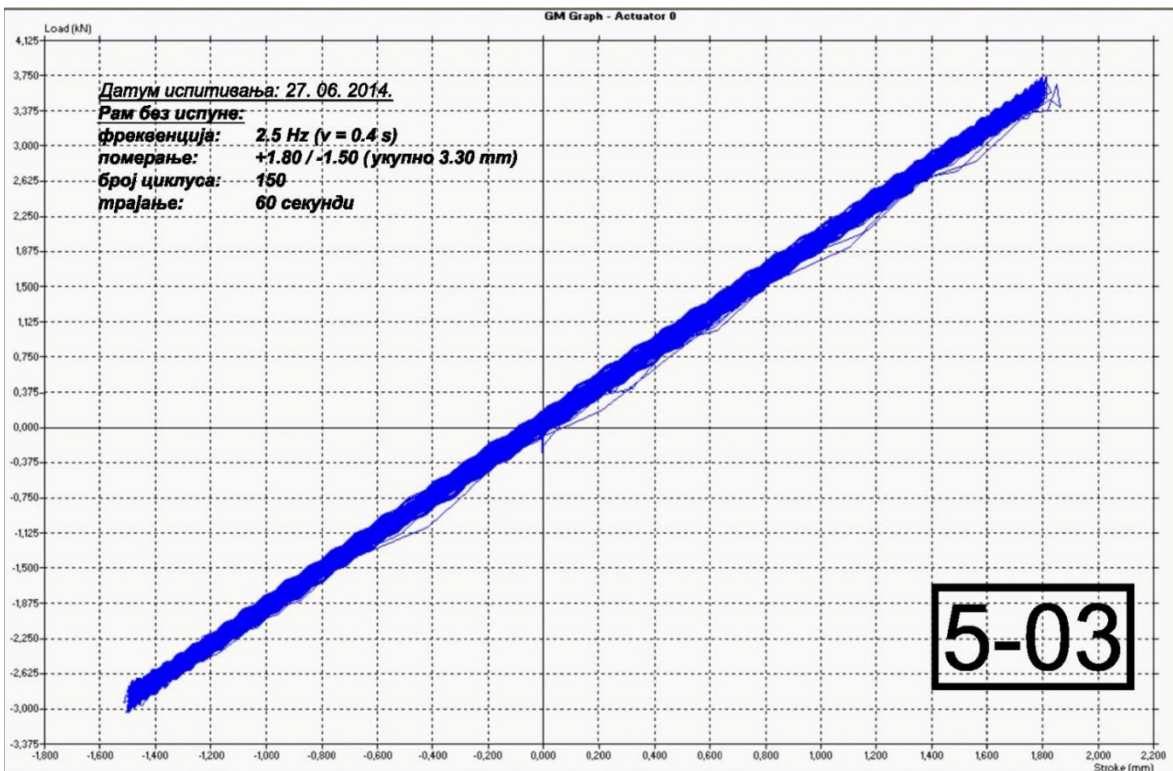
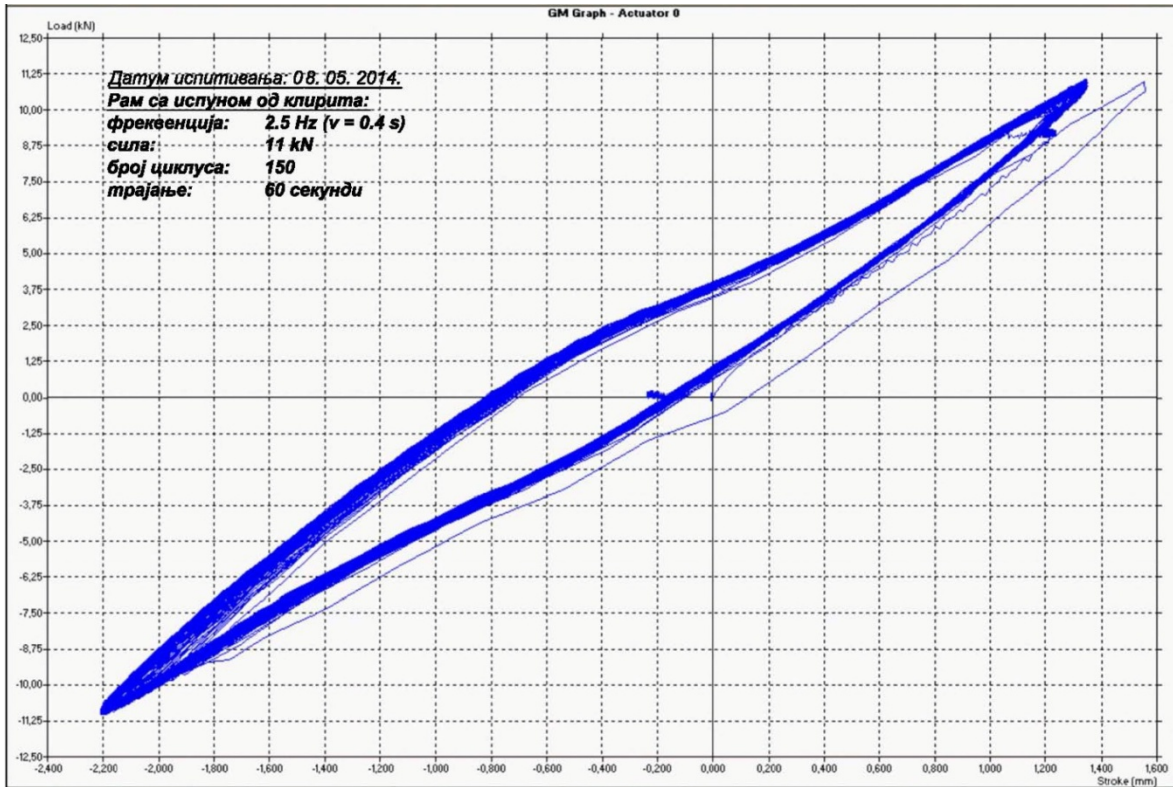


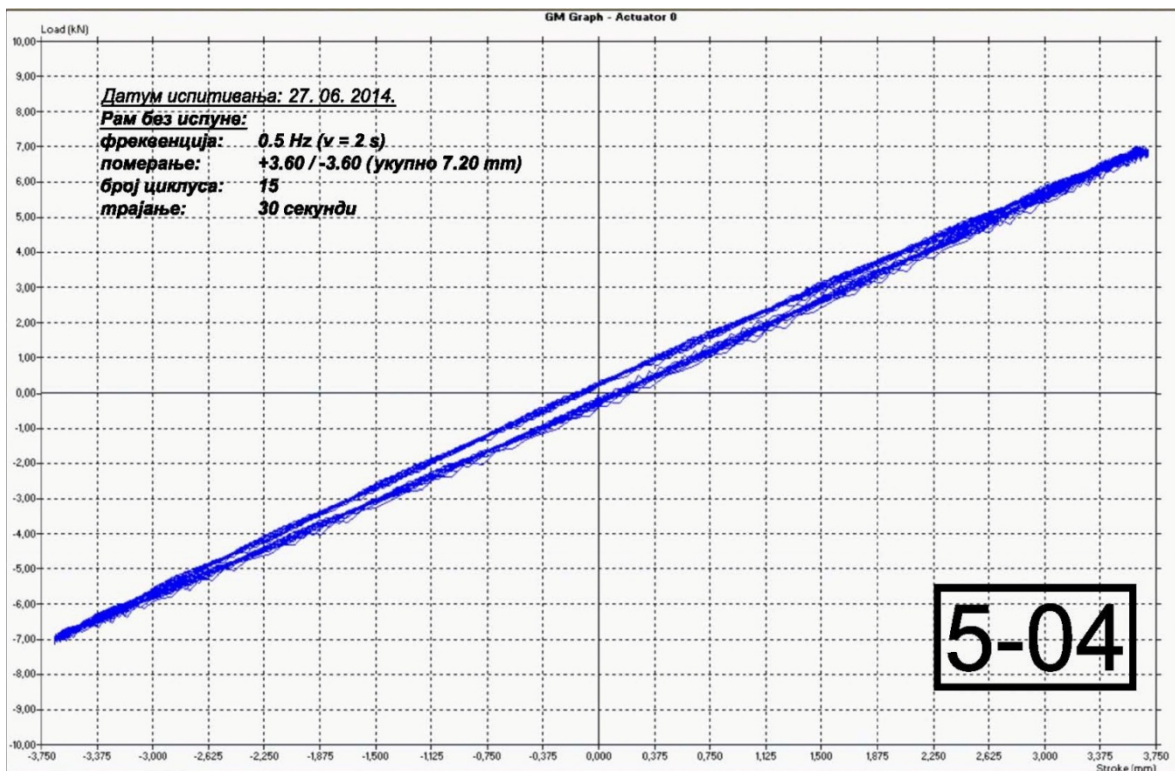
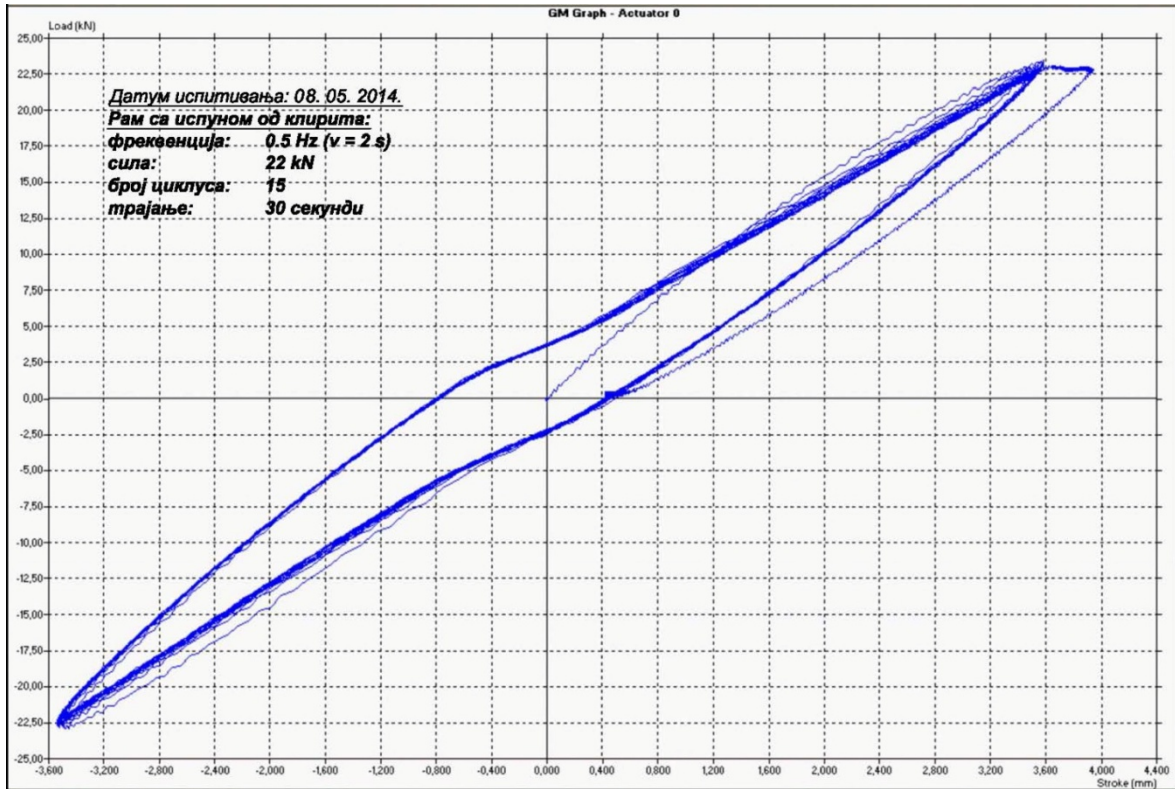
Дијаграми из испитивања експерименталних модела на бази клирита (08. 05. 2014.) и челичног рама без испуне (27. 06. 2014.)

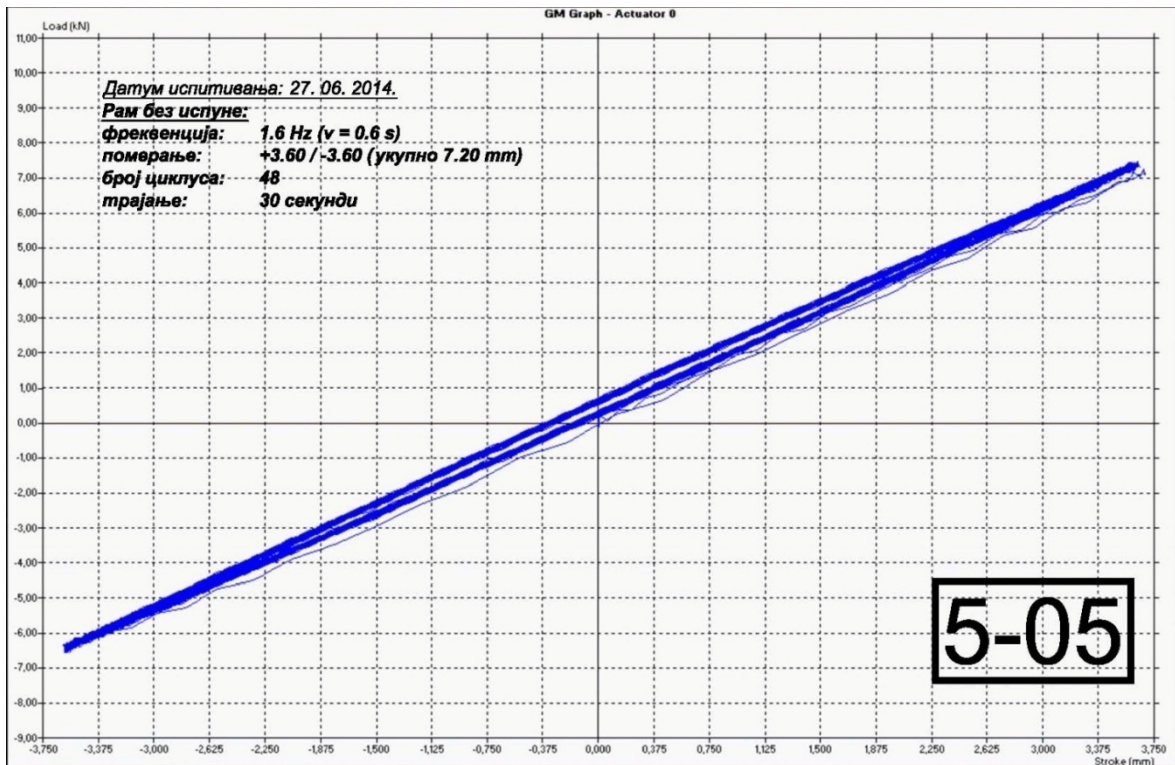
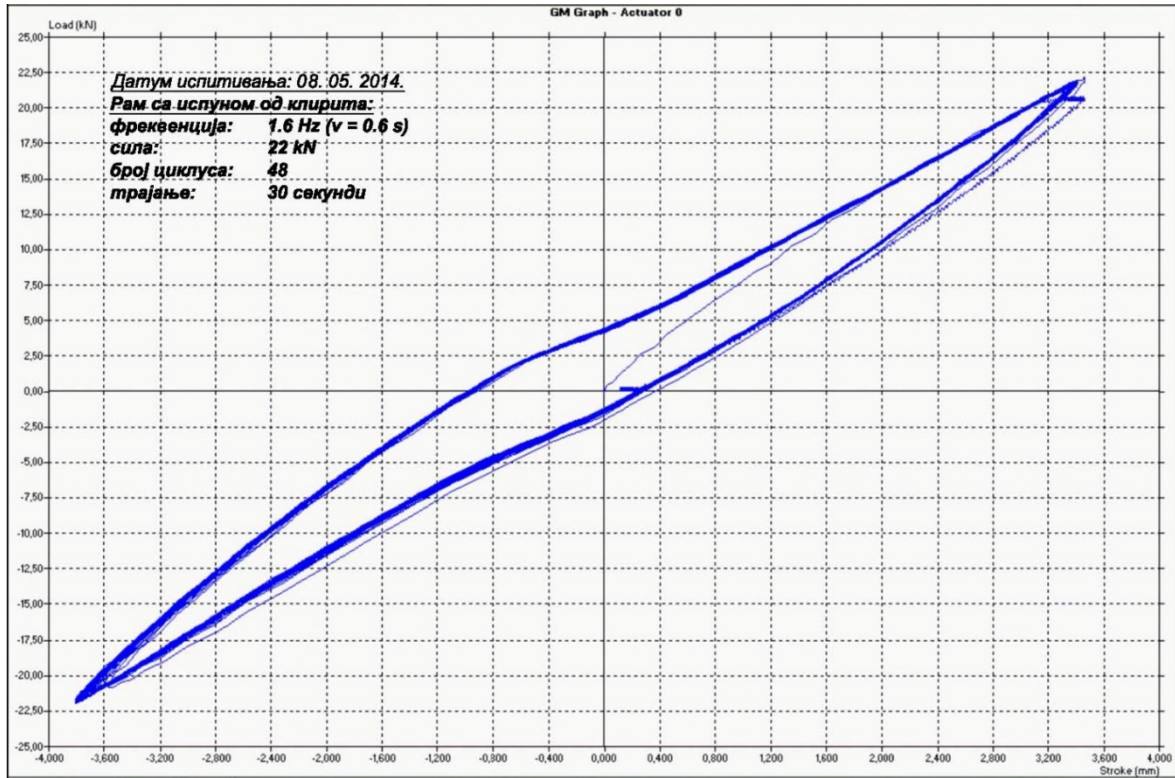
Дијаграми са ознаком “5-...”

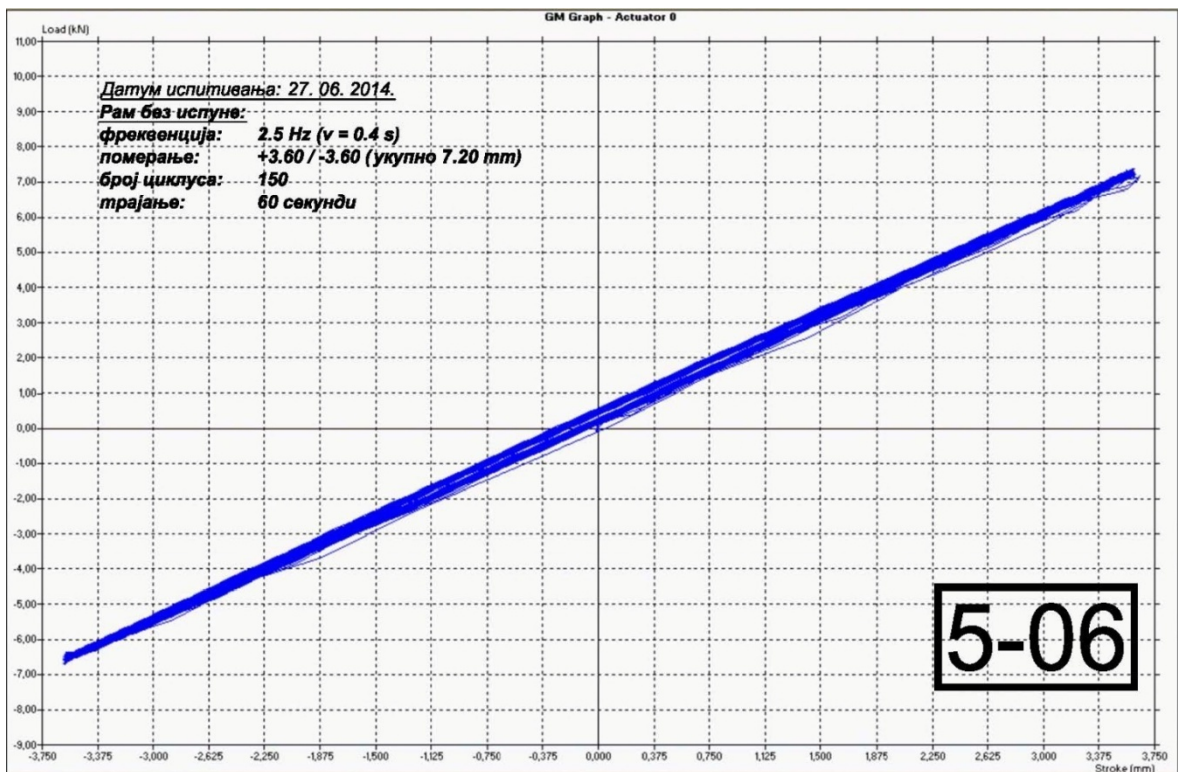
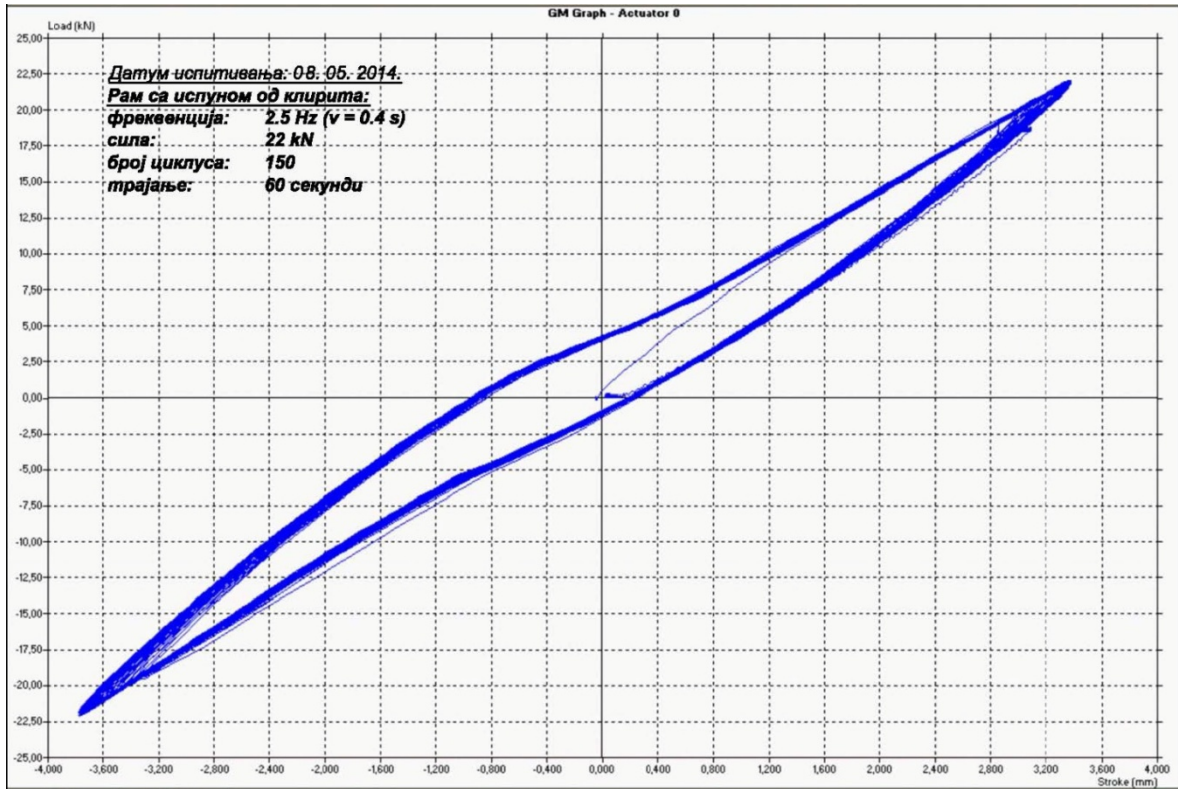


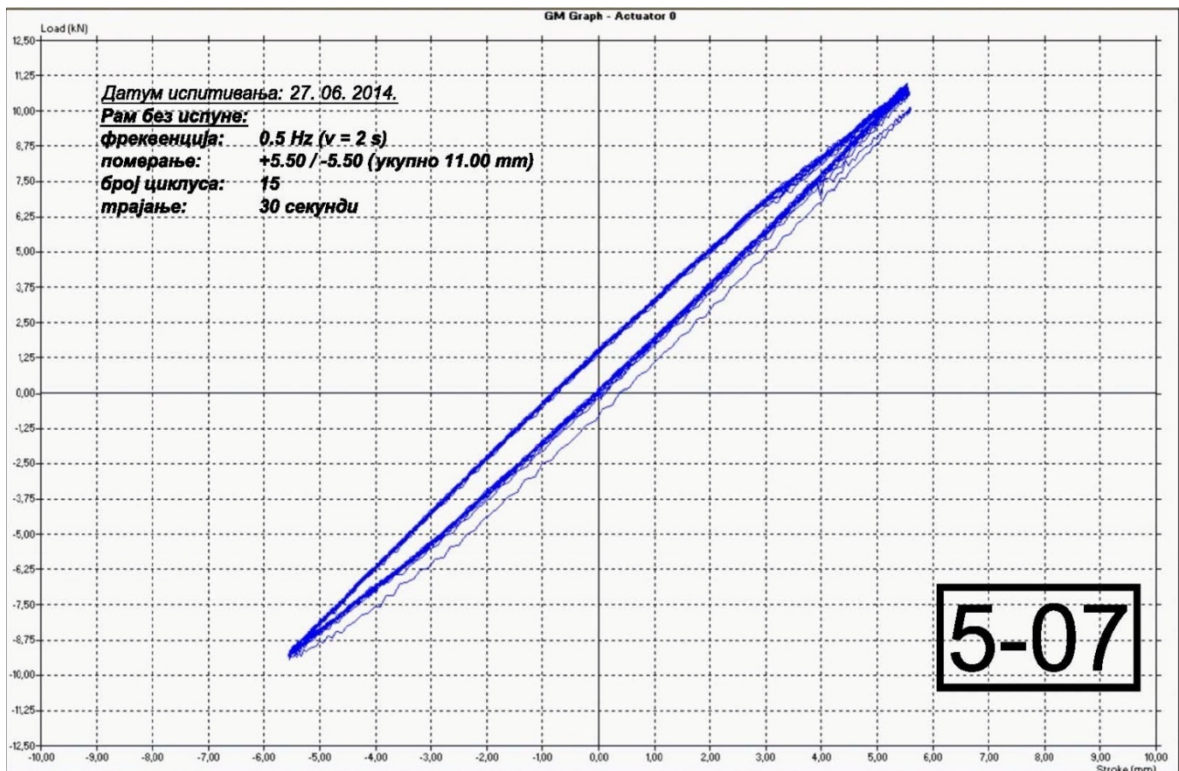
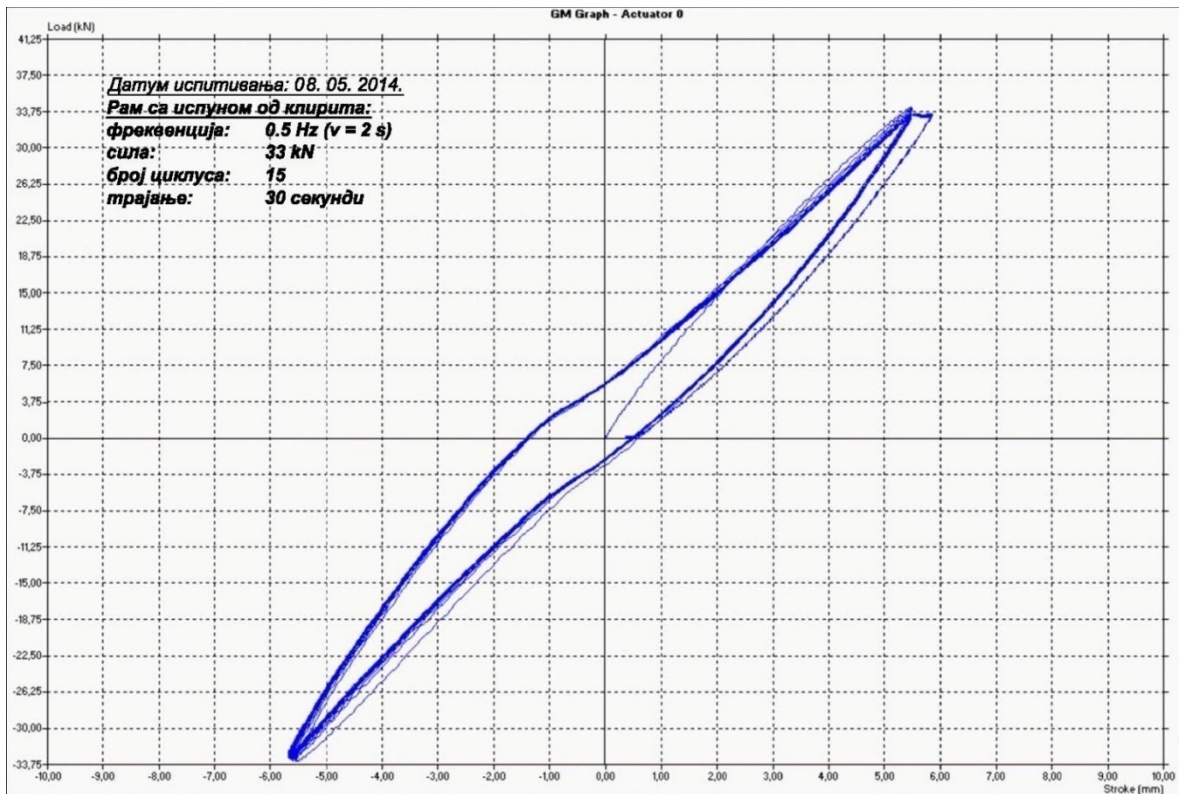


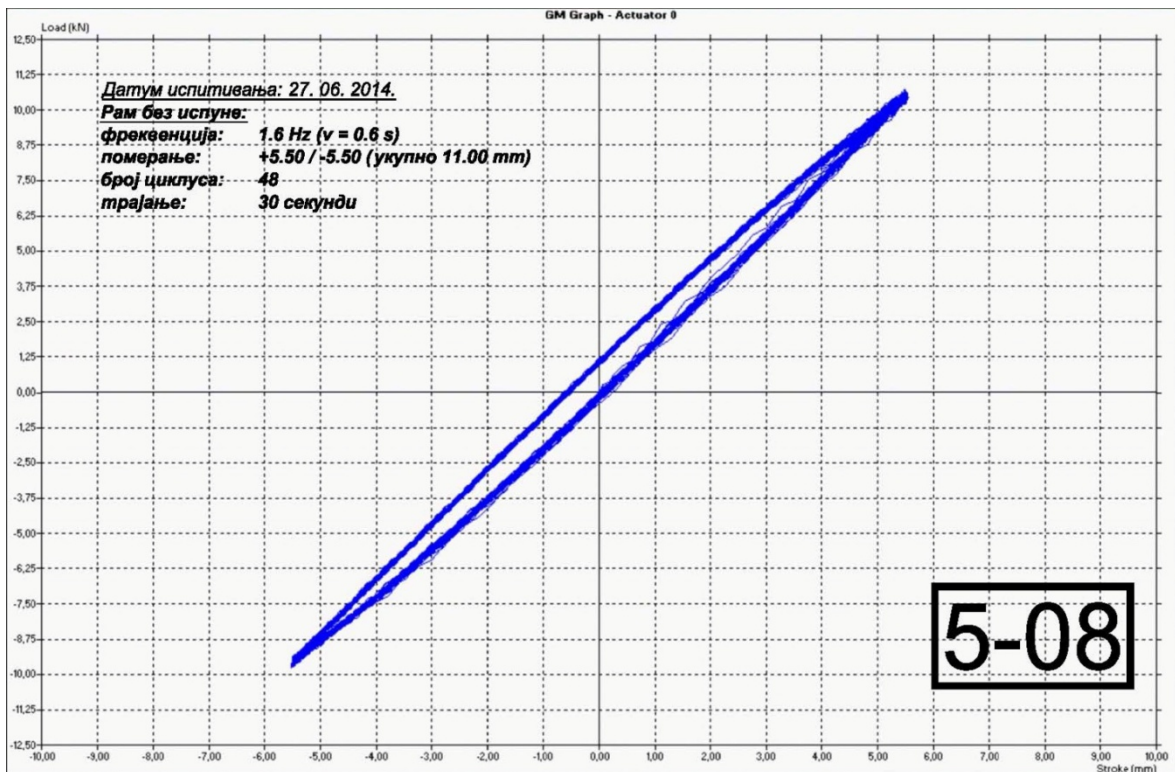
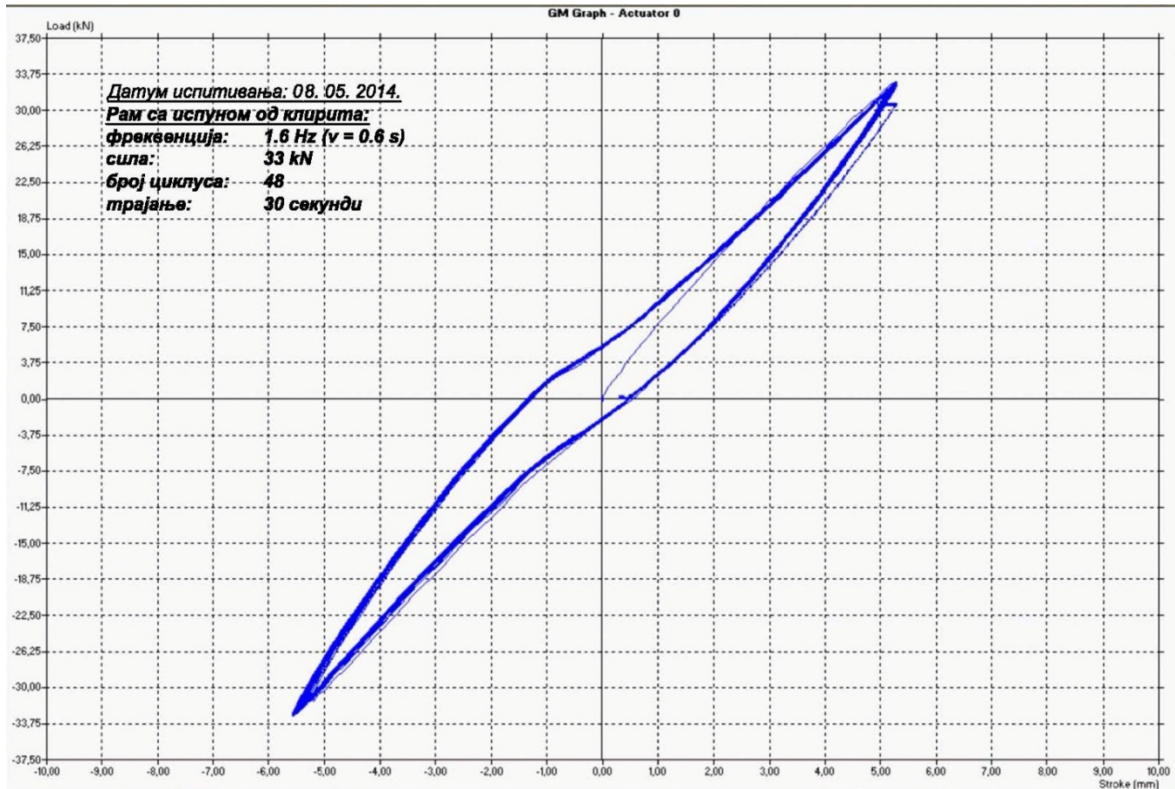


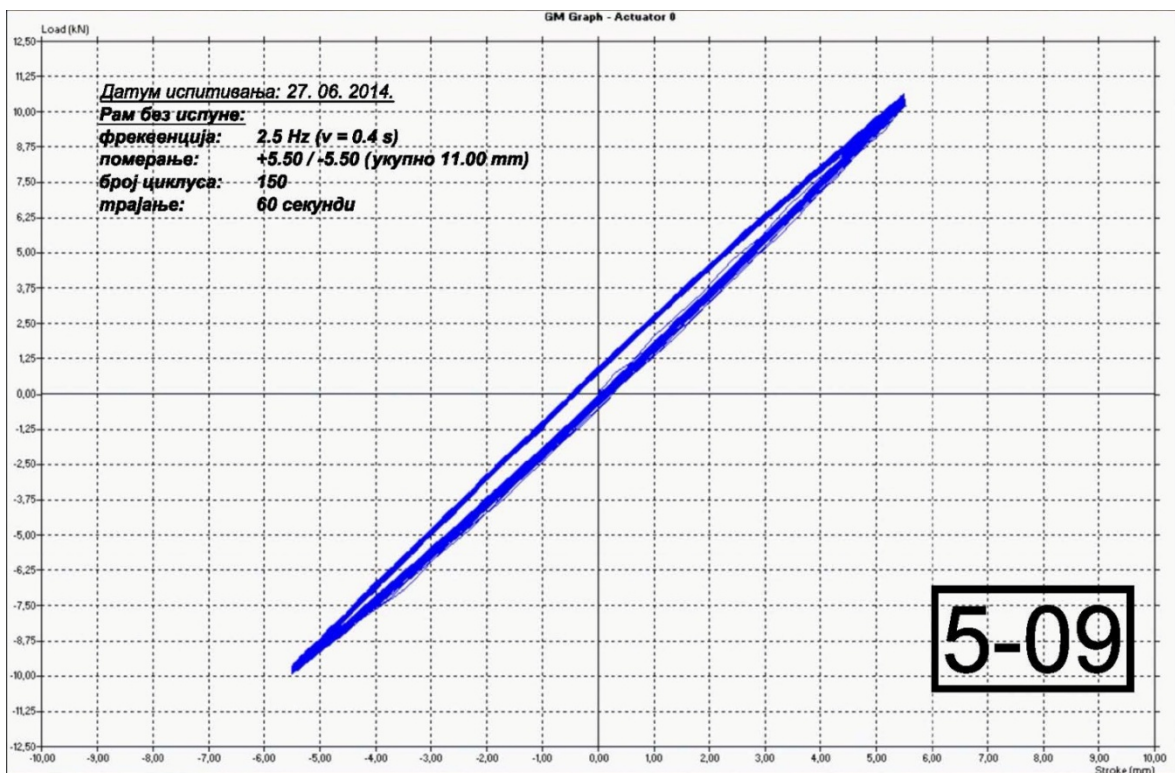
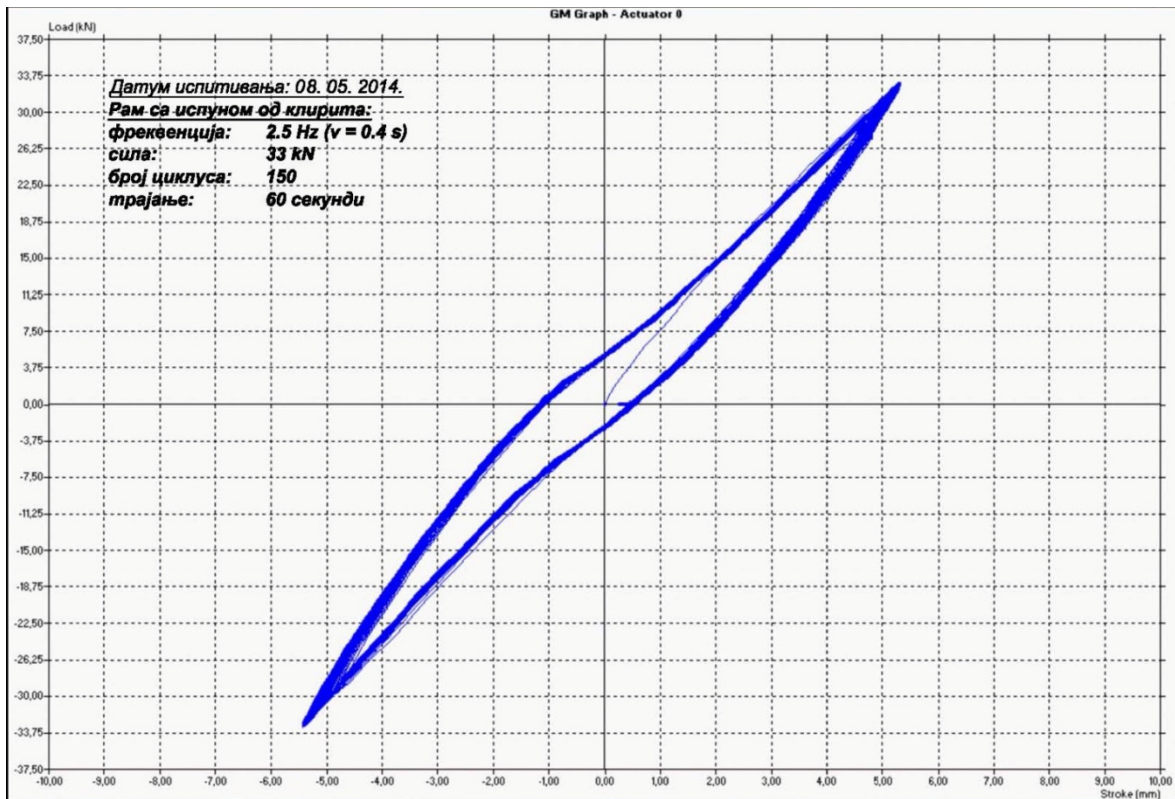








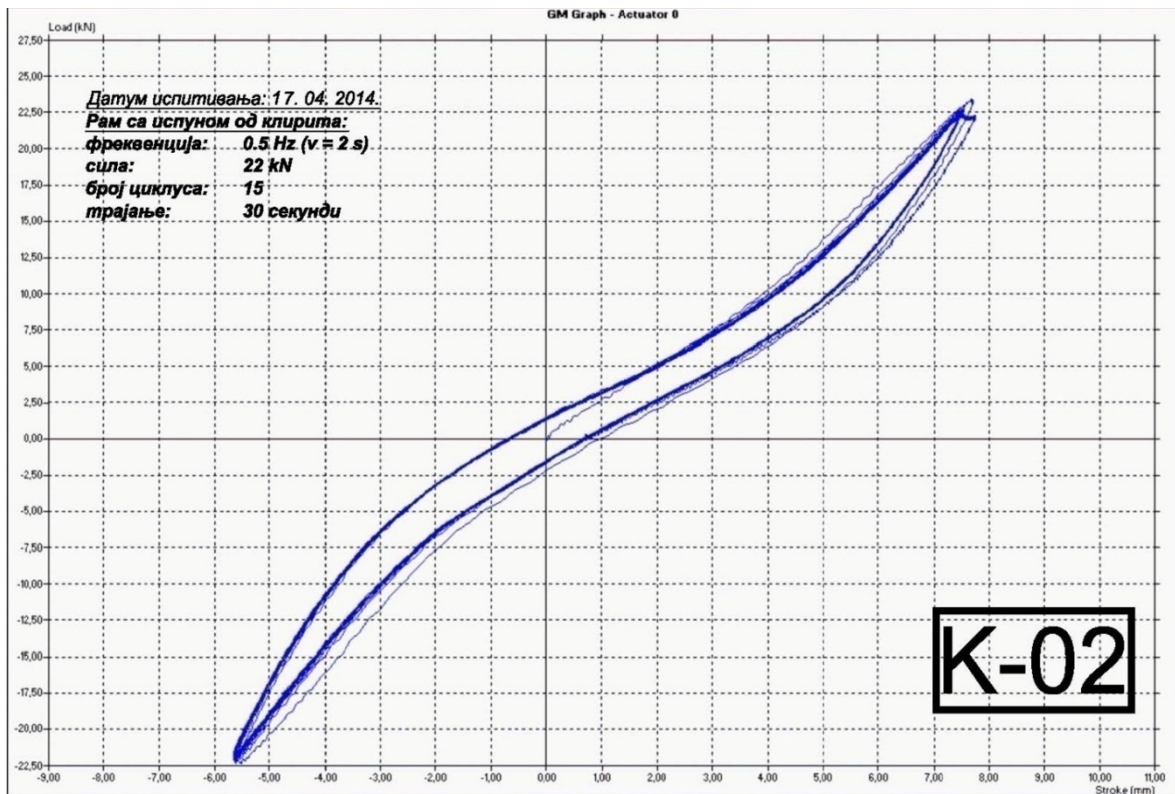
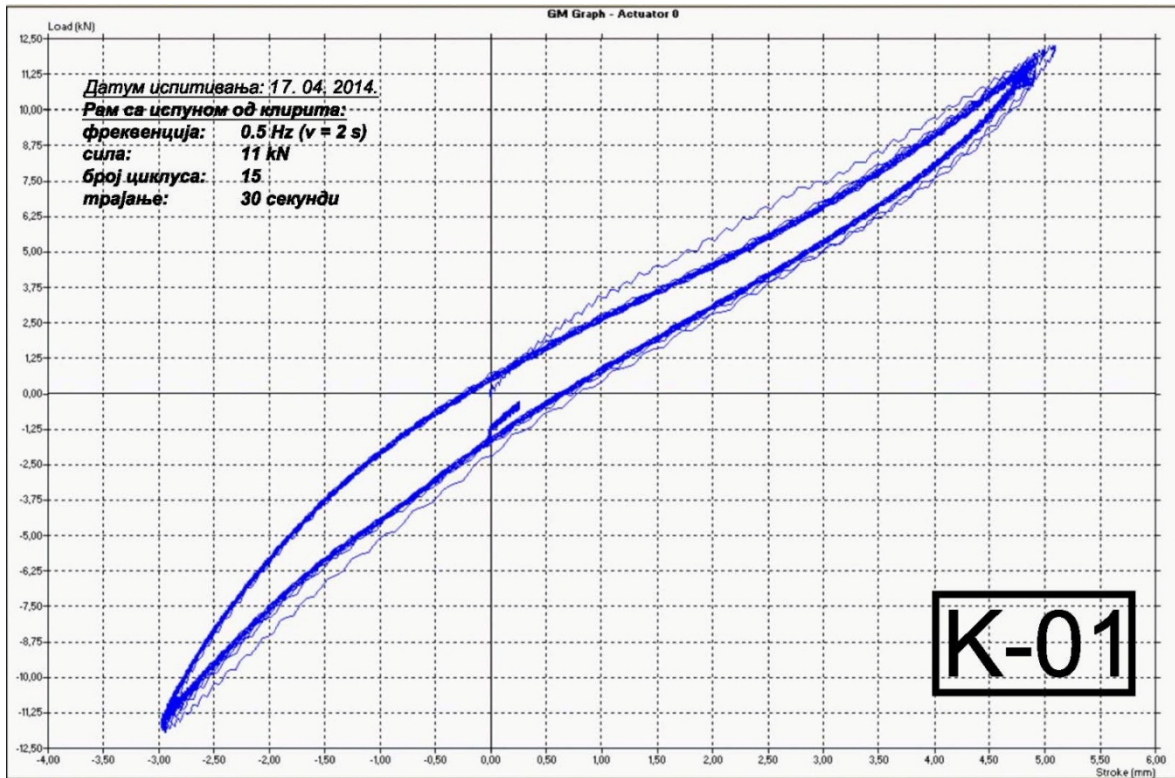


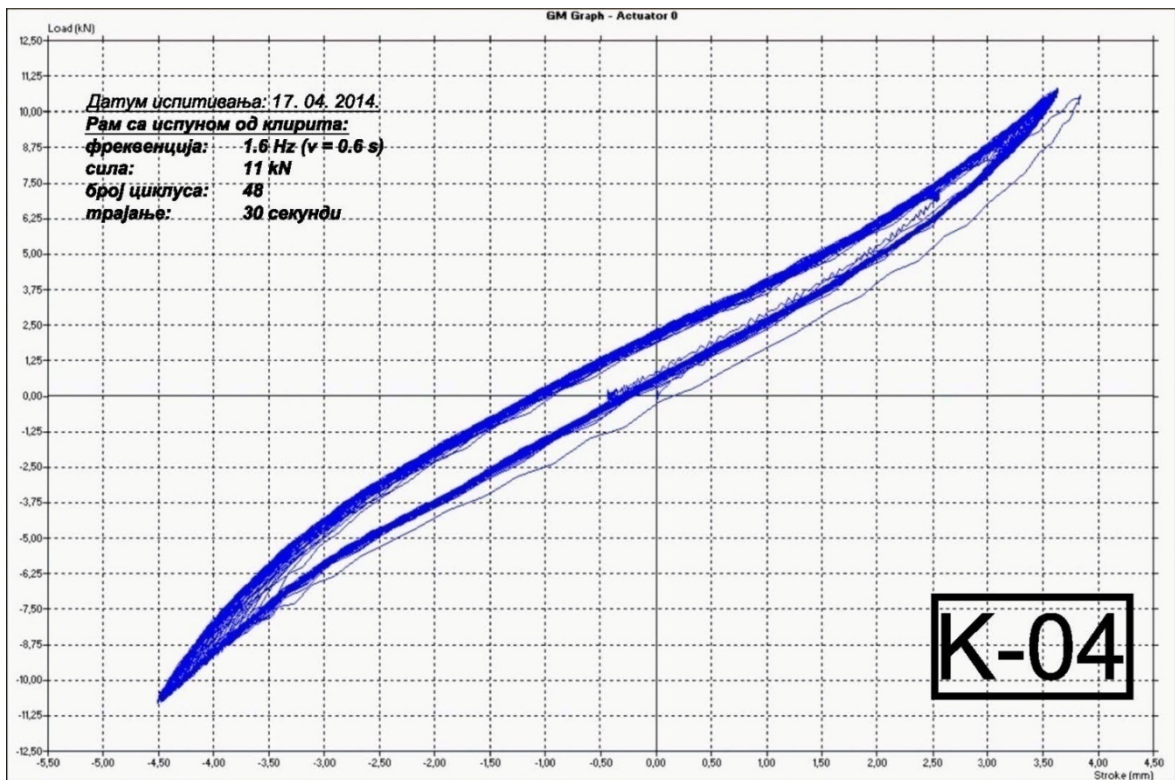
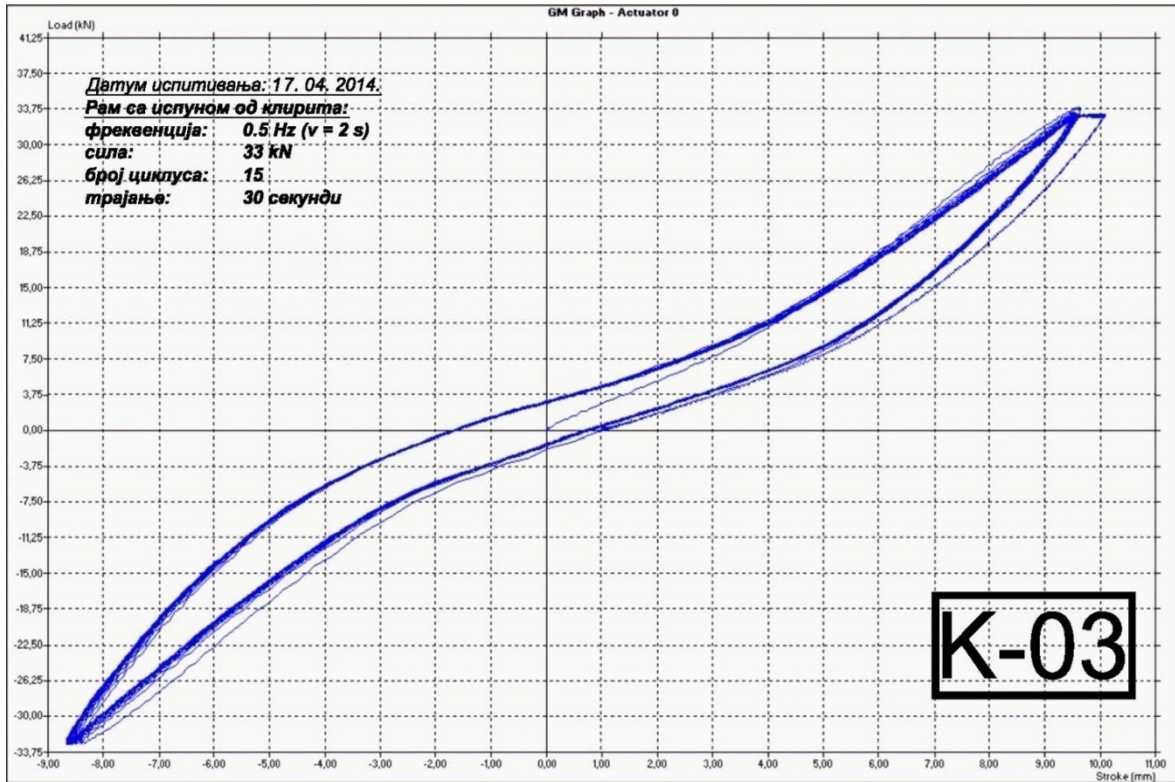


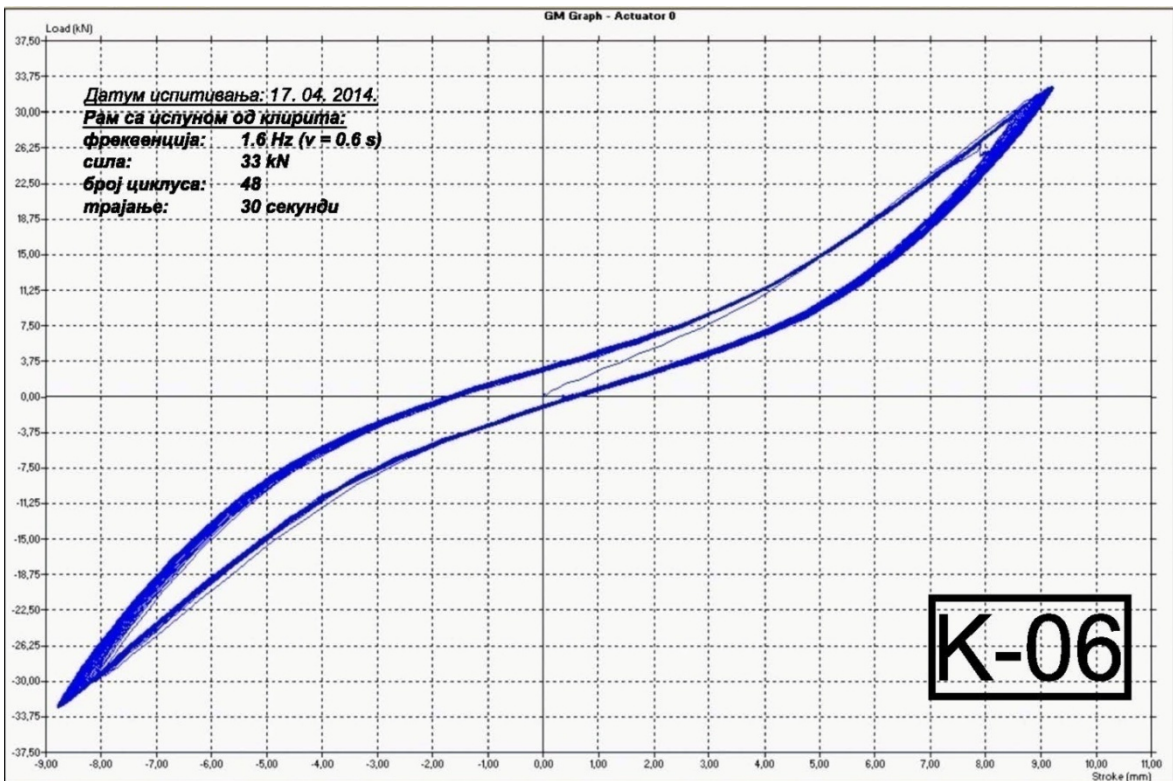
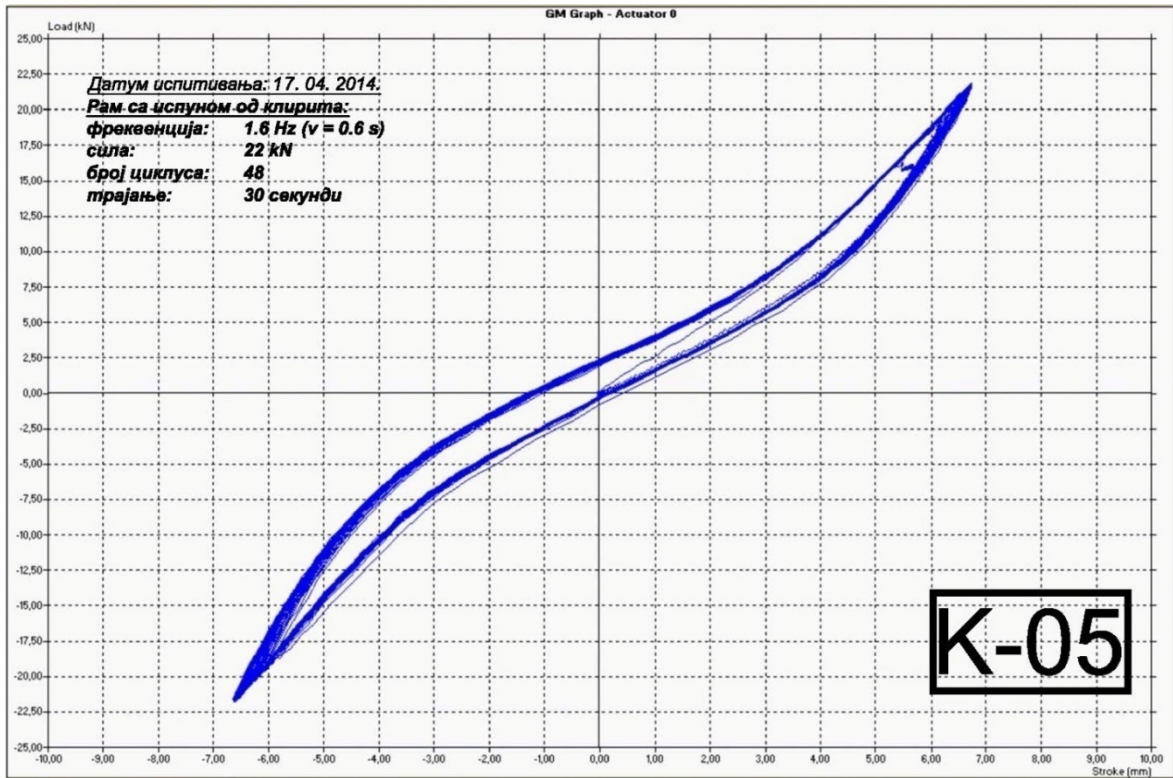
Дијаграми из испитивања експерименталног модела на бази клирита

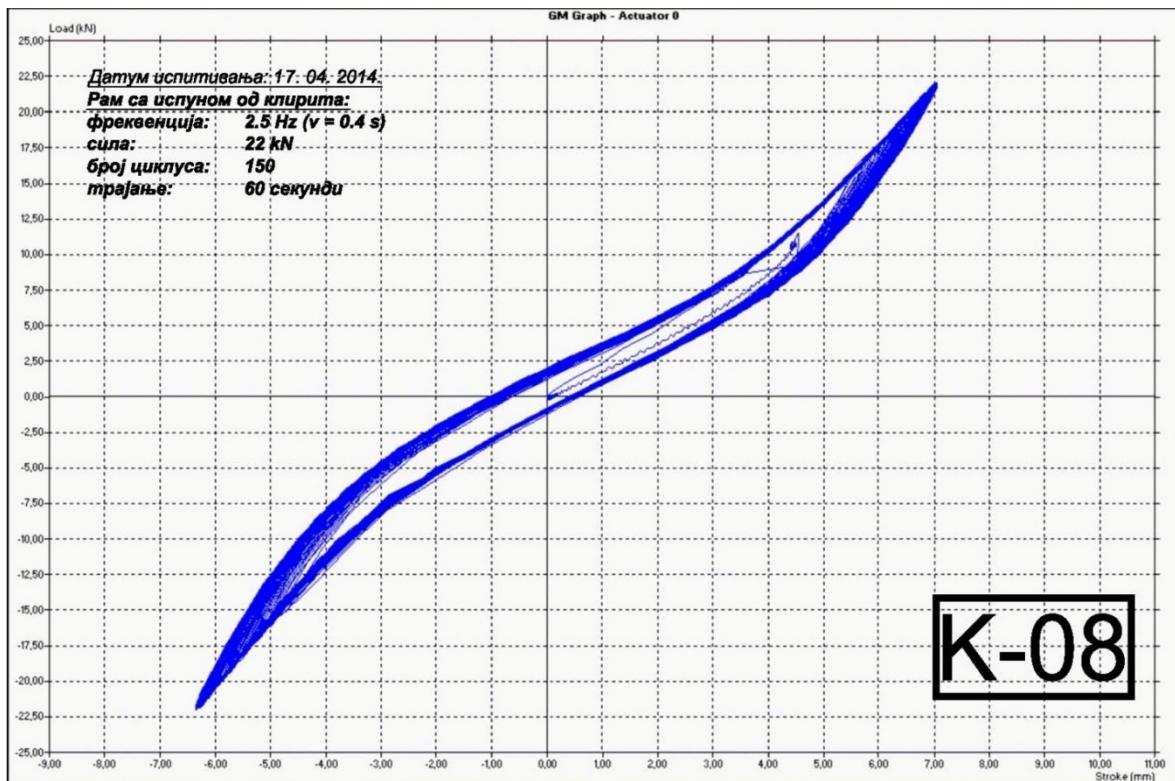
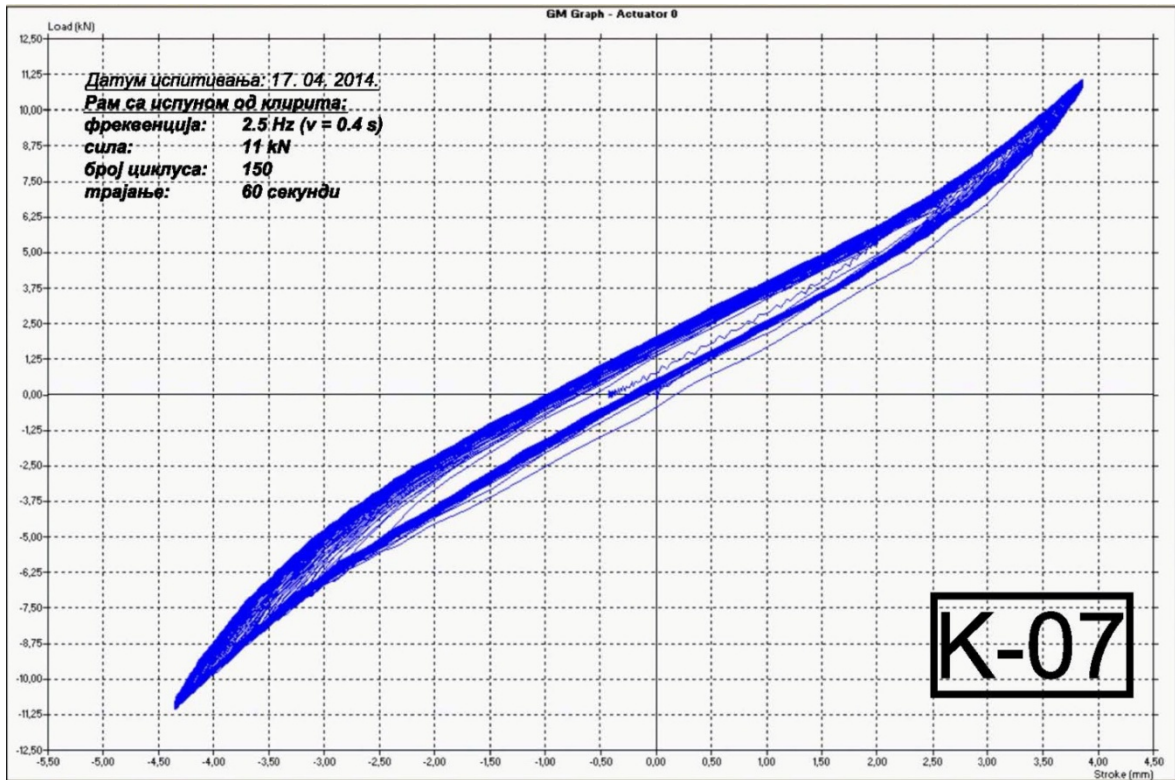
(17. 04. 2014.)

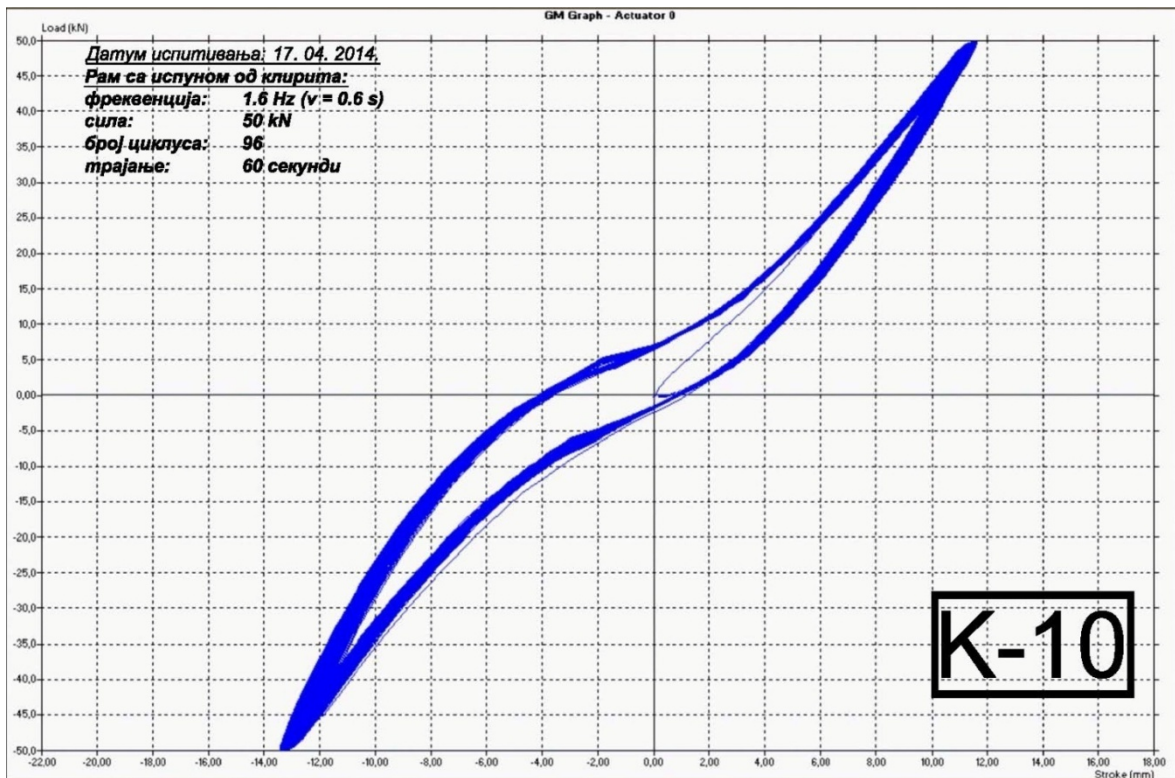
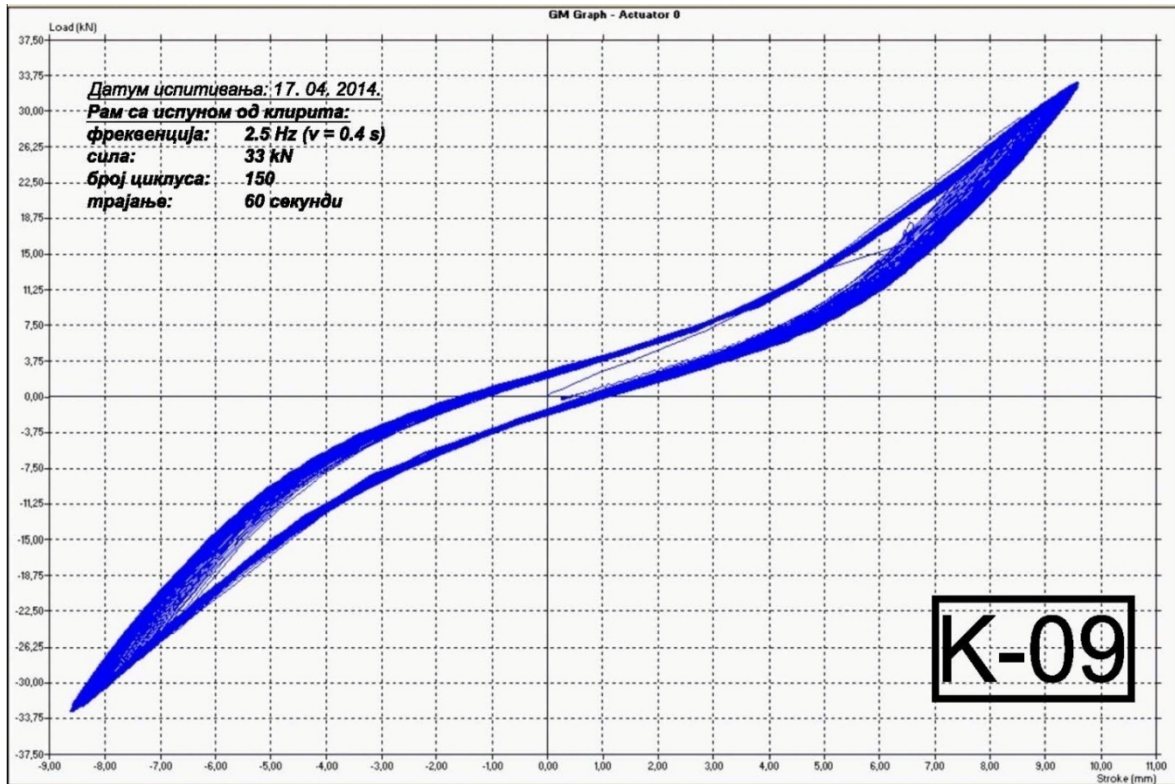
Дијаграми са ознаком “К-...”











Прилог 2.

Изјава о ауторству

Потписани Јефто Терзовић

број индекса Д21/2013

Изјављујем

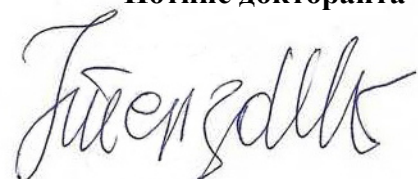
да је докторска дисертација под насловом

ПРОЈЕКТОВАЊЕ СЕИЗМИЧКИ ОТПОРНИХ АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА КОРИШЋЕЊЕМ ПАНЕЛА ОД КОНСТРУКЦИОНОГ СТАКЛА ИЛИ ПОЛИКАРБОНАТА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, април 2016.

Потпис докторанта



Прилог 3.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора	<u>Јефто Терзовић</u>
Број индекса	<u>Д21/2013</u>
Студијски програм	<u>Архитектура и урбанизам</u>
Наслов рада	<u>Пројектовање сеизмички отпорних архитектонских објеката коришћењем панела од конструкционог стакла или поликарбоната</u>
Ментор	<u>др Миодраг Несторовић</u>

Потписани Јефто Терзовић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, април 2016.

Потпис докторанта


Прилог 4.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ПРОЈЕКТОВАЊЕ СЕИЗМИЧКИ ОТПОРНИХ АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА КОРИШЋЕЊЕМ ПАНЕЛА ОД КОНСТРУКЦИОНОГ СТАКЛА ИЛИ ПОЛИКАРБОНАТА

која је моје ауторско дело.

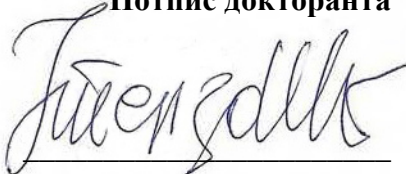
Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

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

У Београду, април 2016.

Потпис докторанта


1. Ауторство - Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.