

„ОТПОРНИ КОНСТРУКЦИИ“ “RESILIENT STRUCTURES”

ЗБОРНИК НА ТРУДОВИ PROCEEDINGS

ДГКМ

**ДРУШТВО НА
ГРАДЕЖНИ
КОНСТРУКТОРИ НА
МАКЕДОНИЈА**

MASE

**MACEDONIAN
ASSOCIATION OF
STRUCTURAL
ENGINEERS**

20 МЕЃУНАРОДЕН СИМПОЗИУМ
INTERNATIONAL SYMPOSIUM

**СКОПЈЕ, С. МАКЕДОНИЈА
SKOPJE, N. MACEDONIA
28 - 29 септември 2023
September , 28th - 29th , 2023**

MASE ДГКМ
Macedonian Association of Structural Engineers
Друштво на градежните конструктори на Македонија

Proceedings
Зборник на трудови

20th **International**
Symposium
ти Меѓународен
симпозиум

Skopje, North Macedonia, 28 – 29 September 2023
Скопје, Северна Македонија, 28 – 29 септември 2023

**PROCEEDINGS
OF THE 20th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF MASE**

**ЗБОРНИК НА ТРУДОВИ
20^{ТИ} МЕЃУНАРОДЕН СИМПОЗИУМ НА ДГКМ**

Publisher:

**MASE - Macedonian Association of Structural Engineers
Faculty of Civil Engineering, Blvd. Partizanski odredi No. 24 P.Box. 560,
1000 Skopje, Republic of North Macedonia
e-mail: mase@gf.ukim.edu.mk; website: www.mase.gf.ukim.edu.mk**

Издавач:

**ДГКМ - Друштво на Градежни Конструктори на Македонија
Градежен Факултет, бул. Партизански одреди бр. 24 П.Ф. 560,
1000 Скопје, Република Северна Македонија
e-mail: mase@gf.ukim.edu.mk; website: www.mase.gf.ukim.edu.mk**

Editor: **Darko Nakov, President of MASE**

За издавачот: **Дарко Наков, Претседател на ДГКМ**

Executive Committee of MASE and
Organizing Committee of the 20th International Symposium of MASE:

**Darko Nakov, Marta Stojmanovska, Ana Trombeva Gavriloska, Simona Bogoevska,
Andrea Serafimovski, Daniel Cekov, Gjorgji Goshev, Goce Lazareski, Koce Todorov,
Denis Popovski, Vladimir Vitanov, Riste Volchev, Nikola Postolov, Dejan Janev,
Kristina Milkova, Milica Jovanoska Mitrevska, Evgenija Stojkoska**

Претседателство на ДГКМ и

Организационен одбор на 20^{тиот} Меѓународен симпозиум на ДГКМ:

**Дарко Наков, Марта Стојмановска, Ана Тромбева Гаврилоска, Симона Богоевска,
Андреа Серафимовски, Даниел Цеков, Ѓорѓи Гошев, Гоце Лазарески, Коце
Тодоров, Денис Поповски, Владимир Витанов, Ристе Волчев, Никола Постолов,
Дејан Јанев, Кристина Милкова, Милица Јованоска Митревска, Евгенија
Стојкоска**

Technical staff of the Symposium:

**Ditar Memedi, Nikola Nisev, Mihail Petrov, Marko Gjorgjioski, Petar Janev, Antonio
Tomeski, Irina Postolova, Natalija Bogdanovska, Borjana Koneska, Jovana Kuzevska,
Andrej Stefanoski, Hristijan Baloski, Emilija Stojanova, Andrijana Arsovska**

Техничка служба на Симпозиумот:

**Дитар Мемеди, Михаил Петров, Марко Ѓорѓиоски, Петар Јанев, Антонио Томески,
Ирина Постолова, Наталија Богдановска, Борјана Конеска, Јована Кузевска, Андреј
Стефаноски, Христијан Балоски, Емилија Стојанова, Андријана Арсовска**

Grafical design of cover page and Symposium poster:

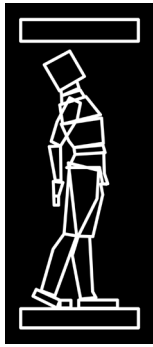
**Mitko Hadzi Pulja, Darko Draganovski
Faculty of Architecture, UKIM, Skopje**

Графички дизајн на корицата и плакатот на Симпозиумот:

**Митко Хаџи Пуља, Дарко Драгановски
Архитектонски факултет, УКИМ, Скопје**

e-book:

електронско издание: ISBN 978-608-66946-3-0



ДГКМ
ДРУШТВО НА
ГРАДЕЖНИТЕ
КОНСТРУКТОРИ НА
МАКЕДОНИЈА

Партизански одреди 24,
П. Фах 560, 1000 Скопје
Северна Македонија

MASE
MACEDONIAN
ASSOCIATION OF
STRUCTURAL
ENGINEERS

Partizanski odredi 24,
P. Box 560, 1000 Skopje
North Macedonia

CM-4



mase@gf.ukim.edu.mk
http://mase.gf.ukim.edu.mk

ПРОНОЌАЊЕ НА ФОРМА НА ЛУШПИ СО ГОЛЕМИ РАСПОНИ ПОД ДЕЈСТВО НА СЕИЗМИЧКА СИЛА

Теодора МИХАЈЛОВСКА¹, Елена ДУМОВА-ЈОВАНОВСКА²
Ана ТРОМБЕВА-ГАВРИЛОВСКА¹

АПСТРАКТ

При дејство на хоризонтални сеизмички сили геометријата на лушпите има клучна улога во нивното однесување, пред се поради нивна помала маса и голема геометриска крутост. Традиционално, техниките за пронаоѓање форми за лушпи се потпираат исклучиво на гравитационите оптоварувања за генерирање на нивниот облик и не го земаат предвид сеизмичкото натоварување. Сепак во современите истражувања се развиваат методи за пронаоѓање форми за комбинирани случаи и на гравитацијата и на сеизмичката сила.

Пристапот за пронаоѓање форма што се разгледува во ова истражување ги зема предвид лушпите направени од материјали кои носат на притисок како што се неармиран бетон, камен, сидарија и земја. Техниката се заснова на општо прифатената претпоставка дека конструкциите од вакви материјали не можат преземат напрегања на затегнување. Затоа, за лушпи подложени и на вертикална гравитација и на хоризонтално сеизмичко натоварување, притиснатиот дел од пресекоот за пренос на силите (во 2D често се нарекува линија на потисок) треба да биде застапен во самата лушпа за да се избегне активирање на механизам на колапс. Преку примена на модел на инверзен висечки ланец подложен на хоризонтално натоварување преку алгоритам за динамичка релаксација, се генерираат облици на лушпа за кои може да се осигура дека постои таква патека на натоварување.

За да ја илустрира оваа методологија, во виртуелната програмска околина Grasshopper и програмскиот јазик Python изграден е алгоритам кој за зададена форма на основа, дефинирани гранични услови и интензитет на сеизмичка сила генерира двослојна лушпа. Добиените лушпи се анализираат во однос на нивната дебелина, бидејќи одредени форми кои произлегуваат од процесот на пронаоѓање на формата бараат голема конструктивна длабочина, што може да доведе до дебелост, а со тоа и тешки лушпи. Поконкретно е анализирано влијанието на три различни параметри врз дебелината на самата лушпа: интензитетот на предвидената сеизмичка сила, сооднос на висината и распонот на лушпата, и бројот на лежишта по периметарот на основата.

Клучни зборови: двослојни лушпи; асеизмичко проектирање; параметарско проектирање; динамичка релаксација

¹ Архитектонски факултет, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, Република Северна Македонија

² Градежен факултет, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, Република Северна Македонија

1. ВОВЕД

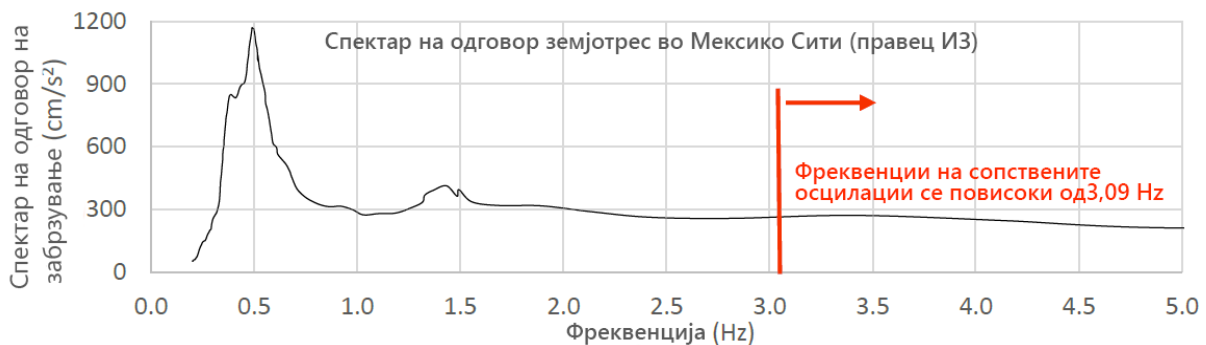
Во изминатите децении, армирано-бетонските покривни конструкции во облик на тенки лушпи со голем распон го покажаа својот потенцијал да се спротивстават на екстремно натоварување за време на природни катастрофи. Поморскиот стадион во Мајами (Сл.1), армирано-бетонска лушпа во форма на хиперболичен параболоид, го издржа ураганот Ендрју од 5-та категорија (1992) без да биде оштетена [1]. Станбената армирано-бетонска купола во Пенсакола Бич, САД (Сл.1) го преживеа ураганот Иван од 5-та категорија (2004) без посериозни оштетувања, додека неколку објекти во нејзина непосредна близина се урнати или претрпуваат непоправлива штета.



Сл. 1 Поморскиот стадион во Мајами (Мајами, САД, 1967) - армирано-бетонска лушпа во форма на хиперболичен параболоид; Станбената армирано-бетонска купола (Пенсакола Бич, САД, 2002)

Слични примери можат да бидат посочени и за однесувањето на лушпите изложени на дејство на земјотрес. Тенките лушпи од армиран-бетон проектирани и конструирани од Феликс Кандела го имаат издржано земјотресот од $8,0 M_w$ што го потресе Мексико Сити во 1985 година без пријавени штети. Подеталното разгледување на една од овие лушпи од Кандела, црквата Medalla Milagrosa (Мексико Сити, Мексико, 1953-1955), дава увид во клучните параметри кои влијаат на тоа како таквата лушпа реагира на земјотрес [2]. Лушпите генерално имаат тенденција да се однесуваат добро за време на земјотреси поради тоа што нивната голема крутост се должи на двојната закривеноста на формата, а не на дебелината, што овозможува тие да имаат мала маса.

Бидејќи силите предизвикани од динамички товари, како што се земјотресите се директно пропорционални со масата на конструкцијата, за лушпите истите се релативно ниски. Дополнително геометриската крутост во комбинација со малата маса резултира со висока фреквенција на сопствени осцилации. Фреквенцијата (ω) е поврзана со крутоста (k) и маса (m) каде што: $\omega = \sqrt{k/m}$. Во конкретни случај ако ги споредиме фреквенцијата на сопствени осцилации на лушпите со спектарот на одговор измерен за време на земјотресот во 1985 година (Сл.2) можеме да утврдиме зошто истите не претрпеле значајна штета. Највисоката реакција на забрзување поради земјотресот е измерена во опсегот на фреквенции од 0,4 до 0,7 Hz, далеку под фреквенциите на лушпите (3,09 Hz или поголеми). Затоа, за разлика од фреквенциите на зградите со 6 до 20 ката кои биле во резонанса со земјотресот, високите фреквенции на сопствени осцилации на лушпата на црквата не се поклопуваат со оние на земјотресот.



Сл. 2 Спектар на одговор на забрзување на земјотресот од 1985 во Мексико Сити

Бидејќи крутоста на лушпите се поврзува со нивната форма, целокупниот облик на лушпата е еден од најважните фактори, покрај условите за потпирање, типот на материјалот и дебелината, кои одредуваат дали лушпата ќе биде соодветна во однос на безбедноста, стабилноста и цврстината.

Развиени се различни техники за пронаоѓање на оптималната форма на лушпа, но примената на овие техники обично е ограничена на проектирање под вертикално (најчесто гравитационо) натоварување, претпоставувајќи дека сопствената тежина на лушпата е подоминантна од надворешните натоварувања (како што се товарите од ветер и снег). Оваа претпоставка не може да биде прифатена во случај на сеизмички товари, бидејќи истите се пропорционални на масата на разгледуваната конструкција.

Во овој труд истражена е потенцијалната примена на методите за пронаоѓање на форма при дејство на сеизмичка сила. Во досегашната литература се развиени методологии кои генерираат форми за лушпи проектирани да ја носат сопствената тежина и сеизмичкото натоварување преку 3Д модели на висечки ланец добиени со метод на динамичка релаксација [3]. Со примена на ваквиот пристап се дефинира геометријата на двослојни меѓусебно поврзани лушпи. Ваквиот пристап претпоставува дека лушпите ќе бидат изградени од материјал кој не носи на затегнување (како што се неармиран бетон, камен, сидарија и земја). Добиените форми на лушпи се анализирани во однос на нивната дебелина, бидејќи одредени форми кои произлегуваат од процесот на пронаоѓање на формата бараат голема структурна длабочина, што може да доведе до дебели, а со тоа и тешки лушпи.

2. МЕТОДИ ЗА ПРОНОАЃАЊЕ НА ФОРМАТА НА ЛУШПИ

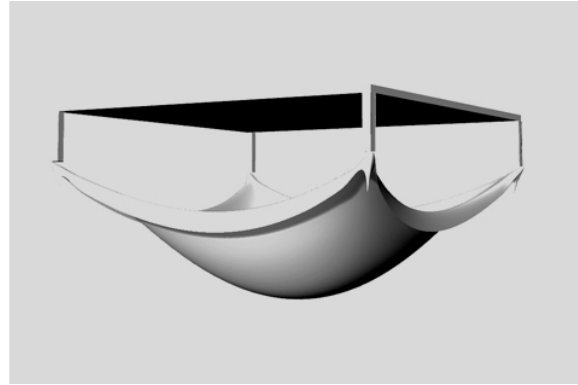
Користењето на физички модели за да се предвиди однесување на конструктивниот систем и да се пронајдат ефикасни конструктивни форми е една од најраните техники за пронаоѓање на формата што се користела интензивно низ историјата на архитектурата и градежните конструкции. Антони Гауди, Хајнц Ислер, Фреи Ото и многу пионери користеле физички модели за да извлекат ефикасни конструктивни форми за нивните дизајни [4]. Техниките за пронаоѓање на физичка форма се јасни и не бараат опширно претходно знаење од областа на градежното инженерство од страна на архитектот-проектант. Едноставен систем на висечки ланци или ткаенина може да претставува оптимална форма на лушпа под гравитациони оптоварувања [5]. Сепак, овие техники имаат бројни ограничувања. Пренесувањето на геометриските својства на добиената форма во размерот на градежен објект може да биде доста тешко и однесувањето на материјалот не секогаш може успешно да се симулира преку модел од многу помали димензии [6]. Правењето модели за сложени архитектонски концепти може да биде временски многу долго, и моделот да биде непрактичен за интеракција и промени во текот на процесот на дизајнот. Дополнително мерењето на внатрешните сили во елементите на конструкцијата и нивното соодветно проектирање е неизводливо без софистицирани мерни уреди.

Денес овие недостатоци на физичките методи за пронаоѓање на формата се надминати преку нивната имплементација во современите компјутерски софтвери за тродимензионално моделирање и симулација (Сл.3). Напредокот во компјутерската наука и инженерството им овозможи на инженерите и архитектите да развијат нумерички техники за да најдат ефикасни структурни форми во компјутерски потпомогната средина. Некои од развиените техники симулираат физичка трансформација на материјалите и наоѓаат оптимална геометрија на конструкцијата при дадените услови на натоварување. Современите компјутерски имплементирани методи за пронаоѓање на формата на лушпи можат да бидат класифицирани во три групи [7]:

- Методите на матрица на крутост се засноваат на користење на стандардни еластични и геометриски матрици на крутост. Овие методи се меѓу најстарите методи за пронаоѓање форми и се приспособени од анализите на конструкции (на пр. анализа на конечни елементи).
- Методите на геометриска крутост се независни од материјалот. Во овие методи, вклучувајќи го и Force Density Method (FDM), односот на силата и должината е основната

единица со која се прават пресметките. Подоцнежните методи често се претставени како генерализации или екстензии на FDM (на пр. Thrust Network Analysis - TNA).

- Методите на динамичка рамнотежа го решаваат проблемот на динамичка рамнотежа за да се дојде до решение за стабилна состојба, еквивалентно на статичка рамнотежа (на пр. Динамичка релаксација - DR и Particle-Spring –PS).



Сл. 3 Дигитална репродукција добиена со динамичка релаксација на физички модел на Хајнц Ислер

Методите на динамичка рамнотежа, како што се динамичка релаксација (DR) и системи со материјални точки и пружини (PS), решаваат проблем со динамичка рамнотежа за да се пронајде статичката рамнотежа. Симулацијата со систем на материјални точки и пружини (PS) наоѓа статичка рамнотежа со дефинирање на топологија за мрежа од точки во кои се распределува и концентрира масата, наречени материјални точки (јазли) и линеарни еластични пружини (линии) кои се врските помеѓу материјалните точки. Динамичката релаксација (DR) е нумеричка процедура која решава систем на нелинеарни равенки. Сумирано, техниката го следи движењето на конструкцијатата низ времето при определени товари и наоѓа статичка рамнотежа. Во овие методи на динамичка рамнотежа, геометријата може да се промени со прилагодување на масата, како и должината и крутоста на пружините.

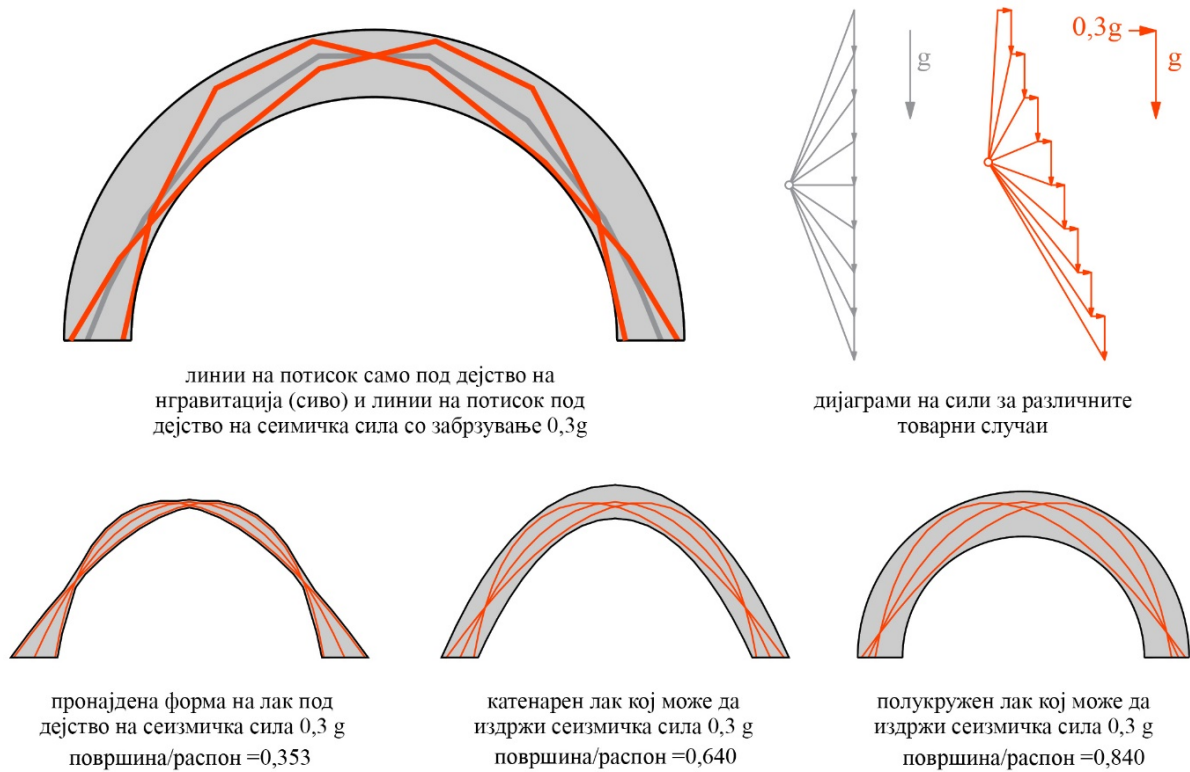
2.1. Потенцијал за примена на методите на пронаоѓање на форма при дејство на сеизмичка сила

Методите на динамичка релаксација и системи од пружини и материјални точки се темелат на Хуковиот принцип на висечки ланец [8]. Принципот е едноставен: доколку се преслика обликот на висечкиот ланец, кој по дефиниција е напрегнат на чисто затегнување, ќе се добие еквивалентен лак кој е напрегнат на чист притисок. Генерализирано, оваа значи дека формата што ја зазема ланецот го илустрира преносот на силите на притисок кај лакот

Овој принцип, може да се прошири надвор од формата на лакот и да се примени на лушпи со различни геометрии. Тридимензионалните форми се значително посложени поради можните повеќекратни патеки за пренос на силите. За разлика од дводимензионалниот лак, тродимензионалната лушпа може да носи широк опсег на различни оптоварувања преку дејство на мембрана без да се создаде напрегање на свиткување. Аналогно на висечкиот ланец на Хук за лакот, може да се создаде тродимензионален модел на вкрстени ланци за пронаоѓање на формата на лушпата.

Со цел методот да го примениме за дејство на сеизмичка сила, најпрво ќе го разгледаме лакот, За лак изложен на дејство и на вертикална гравитација и на хоризонтално сеизмичка сила, линијата на потисок треба да биде присутна во формата на самиот лак за да се избегне создавање на механизам на колапс. Пронаоѓањето на линијата на потисок, однос симулирање на физичкиот модел на висечки ланец компјутерски, за разлика од физичкиот модел, дозволува да биде земена

во предвид сила која дејствува во било кој правец. Во случајот на дводимензионалниот лак се зема во предвид сеизмичка сила која дејствува во рамнината на лакот, во двете спротивни насоки.

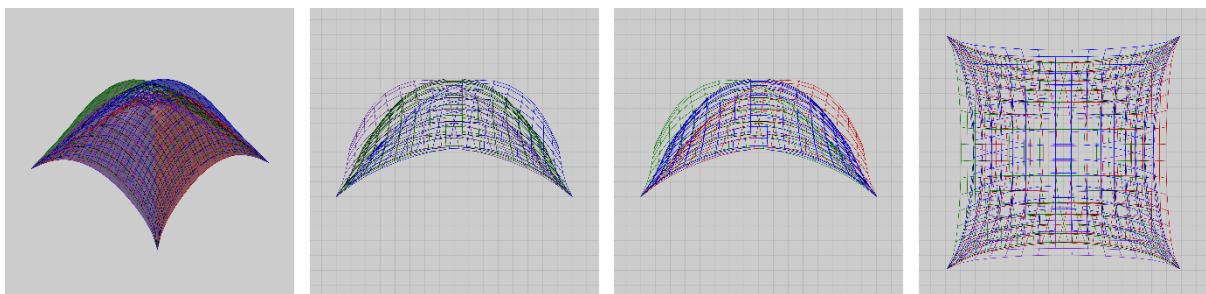


Сл. 4 Споредба на форма и дебелина на лаци под дејство на сеизмичка сила;

Од примерот (Сл. 4) можеме да заклучиме дека примената на методот за пронаоѓање на формата резултира со помала површина и следствено и помала маса на лакот. Истата аналогија може да биде применета и во третата димензија. Преку примената на моделот на инверзна висечка мрежа подложен на хоризонтално натоварување во пресметувач за динамична релаксација, се генерираат облици на лушпи за кои може да се осигура дека постои таква површина на за пренос на силите.

2.2. Примена на методот во Rhinoceros 3D

Со цел добивање на аневелопа на двојна лушпа, под дејство на сеизмичка сила најпрво се дефинираат поединечните лушпи (површини за пренос на силите) од различни товарни случаи. Во ова истражување земени се 5 различни товарни случаи: дејство само од сопствената тежина и 4 комбинации на дејство од сопствена тежина и хоризонтални сеизмички сили во двата ортогонални правци, во позитивната и негативната насока (Сл. 5).



Сл. 5 Поединечни лушпи добиени од различните насоки и правци на дејство на сеизмичка сила за квадратна основа потпрена на четирите агли

Алгоритмот за изведување на операцијата кој го користи Kangaroo е форма на динамична релаксација, нумерички метод базиран на решавање збир на нелинеарни равенки. Динамичката релаксација го следи движењето на конструкцијата низ времето при даденото натоварување, исто како методот на Верлет [9], се користи за интегрирање на вториот Њутнов закон низ времето [7]. Со комбинирање на сите сили кои дејствуваат на секоја точка се определува рамнотежата и постојаното поместување на сите точки преку неколку итерации се додека силите не се избалансираат и движењето не престане, односно се додека конструкцијата не застане во статичка рамнотежа. Ова се случува на динамичен начин, така што движењето ќе осцилира околу рамнотежата, а амортизацијата се користи за да се отстрани енергијата и да се обезбеди конвергенција. Во типичните инженерски апликации на динамичка релаксација, саканиот излез е конфигурација на статичка рамнотежа за зададени гранични услови.

Во разгледуваниот случај земена е квадратна основа, која во Rhinoceros е искористена како основа за генерирање на мрежа поделена на 10 x 10 полиња во Grasshopper. Дефинираната мрежа заедно со товарите се задаваат како цели на пресметувачот кој по пат на динамичка релаксација ги моделира лушпите. Процесот на моделирање на лушпите во целост се изведува во виртуелната околина на Grasshopper и претставува алгоритам создаден преку истоимениот визуелен програмски јазик. Вака добиените лушпи претставуваат влезни информации за алгоритмот кој како излезна информација ја генерира анвелопата на двојната лушпа. Имајќи предвид дека специфичните функции потребни за генерирање на анвелопата не се достапни во библиотеките на Grasshopper, програмиран е класичен алгоритам во програмскиот јазик Iron Python (верзија 2.7.3) Iron Python е интегриран во Grasshopper и директно се надоврзува на неговите визуелни алгоритми, со што се овозможува формирање на еден континуиран процес.

3. СПОРЕДБА НА ВЛИЈАНИЕ НА ПАРАМЕТРИ НА ДЕБЕЛИНАТА НА ЛУШПА

Од почетната квадратна основа може да се добие широк спектар на облици на лушпи. Параметрите со кој проектантот манипулира за да ја одреди конечната форма се позициите на лежиштата, крутоста на мрежата (висината) и формата на самата основа. Откако ќе се дефинираат формата на основата и позициите на лежиштата, треба да се одреди само еден параметар за да се добие конечна форма, крутоста на мрежата, која во суштина ја дефинира висината на лушпата. Вистинската вредност на овој фиктивен параметар на аксијална еластична крутост на елементот е од мала важност бидејќи студијата резултира со форми напрегнати само на притисок, независни од својствата на материјалот. Добиените лушпи се анализираат во однос на нивната дебелина, бидејќи одредени форми кои произлегуваат од процесот на пронаоѓање на формата бараат голема структурна длабочина, што може да доведе до дебели, а со тоа и тешки лушпи. Различните параметри во процесот на пронаоѓање на формата се разгледуваат и се проучува нивниот ефект врз конечната дебелина на лушпата.

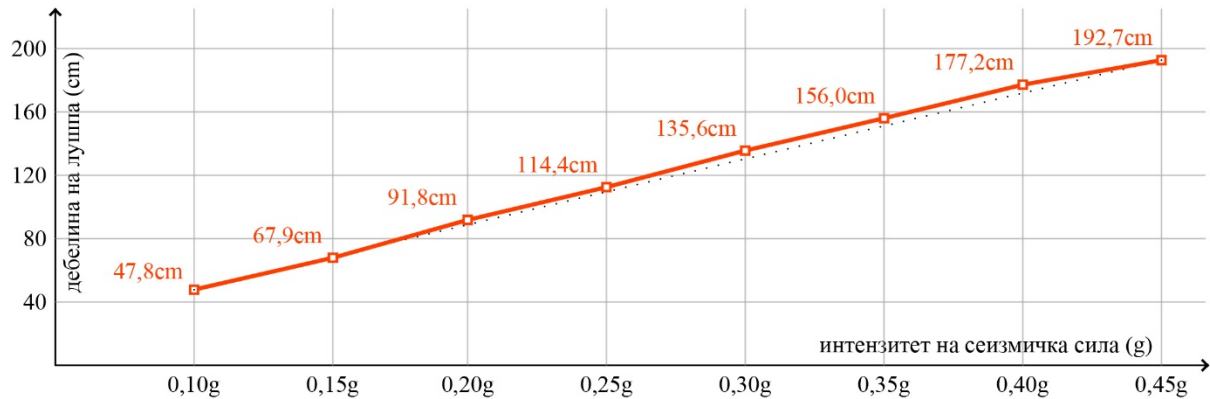
3.1. Интензитет на сеизмичка сила

Еден од главните параметри кој очекувано ја диктира дебелината на двослојната лушпа е интензитетот на сеизмичката сила. Зголемувањето на интензитетот на хоризонталната сила резултира со поголеми поместувања на точките во процесот на добивање на формата на поединечните лушпи и со тоа се зголемува потребната дебелина на двослојната лушпа.

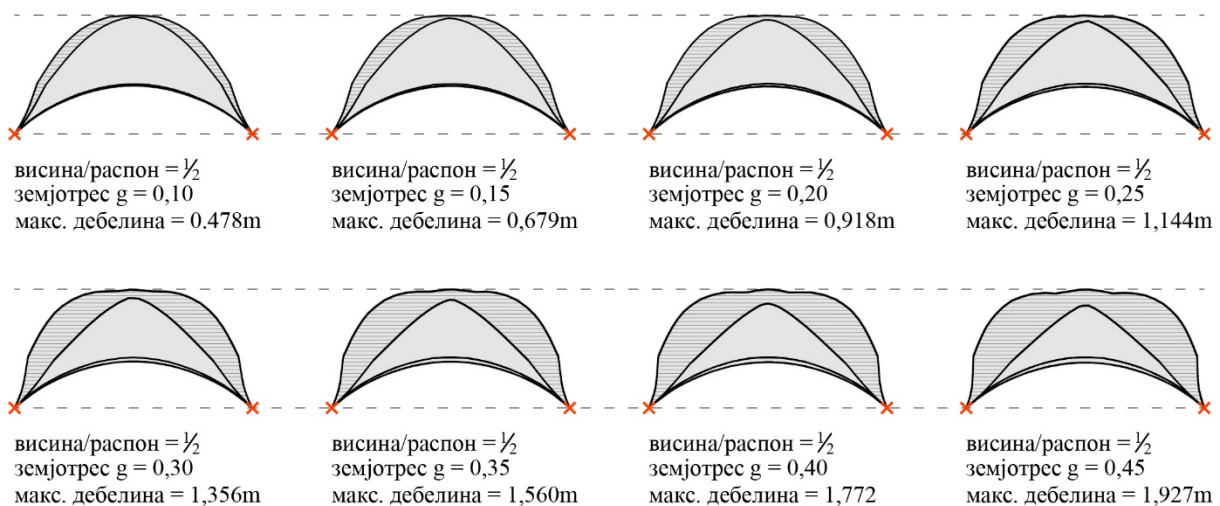
Во анализата направена е споредба на 8 различни интензитети на сеизмичка сила, најмалиот од 0,10g, најголемиот 0,45g; при тоа останатите параметри, како позицијата на лежиштата, висината и распонот на лушпата, се непроменети (Сл.6). Под максимална дебелина на лушпа се подразбира најголемото нормално растојание (нормално на тангентата на кривата во било која точка) помеѓу двата слоја. На графиконот на слика 6, кој ја бележи промената во дебелината на добиената лушпа, наспроти интензитетот на предвидената сеизмичка сила, забележано е дека постои речиси линеарна зависност помеѓу параметрите.

Може да се заклучи дека за секое зголемување на сеизмичката сила од 0,05g дебелината на соодветната лушпа се зголемува за околу 20cm (просечната вредност на промената е 20,7cm). Разгледувајќи ги соодносите на дебелината на лушпата наспроти распонот кој истата го премостува можеме да се заклучи дека ваквиот пристап генерира рационални форми за

оптоварувања со помал интензитет, за 0,1g дебелината е околу 1/25 од распонот. Но како што се зголемува интензитетот дебелината достигнува димензија која е преголема, за интензитет од 0,2g – 0,25g дебелината е околу 1/10 од распонот, додека за интензитет од 0,45g дебелината станува нерационална 1/5 од распонот, што резултира со претешка лушпа, чија маса е нерамномерно распределена. Треба да се нагласи дека толку големи сеизмички товари (0,45g) не се земаат во предвид при димензионирањето на поголемиот дел од конструкциите и истите се вклучени во анализата за да може да се утврди врската помеѓу параметрите



распон = 10m; h=5m



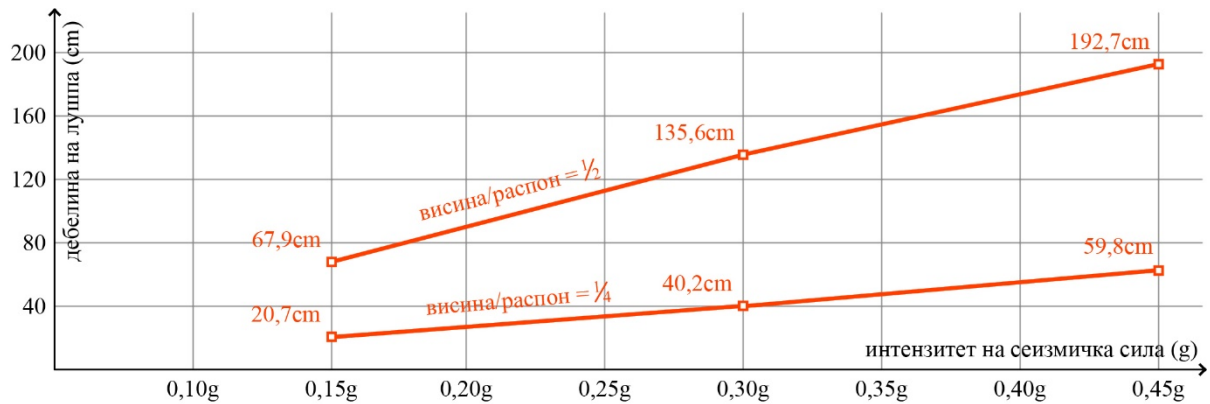
Сл. 6 Споредба на дебелината на лушпа во однос на промената во интензитетот на сеизмичката сила

3.2. Сооднос на распон наспроти висина

Во овој дел се споредени однесувањата на лушпи со различен сооднос на висината и распонот; лушпа со сооднос од 1/2 и плитка лушпа со сооднос од 1/4 (Сл. 7). Методот за пронаоѓање на форма успешно се применува и на двата случаи меѓутоа поголем потенцијал за примена има кај лушпи со поголеми висини во однос на распонот. Колку е поголема висината во однос на распонот, толку поранлива ќе биде лушпата на хоризонталните компоненти на натоварувањето од земјотресот, што налага и поголема потреба од поефикасна техниката за наоѓање формата, со цел да се постигне намалување на тежината и материјална ефикасност. Плитки лушпи суштински имаат и многу помалку шанси да бидат оштетени од хоризонталните забрзувања поради нивната речиси рамна геометрија, дебелината односно потребниот материјал сепак може да се намали во однос на лушпи со постојана дебелина.

Од анализата на графиконот може да се заклучи дека лушпи со помал сооднос на висина во однос на распон имаат помали дебелини, но и нивна дебелина помалку се зголемува со порастот на сеизмичката сила која се зема во предвид. Повторно има линска зависност помеѓу параметрите,

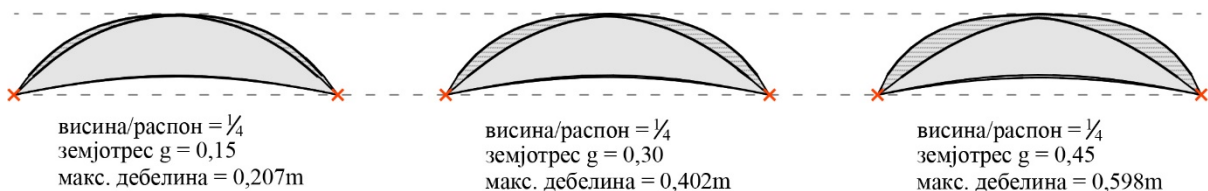
меѓутоа кај лушпите со сооднос на висина наспроти распон од $\frac{1}{4}$ за секое зголемување на сеизмичката сила од 0,15g дебелината на соодветната лушпа се зголемува за околу 20cm (просечната вредност на промената е 20,5cm), споредено со лушпите со сооднос на висина наспроти распон од $\frac{1}{2}$ кај кои за зголемување на дебелината од 20,7cm, беше потребно 3 пати помало зголемување на интензитетот на силата или 0,05g.



распон = 10m; h=5m



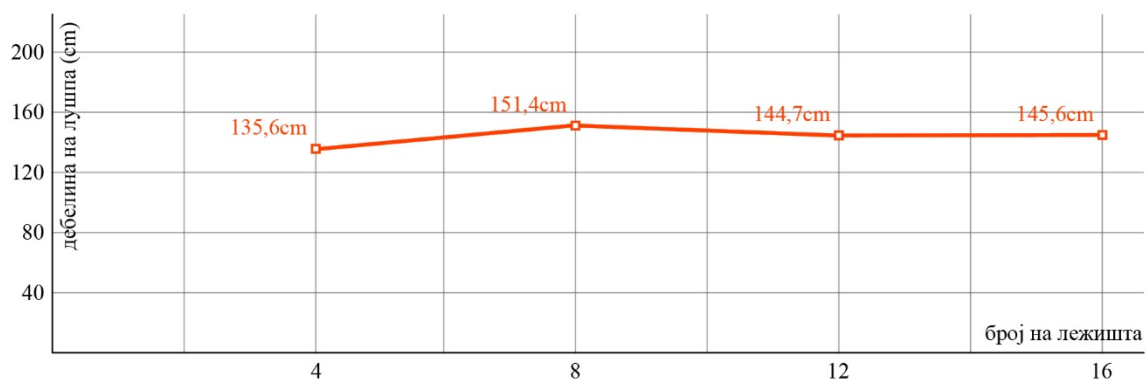
распон = 10m; h=2,5m



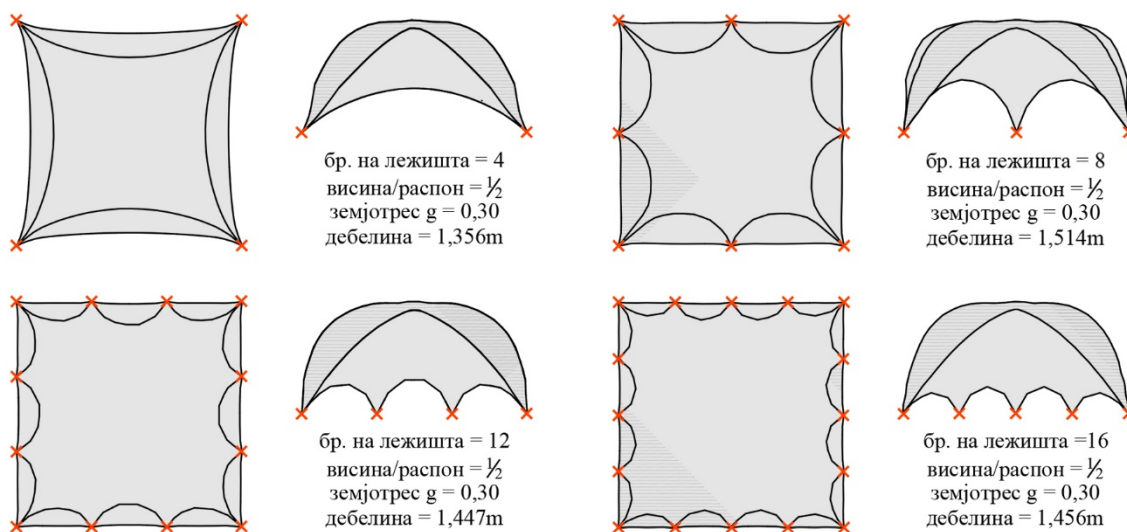
Сл. 7 Споредба на дебелината на лушпа во однос на соодносот на висината наспроти распонот

3.3. Број на лежишта

Последниот параметар кој е разгледан во оваа анализа е бројот на лежишта, односно условите за потпирање на лушпите (Сл.8). Разгледани се четири случаи во кој последователно се зголемува дефинираниот број на лежишта по периметарот на основата. При анализата на добиените податоци дека воведувањето на вакви дополнителни лежишта нема значајно влијание врз дебелината на лушпата, бидејќи истото не го намалува разгледуваниот распон. Воведувањето на лежишта во внатрешноста на основата, резултира со помали дебелини на лушпата, но истото мора да биде разгледувано и од аспект на архитектонскиот простор.



распон = 10m; h=5m



Сл. 8 Споредба на дебелината на лушпа во однос на бројот на лежишта

4. ЗАКЛУЧОК

Ваквите истражувања ја илустрираат потребата за размислувањето на статичките и конструктивните карактеристики на формата уште во раните фази на проектирањето. Методите што се илустрирани во овој труд, се наменети пред се за архитекти – проектанти и го намалуваат потребното време за изработка на проектот, овозможувајќи ефикасен процес преку кој брзо и едноставно се разгледуваат најразлични можни решенија на формата, кои секогаш ја имаат земено во предвид зададената форма на основата, дефинираните гранични услови и интензитетот на сеизмичка сила. Додадена вредност на вака добиените форми, за разлика од произволно проектираните, претставува многу подобрата основа за понатамошна разработка и конструктивна анализа, што значи помалку измени во процесот на проектирање и подобра контрола од самиот почеток.

Од анализираните параметри се изведени неколку заклучоци. При разгледувањето на промената во дебелината на добиената лушпа, наспроти интензитетот на предвидената сеизмичка сила, забележано е дека постои речиси линеарна зависност помеѓу параметрите, односно за секое зголемување на сеизмичката сила од 0,05g дебелината на соодветната лушпа се зголемува за околу 20cm. Лушпи со помал сооднос на висина во однос на распон имаат помали дебелини, но и нивна дебелина помалку се зголемува со порастот на сеизмичката сила која се зема во предвид. Повторно има линеарна зависност помеѓу параметрите, меѓутоа кај лушпите со сооднос на висина наспроти распон од $\frac{1}{4}$ за да се добие зголемување на дебелината од 20cm потребно е

зголемување на сеизмичката сила од 0,15g дебелината на соодветната лушпа се споредено со лушпите со сооднос на висина наспроти распон од $\frac{1}{2}$, беше потребно 3 пати помало зголемување на интензитетот на силата или 0,05g. Зголемувањето на бројот на лежишта по периметарот на основата нема значајно влијание врз дебелината на лушпата, бидејќи истото не го намалува разгледуваниот распон.

Иако ова истражување покажува дека отпорноста на земјотрес на лушпите може да биде под силно влијание на нивниот обликот, треба да се нагласи дека правилната форма сама по себе можеби не е доволна за време на одредени сеизмички настани. Конкретно, сеизмичките настани со силни вертикални компоненти или земјотреси со висока фреквенција, сè уште може да предизвикаат конструктивни оштетувања. Во случај земјотреси со висока фреквенција, поверојатно е да се случи резонанса, додека земјотреси со силни вертикални компоненти ќе предизвикаат поголеми моменти на свиткување бидејќи обвивката е подложена на големо дејство надвор од рамнината. На локации каде што може да се очекуваат вакви типови на сеизмички настани, треба да се земат предвид и други мерки за сеизмичка заштита надвор од обликот на лушпата.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. Adriaenssens, N. Brown, R. Lowinger, and J. Hernandez, “Structural Analysis of Reinforced Concrete Folded Hyperbolic Paraboloid: A Case Study of the Modern Miami Marine Stadium,” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 8, no. 4, pp. 498–516, Jul. 2014, doi: 10.1080/15583058.2012.694967.
- [2] T. Michiels, “Form finding of arches and shell structures subjected to seismic loading,” PhD Thesis, Princeton, New Haven, 2018.
- [3] T. Michiels, S. Adriaenssens, and J. J. Jorquera-Lucerga, “Parametric Study of Masonry Shells Form-Found for Seismic Loading,” *Journal IASS*, vol. 58, no. 4, pp. 267–275, Dec. 2017, doi: 10.20898/j.iass.2017.194.892.
- [4] F. Otto and B. Rasch, *Finding form: towards an architecture of the minimal*. Stuttgart: Axel Menges, 1995.
- [5] D. P. Billington, *The art of structural design: a Swiss legacy*. Princeton, N.J: Princeton University Art Museum, 2003.
- [6] B. Addis, “‘Toys that save millions’ - A history of using physical models in structural design,” *Structural Engineer*, vol. 91, pp. 12–27, Apr. 2013.
- [7] S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal, and C. Williams, Eds., *Shell structures for architecture: form finding and optimization*. London ; New York: Routledge/ Taylor & Francis Group, 2014.
- [8] R. Hooke, *A description of helioscopes, and some other instruments*. London: printed by T.R. for John Martyn, 1676. doi: 10.3931/e-rara-2171.
- [9] L. Verlet, “Computer ‘Experiments’ on Classical Fluids. I. Thermodynamical Properties of Lennard-Jones Molecules,” *Phys. Rev.*, vol. 159, no. 1, pp. 98–103, Jul. 1967, doi: 10.1103/PhysRev.159.98.