

ПРИМЉЕНО: 14 MAJ 2020			
Орг. јед	Број	Прилог	Вредност
	55		

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
Грађевинског факултета
Универзитета у Београду

Предмет: Покретање поступка за верификацију техничког решења

Према Правилнику о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача (Сл. Гласник РС, бр. 24/2016, 21/2017 и 38/2017), обраћамо се Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду са молбом да покрене поступак за верификацију техничког решења категорије М81 под називом:

Софтверско - хардверско решење за естимацију термалног импулног одзива вишеслојног равног зида

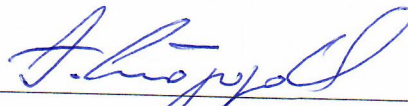
М81 – Техничко софтверско и хардверско решење које задовољава критеријум отвореног извора публиковано у часопису категорије **М21а**

Аутори решења: в.проф. др Горан Тодоровић, дипл.ел.инж., доц. др Радован Госпавић, дипл.ел.инж. и доц. др Зорана Петојевић, дипл.грађ.инж. (сви са Грађевинског факултета у Београду).

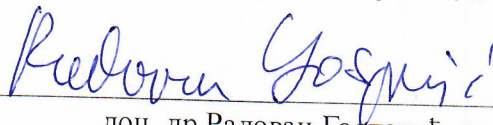
У прилогу достављамо потребну документацију.

14.Мај, 2020.
Београд

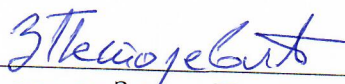
Подносиоци захтева:



в.проф. др Горан Тодоровић, дипл.ел.инж



доц. др Радован Госпавић, дипл.ел.инж.



доц. др Зорана Петојевић, дипл.грађ.инж.

ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ

M81 – Техничко софтверско и хардверско решење које задовољава критеријум отвореног извора
публиковано у часопису категорије **M21a (IF = 8.4)**

Софтверско - хардверско решење за естимацију термалног импулсног одзива вишеслојног равног зида

АУТОРИ:

В.проф. др Горан Тодоровић, дипл.ел.инж., Универзитет у Београду, Грађевински
факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Доц. др Радован Госпавић, дипл.ел.инж., Универзитет у Београду, Грађевински
факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Доц. др Зорана Петојевић, дипл.грађ.инж., Универзитет у Београду, Грађевински
факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Београд, мај 2020. године

1) АУТОРИ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

В.проф. др Горан Тодоровић, дипл.ел.инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Доц. др Радован Госпавић, дипл.ел.инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Доц. др Зорана Петојевић, дипл.грађ.инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

2) НАЗИВ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Софтверско - хардверско решење за естимацију термалног импулсног одзива вишеслојног равног зида

3) КЉУЧНЕ РЕЧИ

термални импулсни одзив; динамичка термална карактеристика; Тихонова регуларизација; вишеслојни раван зид; Енергетска ефикасност

4) ЗА КОГА ЈЕ РЕШЕЊЕ РАЂЕНО

Техничко софтверско и хардверско решење које задовољава критеријум отвореног извора публикувано у часопису категорије **M21a** : **Zorana Petojević, Radovan Gospavić , Goran 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 228 (2018) 468–486, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.083>**

Техничко софтверско и хардверско решење је рађено у склопу пројекта: "Побољшање Енергетске Ефикасаности зграда у Србији и избор материјала за њихову сертификацију", бр: **III42012** финансираног од стране владе Републике Србије

5) ГОДИНА КАДА ЈЕ РЕШЕЊЕ КОМПЛЕТИРАНО

2018. година

6) ГОДИНА КАДА ЈЕ РЕШЕЊЕ ПОЧЕЛО ДА ПРИМЕЊУЈЕ И ОД КОГА

2018. година

7) ОБЛАСТ И НАУЧНА ДИСЦИПЛИНА НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Грађевинарство, ужа научна област Грађевинска физика – енергетска ефикасност и термика грађевинских објеката

8) ПРОБЛЕМ КОЈИ СЕ ТЕХНИЧКИМ РЕШЕЊЕМ РЕШАВА

Термалне карактеристике вишеслојних компоненти грађевинских структура имају пресудан утицај на енергетске и термалне перформансе омотача грађевинског објекта који се налазе под утицајем реалних спољашњих динамичких фактора као што су температурске варијације, влага, соларна радијација, правац и брзина ветар итд. Термални импулсни одзив (ТИО) грађевинске преграде представља термалне одзиве у виду термичких флуксева који се јављају на повшинама са обе стране (које се дефинишу као унутрашња и спољашња страна или улаз и излаз система респективно) а који су последица температурне побуде у виду Диракових импулса на површинама разматране структуре. Диракови импулси су дефинисани као веома кратке (теоретски бесконачно кратки) побуде великог интензитета чији је интеграл у времену или површина испод импулса константна и једнака јединичној вредности, односно не зависи од дужине трајања импулса.

У овом случају ми посматрамо вишеслојну планарну структуру грађевинске преграде коју моделујемо као временски инваријантан линеаран динамички систем са два улаза и излаза где површинске температуре и флуксеви представљају улазе и излазе система респективно.

Познавањем ТИО функција могуће је у потпуности одредити све термалне карактеристике грађевинских преграда у динамичком и статичком режиму [1]. Једна од практичних примена функција ТИО састоји се у проналажењу непознатих топлотних флуксева на површинама анализираних структуре коришћењем познатих површинских температурских варијација. Имајући у виду да су мерења температуре у пракси знатно једоставнија од мерења термалног флукса, овакав приступ базиран на функцијама ТИО, омогућава одређивање топлотних губитака грађевинских објекта коришћењем само мерењем површинских температура што знатно олакшава и упрошћава целу процедуру процене енергетске ефикасности објекта [1].

Један од могућих прилаза при проналажењу ТИО вишеслојних планарних преграда је коришћење њихових познатих геометријских и топлотних карактеристика и познатих аналитичких израза за ТИО у фреквентном домену. У овом случају ТИО се проналазе коришћењем конволуционог интеграла.

Недостатак овог прилаза се састоји у томе што су термални параметри грађевинских материјала подложни значајним променама током дугог периода експлоатације услед променљивих спољашњих утицаја као што су температурске варијације, утицаја влаге, соларне радијације, ветра као и постојање сезонских варијације климе. Прецизне термичке и физичке карактеристике преграда које узимају у обзир ове промене обично нису доступне.

Алтернативни прилаз овом проблему подразумева коришћење „in-situ“ мерења површинских температура и термалних флуксева са обе стране грађевинске преграде у динамичком режиму током довољно дугог временског периода, која би омогућила добијање ТИО из ових улазних мерних података уз коришћење одговарајућих нумеричких процедура. Овако добијене функције ТИО би одговарале актуелним термалним параметрима материјала унутар посматране структуре [1]. Површинске температуре и флуксеви су у овом случају повезани конволуционим интегралом у временском домену, где ТИО функције играју улогу преносних функција система [1]. Естимација ТИО из улазних мерних података је базирана на методу најмањих квадрата („least square estimator“). Пошто је одговарајући линеарни систем једначина у свим практичним ситуацијама слабо условљен („ill-posed“), неопходна је примена неких од техника регуларизације приликом њиховог решавања. Да би се отклонио енермно велики шум у нумеричким решењима за ТИО функције ми користимо једнопараметарску Тихонов регуларизациону метода вишег реда. Оптимални регуларизациони параметар ове методе је одређен методом „L“ криве („L-curve approach“) [1].

Основна предност коришћене естимационе процедуре је да се спроводи у временском домену без априорне потребе познавања термалних и геометријских параметара вишеслојне

преграде. Услед временске инваријантности и линеарности система (систем са два улаза и два излаза) матрица функција ТИО је антисиметрична а број непознатих ТИО функција је три. Проблеми где су познате све величине на улазу и излазу система (температуре и топлотни флуksеви) а непознате ТИО функције спада у групу „non-blind“ деконволуционих проблема. Код ове групе проблема систем је описан интегралним једначинама прве врсте, док су улазне и излазне физичке величине повезане конволуционим интегралима. Слаба условљеност овог типа проблема произилази из чињенице да мале стохастичке варијације у мерним подацима на улазу и излазу доводе до великих и неконтролисаних стохастичких осцилација у решењу. Управо због овог нумеричког ефекта је неопходно коришћење регуларизационих техника при решавању овог типа проблема [1].

9) СТАЊЕ РЕШЕНОСТИ ПРОБЛЕМА У СВЕТУ

У складу са извештајем Међународне агенције за енергију („International Energy Agency“) једна трећина светске потрошње енергије је базирана у секторима везаним за загревање грађевинских објеката [1,2,3]. У складу са овим свако побољшање и оптимизација термалних карактеристика омотача грађевинских објеката имало би значајан утицај на повећање енергетске ефикасности и смањење потрошње енергије. У студији спроведеној од стране Међународне агенције за енергију указује се на неопходне мере, акције и политику коју је потребно спровести да би се повећала енергетска ефикасност постојећих грађевинских објеката. Такође је показано да оптимизација и побољшање термалних перформанси омотача грађевинских објеката има кључну улогу у смањењу енергетских потреба [1,4]. Из ове анализе и анализа Европског парламента и Савета [1,5] може се закључити да постојећи грађевински објекти имају велики потенцијала у погледу смањивања потрошње енергије као и повећања енергетске ефикасности. Поред тога потрошња енергије у грађевинским објектима заједно са очекиваним порастом светске популације има велики утицај на питања везана за одрживи развој, екологију, економију и енергетски сектор.

У инжењерској пракси импулсни одзив или Гринов-а функција се користе као стандардни начин представљања временски инваријантних линеарних система у временском домену. На аналоган начин исти системи се могу описивати трансфер функцијама у фреквентном домену [1,6,7]. У решавању практичних термалних и енергетских проблема у случају вишеслојних планарних структура у динамичком режиму широко је прихваћено коришћење кондукционе трансфер функције („conduction transfer function CTF“) и термалних одзивних фактора („thermal response factors“) [1,8-10]. У овим случајевима се површинске температуре и флуksеви са унутрашње и спољашње стране зида третирају као улази и излази система, при чему су коефицијенти у кондукционој трансфер функцији и термални одзивни фактори у потпуности одређени термалним и геометриским параметрима зида. Нумеричке симулације базиране на овим методама омогућавају карактеризацију и описивање термалних процеса у вишеслојним и ламинарним структурама у динамичком режиму под условом да су сви термални и геометриски параметри посматране структуре познати [1,8,9]. Неки од ових метода су имплементирани у софтверским пакетима за симулацију и прорачун термалних карактеристика грађевинских објеката [1,11,12]. У литератури је коришћен велики број аналитичких и нумеричких метода за решавање директних и инверзних термалних проблема помоћу функција ТИО. Fernandes et al. [1,6] је предложио аналитички метод за решавање инверзног термалног проблема за систем са једним улазом и једним излазом коришћењем функција ТИО. Коришћењем сличног приступа Simões et al. [1,7] је израчунао термална кашњења за вишеслојну структуру помоћу Гринових функција. Поред осталих метода и Лапласова трансформација је широко коришћен метод за решавање термалних проблема у композитним структурама и за решавање инверзних проблема при индиректном одређивању температуре [1,13,14].

Међународни стандард ISO 13786 [1,15] описује пренос топлоте кроз вишеслојну планарну структуру у периодичном режиму помоћу функција ТИО у фреквентном домену. Овај метод је базиран на претходним радовима Carslaw и Jaeger [1,16] који су показали да је релација између температуре и флукса на површинама вишеслојне планарне структуре линеарна у случају простиопериодичне температурске побуде. Ова релација је представљена помоћу матрице топлотног трансфера („heat transfer matrix“) која је дата у фреквентном домену и која зависи од термичких и геометриских параметара вишеслојне планарне структуре. Главни недостатак овог приступа у практичним применама је што у генералном случају за вишеслојну структуру елементи ове матрице се не могу представити у затвореном аналитичком облику у временском домену [1,16]. Поред тога, метод описан стандардом ISO 13786 је могуће директно применити само у случајевима када су сви термални и геометриски параметри посматране грађевинске преграде априори познати. На овај начин, директном применом овог стандарда, не могу се узети у обзир варијације и трајне промене термалних параметара грађевинских структура које се јављају након дужег временског периода услед дејства спољашњих атмосферских утицаја и утицаја околине као ни сезонске варијације термалних параметара материјала (на пр. услед варијације садржаја влаге у атмосфери).

10) ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

10.1 Генерални концепт техничког решења

У представљеном техничком решењу развијена је нумеричка процедура, одговарајући софтвер и мерна опрема (хардвер) за одређивање функција ТИО за вишеслојну планарну структуру непознатих термалних и геометриских параметара коришћењем искључиво „in-situ“ мерења површинске температуре и термалног флукса са обе стране преграде у динамичком режиму. Целокупна процедура је спроведена у временском домену. При одређивању непознатих функција ТИО коришћен је естиматор базиран на методу најмањих квадрата и приступ заснован на деконволуцији [1]. У генералном случају линеарни системи су представљени системом интегралних или диференцијалних једначина првог реда, док су улазне и излазне величине линеарног и временски инваријантног система повезане конволуционим интегралом у коме фигуришу функције ТИО. Деконволуционе технике генерално припадају групи инверзних проблема где је главни циљ целе процедуре одређивање функција ТИО као и евентуално одређивање непознатих улазних сигнала [1,17,18]. Ако су и улазне величине непознате ради се о „blind“ деконволуцији. У случају да су непознате само функције ТИО (што је наш случај) ради се о „non-blind“ деконволуцији. У генералном случају деконволуциони проблеми су инхерентно слабо условљени („ill-posed“) у смислу да мале стохастичке пертурбације у мерним подацима изазивају неконтролисане и стохастичке осцилације у решењу ТИО функција [1,19,20]. Да би се превазишли ови нумерички проблеми, као што је већ речено, неопходно је применити процедуру регуларизације на полазни проблем.

Један од често коришћених и добро познатих регуларизационих метода је Тихонов једнопараметарска регуларизација која је коришћена и у овом техничком решењу [21,22]. За одређивање оптималног регуларизационог параметар је коришћен метод „L“ криве [23]. Све нумеричке процедуре везане за деконволуцију, естимацију и регуларизацију при одређивању непознатих функција ТИО су имплементиране у „open source“ софтверском пакету развијеном у програмском језику „Python“ и „open source“ нумеричком пакету „LAPACK“.

10.2 Мерна опрема (хардвер), поставка мерних уређаја и улазни подаци

За потребе практичне демонстрације развијеног метода и примене софтвера за естимацију функција ТИО, извршена су мерења површинских температура и топлотних флукса са унутрашње и спољашње стране омотача једне стамбене зграде на територији Београда. Мерна опрема се састојала од следећих компоненти [1]:

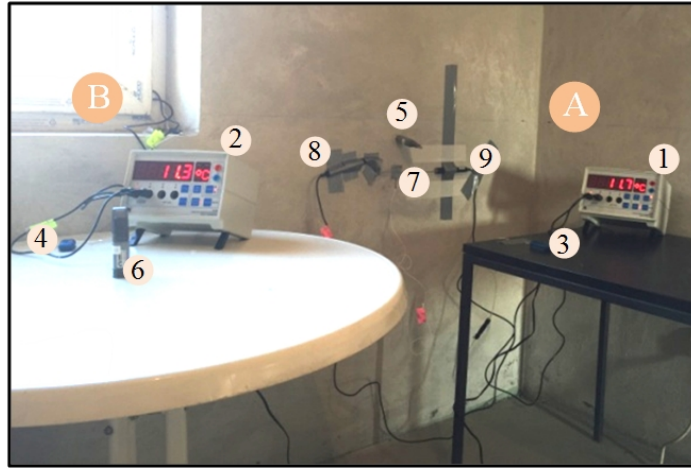
- Два сензора за мерење термалног флукса silicone embedded greenTEG gSKIN®ХО ултра високе резолуције следећих карактеристика: димензије сензора 30x30x2.5 [mm³], температурски радни опсег -50 до 150 [°C], осетљивост мерног претварача 7 [$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$],
- Два „data“ логера за greenTEG сензоре са 12 битним А/D конверторима, опсегом фреквенција семпловања 50 [semp/s] до 2 [semp/day] и са појачавачем 1000x,
- Четири температурска сензора у виду NiCr-Ni термопарова следећих карактеристика: температурски радни опсег од -200 [°C] до 1200 [°C], време одзива на импулсну побуду у ваздуху 15 [s], осетљивост мерног претварача приближно 41 [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$], дијаметр сензора приближно 1.5 [mm], мерна несигурност сензора ± 0.2 [°C] у температурном опсегу ± 100 [°C],
- Два дигитална термометра са аналогним излазом, са уграђеним 12 битним „data“ логерима и са две „switchable“ резолуције 1 [$\text{mV}/^\circ\text{C}$] и 10 [$\text{mV}/^\circ\text{C}$],
- Три Lascar EL-USB-2 „data“ логера за мерење температуре и релативне влажности следећих карактеристика: температурски опсег од -35 [°C] до 80 [°C], опсег мерења влажности 0 - 100 [%], одзив на импулсну побуду у ваздуху 20 [s], мерна несигурност за температурска мерења ± 0.5 [°C], мерна несигурност при мерењу влажности ± 3.0 [%],
- Један РС рачунар на чији RS232 порт су прикључени излази из дигиталних термометара и који је служио за прикупљање и аквизицију температурских мерења са термопарова
- Софтвер написан за аквизицију података са RS232 портова и аутоматско усредњавање мерених вредности

Флуксметри су постављени на омотач зграде са унутрашње и спољашње стране на приближно истој позицији у односу на ивице зида. Испод сваког од сензора за мерење флукса су постављени термопарови тако да би се површинска температура мерила у непосредној околини флуксметара. Да би се побољшао термални контакт између сензора за мерење флукса и површине зида коришћена је термо паста термалне проводности 5 W/m K. **Само мерни подаци са ова четири мерна претварача су директно коришћени у естимацији ТИО функција. Сва остала мерења су вршена у контролне сврхе.**

Два преостала термопара су постављена у непосредној близини зида на расојању од 1-2 [cm] и служила су као контролна мерења температуре у близини флуксметара. Три Lascar EL-USB-2 „data“ логера су служила за контролно мерење спољашње и унутрашње температуре и релативне влажности у близини зида са унутрашње и спољашње стране и у централном делу просторије. Сви термопарови су спојени на два дигитална термометра чију су дигитални излази спојени на RS232 порт РС рачунара који је вршио прикупљање и аквизицију температурских мерења са термопарова. Мерни подаци са флуксметара су прикупљани аутоматски на два greenTEG-ова „data“ логера [1].

Сва мерења температуре и термалног флукса која су коришћена при естимацији функција ТИО су вршена у складу са стандардом ISO 9869 [24]. Током периода мерења релативна влажност у просторији је била између 55% и 71% док је релативна влажност са спољашње стране била између 30% и 80%.

Сва мерења су непрекидно вршена у периоду између 27 Марта и 8 Априла 2016 у укупном трајању од 300 [h] (12.5 дана). На слици 1. је приказана мерна опрема и „*experimental setup*“ коришћен приликом мерења [1].

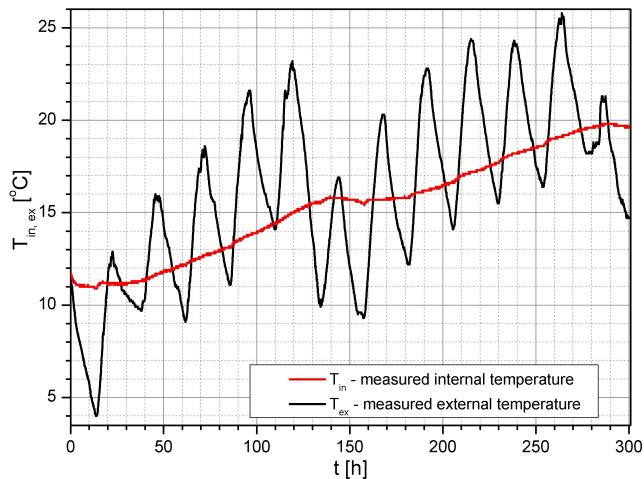


Слика 1.

- А** Мерна опрема коришћена унутар објекта
- В** Мерна опрема коришћена са спољашње стране објекта
- 1, 2** дигитални термометри
- 3, 4** greenTEG дата логери са појачавачем 1000x
- 5, 6** Lascar EL-USB-2 дата логери за мерење температуре и релативне влажности
- 7** silicone embedded greenTEG gSKIN@XO сензори за мерење флукса
- 8, 9** сонде са NiCr-Ni термопаровима

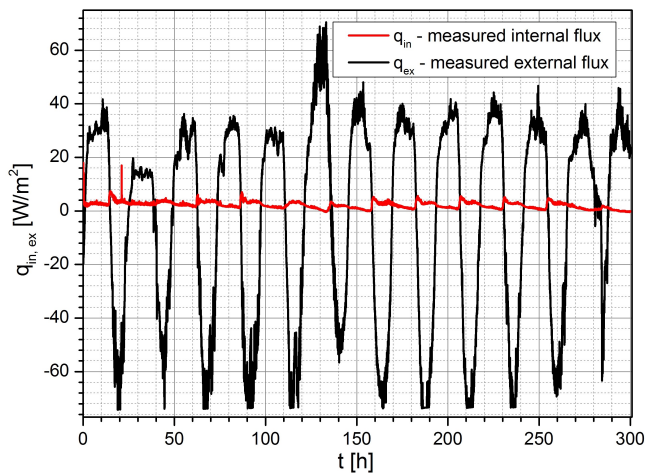
Површинске температуре су мерене са временским кораком од 5 min док су површински флуксеви мерени са временским кораком од 1min. Број семплова температурских мерења и мерења термалног флукса је био 3600 и 18000 респективно. Каснијом анализом, која је представљена у следећим одељцима, је утврђено да за уобичајене грађевинске преграде минимални период мерења температуре и флукса неопходан за естимацију ТИО функција мора да буде дужи од 120 [h]. То је време које је потребно да све функције ТИО опадну приближно на нулу, односно то је максимално време трајања термичког одзива на Диракову температурску побуду грађевинске преграде. Ово време зависи од термичких и геометриских параметара преграде.

Мерни подаци за површинске температуре и флуксеви су приказани на сликама 2 и 3 респективно. Да би се из улазних мерних података одстранио шум услед мерења примењен је LOESS „smoothing method“. Усредњена разлика између сирових мерних података („raw data“) и филтрираних („смутованих“) је занемарљива и оноси око 0.5% за све податке када се исказе „mean absolute deviation percent“ (MADP) методом. Филтрирана мерења са уклоњеним шумом су коришћени као улазни подаци у софтверском модулу за естимацију функција ТИО [1].



Слика 2.

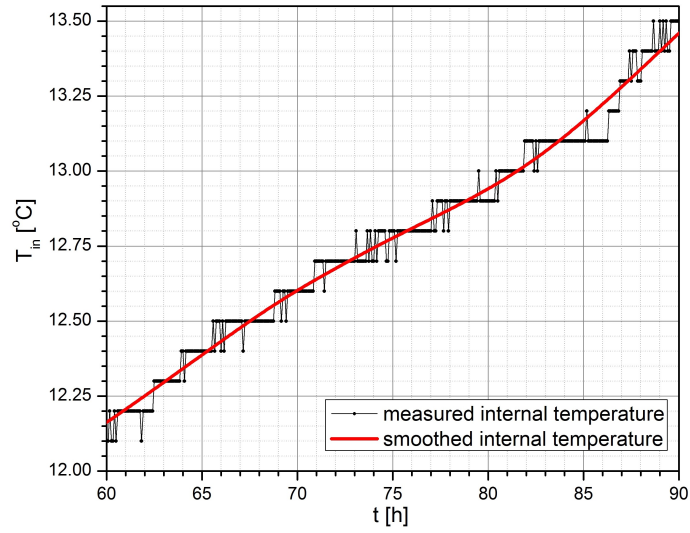
Мерне вредности површинске температуре са спољашње и унутрашње стране омотача зграде



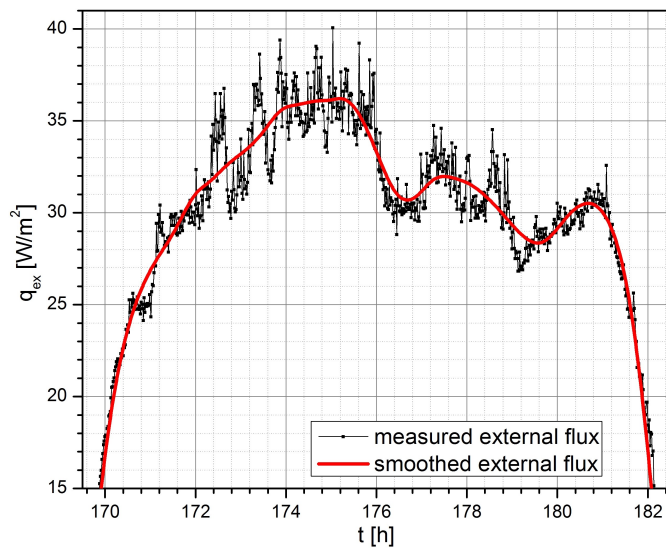
Слика 3.

Мерне вредности флуkseва са спољашње и унутрашње стране омотача зграде

На сликама 4 и 5 су приказан као илустрација део података за температуру и термални флукс пре и после скидања шума применом LOESS филтра.



a)



б)

Слика 3.

Мерне вредности површинске температуре а) и флуksа б) пре и после скидања шума коришћењем LOESS филтра.

10.3 Естимација функција ТИО коришћењем „in-situ“ мерења у динамичком режиму

Површинске температуре и термални флуксеви са унутрашње и спољашње стране зида се могу посматрати као улазни и излазни сигнали линеарног временски инваријантног система са два улаза и два излаза. У овом случају температуре са спољашње и унутрашње стране зида представљају сигнале на улазима система док су одговарајући термални флуксеви излазни сигнали. У том случају су температуре и термални флуксеви повезани следећим конволуционим интегралима [1]:

$$\begin{aligned} q_{in} &= g_{11}(t) * T_{in}(t) + g_{12}(t) * T_{ex}(t) = \int_0^{\infty} g_{11}(\tau) \cdot T_{in}(t - \tau) \cdot d\tau + \int_0^{\infty} g_{12}(\tau) \cdot T_{ex}(t - \tau) \cdot d\tau \\ q_{ex} &= g_{21}(t) * T_{in}(t) + g_{22}(t) * T_{ex}(t) = \int_0^{\infty} g_{21}(\tau) \cdot T_{in}(t - \tau) \cdot d\tau + \int_0^{\infty} g_{22}(\tau) \cdot T_{ex}(t - \tau) \cdot d\tau, \end{aligned} \quad (1)$$

где су $T_{in,ex}$ и $q_{in,ex}$ површинске температуре и термални флуксеви са унутрашње и спољашње стране зида респективно, док су $g_{i,j}$ ($i,j=1,2$) непознате ТИО функције, симбол * означава конволуцију две величине. Функције ТИО представљају одзиве система на импулсну температурску побуду и асимптотски теже ка нули за довољно велике временске интервале (за уобичајене грађевинске структуре ово време је 120 [h]), и због симетрије система важи следећа релација $g_{12} = -g_{21}$. Да би одредили естимацију ТИО функције користили смо „least square“ естиматор. Да би се добила већа тачност естимације конволуциони интегрални су апроксимирани Гаус-Лежандр-овом (Gauss-Legendre) квадратуром а за временску дискретизацију су коришћене Гаус-ове интерполационе тачке. Естимација функција ТИО је спроведена применом „least square“ естиматора на следећи минимизациони проблем [1]:

$$\mathbf{g}_n = \arg \min_{\mathbf{g}_n} \{ \xi(\mathbf{g}_n) \}; \quad \xi(\mathbf{g}_n) = \|\mathbf{q}_n - \mathbf{A}_n \cdot \mathbf{g}_n\|_2^2, \quad n=1,2; \quad (2)$$

где је ξ функционал који представља „residual norm“ и зависи од непознатих ТИО. \mathbf{g}_n и \mathbf{q}_n су вектори са вредностима термалног флукса и функција ТИО у Гаус-овим интерполационим тачкама респективно, $\|\cdot\|_2$ означава ℓ^2 норму а све физичке величине са унутрашње и спољашње стране преграде у горњим једначинама су индексирани са $n=1,2$ респективно. Матрични елементи у матрици \mathbf{A}_n се добијају као производи температура у Гаус-овим (Gauss) интерполационим тачкама и Гаус-ових (Gauss) тежинских фактора [1].

10.4 Регуларизација

Применом „least square“ естиматора на минимизациони проблем дат једначином (2) добија се линеарни систем једначина са непознатим вредностима функција ТИО у интерполационим тачкама. Добијени систем је слабо условљен и за његово решавање је потребно извршити регуларизацију. Применом Тихонов једнопараметарског регуларизационог метода оригинални минимизациони проблем дат релацијом (2) је модификован на следећи начин [1,19,25]:

$$\xi(\lambda_n, \mathbf{g}_n) = \|\mathbf{q}_n - \mathbf{A}_n \cdot \mathbf{g}_n\|_2^2 + \lambda_n \cdot \|\mathbf{L}_n \cdot \mathbf{g}_n\|_2^2; \quad n=1,2; \quad \lambda_n > 0; \quad (3)$$

где су \mathbf{L}_n и λ_n су регуларизациони оператор и регуларизациони параметар респективно (индекси $n=1,2$ се односе на унутрашњу и спољашњу страну зида). Додатни члан у релацији (3) се назива

„smoothing-norm“ и његова улога је да пригуши и одстрани нежељене нестабилности и стохастичке осцилације које су последица слабе условљености полазног проблема датог релацијом (2). У овом техничком решењу диференцијални оператор четвртог и петог реда су коришћени и тестирани као регуларизациони оператори. Детаљна теоретска анализа регуларизације диференцијалним оператором је дата у референци од стране Jane Cullum [26]. Детаљан поступак прорачуна матричних елемената диференцијалног оператора друге врсте за неуниформну расподелу интерполационих тачака је дат у литератури [1].

Решење минимизационог проблема (3) задовољава следећу линеарну једначину [1,27] :

$$\mathbf{g}_n(\lambda_n) = \underset{\mathbf{g}_n}{\operatorname{argmin}} \{ \zeta(\lambda_n, \mathbf{g}_n) \} \Rightarrow (\mathbf{A}_n^T \cdot \mathbf{A}_n + \lambda_n^2 \cdot \mathbf{L}_n^T \cdot \mathbf{L}_n) \cdot \mathbf{g}_n(\lambda_n) = \mathbf{A}_n^T \cdot \mathbf{q}_n; \quad n=1,2; \quad (4)$$

Потребно је поново апострофирати да су релацијом (4) дефинисана два систем једначина, за унутрашњу и спољашњу страну зида за $n=1,2$ респективно, као и да је оптимално решење горње једначине уједно и функција (у општем случају нелинеарна) регуларизационог параметра тако да је у основи потребно наћи решење које задовољава систем (4) али за оптимални регуларизациони параметар [1].

Да би пронашли оптималне регуларизационе параметре и решили горњи систем једначина коришћена је генералисана „singular value“ декомпозиција пара матрица \mathbf{A}_n и \mathbf{L}_n , која нам омогућава да манипулишемо и анализирамо горњи систем и да експлицитно изразимо функције ТИО у општем облику и пре проналажења оптималног регуларизационог параметра. Регуларизациони параметар (који је > 0) контролише релативни удео „smoothing“ норме у односу на „residual“ норму у функционалу (циљној функцији) у релацији (3). За веома мале вредности регуларизационог параметра минимизациони проблем (3) је близак или скоро идентичан оригиналном слабо условљеном проблему (2). Са повећањем регуларизационог параметра удео „smoothing“ норме у функционалу (3) у односу на „residual“ норму се повећава на овај начин се потискују нежељене стохастичке високо фреквентне осцилујуће компоненте из функција ТИО које су последица слабе условљености и нестабилности система (2). Са друге стране за сувише велике вредности регуларизационог параметра се све више удаљавамо од оригиналног проблема и уместо да минимизирамо „residual“ норму (решавамо оригинални проблем) све више минимизирамо „smoothing“ норму (избацујемо осцилујуће компоненте из решења).

Проналажење оптималног регуларизационог параметра на тај начин представља проналажење оптималног односа „smoothing“ и „residual“ норме у функционалу (3) за који ће високофреквентне и стохастичке компоненте у решењу, које су последица нестабилности система, бити уклоњене. Оптимални регуларизациони параметар је пронађен методом „L“ криве. „L“ крива представља параметарску криву дефинисану са $(\chi(\lambda), \eta(\lambda))$ у „log-log“ скали где величине $\chi(\lambda)$ и $\eta(\lambda)$ представљају природне логаритме „residual“ и „smoothing“ норме. Ова крива има облик латиничног слова „L“ по чему је и добила име [1,27]. За мале вредности регуларизационог параметра решењем доминирају високо фреквентне стохастичке компоненте које су последица слабе условљености и нестабилности проблема. Са порастом регуларизационог параметра $\eta(\lambda)$ се рапидно смањује док се величина $\chi(\lambda)$ много мање мења (расте). Ово одговара слабљењу високо фреквентних компоненти у решењу које мало утичу на „residual“ норму и у овом делу крива има велик нагиб што одговара вертикалном делу слова „L“.

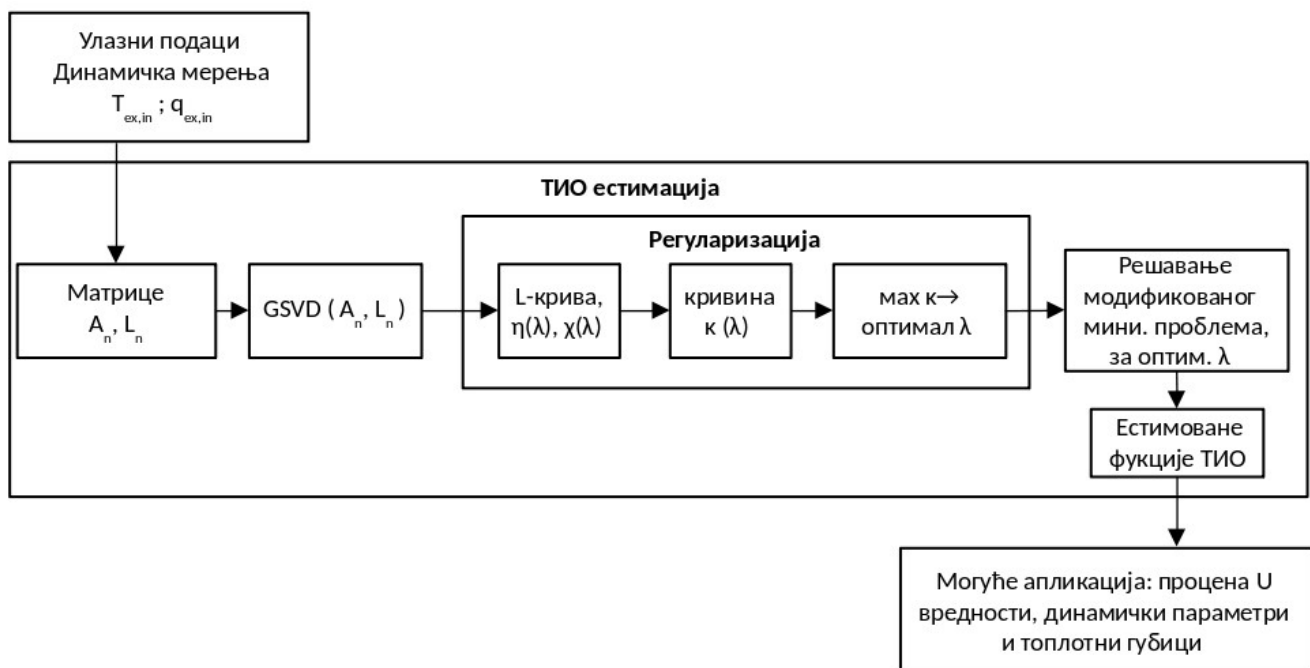
Са даљим повећањем регуларизационог параметра брзина промене величине $\eta(\lambda)$ се знатно смањује док величина $\eta(\lambda)$ почиње да рапидно расте, што одговара случају када су стохастичке и високо фреквентне компоненте решења које су последица нестабилности система скоро у потпуности исфилтриране а даље повећање регуларизационог параметра доводи до брзог пораста „residual“ норме односно до повећања грешке у оригиналном проблему. Овај део криве одговара хоризонталном делу слова „L“. Оптимални регуларизациони параметар налази се између

ове две области, односно у тачци где „L“ крива има највећу кривину односно најмањи полупречник кривине [1,28].

10.5. Софтверска имплементација

Целокупан нумерички процес естимације функција ТИО описан у предходним параграфима је имплементиран у програмском језику „Python“. За добијање генерализоване „singular value“ декомпозиција матрица A_n и L_n коришћена је верзија отвореног софтверски пакет „LAPACK“ написана у програмском језику „FORTRAN“ који је у потпуности расположив у оквиру библиотеке „scipy“ у „Python“-у. Коришћена је „low-level subroutine“ „DGGSD3“ која није директно доступна у „scipy“ библиотеци, због тога је било неопходно генерисати интерфејс или „wrapper“ за ову функцију. Интерфејс је генерисан коришћењем „Python“-овог алата „f2py“.

Поред библиотеке „scipy“ коришћене су и бројне функције из „Python“-ове нумеричке библиотеке „numpy“ за нумеричку интеграцију („numpy.polynomial.legendre.leggauss“), за прорачун матричних елемената матрица A_n и L_n за прорачун кривине „L“ крива итд. На слици 5 приказан је блок дијаграм целокупног нумеричког процеса естимације ТИО функција који је примењен у софтверском решењу [1].



Слика 5

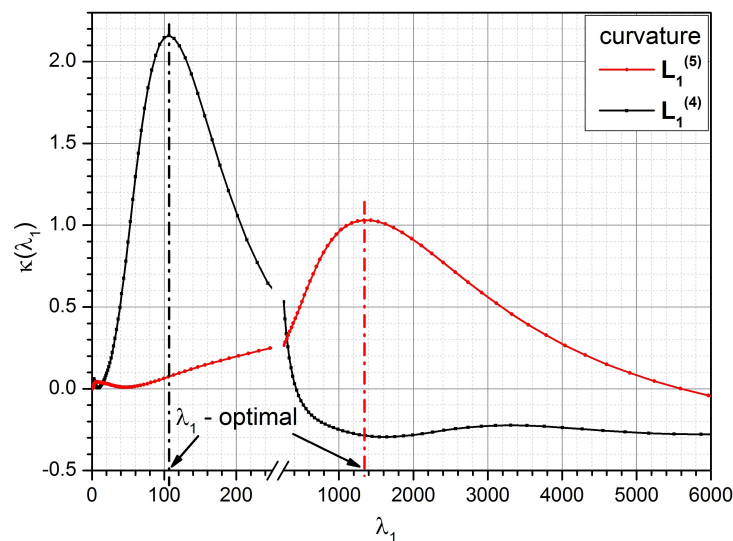
Блок дијаграм нумеричког процеса естимације функција ТИО примењен у софтверском решењу

Као улазне величине неопходне за процес естимације фигуришу мерења површинских температура и термалних флуксева добијена у динамичком режиму у довољно дугом временском интервалу, са одстрањеним шумом применом LOESS „smoothing“ метода. У првом кораку се формирају A_n и L_n рачунањем матричних елемената, после тога се проналази „GSVD“ декомпозиција (генерализоване „singular value“ декомпозиција) ових матрица. После овога

започиње процес регуларизације који се састоји из три корака. У првом кораку се формирају величине $\chi(\lambda)$ и $\eta(\lambda)$ које представљају „residual“ и „smoothing“ норму у логаритамској скали, после овога се рачуна кривина κ „L“ криве за различите вредности регуларизационог параметра λ . У последњем кораку се проналази оптимална вредност параметра λ за које је кривина κ максимална. У следећем кораку се решава модификовани минимизациони проблем за оптимални параметар λ и на тај начин се добија естимована вредност ТИО. Потребно је напоменути да се цела процедура понавља два пута за сет једначина са унутрашње и спољашње стране [1].

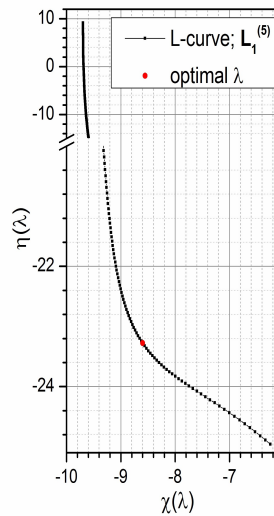
10.6 Резултати естимације

У обом одељку, као илустрација развијеног софтверског решења, су приказани одређени резултати добијени за улазне мерне податке приказане на сликама 2 и 3. За естимацију функција ТИО је коришћено првих 196 [h] мерења. Максимални временски интервали за које се предпоставља да су функције ТИО асимптотски опале на нулу су били 100 [h] за функције g_{11} g_{22} и 120 [h] за g_{12} и g_{21} . Број Гаус-ових интерполационих тачака је био 400 за функције g_{11} и g_{22} и 200 за g_{12} и g_{21} . Димензија система (4) је 600×600 . На слици 6 су приказане вредности кривине „L“ криве са унутрашње стране зида за различите вредности регуларизационог параметра за диференцијални оператор четвртог и петог реда. Оптималне вредности регуларизационог параметра су назначене на слици. На сликама 7а,б су приказане коресподентне „L“ криве са назначеним положајем на кривој за који регуларизациони параметар има оптималну вредност [1].

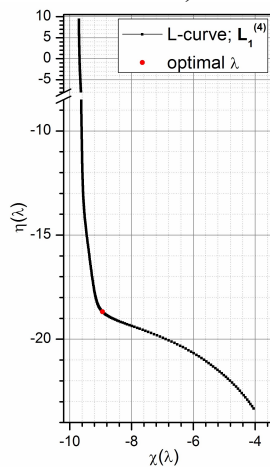


Слика 6

Вредности кривине „L“ криве са унутрашње стране за различите вредности регуларизационог параметра за диференцијални оператор четвртог и петог реда. Оптималне вредности регуларизационог параметра су назначене на слици.



а)

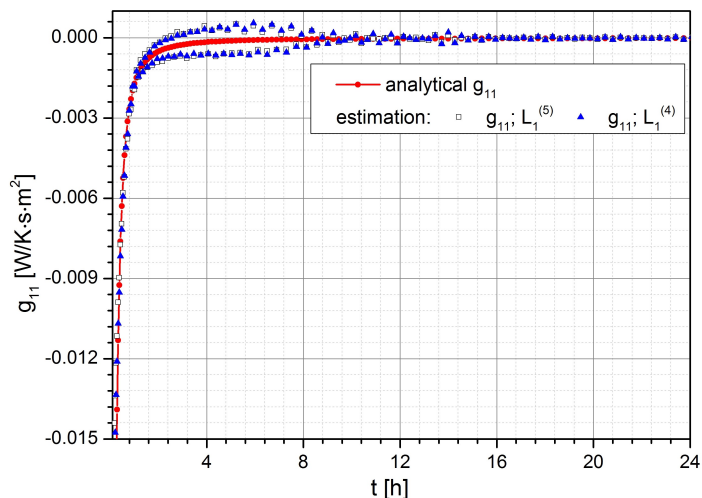


б)

Слика 7

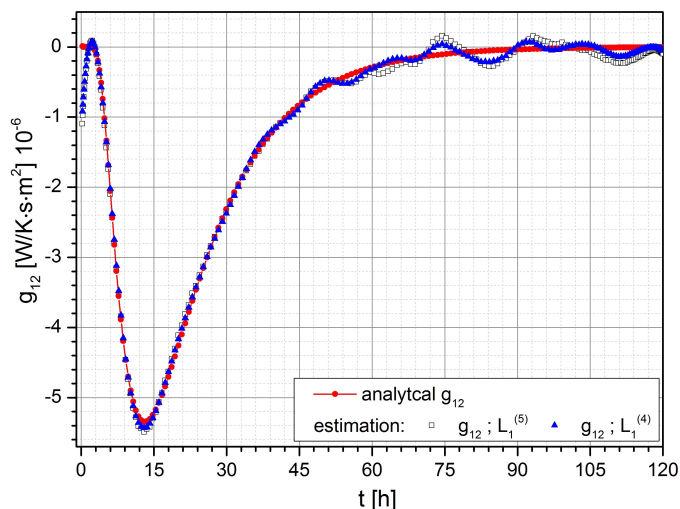
„L“ криве за диференцијалне операторе 4 (а) и 5 (б) реда са назначеним положајем на кривој за који регуларизациони параметар има оптималну вредност

На сликама 8 и 9 су приказане ТИО функције, g_{11} и g_{12} добијене естимацијом помоћу диференцијалних оператора 4 и 5 реда као и одговарајуће функције ТИО добијене на основу стандарда ISO 13786 [1].



Слика 8

Функција ТИО g_{11} добијена естимацијом коришћењем диференцијалних оператора 4 и 5 реда као и иста функција добијена на основу стандарда ISO 13786.



Слика 9

Функција ТИО g_{12} добијена естимацијом коришћењем диференцијалних оператора 4 и 5 реда као и иста функција добијена на основу стандарда ISO 13786.

10.7 Закључак

Развијено је софтверско решење за естимацију функција ТИО вишеслојних планарних грађевинских структура, коришћењем „in-situ“ мерења површинских температура и термалних флуксева без априори познавања термалних и геометријских карактеристика посматране структуре. Полазна претпоставка је да се на основу стандарда ISO 13786 композитна планарна структура у термичком смислу може посматрати као линеарни временски инваријантни систем са два улаза и два излаза. У предложеном решењу површинске температуре и термални флуксеви су третиране као улази и излази система респективно [1].

Основни закључци који се могу извести из предложеног решења су:

- Све функције ТИО које представљају термални одзив посматраног система на Диракове температурске побуде асимптотски опадају на нулу после 100-120 [h] за посматрану грађевинску структуру. Овај закључак се може оријентационо користити за све уобичајене грађевинске структуре,
- Да би се генерисали улазни подаци за развијено софтверско решење неопходно је извршити непрекидно мерење површинских температура и темалних флуксева са обе стране посматране структуре у временском трајању које мора бити дуже од 120 [h],
- Да би се регистровале све динамичке промене мерених величина, а не само температурске варијације дан-ноћ, неопходно је подесити време „семпловања“ да је реда минута. У предложеном решењу коришћена су мерења у циљу валидације у којима су временски кораци за температурска мерења били 5 min док су површински флуксеви мерени са временским кораком од 1 min,
- Приликом мерења пожељне су нагле температурске промене са спољашње стране зида које ће изазвати значајније варијације температура и флуксева на унутрашњој страни зида. Током мерења, просторија у којој се врше мерења, не сме да се континуирано загрева или хлади да би површинске температуре и термални флуксеви са унутрашње стране могли да прате варијације са спољашње стране,
- Неопходно је уклонити шум из улазних мерних података погодном процедуром или филтером. У овом софтверско решењу за ове потребе је коришћен LOESS „smoothing method“,
- Због слабе условљености посматраног линеарног система неопходно је извршити регуларизацију како би се уклонили и пригушиле неконтролисане стохастичке варијације у функцијама ТИО,
- У предложеном техничком решењу је коришћен Тихонов једнопараметарски регуларизациони метод и тестирани су диференцијалним оператором 4 и 5 реда као регуларизациони оператори,
- За проналажење оптималног регуларизационог параметра коришћен је метод „L“ криве и генералисана „singular value“ декомпозиција која која знатно убрзава проналажење оптималног регуларизационог параметра,
- Предложено софтверско решење је реализовано у програмском језику „Python“, коришћен је отворени пакет „LAPACK“ и његова субрутина „DGGSV3“ за проналажење генералисане „singular value“ декомпозиције,
- Могуће апликације развијеног софтверског решења су: процена свих динамичких параметара посматране структуре, процена U вредности зида, процена топлотних губитака и енергетске ефикасности зграде.

Литература

- [1] Zorana Petojević, Radovan Gospavić, Goran 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 228 (2018) 468–486, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.083>
- [2] Key World Energy Statistics, International Energy Agency; 2015.
- [3] Pérez Gabriel, Coma Julià, Sol Salvador, Cabeza Luisa F. Green facade for energy savings in buildings: the influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. Appl Energy 2017;187:424–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>.
- [4] Technology Roadmap, Energy efficient building envelopes, International Energy Agency; 2013.

- [5] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 on energy efficiency, European Parliament, Directive; 2012.
- [6] Fernandes Ana Paula, dos Santos Marcelo Braga, Guimarães Gilmar. An analytical transfer function method to solve inverse heat. *Appl Math Modell* 2015;39:6897–914. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2015.02.012>.
- [7] Simões I, Simões N, Tadeu A. Thermal delay simulation in multilayer systems using analytical solutions. *Energy Build* 2012;49:631–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.005>.
- [8] Luo C, Moghtaderi B, Page A. Modelling of wall heat transfer using modified conduction transfer function, finite volume and complex Fourier analysis methods. *Energy Build* 2010;42:605–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.031>.
- [9] Li Xiang Qian, Youming Chen JD, Spitler D Fisher. Applicability of calculation methods for conduction transfer function of building constructions. *Int J Therm Sci* 2009;48:1441–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.11.006>.
- [10] Ouyang K, Haghghat F. A procedure for calculating thermal response factors of multi-layer walls—state space method. *Build Environ* 1991;26(2):173–7. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(91\)90024-6](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(91)90024-6)
- [11] Crawley Drury B, Lawrie Linda K, Pedersen Curtis O, Winkelmann Frederick C, Witte Michael J, Strand Richard K, et al. *EnergyPlus: an update*, Boulder, Colorado; 2004.
- [12] Benoit Delcroix, Michael Kummert, Ahmed Daoud, Marion Hiller, Improved conduction transfer function coefficients generation in Trnsys multizone building model. In: 13th Conference of international building performance simulation association, Chambéry, France; 2013.
- [13] Lotfi Mohamed, Mezrigui Lassaad, Heyd Rodolphe. Study of heat conduction through a self-heated composite cylinder by Laplace transfer functions. *Appl Math Model* 2016;40:10360–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2016.07.012>.
- [14] Feng ZC, Chen JK, Zhang Yuwen. Real-time solution of heat conduction in a finite slab for inverse analysis. *Int J Therm Sci* 2010;49:762–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.11.002>.
- [15] Thermal performance of building components: dynamic thermal characteristics and calculation methods, ISO 13786; 2007.
- [16] Carslaw HS, Jaeger JC. *Conduction of heat in solids*. Oxford: Oxford University Press; 1959
- [17] Bertero M, De Mol C, Pike AR. Applied inverse problems in optics. In: Engl Heinz W, Groetsch CW, editors. *Inverse and Ill-Posed Problems*. New York: Academic Press; 1987.
- [18] Scales JA, Gersztenkorn A. Robust methods in inverse theory. *Inverse Prob* 1988;4:1071–91.
- [19] Chaudhuri Subhasis, Velmurugan Rajbabu, Rameshan Renu. *Blind image deconvolution methods and convergence*. Heidelberg, New York: Springer Cham; 2014.
- [20] Hansen Per Christian, O’leary Dianne Prost. The use of the l-curve in the regularization of discrete ill-posed problems. *SIAM J Sci Comput* 1993;14(6):1487–503.
- [21] Tikhonov AN. Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. *Sov Math Dokl* 1963;4:1035–8.
- [22] Tikhonov AN, Arsenin VY. *Solutions of Ill-posed problems*. Washington, DC: Winston; 1977.
- [23] Hansen Per Christian. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve. *SIAM Rev* 1992;34:561–80.
- [24] Thermal Insulation—Building Elements—In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance, Standard ISO 9869; 1994.
- [25] Engl Heinz W, Hanke Martin, Neubauer Andreas. *Regularization of inverse problems*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers; 2000.
- [26] Cullum Jane. The effective choice of the smoothing norm in regularization. *Math Comp* 1979;33:149–70.
- [27] Calvetti D, Reichel L, Shuibi A. L-curve and curvature bounds for Tikhonov regularization. *Numer Algorithms* 2004;35(2–4):301–14. <http://dx.doi.org/10.1023/B:NUMA.0000021764.16526.47>.

[28] Hansen Per Christian. The L-curve and its use in the numerical treatment of inverse problems, computational inverse problems in electrocardiology. In: Johnston P, editor. Advances in computational bioengineering. Southampton: WIT Press; 2000. p. 119–42.

11. ТЕХНИЧКА ДОКУМЕНТАЦИЈА

Техничко софтверско и хардверско решење које задовољава критеријум отвореног извора публикувано у часопису категорије M21a : **Zorana Petojević, Radovan Gospavić , Goran 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 228 (2018) 468–486, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.083>**

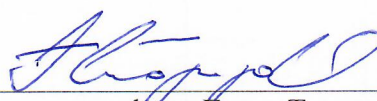
Техничко софтверско и хардверско решење је рађено у склопу пројекта: "Побољшање Енергетске Ефикасаности зграда у Србији и избор материјала за њихову сертификацију", бр: **III42012** финансираног од стране владе Републике Србије.

- Листа техничких решења свих аутора

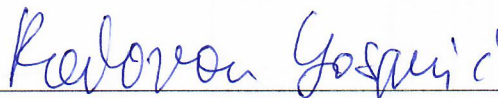
В.проф. др Горан Тодоровић, дипл.ел.инж, Доц. др Радован Госпавић, дипл.ел.инж. - техничка решења:

Радован Госпавић, Горан Тодоровић, Драгослав Шумарац, Маја Ђуровић-Петровић „Софтверски пакет за симулацију термалних и дифузионих процеса“, Грађевински Факултет, Београд, 2010, (бр: 372/2 -10, 13 јул 2010), категорија M85, Техничко решење - ново прихваћено решење у области грађевинарства

Аутори техничког решења



в.проф. др Горан Тодоровић, дипл.ел.инж



доц. др Радован Госпавић, дипл.ел.инж.



доц. др Зорана Петојевић, дипл.грађ.инж.