

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр.184/9-15 од 06.07.2018. године именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Зоране М. Петојевић, дипл.грађ.инж. под насловом:

**ОПТИМИЗАЦИЈА ГРАЂЕВИНСКИХ МЕРА У ЦИЉУ СМАЊЕЊА ПОТРЕБНЕ  
ЕНЕРГИЈЕ ЗА ГРЕЈАЊЕ У СТАМБЕНИМ ЗГРАДАМА**

После прегледа достављене дисертације Комисија подноси Научно-наставном већу Грађевинског факултета следећи

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. УВОД**

**1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације**

Зорана М. Петојевић, дипл.грађ.инж. пријавила је докторску дисертацију под насловом „Оптимизација грађевинских мера у циљу смањења потребне енергије за грејање у стамбеним зградама“, 08.05.2015. године. Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета бр.184/2 од 15.05.2015. године, одређена је Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под насловом „Оптимизација грађевинских мера у циљу смањења потребне енергије за грејање у стамбеним зградама“, у саставу проф. др Бранислав Ивковић, в. проф. др Ненад Иванишевић, в. проф. др Милош Ковачевић, в. проф. др Горан Тодоровић и проф. др Милан Тривунић (са Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду). Позитиван извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације усвојен је на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 18.06.2015. године (Одлука бр. 184/4-15 од 22.06.2015. године). За ментора је предложен др Горан Тодоровић, ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 30.06.2015. (Одлука бр. 61206-2949/2-16 од 30.06.2015. године) усвојило је предлог теме докторске дисертације кандидаткиње Зоране М. Петојевић.

Кандидаткиња је предала завршену докторску дисертацију Служби за студентска питања Грађевинског факултета 28.06.2018. године. Наставно-научно веће Грађевинског факултета на седници одржаној 05.07.2018. године именовало је Комисију (Одлука бр. 184/9-

15 од 06.07.2018.) за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:

1. др Горан Тодоровић, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет
2. др Бранислав Ивковић, редовни професор у пензији  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет
3. др Ненад Иванишевић, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет
4. др Радован Госпавић, доцент  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет
5. др Витомир Милановић, професор емеритус  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

## **1.2. Научна област дисертације**

Тема дисертације припада научном пољу техничко-технолошких наука и научној области *Грађевинарство*, за коју је матичан Грађевински факултет Универзитета у Београду. Уже научне области, према Статуту Грађевинског факултета, јесу *Грађевинска физика и енергетска ефикасност* и *Менаџмент и технологија грађења*.

## **1.3. Биографија кандидата**

Зорана М. Петојевић је рођена 21.06.1979. године у Прибоју. У Смедереву је завршила основну школу и гимназију природно-математичког смера. Грађевински факултет Универзитета у Београду уписала је школске 1998/99. године, а дипломирала је 2005. године на конструктивном смеру, са просечном оценом 8.05 и оценом 10 на дипломском раду. По завршетку студија у периоду од 2006. до 2008. године била је ангажована на међународним пројектима у Катару и Русији као инжењер плана и анализе.

Докторске студије је уписала крајем 2007. године. Све предвиђене испите положила је закључно са октобром 2014. године, са просечном оценом 9.88. Докторску дисертацију је пријавила у јуну 2015. године. У оквиру рада на докторској дисертацији, боравила је на стручном усавршавању у оквиру докторске школе, „Urban Physics Winter School“, у организацији Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich) у Швајцарској, Department of Architecture, Chair of Building Physics, у јануару 2015. године.

Као истраживач – сарадник учествовала је: (1) од јуна 2017. год. у научно-истраживачком пројекту Европске Уније – COST Action CA16114, под називом: „RESTORE – REthinking Sustainability TOWards a Regenerative Economy“; (2) у периоду 2014.-2017. год. у образовном програму Европске заједнице ERASMUS + под називом: „WIFI Academy for Facility Management (WIFI – FMA)“; и (3) у периоду 2008.-2011. год. у научно-технолошком

пројекту Министарства Републике Србије ТР – 16011, под називом: „Управљање реализацијом великих инвестиционих пројеката“.

У периоду од 2011.-2016. год. учествовала је у одржавању наставе, као и у организовању и евалуацији семинара из области управљања пројектима инфраструктуре, под називом: „Припрема методологије и тренинг модула за инфраструктурне пројекте“, у организацији Националне агенције за регионални развој Републике Србије.

У току израде докторске дисертације кандидаткиња Зорана М. Петојевић је објавила преко 20 научних радова из уже научне области Грађевинска физика и енергетска ефикасност и уже научне области Менаџмент и технологија грађења.

Говори, чита и пише енглески језик и говори руски језик. Удата је за супруга Јована и има двоје деце, Вукашина и Васју.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **2.1. Садржај дисертације**

Докторска дисертација Зоране М. Петојевић, под насловом „Оптимизација грађевинских мера у циљу смањења потребне енергије за грејање у стамбеним зградама“, има 289 страна, садржи 77 слика и 80 табела. На почетку дисертације дата је изјава захвалности, резиме са кључним речима, садржај и списак табела и графичких прилога. Дисертација је подељена на 7 поглавља:

1. Увод
2. Анализа литературе и теоријска разматрања
3. Експериментална истраживања преноса топлоте кроз термички омотач зграде
4. Примена вишекритеријумске анализе на избор грађевинских мера у циљу смањења топлотних губитака зграде
5. Закључак, ограничења и правци даљих истраживања
6. Библиографија
7. Прилози

Биографија кандидаткиње дата је на крају дисертације.

Дисертација је технички обликована према упутствима Сената Универзитета у Београду и посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије доктората. Садржи обавезна поглавља и обрасце: изјава о ауторству, изјава о истовестности електронске и штампане верзије и изјава о коришћењу.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У **уводном поглављу** дефинисан је предмет истраживања докторске дисертације и постављени су циљеви и задаци истраживања докторске дисертације.

У **другом поглављу**, на бази доступних светских и домаћих извора података, урађена је анализа стања и могућности за смањење потрошње енергије и дате су прогнозе потрошње енергије у сектору *Зградарство* у свету и код нас, са акцентом на подсектор *Домаћинства*. У овом поглављу дат је преглед модела вишекритеријумске оптимизације за решавање проблема енергетске оптимизације зграда који су развијени у свету у последњој деценији, као и преглед тренутно у свету развијених методологија за одређивање годишње потребне енергије за грејање у зградама.

У **трећем поглављу** приказани су резултати експерименталног истраживања карактеристика термичког омотача зграде спроведеног у реалним атмосферским условима. У поглављу је приказана осмишљена специфична експериментална техника за истовремено *in-situ* мерење топлотних флуkseва и температура на површинама термичког омотача зграде, према којој су спроведена мерења. Развијен је дискретизован физичко-математички модел нестационарног преноса топлоте кроз вишеслојне грађевинске елементе непознате структуре и термичких карактеристика и развијена је техника решавања термалног импулсног одзива (енгл. *Thermal Impulse Response, TIR*) система у временском домену на бази експерименталних вредности температуре и топлотних флуkseва. У оквиру овог поглавља детаљно је приказан поступак добијања аналитичког решења за истоимене функције, решавањем Фуријеове једначине провођења топлоте за раван вишеслојни зид познате структуре у нестационарним условима. Извршена је валидација TIR функција добијених на бази експерименталних података са оним добијеним аналитичким решењима. Такође урађено је поређење резултата које предвиђа модел са експерименталним резултатима добијеним на истом елементу који нису коришћени за формирање модела. На крају овог поглавља, приказана је практична примена експериментално добијених TIR функција кроз четири студије случаја. Приказане су следеће студије које се заснивају на моделу развијеном у дисертацији: (1) Одређивање свих 9 динамичких термичких параметара зида дефинисаних у Стандарду ISO:13786; (2) Одређивање површинских трансмисионих губитака топлоте кроз зид и одређивање акумулације топлоте у зиду; (3) Одређивање коефицијента прелаза топлоте; (4) Одређивање коефицијента пролаза топлоте.

У **четвртном поглављу** развијен је вишекритеријумски хијерархијски оптимизациони модел који избор грађевинских мера истовремено сагледава кроз четири критеријума (параметра): 1) Енергетски параметри; 2) Услови комфора; 3) Финансијски параметри и 4) Еколошки параметри, где је за квантификацију сваког параметра предложено 2-3 индикатора

(укупно 10 индикатора). Поред топлотних губитака кроз омотач зграде и вредности коефицијента пролаза топлоте, као до сада најчешће коришћених индикатора енергетске ефикасности, предложени модел подразумева увођење динамичких термичких карактеристика зида, који директно одсликавају топлотну акумулативност зида и ниво комфора у објекту. Предложени индикатори финансијских параметара су: 1) иницијална инвестициона средства, 2) укупни трошкови у фази експлоатације и 3) повратни период инвестиционих средстава, где је за прорачун наведених вредности узета у обзир вредност новца кроз време. Еколошки параметри су процењивани квантитативно, преко вредности за количину емисије угљен-диоксида и квалитативно, анализом и оценом уграђених материјала са аспекта екологије. Модел је тестиран у оквиру студије случаја за избор грађевинских мера при енергетској санацији фасадног зида од опеке  $d=38\text{cm}$ , без термоизолације, обострано малтерисан. Модел је проширен увођењем концепта супериорности појединих параметара и индикатора у циљу лакшег доласка до супериорног решења и оцене конзистентности истог. Додатно, урађена је и анализа осетљивости решења на промену цене енергента.

У **петом поглављу** сумирани су остварени резултати у дисертацији, дата су закључна разматрања, наведена су остварена научна достигнућа као и ограничења која су уведена у току истраживања и предложени правци даљих истраживања.

**Шесто поглавље** чини преглед коришћене литературе, укупно 185 референци, где је Зорана М. Петојевић у 14 референци коаутор.

**Седмо поглавље** чини седам прилога. У прилозима су дата сва аналитичка извођења везана за физички и математички модел експеримента, као и одговарајући рачунарски кодови креирани у програму MATLAB.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Унапређење енергетске ефикасности у зградарству једна је од најшире промовисаних мера за смањење експлоатације необновљивих извора енергије и ублажавање климатских промена кроз смањење емисије угљен-диоксида. Постављање глобалних краткорочних и дугорочних стратешких циљева у области енергетске ефикасности у зградарству је наметнуло научној заједници захтев за перманентним унапређењем инжењерског методолошког оквира за оцену енергетске ефикасности у зградарству. Данашњи научни тренд подразумева да се енергетска ефикасност посматра са становишта целоживотне анализе, и то не само са финансијског аспекта, као и да се фокус посматрања и оцена унапређења енергетске ефикасности у области зградарства, а и уопште, прошири са угла посматрања инвеститора на све заинтересоване стране за реализацију пројекта (енгл.

*Stakeholders*).

Данас у свету се улажу велики напори да се побољшају постојеће методе прорачуна потребне енергије, како би биле прецизније, а које ће узимати у обзир променљиве климатске услове у којима егзистирају зграде, као и природну деградацију материјала кроз време. Актуелна светска литература, када је у питању решавање оптимizacionих проблема енергетске санације термичког омотача зграде, предлаже развој свеобухватних модела који би енергетску ефикасност у зградарству сагледали кроз више аспеката.

Залагања усмерена ка развијању постојећих научних метода и модела, у оквиру ове дисертације се односе на: (1) унапређење метода за прорачун и процену топлотних губитака термичког омотача зграде у нестационарним условима преноса топлоте и (2) унапређење вишекритеријумских модела за избор и оцену енергетске ефикасности грађевинских мера примењених приликом изградње нових или енергетске санације постојећих зграда.

У првом делу дисертације развијен је нови нумерички приступ за предикцију топлотних губитака и акумулацију топлоте у конструкцији објекта у нестационарним условима и процену термичких и физичких карактеристика термичког омотача зграде, базиран на познавању TIR функција. Овај приступ представља оригинални научни допринос јер представља први покушај да се само на основу *in-situ* мерења, коришћењем технике деконволуције идентификују TIR функције за вишеслојан раван зид са непознатим термичким својствима и структуром у динамичком режиму.

У другом делу дисертације развијени оптимizacionи модел представља оригинални научни допринос у области оптимizacione енергетске ефикасности зграда јер проблем оптимizacione истовремено посматра кроз четири најзначајнија аспекта енергетске ефикасности: 1) економски аспект, 2) потрошњу енергије, 3) утицај на животну средину и 4) задовољење услова комфора. Већина модела, тренутно дефинисаних у светској литератури, третира само два од четири наведена аспекта. Поред наведеног, развијени модел уводи у разматрање динамичке термичке параметре зида који одсликавају понашање зида у реалним атмосферским условима, чиме је узета у разматрање топлотна акумулативност омотача зграде као и његова способност да обезбеди што боље услове топлотног комфора у климатски променљивим атмосферским условима какви владају у окружењу објекта.

### **3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу**

У изради ове докторске дисертације је коришћено 185 библиографских јединица. Већину референци чине радови објављени у водећим међународним часописима попут *Applied Energy*, *Energy and Buildings*, *Building and Environment*, *Energy*, *International Journal of Thermal Sciences*, *Applied Mathematical Modelling*, књиге референтних аутора из ове области, као и радови објављени на значајним међународним конференцијама. Највећи број

референци је новијег датума: 152 референце су публиковане након 2000. године, од чега 121 између 2010. и 2018. године.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Над експериментално прикупљеним подацима температура и топлотних флукса на површинама зида вршена је анализа спектралног садржаја сигнала применом Фуријеове анализе дискретних сигнала (енгл. *Discrete Fourier transform, DFT*), са циљем екстракције доминантних периода варијације температуре и флукса. Како би се елиминисале случајне грешке у мерењима (енгл. *outlier*), и уједно како би се постигло фитовање сигнала у деловима релативно високих квантационих грешака, примењена је метода локалне регресије (енгл. *Local Polynomial RegrESSion, LOESS*).

Експериментално мерене температуре и топлотни флукси су преко TIR функција повезани конволуционим интегралима, те је за одређивање ових функција вршена деконволуција. У првом делу истраживања у процесу естимације непознатих коефицијената импулсног одзива динамичког система коришћен је Винеров филтер (енгл. *Wiener filter*) коначног импулсног одзива (енгл. *Finit Impulse Respoce, FIR*), где су коефицијенти импулсног одзива система – TIR, изједначени са коефицијентима Винеровог филтра. У дисертацији је за естимацију Винерових коефицијената примењен критеријум минималног средњег квадратног одступања који у себи укључује познавање статистике другог реда (корелације) међу сигналама.

С обзиром да решавање деконволуције у термици припада типу инверзног *ill-posed* проблема, тј. решење садржи висок ниво шума, у стандардни поступак решавања тј. минимизацију средњег квадратног одступања грешке (резидуална норма) уведен је поступак Тикхонове регуларизације (енгл. *Tikhonov regularization*), који подразумева увођење поред резидуалне норме и тзв. регуларизациону норму, након чега се врши истовремена минимизација обе норме. Параметар који фигурише у регуларизационој норми је одређен методом *L*-криве. Генерализована метода сингуларне декомпозиције матрица је коришћена за истовремену минимизацију норми.

Дискретизација конволуционих интеграла је извршена коришћењем најтачнијег метода за нумеричку интеграцију, Гаус-Лежендрове (енгл. *Gauss-Legendre, GL*) квадратуре. С обзиром да су интерполацијске тачке у GL квадратури најгушће на крајевима интервала интеграције, примена наведене методе је омогућила израчунавање брзих промена TIR функција када  $t \rightarrow 0$ , где функције имају изражен експоненцијални опадајући карактер.

За решавање проблема избора енергетски оптималних грађевинских мера при санацији фасадног зида изабрана је Метода аналитичких хијерархијских процеса (енгл. *Analitical Herahical Process, AHP*). Метода је базирана на принципима вишекритеријумског

компромисног рангирања алтернативних решења, где се из једне расположиве групе алтернатива бира најповољнија, а на основу дефинисаног броја критеријума за одлучивање. АНР метода спада у једну од најпознатијих метода научне анализе сценарија и доношења одлука конзистентним вредновањем хијерархија чије елементе чине циљеви, критеријуми, подкритеријуми и алтернативе.

Све коришћене методе истраживања у оквиру дисертације су актуелне и у потпуности примерене за примену у предметном истраживању.

### **3.4. Применљивост остварених резултата**

Практична примена предложеног новог нумеричког приступа за прорачун TIR функција, у сврху оцене енергетских перформанси и оцене енергетске ефикасности зграде, је приказана кроз процену свих динамичких термичких карактеристика зида, процену кумулативних топлотних губитака зида, акумулацију топлоте у зиду, одређивање коефицијената прелаза топлоте са спољашње и унутрашње стране зида и израчунавање коефицијента пролаза топлоте.

Развијени оптимизациони модел је подједнако применљив и при доношењу одлука везаних за изградњу нових енергетски ефикасних објеката као и при санацији постојећих објеката. Предложени модел, даје конкретне и практичне информације, као што су висина иницијалних инвестиционих средстава, повратни период инвестиције и енергетске карактеристике објекта, које помажу при доношењу одлуке о томе која је грађевинска мера при енергетској санацији или изградњи новог објекта оптимална, али и пружа значајне информације важне за процес управљања објектом у фази експлоатације. Такве информације су: операциони трошкови у периоду експлоатације, трошкови одржавања, повећање услова комфора, продужење експлоатационог века објекта и очување вредности некретнине.

### **3.5. Оцена достигнути способности кандидата за самостални научни рад**

Кандидаткиња се у оквиру своје докторске дисертације прво бавила изучавањем доступне референтне литературе и показала је способност критичког сагледавања претходних истраживања и њихових резултата везаних за предмет истраживања. Затим се бавила планирањем, припремањем и спровођењем експерименталног истраживања, анализом добијених података, процесуирањем и валидацијом. Кандидаткиња је развила физички модел зида и технику решавања термичког проблема у временском домену путем деконволуције као и практичну примену модела. Систематичним приступом постављеном мултидисциплинарном проблему, користећи и повезујући знања из више научних области, Зорана М. Петојевић је успешно решила постављене задатке и доказала да поседује способност за самостални научно-истраживачки рад.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације Зоране М. Петојевић остварени су следећи научни доприноси.

1. Предложен је нови приступ за процену преноса топлоте кроз грађевинске елементе и оцену топлотног комфора у зградама који се заснива на естимацији функција Термалног импулсног одзива (TIR) зида са непознатим термичким својствима, структуром и димензијама.
2. Развијен је нови нумерички поступак за добијање TIR функција зида са непознатим термичким својствима, структуром и димензијама, заснован на: (1) подацима из *in-situ* експерименталних мерења површинских температура и топлотних флуксева на унутрашњој и спољашњој страни зида у динамичком режиму и (2) коришћењу технике деконволуције и методологије уклањања шума из естимованих TIR функција базиране на увођењу поступка Тикхонове регуларизације у прорачун.
3. Осмишљена је специфична експериментална техника за истовремено *in-situ* мерење топлотних флуксева и температура на површинама термичког омотача зграде.
4. Изведено је аналитичко решење термалних трансфер функција у временском домену за раван вишеслојни зид, са временски променљивим граничним условима температуре и топлотног флукса на површинама зида.
5. У дисертацији су изведене формуле за добијање унутрашње и спољашње термичке адмитансе и одговарајуће периодичне трансмитансе у функцији TIR функција представљених у комплексном домену.
6. Развијена је методологија примене TIR функција на израчунавање свих 9 динамичких термичких параметра зида.
7. Развијен је оригинални хијерархијски аналитички оптимизациони модел за избор грађевинских мера у циљу смањења потрошње енергије за грејање у стамбеним зградама, који процес оптимизације истовремено сагледава кроз четири параметра: 1) Енергетски параметри; 2) Услови комфора; 3) Финансијски параметри и 4) Еколошки параметри.
8. Имајући у виду променљиве климатске услове у којима егзистирају зграде и њихов утицај на унутрашњи комфор као и способност омотача зграде да акумулира топлоту, у оквиру оптимизационог модела предложено је увођење динамичких термичких карактеристика зида (декремент фактора и временског кашњења амплитуде температуре) као индикатора за оцену услова топлотног комфора који се могу постићи у објекту.

## 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У дисертацији је приказан оригиналан поступак добијања TIR функција које се користе за карактеризацију топлотних својстава зида. Оригиналноост приступа се огледа у коришћењу само *in-situ* експерименталних мерења температура и топлотног флукса, без употребе података о физичким и термичким карактеристикама зида. Према постојећим важећим стандардима из ове области, за одређивање топлотних својстава зидова неопходно је познавање ових карактеристика. Дакле, предност развијене методе је та, што се приликом процене топлотних перформанси грађевинских компоненти не захтева претходно познавање њиховог састава, што је предност ако се има у виду да материјали временом деградирају и њихове физичке карактеристике могу значајно да одступају од пројектованих вредности. Такође, постоје бројни објекти са непостојећом и некомплетном техничком документацијом за које није могућ прорачун топлотних перформанси на бази важећих стандарда.

У дисертацији је, на основу изложених резултата израчунавања на примеру зида на којем су вршена мерења, показано да је познавајући TIR функције могуће прецизно предвидети све динамичке термичке параметре зида, коефицијент пролаза топлоте, коефицијенте прелаза топлоте са обе стране зида, као и да је могуће вршити предикцију топлотних губитака зида и акумулацију топлоте у зиду за нове спољашње климатске и унутрашње пројектоване услове.

Добијени резултати у оквиру дисертације који потврђују предходно тврђење су следећи. Максимално релативно одступање при естимацији динамичких термичких карактеристика зида, у односу на вредности добијене на основу Стандарда ISO13786 износи 7.35%, осим за вредности декремент фактора и термичке трансмитансе на фреквенцији 1/дан, када је релативна грешка 29.98%. Средња апсолутна грешка у процентима (енгл. *Mean Absolute Deviation Percent, MADP*) приликом предикција топлотних губитака за унутрашњу и спољну страну зида и акумулације топлоте у односу на мерене вредности износи 16.4%, 8.77% и 6.11%, респективно. Релативна грешка за естимацију кондуктивног дела коефицијента пролаза топлоте у односу на вредност према Стандарду ISO6946 је између 0.48% и 2.48%. Слагање између вредности за естимоване коефицијенте прелаза топлоте са обе стране зида у односу на вредности добијене на основу мерења је веома високо, са релативном грешком мањом од 4% за споља и 15% за коефицијент прелаза топлоте са унутрашње стране.

Примена модела за добијање TIR функција захтева да се мерења спроведу на начин прописан у стандарду којим се прецизира техника мерења топлотних флукса и температуре са циљем избегавања утицаја линијских и тачкастих губитака топлоте у зиду.

У дисертацији развијени хијерархијски оптимизациони модел за избор енергетски

оптималних грађевинских мера при санацији фасадног зида, проблем енергетске санације истовремено сагледава са више различитих аспеката: економског, аспекта потрошње енергије, утицаја на животну средину и задовољења услова комфора.

На основу резултата добијених тестирањем развијеног оптимизационог модела показано је да модел на свеобухватан начин описује оптимизациони проблем енергетске санације фасадног зида и да даје конзистентно решење, а сам редослед ранжираних алтернатива директно зависи од тежинских фактора који се задају критеријумима.

Резултати показују да је рангирање алтернатива најосетљивије на промену тежинског фактора за критеријум финансијски параметри, док фаворизовање осталих критеријума не утиче битно на рангирање најповољнијих алтернатива, већ само на мање измене параметра који одражава релативну важност алтернативе у скупу алтернатива. Задавање једнаких тежина свим критеријумима резултира тиме да су на водећим позицијама алтернативе које су са становишта употребе ресурса (енергије за грејање) и екологије најбоље алтернативе и које подразумевају уградњу најсавременијих термоизолационих материјала, и ако оне за собом повлаче највећа иницијална финансијска средства. Истицање важности еколошког, или енергетског, или параметара који одсликавају услове комфора, само повећава релативну важност ових алтернатива. Истицањем важности само финансијских параметара, а нарочито иницијалних инвестиционих средстава, ове алтернативе бивају брзо потиснуте алтернативама које у себи садрже конвенцијалне материјале чије су цене знатно ниже. Анализа осетљивости решења на промену цене енергента, показује да повећање цене не утиче на рангирање алтернатива.

Ограничења развијеног модела су следећа: (1) критеријумске функције су дефинисане само за алтернативе које у себи садрже грађевинске мере те би проширење овог модела, у смислу решавања проблема избора различитих врста енергетски ефикасних мера, нпр. грађевинских и мера везаних за техничке системе у згради, захтевало извесне модификације у начину прорачуна критеријумских функција и/или модификације самог скупа критеријума и (2) модел не дефинише граничне вредности за поједине критеријуме и подкритеријуме, што може проузроковати да скуп допустивих решења буде обиман. Ово ограничење се лако може превазићи узимањем у обзир ограничења које уводи релевантна законска регулатива, или постављањем одређених функционалних захтева, или економских ограничења.

#### **4.3. Верификација научних доприноса**

Свој научно истраживачки рад у току израде дисертације, Зорана М. Петојевић је верификовала објављивањем већег броја радова у часописима и саопштењима на конференцијама међународног и домаћег значаја. Посебно истичемо рад објављен у једном од водећих светских часописа из области оптималног коришћења енергије, *Applied Energy*.

### Категорија M21a:

1. **Z. Petojević**, R. Gospavić, G. Todorović, "Estimation of Thermal Impulse Response of a Multi-Layer Building Wall through In-Situ Experimental Measurements in a Dynamic Regime with Applications," *Applied Energy*, vol. 228, no. C, pp. 468-486, 2018, DOI:10.1016/j.apenergy.2018.06.083.

### Категорија M33:

1. M. Mirković Marjanović, **Z. Petojević**, R. Gospavić, G. Todorović, "In Situ Experimental Determination of the Heat Transmittance of a Building Wall", *Proceedings of 6th International conference Contemporary Achievements in Civil Engineering*, p. 281-289, Subotica, April 2018, ISBN 978-86-80297-73-6.
2. **Z. Petojević**, P. Mitković, N. Mirković, J. Milovanović, B. Ninić, M. Mirković, D. Šumarac, R. Gospavić, G. Todorović, "Estimation of temperature transfer function in facade wall heat transport", *Proceedings of 5th International conference Contemporary Achievements in Civil Engineering*, p. 739-748, Subotica, April 2017, ISBN 978-86-80297-68-2.
3. J. Josipović, M. Aškrabić, V. Kuzmanović, M. Mirković, **Z. Petojević**, R. Gospavić, G. Todorović, "Temperature variation of "Bajina Bašta" between 1995-2015", *Proceedings of 4th International conference contemporary achievements in civil engineering 2016*, Subotica, p. 689-698, ISBN 978-86-80297-63-7
4. **Z. Petojević**, M. Petronijević, M. Mirković, I. Balić, R. Gospavić, G. Todorović, "Digital signal processing of the forty-year mean daily temperature at Belgrade", *Proceedings of 4th International conference contemporary achievements in civil engineering 2016*, Subotica, p. 181-190, ISBN 978-86-80297-63-7,
5. M. Mirković, **Z. Petojević**, R. Gospavić, G. Todorović, "CFD simulation of thermal performances of building structure with expanded polystyrene (EPS) as thermal insulation", *Conference IcETRAN 2016*, Zlatibor, ISBN 978-86-7466-618-0,
6. **Petojević, Z.**, Mirković, M., Balić, I., Gospavić, R., Todorović, G., "Estimation of the Temperature Transfer Function of a Building Wall Based on Measurement Data", *Civil Engineering - Science and Practice, 6th International Conference*, Zabljak, Montenegro, 2016. p. 1171-1178, ISBN 978-86-82707-30-1
7. M. Mirković, M. Petrović, **Z. Petojević**, G. Todorović, R. Gospavić, "The Impact of the Daily Temperatures Variation on Dynamic Parameters of Thermal Envelope", *Civil Engineering - Science and Practice 6th International Conference*, Zabljak, Montenegro, 2016. p. 1155-1162, ISBN 978-86-82707-30-1
8. M. Mirković, N. Simić, **Z. Petojević**, G. Todorović, R. Gospavić, "Dynamic Thermal Characteristics and Performance of Various Building Facade Walls", *Civil Engineering -*

*Science and Practice, 6th International Conference, Zabljak, Montenegro, 2016. p. 1147-1154, ISBN 978-86-82707-30-1*

9. **Z. Petojević**, M. Mirković, Ž. Jovanovic, R. Gospavić, G. Todorović, "Determination of dynamic thermal characteristics of a building wall", *17th International Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia*, University of Nis, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, Sokobanja, Serbia, Oct. 2015. ISBN 978-86-6055-076-9
10. M. Mirković, **Z. Petojević**, G. Todorović, R. Gospavić, Ž. Jovanović, "Experimental determination of dynamic thermal parameters of the building wall by the transfer matrix method", *National scientific conference, Installations & Architecture*, Beograd, 2015. p. 107-112, ISBN 978-86-7924-154-2
11. **Z. Petojević**, V. Radojević, M. Mikić M. Petronijević, "Energy efficiency of buildings in Serbia and the application of infrared thermography in buildings", *International Scientific Conference: Construction – Science and Practice*, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, Zabljak, Montenegro, Feb. 2014.
12. M. Mikić, **Z. Petojević**, N. Ivanišević, "Critical Risks in Serbian Infrastructure Projects", *Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference: "Organization, Technology and Management in Construction"*, Dubrovnik, Croatia, September 2013, pp. 296-307, ISBN 978-953-7686-04-8.
13. B. Ivkovic, **Z. Petojevic**, M. Mikic, "Methodology of Design Organization Structure for Management Team at a Large Project", *International Scientific Conference: Construction – Science and Practice*, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, Zabljak, Montenegro, Feb. 2010. str. 1715-1720, ISBN 978-86-82707-19-6.

#### **Категорија М34:**

1. **Z. Petojević**, M. Mirković, Ž. Jovanovic, R. Gospavić, G. Todorović, "Determination of the temperature transfer function of building constructions based on measurement data", *The 20<sup>th</sup> Anniversary YUCOMAT Conference*, Materials Research Society of Serbia, Herceg Novi, Montenegro, Sep. 2015. Book conference pp.16
2. **Z. Petojevic**, Z. Naunovic, "The Application of Recycled Plastic Insulation Materials in Constructions – Serbian Prospects", *International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, Athens, Greek, June 2012

#### **Категорија М63:**

1. S. Pavlovic, M. Stjepanovic, B. Lazarevic, **Z. Petojević**, "Post project analysis of reconstruction and modernization of the railway Belgrade-Nis, section Gilje-Cuprija-Paracin", *Project Society Conference 2015*, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia, May. 2015.

2. S. Radulović, **Z. Petojević**, "Facility Management in Serbia today and perspectives of its development", *Project Society Conference 2015*, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia, May. 2015.
3. K. Kariklic, M. Živanović, P. Jovanovic, **Z. Petojević**, "The organizational aspects of the city road Sv. Sava reconstruction in Zvornik", *Project Society Conference 2015*, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia, May. 2015.
4. **Z. Petojevic**, M. Mikic, B. Ivkovic, "Standard in project management - ANSI/PMI 99-001-2008 brief presentation", *International Project Management Conference: Meeting the Economy of Knowledge – Managing Knowledge Projects*, YUPMA, Zlatibor, Serbia, May.2012. ISBN: 978-86-86385-09-03.
5. M. Mikić, **Z. Petojević**, B. Ivković, N. Ivanišević, "Project Risk Management and BIM Application in Serbia – Survey Results", *Proceedings of the III International Congress: "Installation and architecture"*, University of Belgrade, Faculty of Architecture, Belgrade, 2010, pp. 117-123, ISBN 978-86-7924-086-6.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Предмет истраживања у овој дисертацији је била енергетска ефикасност у стамбеним зградама у делу који се односи на смањење потребне енергије за грејање. У дисертацији је приказан нови приступ за одређивање свих динамичких термичких карактеристика омотача зграде путем једног сета мерења, којим су одређене топлотне трансфер функције зида на бази којих је могућа предикција топлотних губитака и акумулације топлоте у нестационарним условима, што представља оригинални научни допринос.

Могућност унапређења енергетске ефикасности у стамбеним зградама је анализирана коришћењем у дисертацији развијеног оптимизационог модела који смањење укупне потребне енергије за грејање у стамбеним зградама сагледава кроз смањење топлотних губитака кроз нетранспарентни део термичког омотача зграде у зимским условима узимајући у обзир динамичке термичке карактеристике омотача. Предложени модел представља оригинални научни допринос у области оптимизације енергетске ефикасности зграда јер проблем оптимизације истовремено посматра кроз четири најзначајнија аспекта: 1) економски аспект, 2) потрошњу енергије, 3) утицај на животну средину и 4) задовољење услова комфора, док се у светској литератури предметни проблем најчешће посматра само кроз два аспекта уз занемаривање динамичких термичких карактеристика објекта.

На основу анализе докторске дисертације, примењених научних метода, остварених резултата истраживања и научних доприноса Комисија сматра да урађена докторска дисертација под насловом: „Оптимизација грађевинских мера у циљу смањења потребне

енергије за грејање у стамбеним зградама“, кандидаткиње Зоране М. Петојевић дипл.грађ.инж, представља оригиналан и вредан научни допринос у области грађевинске физике и енергетске ефикасности и области менаџмента и технологије грађења. Дисертација поседује све елементе оригиналног научног рада и испуњава све захтеване критеријуме. Кандидаткиња је током израде дисертације показала способност за самостално бављење научно-истраживачким радом. Имајући у виду све до сада наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да прихвати овај Извештај, изложи га на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 11.07.2018.

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....  
др Горан Тодоровић, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....  
др Бранислав Ивковић, редовни професор у пензији  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....  
др Ненад Иванишевић, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....  
др Радован Госпавић, доцент  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....  
др Витомир Милановић, професор емеритус  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет