

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Веће научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

491/5

(Број захтева)

20.04.2017. године

(Датум)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији**

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5 тач. 4. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

ТАМАРА (СЛАВКО) БАЈЦ

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **ТАМАРА (СЛАВКО) БАЈЦ** уписана на Докторске студије 2009 год.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

УТИЦАЈ ЛОКАЛНОГ СТАЊА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА НА СМАЊЕЊЕ РАДНЕ СПОСОБНОСТИ У НЕСТАМБЕНИМ ЗГРАДАМА (THE LOCAL THERMAL COMFORT IMPACT ON WORKING PRODUCTIVITY LOSS IN NON – RESIDENTIAL BUILDINGS)

Универзитет је дана 08.02.2016. год. својим актом под бр. 61206-394/2-16 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

УТИЦАЈ ЛОКАЛНОГ СТАЊА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА НА СМАЊЕЊЕ РАДНЕ СПОСОБНОСТИ У НЕСТАМБЕНИМ ЗГРАДАМА (THE LOCAL THERMAL COMFORT IMPACT ON WORKING PRODUCTIVITY LOSS IN NON – RESIDENTIAL BUILDINGS)

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **ТАМАРЕ (СЛАВКО) БАЈЦ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 02.03.2017. године, одлуком факултета под бр. 491/3, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. <u>Др Милош Бањац</u>	Ред. проф.	Термомеханика	Машински факултет Београд
2. <u>Др Маја Тодоровић</u>	Ванр. проф.	Термотехника	Машински факултет Београд
3. <u>Др Милан Гојак</u>	Ванр. проф.	Термомеханика	Машински факултет Београд
4. <u>Др Агис Пападопулос</u>	Ред. проф.	Термомеханика	Универзитет Аристотел у Солуну Машински факултет
5. <u>Др Жана Стевановић</u>	Научни сарадник	Термотехника и енергетика	ИНН Винча Београд

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 20.04.2017. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф.др Радивоје Митровић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.

2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.

3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности, уколико је таквих примедби било.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 491/5
Датум: 20.04.2017. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и реферата Комисије у саставу: др Милош Бањац, ред. проф., ментор, др Маја Тодоровић, ванр. проф., др Милан Гојак, ванр. проф., др Агис Пападопулос, ред. проф., Универзитет Аристотел у Солуну, Машински факултет, др Жана Стевановић, научни сарадник, ИНН Винча Београд о оцени докторске дисертације „Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама (The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings)“ студента докторских студија **Тамаре Бајц, дипл. инж. маш.**, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 20.04.2017. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„УТИЦАЈ ЛОКАЛНОГ СТАЊА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА НА СМАЊЕЊЕ РАДНЕ СПОСОБНОСТИ У НЕСТАМБЕНИМ ЗГРАДАМА (THE LOCAL THERMAL COMFORT IMPACT ON WORKING PRODUCTIVITY LOSS IN NON-RESIDENTIAL BUILDINGS)“** студента **ТАМАРЕ БАЈЦ, дипл. инж. маш.**

Докторску дисертацију и реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији доставити на давање сагласности Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, по истеку рока од 30 дана у коме су били на увиду јавности.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, студенту, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата
Тамаре С. Бајц, дипл. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком број 491/3 од 02.03.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације под насловом

„УТИЦАЈ ЛОКАЛНОГ СТАЊА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА НА СМАЊЕЊЕ РАДНЕ СПОСОБНОСТИ У НЕСТАМБЕНИМ ЗГРАДАМА“

(„THE LOCAL THERMAL COMFORT IMPACT ON WORKING PRODUCTIVITY LOSS IN NON-RESIDENTIAL BUILDINGS“)

кандидата Тамаре С. Бајц, дипл. инж. маш., студента докторских студија.

Након прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала, као и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Тамара С. Бајц, студент докторских студија, уписала је прву годину докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2009/2010. године. На докторске студије је уписана по наставном плану који је Сенат Универзитета прихватио 2007. године на основу Закона о високом образовању из 2005. године, а по којем докторске студије не могу трајати дуже од 6 година. У току трајања студија, кандидат Тамара С. Бајц, је у школској 2014/2015. године користила право на мировање права и обавеза. По овим правилима, Тамара С. Бајц је имала обавезу да дисертацију одбрани до 30. септембра 2016. године.

На молбу кандидата Тамаре С. Бајц, Решењем број 1951/1 од 08.09.2016. године, сагласно одредбама Статута Универзитета у Београду, рок за одбрану дисертације је продужен за два семестра – до 30. септембра 2017. године.

По захтеву кандидата Тамаре С. Бајц број 2498/1 од 02.12.2015. године, предлога проф. др Милоша Бањца, као и сагласности Катедре за термомеханику, бр. 2489/2 од 21.12.2015. године, да јој се одобри пријава теме докторске дисертације и именује Комисија

за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је Одлуку број 2498/3 од 24.12.2015. године којом се прихвата тема докторске дисертације и именује ментор проф. др Милош Бањац и именује Комисија за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације у саставу:

- др Милош Бањац, ред. проф., Универзитет у Београду, Машински факултет
- др Маја Тодоровић, ванр.проф., Универзитет у Београду, Машински факултет
- др Жарко Стевановић, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке Винча

На основу извештаја Комисије бр. 94/1 од 15.01.2016. године и одлуке ННВ бр. 94/2 од 21.01.2016. године, поднет је захтев Машинског факултета Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, које је на седници одржаној 08.02.2016. године донело Одлуку бр. 61206-394/2-16, да се Тамари С. Бајц, дипл.инж.маш., студента докторских студија, даје сагласност на предлог теме докторске дисертације **„Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама“** (**“The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings”**), а под менторством проф. др Милоша Бањца.

На основу обавештења проф. др Милоша Бањца, ментора, да је докторанд Тамара С. Бајц, дипл. инж. маш. завршила докторску дисертацију, као и предлога Катедре за термомеханику, Наставно-научно веће Машинског факултета донело је Одлуку број 491/3 од 02.03.2017. године о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Милош Бањац, ред. проф., Универзитет у Београду, Машински факултет
- др Маја Тодоровић, ванр.проф., Универзитет у Београду, Машински факултет
- др Милан Гојак, ванр.проф., Универзитет у Београду, Машински факултет
- др Агис Пападопулос, ред. проф. Машински факултет Универзитета Аристотел у Солуну, Грчка
- др Жана Стевановић, научни сарадник, Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке Винча

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Тамаре С. Бајц, под насловом **„Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама“** (**“The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings”**), припада области техничких наука – машинство, ужа научна област термомеханика, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

Израдом докторске дисертације руководио је др Милош Бањац, редовни професор групе предмета везаних за термомеханику и шеф Катедре за термомеханику Машинског факултета Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Тамара С. Бајц, дипл. инж. маш., студент докторских студија, рођена је у Београду 12.03.1984., Република Србија. Основну школу "Марко Орешковић" завршила је са одличним успехом, стеченом "Буковом дипломом" и именовањем за Бака генерације. Средњу школу, "Земунску гимназију" је похађала у Земуну и завршила такође са одличним успехом. Машински факултет Универзитета у Београду уписала је школске 2003/2004. године и завршила 26.02.2009. са просеком 8,72 на смеру Термотехника и оценом 10,00 на дипломском раду из предмета Климатизација, на тему: " Енергетске потребе пасивне куће са Тромбеовим зидом за климатско подручје Београда", код ментора проф. др Маје Тодоровић.

У периоду од маја 2009. године до краја децембра 2010. године радила је као пројектант термотехничких инсталација у фирми "Аерпројект". Учествовала је у изради више од двадесет машинских пројеката за грађевинску дозволу и пројеката за извођење, на пројектовању термотехничких инсталација за стамбене, пословне зграде, хотеле, штампарије, гараже итд.

Школске 2009/2010. Тамара је уписала Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду, а јануара 2011. године се запослила на Машинском факултету у Београду, као истраживач-сарадник на истраживачком пројекту, који је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја, ев. бр. ТР33047.

Године 2012. Тамара С. Бајц је учествовала на међународном студентском такмичењу „International ASHRAE student design competition 2012” предводивши тим Београдског Универзитета. У оквиру категорије “Integrated sustainable building design” освојила је треће место на овом престижном светском такмичењу.

На основу одлуке Изборног већа број 188/5 од 07.04.2016. и Решења број 188/6 од 08.04.2016. именована је у звање Асистент за ужу научну област Термотехника на Машинском факултету у Београду.

Током Докторских студија, положила је све испите предвиђене Статутом факултета, са просечном оценом 10,00, као и два Стручна испита у Инжењерској комори Србије и носилац је две пројектантске лиценце.

У оквиру научно-истраживачке делатности и рада на пројекту Тамара Бајц је као аутор или коаутор објавила 2 рада у међународним научним часописима, од тога 1 у категорији М21 и 1 у категорији М23. Поред тога је као аутор или коаутор објавила 1 рад у националном часопису од међународног значаја, у категорији М24, као и 4 рада у часописима националног значаја, од тога 3 рада у категорији М51 и 1 рад у категорији М52, као и саопштеила 11 научних радова на међународним научним скуповима који су штампаних у целини.

Кандидат течно говори енглески језик и служи се немачким и руским језиком на основном нивоу. У свакодневном раду користи програмске пакете за обраду текста (MSOffice), графике (AutoCAD, Inventor, Corel Draw, Adobe Photoshop), за нумеричку механику флуида (Phoenix Flair), као и програмеке пакете за математичке прорачуне, пројектовање и термотехничке прорачуне MATLAB, Origin, HEVA Comp, Carrier HAP E-II, 20, AirCalc, Design Builder, итд.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Тамаре С. Бајц, дипл. инж. маш., под називом: „**Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама**“ (“**The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings**”), написана је на енглеском језику, латиничним писмом, при чему је написан проширени резиме и на српском језику, ћириличним писмом. Садржи 174 стране формата А4, 76 слика, 69 табела, 63 нумерисана израза и списак литературе на 10 страна.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод;
2. Квалитет унутрашње средине и топлотни комфор – преглед литературе;
3. Губитак радне способности– преглед литературе ;
4. Експериментална истраживања;
5. Статистичка истраживања;
6. Нумеричка истраживања;
7. Синтеза експерименталних, статистичких и нумеричких резултата;
8. Закључци и предлог смерница за будући рад;
Литература.

Осим наведеног, дисертација садржи проширени резиме на српском и енглеском језику, садржај, номенклатуру, прилог, као и биографију аутора и изјаву о ауторству, изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

2.2. Кратки приказ појединих поглавља

У првом поглављу је наглашен утицај здравог и енергетски ефикасног окружења у зградама у којима људи бораве, на њихово здравље, продуктивност и смањење загађења. Приказани су, до сада најзначајнији, објављени резултати из области топлотног комфора као и њихов утицај на радну продуктивност корисника. У оквиру разматрања предмета истраживања, истакнуто је да је истраживање фокусирано на квантификацију процента незадовољних и смањења продуктивности корисника у нестамбеним зградама у функцији одступања вредности локалних физичких параметара стања околине од средњих вредности.

Затим су дефинисани предмет, научне методе и циљеви истраживања, који обухватају примену савремених експерименталних, нумеричких и статистичких метода истраживања за квантификовање утицаја локалних параметара стања унутрашње средине (температура ваздуха, радијантна температура, релативна влажност ваздуха, брзина ваздуха и интензитет турбуленције) на ниво топлотног комфора унутрашњег простора нестамбене зграде.

Посебни циљ израде ове докторске дисертације је било успостављање корелационих односа између стања топлотног комфора и губитка радне способности људи.

Практични циљ израде ове докторске дисертације је био да се на основу добијених резултата истраживања предложи техничка упутства и смернице пројектантима, како би се обезбедио свеобухватан интердисциплинарни приступ у пројектовању, а услови квалитетног топлотног комфора разматрали у најранијој фази пројектовања.

Приказане су коришћене научне методе истраживања које су подељене у три групе: експерименталне, нумеричке и статистичке методе. Експерименталне методе су коришћене за компаративну анализу неуниформности поља физичких параметара унутрашње средине. Извршена су одговарајућа мерења температуре и релативне влажности ваздуха, радијантне температуре, брзине струјања ваздуха и интензитета турбуленције у карактеристичним мерним тачкама и дефинисаним временским периодима.

Нумеричке симулације физичких параметара и индикатора топлотног комфора изабраног модела простора, у оквиру дефинисаних сценарија, коришћене су за оцену и квантификацију тачности модела преношења топлоте и одређивање физичких параметра ваздуха у тачкама простора где није било могуће вршити експериментална мерења.

У оквиру израде докторске дисертације, коришћене су и статистичке методе. Анкетирањем људи који бораве у посматраним просторима, обезбеђени су подаци, чијом статистичком обрадом су изведени значајни закључци и, синтезом са резултатима експерименталне и нумеричке анализе, успостављене су емпиријске корелације за одређивање индикатора топлотног комфора и интензитета губљења радне способности људи.

Такође је дат катарак приказ структуре дисертације по поглављима.

У другом поглављу се детаљније разматрају резултати истраживања остваривања топлотног комфора и квалитета унуташње средине, који су објављени у скорије време, а у оквиру многобројне светске, европске и српске литературе и законодавства из ове области. Приказује се преглед најважнијих стандарда и прописа у оквиру области истраживања услова топлотног комфора и квалитета унуташње средине. Детаљно су приказани индикатори топлотног комфора, дефинисани у оквиру постојеће светске регулативе, са максимално дозвољеним вредностима за постизање жељених услова комфора у зградама.

У трећем поглављу је дат преглед објављених резултата утицаја квалитета унутрашње средине и топлотног комфора на радну способност људи. Приказане су постојеће корелације индикатора топлотног комфора PMV и губитка радне способности, уз коментаре о могућим правцима даљег истраживања.

У четвртном поглављу пажња је посвећена експерименталним истраживањима која су обављена. Описано је климатско подручје у коме се налази зграда која је предмет истраживања и дате су основне климатске карактеристике за подручје Београда, за претходних педест година, а на основу подата објављених од стране Републичког хидрометеоролошког завода. Поред тога, приказане су измерене локалне вредности спољашње температуре и релативне влажности ваздуха, чија мерења су вршена током укупног периода експерименталних истраживања.

Дефинисан је физички модел и одабрана је зграда, односно просторија - учионица у којој су вршена мерења. Детаљно су описане и приказане карактеристике термичког омотача просторије, димензије, оријентација и постојећи систем централног грејања.

Следи детаљан опис процедура мерења која су извршена током експерименталног дела истраживања. Протоколом мерења су дефинисане, а затим и измерене следеће величине: температуре унутрашњих површина, температуре и релативне влажности ваздуха у више од тридесет тачака у учионици, радијантна температура, брзине струјања ваздуха, концентрације угљен-диоксида и температуре површине коже корисника. Постављена су четири различита сценарија, у смислу постизања различитих термичких параметара

унутрашње средине, а како би се квантификовали утицаји тих различитости на индикаторе топлотног комфора и радну способност људи. Такође су приказане карактеристике мерних уређаја, који су коришћени током истраживања, као и тачне позиције инструмената током спровођења четири, унапред дефинисана, сценарија.

Након тога су приказани и коментарисани резултати мерења физичких величина, локално, за сваку позицију седења, као и просечне вредности за сваки сценарио. Приказани су резултати вредности индикатора топлотног комфора и губитка радне способности добијени на основу измерених физичких величина, као и на основу прорачуна, који базирају на методологији препорученој стандардима и постојећом литературом. Посебна пажња посвећена је локалним параметрима топлотног комфора. На основу дефиниција и методологије прорачуна препоручених стандардом ISO 7730:2005 и измерених физичких величина у простору, израчунате су вредности индикатора локалног топлотног дис комфора, као што су: вертикална температурска разлика, проценат незадовољних температуром пода, утицај промаје и радијантна асиметрија.

Утицај стања локалног топлотног комфора на температуру површине коже људи, који бораве у посматраној учионици, такође је приказан на основу резултата мерења, а која су извршена у периоду од четири седмице, на значајном броју испитаника. Такође су приказане корелације између температуре површине коже корисника простора и њиховог гласања о топлотним карактеристикама посматраног простора.

На крају овог поглавља су приказани резултати снимања термовизијском камером, како термичког омотача посматране учионице, тако и површине одеће корисника. Резултати добијени снимањем термовизијском камером коришћени су само као контролно мерење у оквиру сваког од сценарија.

У петом поглављу се приказују методологија и резултати статистичког истраживања које је спроведено у учионици. Приказани су нови упитници који су развијени у оквиру овог истраживања, а у складу са препорукама важеће светске регулативе и коришћени за статистичко прикупљање података, са описом делова упитника и питањима. У оквиру истраживања коришћене су две врсте упитника: општи, који се састојао од питања везаних за старосну доб, пол, физичко стање и одевеност популације која је испитивана, затим за евалуацију стања топлотног комфора, као и локалних параметара који утичу на топлотни дис комфор и евалуацију квалитета параметара унутрашње средине, као и субјективни осећај корисника о утицају ових параметара на радну способност, концентрацију и здравствено стање корисника; и посебни упитник, који је обухватао тест концентрације. Значајан број тестова концентрације извршен је у периоду од четири седмице. Тестирања су вршена сваки дан и на основу њих је утврђен ниво радне способности, односно њен губитак.

На дијаграмима и у табелама су приказани обрађени статистички подаци за евалуацију стања квалитета унутрашње средине и незадовољства локалним условима топлотног комфора, на основу чега су коментарисани резултати и изведени важни закључци о субјективном осећају корисника. Утврђено је да се субјективни осећај корисника о квалитету унутрашњег ваздуха углавном поклапа са резултатима мерења. Показало се да су испитаници најосетљивији на повишене температуре у простору (радијантну и температуру ваздуха), вертикалну температурску разлику, високе концентрације угљен-диоксида и лошу вентилацију. Уочен је негативан утицај услова унутрашње средине на здравље корисника, јер су се у оквиру Сценарија 3 и Сценарија 4 корисници жалили на појаву главобоље и смањења продуктивности и концентрације проузроковане боравком у учионици. У оквиру

истраживања развијен је нови индекс за субјективну евалуацију процентуалног утицаја топлотног комфора на смањење концентрације и радне способности корисника „TIP“. Индекс „TIP“ изражава се у процентима (од 0 до 100%) и представља квантификовану субјективну оцену утицаја топлотног комфора на смањење концентрације и радне способности корисника простора. Показало се да је Сценарио 2 оцењен као сценарио са најповољнијим радним условима, који просечно око 14% утичу на смањење радне способности корисника, док је Сценарио 4 оцењен као најлошији, са скоро 30% вредности TIP индекса. Испитаници су, такође, оценили и локалне индикаторе топлотног комфора, на основу чега се показало да су се сви корисници у Сценариу 2 изјаснили да је интензитет промаје у учионици 0%, да је проценат незадовољних температуром пода такође био 0%. Најмањи проценат незадовољних радијантном асимеријом и вертикалном температурском разликом, у односу на сва четири сценарија, такође је запажен током Сценарија 2.

У оквиру овог поглавља су на дијаграмима приказани и резултати укупно 240 тестова продуктивности студентата током четири седмице истраживања. Показало се да је највећа продуктивност, око 68% просечно, забележена у току Сценарија 2, док је у Сценарију 4 забележено значајано смањење продуктивности студената у односу на Сценарио 2, од око 20%.

У шестом поглављу су приказани резултати нумеричких симулација за услове у учионици дефинисане протоколима у оквиру четири сценарија. Дат је сажет преглед најзначајније литературе из ове области, са могућношћу примене различитих нумеричких модела, а који је претходио избору одговарајућег модела турбуленције за решавање комплексних проблема струјања ваздуха, као и оцене индикатора топлотног комфора у зградама. Приказан је детаљан математички модел који описује проблем природне конвекције користећи једначине одржања масе, количине кретања и енергије, заједно са допунским једначинама за затварање система једначина, као и модел зрачења који је коришћен.

У наставку је описан комерцијални софтверски пакет „Phoenics FLAIR“, који је коришћен за нумеричке симулације физичких параметара и услова општег и локалног топлотног комфора у посматраној учионици. Описано је моделирање геометрије унутрашњости простора и формирање мреже. Проверен је утицај мреже на резултате прорачуна. Модел су валидирани коришћењем процедура валидације, објашњених у овом поглављу, а поређено са резултатима мерења добијених експерименталним истраживањем. Приказани су резултати симулација за четири сценарија, који су валидирани, како за физичке параметре, тако и за индикаторе топлотног комфора. Показано је одлично слагање модела са измереним вредностима, са релативним одступањем до 5% за физичке параметре.

У седмом поглављу је приказана синтеза резултата добијених експериментално, статистички и симулацијама. Анализирани су најважнији резултати и успостављене корелације између продуктивности корисника и њиховог субјективног незадовољства утицајем топлотног комфора. Разматрана је веза новоуведеног индекса TIP са температуром површине коже испитаника и наглашен је субјективни осећај корисника о утицају услова топлотног комфора. На укупно 240 резултата тестова продуктивности утврђена је комплексна природа губитка радне способности, која, како је истакнуто, не зависи само од индекса топлотног комфора, већ и од концентрације угљен-диоксида у простору, као и од личних параметара, који су веома комплексне бихевиористичке природе. Успостављене су

нове корелационе једначине између топлотног комфора, концентрације угљен-диоксида у простору и радне способности.

У наставку је разматран научни допринос дисертације и потенцијалне примене утврђених корелационих једначина. Разматрана је до сада објављена веза топлотног комфора и радне способности у оквиру ранијих истраживања различитих аутора и упоређена са новодобијеним резултатима, на основу унапређених релација. Наглашена је потреба примене корелација базираних на локалним вредностима параметара топлотног комфора, у синтези са условима квалитета унутрашње средине и личним параметрима, које поједностављени глобални модели, до сада публиковани, не могу да опишу. Описује се значај изведене комплексне експерименталне, статистичке и нумеричке анализе, као и научни доприноси дисертације. Након тога су истакнути најважнији закључци добијени синтезом резултата истраживања.

У осмом поглављу дисертације дат је закључак о приказаним и анализираним резултатима, извршена је синтеза парцијалних закључака о резултатима истраживања у претходним поглављима дисертације. Изнети су детаљни закључци са критичком анализом остварених резултата истраживања. Наглашени су свеукупни утицаји локалног стања топлотног комфора и квалитета унутрашње средине на радну способност корисника у нестамбеним зградама. Указано је на правце будућег истраживања у циљу изналажења нових корелација које ближе квантификују личне параметре, који су нераздвојиви део анализе истраживања смањења продуктивности корисника. Истакнут је научни допринос дисертације као и могућност примене остварених резултата приликом решавања конкретних инжењерских проблема.

Након осмог поглавља налазе се Прилог и Литература. Уводу претходи Садржај и Номенклатура.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Анализа информација које су претходиле дефинисању предмета истраживања докторске дисертације кандидата Тамаре С. Бајц, студента докторских студија, се базира, пре свега, на анализи различитих видова публикација (официјелних докумената различитих светских, европских и домаћих институција, као што су Светска здравствена организација, Европска комисија, национална регулатива, итд.), као и великог броја публикованих радова из ове области у међународним часописима.

Основни закључак анализе је да одрживи развој у зградарству, односно здрава и енергетски ефикасна зграда, представља не само данашњи фокус, већ ултимативни захтев за будућим континуалним развојем научне мисли и применама резултата истраживања у практичним решењима, ради директног утицаја на побољшање радних услова, смањења ризика по здравље људи, енергетских уштеда и доприносу стратегија смањења емисија гасова стаклене баште.

Кључни закључци анализе тренутног стања научне мисли у овој области и постигнути резултати са фокусом на предмет истраживања, могу се сумирати у следећим ставовима:

- Досадашња истраживања указују да топлотни дискомфор може умањити радне способности за 5 до 15 процената (*Wargocki, 2009, Wayon, 1996*).

- На основу резултата 24 истраживачких студија о утицају температуре ваздуха унутрашњег простора на административни рад у канцеларијама (*Seppanen at al., 2006*), сугерисана је груба корелација да се радне способности смањују за један проценат, на свако умањење температуре од 1°C у односу на температуру ваздуха за коју је достигнута топлотна равнотежа тела и околне средине.
- Када су у питању школске установе, студија над ученицима старосне доби од 10 и 12 година, указује на чињеницу да снижење температуре у интервалу од 24 - 25 °C на 20°C може унапредити говорну и способност рачунања ђака за 2 до 4 процената (*Wargocki and Wyon, 2006*).
- Треба напоменути да у приказаним оценама нису укључени резултати студија у којима су сами испитаници процењивали своје радне способности, већ су добијени подаци из студија које су се спроводиле у лабораторијским условима.
- Постоје и покушаји да се топлотни дискомфорт корелише са губитком радне способности преко индикатора топлотне угодности PMV, али до данас не постоје студије које би ове корелације експериментално потврдиле (*Roelofsen, 2002, Kosonen, 2004*).

Управо овај простор непостојања експерименталних потврда корелационих односа индикатора топлотне угодности и процента смањења радних способности у реалним условима, указао је на могућност оригиналног приступа и доприноса у реализацији ове докторске дисертације.

Тема истраживања дисертације обухвата развој нових корелационих односа између индекса топлотног комфора и смањења радне способности корисника. У оквиру дисертације развијен је нови индекс за субјективно оцењивање стања топлотног комфора и његовог процентуалног утицаја на смањење радне способности корисника. На основу експерименталних и статистичких резултата истраживања, успостављена је нова корелација индекса TPR са температуром површине коже испитаника и наглашен је утицај услова стања локалног топлотног комфора на субјективни осећај корисника. На укупно 240 резултата тестова продуктивности утврђена је комплексна природа губитка радне способности, која, како је истакнуто, не зависи само од индекса топлотног комфора, већ и од концентрације угљен-диоксида у простору, као и од личних параметара који су веома комплексне природе. Успостављене су нове корелационе једначине између топлотног комфора, концентрације угљен-диоксида у простору и радне способности. Након тога су истакнути најважнији закључци добијени синтезом резултата истраживања.

С обзиром на потребе у будућности за пројектовањем и изградњом нових зграда, као и реконструкцијом постојећих, а имајући у виду да су зграде један од највећих потрошача енергије, тема истраживања обрађена у дисертацији је савремена и значајна с аспекта интегралног пројектовања зграда при чему је потребно остварити одговарајуће услове комфора, као и здраво окружење за боравак и рад корисника. Истраживање управо пружа увид у један од праваца развоја и унапређења постојећих методологија прорачуна у оквиру стандарда који прописују препоручене вредности параметара топлотног комфора у зградама.

У оквиру дисертације кандидат је извршио различита експериментална, статистичка и нумеричка истраживања, на основу којих је развио и унапредио различите моделе прорачуна и ствара оригиналане, комплексане и обједињене математичке корелације између индикатора локалног стања топлотног комфора, квалитета унутрашње средине и радне способности корисника. Извршено је унапређење методологије мерења физичких параметара

стања средине у реалним условима и то на начин увођења детаљног континуалног мерења у великом броју тачака простора. Оваквим приступом омогућена је евалуација утицаја физичких параметара на стање локалног топлотног комфора за сваког појединачног корисника простора, у зависности од места боравка у просторији. Анализа добијених резултата експерименталних истраживања, у том смислу, представља важан допринос за квантификацију утицаја локалног топлотног комфора на здравље и радну способност корисника. У оквиру нумеричког истраживања, развијени су модели који су омогућили анализу и евалуацију параметара стања топлотног комфора и у тачкама у којима није било могуће извршити мерења. Валидација модела је извршена поређењем са добијеним детаљним експерименталним резултатима, при чему је остварено одлично слагање модела са измереним вредностима, са релативним одступањем до 5% за физичке параметре. Кандидат је анализирао утицај локалног стања топлотног комфора на радну способност корисника користећи и статистичке податке добијене у оквиру спроведеног истраживања. За потребе овог истраживања, развијени су нови упитници и тестови за евалуацију продуктивности корисника зграде. Прикупљени су вредни подаци, у реалним условима, у току текућег зимског семестра, за одрасле кориснике простора старости између 20 и 25 година. Досадашњи објављени резултати у доступној литератури су се углавном базирали на истраживањима спроведеним у лабораторијским условима, па спроведена истраживања у оквиру ове дисертације представљају значајан допринос разумевању корелација локалног стања топлотног комфора и опадања радне способности у реалним условима, у нестамбеним зградама. Потреба за оваквом анализом проистекла је из чињенице да је тешко предвидети смањење радне способности у нестамбеним зградама у реалним условима, те да корелације између стања топлотног комфора добијене у лабораторијским условима значајно одступају од резултата у реалним учионицама и зградама сличне намене, са великим бројем корисника. Анализиран је утицај брзине ступања ваздуха, радијантне температуре, вертикалне разлике температуре ваздуха, температуре пода и концентрације угљен-диоксида на смањење радне способности људи. Анализама је показано да вредности индикатора локалног стања топлотног комфора значајно одступају од осредњених вредности и да то одступање представља један од узрока појаве смањења радне способности корисника. Други значајан фактор је концентрација угљен-диоксида, чије повећање изнад прописаних граница доводи до смањења концентрације, поспаности и лошије продуктивности, док је трећи, такође доминантан фактор, скуп сложених личних параметара које је веома тешко квантификовати математички прецизно, а тиме и комплексно раздвојити ове утицаје. Добијене релације између индикатора стања топлотног комфора, концентрације угљен-диоксида и радне способности корисника је могуће користити у савременом процесу интегралног пројектовања зграда, за унапређење стандарда и препорука за постизање оптималних услова угодности у зградама, водећи рачуна о здрављу корисника.

Резултат истраживања је и развој корелација између субјективног доживљаја стања топлотног комфора и стварне продуктивности корисника. Резултати експерименталног, нумеричког и статистичког истраживања су допринели бољем разумевању процеса губитка радне способности у нестамбеним зградама који је последица локалног стања топлотног комфора, али и других фактора који до сада нису разматрани као нераздвојиви део комплексне везе утицаја околине и личних параметара. Формирањем модела и валидацијом нумеричких метода помоћу експерименталних резултата указало се на значај и могућност коришћења нумеричких симулација приликом планирања и пројектовања зграда, као и при одлучивању о системима грејања, хлађења и климатизације, који значајно утичу на постизање оптималних услова за боравак и рад корисника.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе која је коришћена приликом израде дисертације дат је у посебном одељку рада. Литература обухвата радове, законску регулативу и књиге које се односе на термодинамику и феномене преношења топлоте, механике флуида, нумеричку механику флуида, топлотни комфор, квалитет унутрашње средине, радну способност људи, психолошке и субјективне утицаје, задовољство корисника условима средине, итд. Прегледом листе коришћених радова закључује се да је кандидат имао на располагању и проучио доступну референтну литературу. Она је била полазна основа за приказ постојећег стања у области истраживања, али и темељ за избор начина оцене параметара стања топлотног комфора и формирање нових корелација за савремено, интегрално и одрживо пројектовање зграда. У дисертацији је коришћено укупно 103 референце, које су највећим делом савремени радови објављени у водећим међународним часописима или фундаментални радови, који су дали добар основ савременом решавању проблема.

У оквиру дисертације кандидат се позива на анализе, резултате и закључке објављене у референтним докторским дисертацијама, стручним књигама, радовима у међународним часописима и релевантним важећим стандардима из области топлотног комфора, квалитета унутрашње средине и радне способности људи. Кандидат је коректно проучио и цитирао наведене изворе.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методе које су коришћене у току реализације истраживања обухватају:

- Систематски приступ и класификацију доступне литературе кроз критичку анализу и међусобно поређење различитих приступа моделирања и анализе утицајних параметара топлотног комфора;
- Експерименталне методе: У изабраном простору извршена су одговарајућа мерења температуре и релативне влажности ваздуха, радијантне температуре, брзине струјања ваздуха и интензитета турбуленције у карактеристичним мерним тачкама и дефинисаним временским периодима. Резултати ових мерења коришћени су за компаративну анализу неуниформности поља физичких параметара унутрашње средине, као и за валидацију нумеричког модела;
- Нумеричке методе: Нумеричким симулацијама изабраног простора и дефинисаних сценарија, квантификована је тачност модела преноса топлоте, и одређени су физички параметри ваздуха у тачкама простора где није било могуће вршити експериментална мерења. Извршена је валидација симулационог нумеричког модела поређењем са резултатима мерења. На бази одговарајућих модела одређивања локалних индикатора топлотног комфора и процента смањења радне способности људи, приказан је међусобни утицај ових величина и значајно одступање локалних од средњих вредности.
- Статистичке методе: У оквиру докторске дисертације, анкетањем људи, који бораве и уче у посматраном простору, обезбеђени су вредни подаци чијом статистичком обрадом су добијене емпиријске корелације за одређивање интензитета губљења радне способности људи у функцији од индикатора топлотног комфора и концентрације угљен-диоксида у простору.

3.4. Применљивост остварених резултата

Добијени резултати истраживања у оквиру докторске дисертације кандидата Тамаре С. Бајц, дипл.инж.маш., студента докторских студија су нове и унапређене препоруке и смернице за интердисциплинарно пројектовање здравих и енергетски ефикасних зграда у најранијој фази пројектовања, као и укључивање концепта здравих зграда у процесу пројектовања. Развијени нови корелациони изрази за утицај локалних индикатора топлотног комфора на проценат губљења радне способности су применљиви како у фази интегралног пројектовања нових зграда, тако и приликом унапређења постојећих перформанси зграда и термотехничких система.

Примењеним моделима изведена је опсежна нумеричка студија могућности коришћења нумеричких симулација за предвиђање услова топлотног комфора у зградама, као и утицаја стања локалног топлотног комфора на смањење радне способности код људи, као и очекивани проценат незадовољних. Добијени резултати се могу употребити при одлучивању о правцима будућег одабира и пројектовања како самих зграда, тако и термотехничких система. Доношењем нове законске регулативе у Републици Србији 2011. године, а која се односи на процес енергетске сертификације зграда, уведена је и обавеза доказивања постизања услова топлотног комфора, кроз израду Елабората енергетске ефикасности за зграду.

Развијени су нови упитници за статистичко прикупљање података о вредновању услова комфора у нестамбеним зградама, који су опште применљиви у зградама са великим бројем корисника, као што су зграде намењене образовању, управне и административне зграде, пословне зграде итд. Ово је од посебног значаја имајући у виду утицај услова топлотног комфора и квалитета унутрашње средине на здравље и продуктивност корисника, а што је показано у оквиру дисертације. На основу развијених упитника, могу се утврдити неправилности у раду термотехничких система, а отуда и могућности за унапређење како система, тако и саме зграде. Постизањем одговарајућих параметара комфора у зградама, значајно се утиче на здравље и продуктивност корисника.

Развијен је нови индекс ТИР за субјективну евалуацију утицаја параметара средине на радну способност људи и смањење концентрације. Коришћењем овог индекса, у оквиру упитника за статистичко прикупљање података, могуће је детектовати постојање фактора који утичу на смањење топлотног комфора у зградама, а самим тим и одклонити ове узроке, чиме се доприноси развоју и унапређењу концепта здравих зграда.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови комисије сматрају да је кандидат показао да има смисао и знање неопходно да самостално препозна и систематски решава инжењерске и научне проблеме, примењујући савремене методе теоријског, експерименталног, нумеричког и статистичког карактера, да користи расположиву литературу и да успешно влада савременим истраживачким методама. Резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру рада на дисертацији потврђена су и проширена постојећа знања и као таква дисертација представља научни допринос у области термомеханике и термотехнике. Корелациони односи између утицаја локалног стања топлотног комфора и квалитета унутрашње средине на смањење радне способности људи се ретко срећу у литератури. Већина расположивих радова у области се односи на модел општег топлотног комфора, а резултати су добијени углавном у лабораторијским условима, на малом броју испитаника. У докторату се користе сопствени резултати добијени експерименталном, нумеричком и статистичком анализом, на основу којих су развијени нови корелациони односи локалног стања топлотног комфора и продуктивности корисника, добијени у оквиру истраживања у реалним условима, на већем узорку испитаника. Остварени научни допринос докторске дисертације огледа се у следећем:

- унапређена методологија мерења физичких параметара стања средине у реалним условима на начин увођења детаљног континуалног мерења у великом броју тачака простора;
- квантификација утицаја локалне нехомогености физичких параметара стања ваздуха у унутрашњем простору на опште и локалне индикаторе топлотног комфора, коришћењем експерименталних метода;
- модели за комплексну нумеричку анализу параметара локалног топлотног комфора у свим тачкама посматраног простора;
- нови упитници за статистичко прикупљање података и субјективно вредновање параметара општег и локалног топлотног комфора;
- нови тестови за евалуацију степена продуктивности корисника;
- нови индекс ТПР за субјективну процентуалну квантификацију утицаја општег и локалног стања топлотног комфора на продуктивност људи.
- нови корелациони однос између локалних индикатора топлотног комфора и нивоа губљења радне способности људи који бораве у том простору;
- нови корелациони однос између продуктивности и ТПР индекса;
- препоруке и смернице за интердисциплинарно пројектовање нових, здравих зграда у најранијој фази пројектовања, као и укључивање концепта здравих зграда у процесу унапређења постојећих зграда и термотехничких система.
- подигнут ниво знања и разматрања комплексних утицаја стања општег и локалног топлотног комфора, као и квалитета унутрашње средине на здравље и продуктивност људи који бораве и раде у нестамбеним зградама, са великим бројем корисника.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Критичка анализа резултата докторске дисертације постигнута је кроз примену различитих научних метода истраживања, а које су потврђене у међународним публикацијама. Одабир метода у раду извршен је веома пажљиво, како би одговарао проблематици која се обрађује у дисертацији, чиме се обезбеђује релевантност и општа применљивост резултата. Коришћењем три потпуно различите научне методе постигнута је

релевантност и валидност резултата, имајући у виду да је у дисертацији коришћен иновативни приступ у одређивању локалних вредности параметара унутрашње средине.

Разматрање и анализа објављених резултата из области топлотног комфора су коришћени као основа за одабир методологије и научних метода истраживања. Одабране научне методе представљају добар начин истраживања параметара унутрашње средине у реалним условима и дају репрезентативне резултате о стварним величинама како општих, тако и локалних параметара топлотног комфора.

Развој нумеричких модела допринео је познавању индикатора топлотног комфора, у свим тачкама посматраног простора, чак и у оним у којим мерења нису била могућа, што је значајно допринело разумевању локалних вредности параметара, односно смањења продуктивности локално, сваког корисника понаособ. Постигнута су добра слагања резултата на нумеричким моделима за сва четири сценарија, са подацима из обављених експеримената. Резултати добијени симулацијама, представљају одличну полазну подлогу за детаљне анализе у комбинацији са мерењима на постојећим зградама и могу представљати важан алат при пројектовању нових, односно ревитализацији и управљању термотехничких система у постојећим нестамбеним зградама.

Добијени резултати прикупљени статистичким истраживањем, коришћењем нових упитника који су развијени у оквиру овог истраживања, представљају значајан допринос разумевању субјективних перцепција о стању топлотног комфора у зградама. Поређењем са експерименталним, нумеричким резултатима, као и до сада објављеним резултатима, утврђено је да постоје одређена одступања резултата приликом субјективног вредновања од стране корисника. У оквиру истраживања, спроведених у дисертацији, показано је да је могуће имати 0% незадовољних локалним параметрима топлотног комфора, ако су сви остали параметри у жељеним опсезима (показано за температуру пода у Сценарију 2, када је општа вредност PMV=0.29).

Показано је да оптимално решење увек представља компромис између различитих захтева и да умногоме зависи од концентрације угљен-диоксида у простору, односно од квалитета унутрашњег ваздуха и вентилације простора.

У резултатима је надаље приметно да постоји значајан утицај личних параметара на продуктивност корисника. Досадашња истраживања су разматрала само утицаје топлотног комфора на човека, међутим у дисертацији је показано да радна продуктивност људи није само функција стања топлотног комфора, већ да умногоме зависи и од личних параметара корисника, који су стохастичка величина и веома их је тешко квантификовати математички прецизно. За њихову квантификацију предложена су мултидисциплинарна истраживања која обухватају и неуро-бихевиористичке тестове, као и медицинска истраживања испитаника.

Развијене корелације које обједињују утицајне параметре стања топлотног комфора и квалитета унутрашње средине, приказане у дисертацији, омогућиле су боље разумевање и прецизније квантификовање смањења продуктивности корисника нестамбених зграда. Комбиновањем развијених нових упитника и корелација, заједно са једноставнијим мерењима квалитета ваздуха у постојећим зградама, могуће је значајније утицати на смањење опадања продуктивности људи и побољшање свакодневних услова за рад и боравак, као развој концепта здравих зграда у фази интегралног пројектовања.

4.3. Верификација научних доприноса

Део доприноса докторске дисертације верификован је радовима које је кандидат публиковао у међународним часописима на SCI листи, радовима у којем је примењена

нумеричка и експериментална анализа параметара топлотног комфора и њиховог утицаја на здравље и продуктивност људи у нестамбеним зградама, као и неколико радова у домаћим часописима, као и у више радова саопштених на скуповима од међународног значаја:

Категорија M21

1. **Bajc, T.**, Todorović, M., Svorcan, J., *CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand*, Energy and Buildings, 2015, VOL.98, ISSN 0378-7788, [doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.018](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.018), Elsevier, pp. 39-44. (M21, IF 2014 (2015): 2.884)

Категорија M23

2. **Bajc, T.**, Todorović M., Papadopoulos, A., *Indoor Environmental Quality in Non-residential Buildings – experimental investigation*, Thermal science, 2016, VOL.20, Supplement 5, ISSN 0354-9836, doi: [10.2298/TSCI16S5521B](https://doi.org/10.2298/TSCI16S5521B), Vinča Institute of Nuclear Sciences, pp. S1521-S1529 (M23, IF 2015: 0.939)

Категорија M24

3. Todorović, M., Ristanović, M., Lazić, D., Galić, R., **Bajc, T.**, *A novel laboratory set-up for investigation of intelligent automatic control in complex HVAC systems*, FME Transactions, 2015/3, VOL.43, ISSN 1451-2092, Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade, pp. 243-248. (M24)

Категорија M33

4. **Bajc, T.**, Todorović M., Papadopoulos, A., *Indoor Air Quality in Office Buildings – experimental investigation*, 17th International symposium on Thermal science and engineering of Serbia, 20-23.10.2015., Sokobanja, Serbia, ISBN 978-86-6055-077-6, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, Proceedings on <http://simterm.masfak.ni.ac.rs>. (M33)
5. **Bajc, T.**, Todorović M., Stevanović, Žarko, Stevanović, Žana, Banjac, M., *Local thermal comfort indices impact on productivity loss in classroom*, The 1st international conference on buildings, energy, systems and technology, 2.-4.11.2016., Belgrade, Serbia, Society of thermal engineers of Serbia, Proceedings on <http://www.best2016-conference.com/papers-presentations.php>. (M33)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „**Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама**“ (“**The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings**”) кандидата Тамаре С. Бајц, дипл. инж. маш., студента докторских студија, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета у Београду.

На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана тематика значајна и актуелна у стручној и научној јавности, констатује се да је кандидат Тамара С. Бајц, дипл. инж. маш., студент докторских студија, успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања. Кандидат је остварио оригиналне резултате везане за моделирање и анализу утицаја локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама, користећи при том расположиву литературу и резултате експерименталних, статистичких и нумеричких истраживања. Резултати истраживања су систематично обрађени

и на основу њих изведени су вредни закључци о утицајима локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама. Изведена анализа и развијене корелације представљају користан алат за решавање конкретних инжењерских проблема. Научна и стручна јавност је упозната са резултатима истраживања публиковањем два рада у међународним часописима (1 рад категорије M21 и 1 рад категорија M23), један рад у националном часопису међународног значаја (1 рад категорија M24), као и 2 рада саопштена на скуповима од међународног значаја и штампана у целини (2 рада категорије M33).

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука, ужа научна област Термомеханика и Термотехника, па сагласно томе предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да прихвати Реферат Комисије и упути га Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на усвајање, а дисертацију **„Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама“** (**“The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings”**) кандидата Тамаре С. Бајц, дипл. инж. маш., студента докторских студија, стави на увид јавности.

У Београду, 05.04.2017. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Милош Бањац, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Маја Тодоровић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Милан Гојак, ванредни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Агис Пападопулос, редовни професор
Универзитет Аристотел у Солуну – Машински факултет

др Жана Стевановић, научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча

TO THE DOCTORAL STUDIES COUNCIL

Subject: report on candidate **Tamara S. Bajc**'s (dipl.mech.eng., PhD student) finished doctoral dissertation

According to decision number 491/3 on 02.03.2017, we, members of the committee, were called for the examination, assessment and defense of the doctoral dissertation:

**„THE LOCAL THERMAL COMFORT IMPACT ON WORKING PRODUCTIVITY LOSS
IN NON-RESIDENTIAL BUILDINGS”**

**(„УТИЦАЈ ЛОКАЛНОГ СТАЊА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА НА СМАЊЕЊЕ РАДНЕ
СПОСОБНОСТИ У НЕСТАМБЕНИМ ЗГРАДАМА“)**

by candidate **Tamara S. Bajc**, dipl.mech.eng., PhD student

The committee proposes the following report based on the examination of the submitted dissertation and other supporting materials, as well as discussion with the candidate:

REPORT

1. INTRODUCTION

1.1. Timeline of the approval and development of the dissertation subject

The candidate **Tamara S. Bajc** (dipl.mech.eng., PhD student) was enrolled in her first year of doctoral studies at the Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade during the academic year 2009/2010. The candidate was enrolled in PhD studies according to the curriculum approved by the Belgrade University Senate in 2007, which follows the 2005 law on Higher Education that states that PhD studies cannot last longer than 6 years. During her studies, the candidate, Tamara S. Bajc, used the right to suspension of rights and obligations in the academic year 2014/2015. According to these rules, Tamara S. Bajc had an obligation to defend the doctoral dissertation by 30th of September 2016.

According to Tamara S. Bajc's request, and Decision number 1951/1 from 08.09.2016, in accordance with University of Belgrade Statute regulations, the deadline for the dissertation defense was extended for two semesters – to the 30th September 2017.

On 24.12.2015, following Tamara S. Bajc's request (number 2498/1) from 02.12.2015, the proposal by Dr Milos Banjac and the consent of the Department of Thermal Mechanics (number 2489/2) from 21.12.2015, for the dissertation subject application and the nomination of an assessment committee for the assessment of the requirements of the candidate and the scientific foundation of thesis subject, the Academic Council of the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade accepted the thesis subject and appointed Dr Milos Banjac as supervisor, and the

committee for the assessment of the requirements of the candidate and the scientific foundation of the thesis subject was nominated and comprised as follows (decision number 2498/3):

- Dr Milos Banjac, full-time prof., University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
- Dr Maja Todorovic, assoc. prof., University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
- Dr Zarko Stevanovic, scientific adviser, University of Belgrade, Vinca Institute of Nuclear Science

According to the Committee Report (number 94/1) from 15.01.2016. and the decision of the Academic Council (number 94/2) from 21.01.2016., the Faculty of Mechanical Engineering submitted a request to the Academic Council of Technical Sciences University of Belgrade to approve Tamara S. Bajc's (dipl.mech.eng., PhD student) proposed doctoral dissertation on the subject of **"The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings"** („Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама“), under the supervision of Dr Milos Banjac. This was approved in a session held on 08.02.2016 (decision number 61206-394/2-16).

According to the announcement of prof. dr. Milos Banjac, the supervisor, the PhD candidate Tamara S. Bajc (dipl. mech. eng.) has finished her doctoral dissertation, titled **"The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings"** („Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама“). So on 02.03.2017, according to the proposal of the Department of Thermal Mechanics, the Academic Council of Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade made a decision (number 491/3) on the nomination of the committee for the assessment and defense of the doctoral dissertation. The committee is comprised as follows:

- Dr Milos Banjac, full-time prof., University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
- Dr Maja Todorovic, assoc. prof., University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
- Dr Milan Gojak, assoc. prof., University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
- Dr Agis Papadopoulos, full-time prof., University Aristotle Thessaloniki, Greece, Faculty of Mechanical Engineering
- Dr Zana Stevanovic, research scientist, University of Belgrade, Vinca Institute of Nuclear Science

1.2. The scientific discipline of the dissertation

The PhD thesis **"The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings"** („Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама“) by Tamara S. Bajc belongs to the scientific discipline of technical sciences – mechanical engineering and the scientific sub-discipline of thermal mechanics. The Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, manages all research in these fields.

The dissertation was completed under the supervision of Dr Milos Banjac, full-time professor for a number of subjects dedicated to thermal mechanics and head of the Department of Thermal Mechanics at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade.

1.3. Candidate's Curriculum Vitae

Candidate Tamara S. Bajc (dipl. mech. eng., PhD student) was born in Belgrade, Republic of Serbia, on 12.03.1984. She finished Marko Oreskovic primary school with excellent grades, was awarded the "Vuk Karadzic diploma" and was elected best pupil in the graduating class. She attended the «Zemunaska gimnazija» high school in Zemun, which she also finished with excellent grades. She enrolled at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade in the academic year 2003/2004, and finished on 26.02.2009 with a grade average of 8,72 (out of the maximum 10) at the Department of Thermal Mechanics, where she also received a grade of 10,00 for her M.Sc. thesis on air-conditioning, titled: "The energy demands of a passive house with Trombe walls for Belgrade weather data", under the supervision of Dr Maja Todorovic.

She worked for the company "Aerprojekt" as a mechanical engineering designer for HVAC installations from May 2009-2010. During this time she was involved in more than twenty mechanical design projects for building permits and construction, working on HVAC installation design for residential and office buildings, hotels, printing centars, garages, etc.

Tamara enrolled in PhD studies at the Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade in the academic year 2009/2010. In January 2011, she was employed at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, to work as a research and teaching associate on a research project (number TR33047) funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development.

In 2012, Tamara S. Bajc participated in the „International ASHRAE student design competition” as leader of the team representing the University of Belgrade. She won third place in this prestigious competition in the “Integrated sustainable building design”category.

In April 2016, she was selected as the teaching assistant for the scientific sub-discipline of Thermal Mechanics at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade. This was following the decisions of the selection committee on the 07.04.2016 (number 188/5) and 08.04.2016 (number 188/6).

During her PhD studies, she passed all of the compulsory exams dictated by the Statute of the Faculty, with an average grade of 10,00 (from a maximum of 10), as well as two professional exams from the Serbian Chamber of Engineers. Additionally, she has two licences for HVAC installation design.

She is the author or coauthor of two published papers in international scientific journals, one in the M21 category and one in the M23 category. Additionally, she is the author or coauthor of one paper in an internationally important national scientific journal, in the M24 category, and four papers in national scientific journals, of which three papers were in the M51 category and one was in the M52category. She has also presented eleven papers at international conferences, which were printed in the proceedings.

The candidate speaks fluent English and basic German and Russian. She has professional working knowledge of word processing software (MSOffice), graphics software (AutoCAD, Inventor, Corel draw, Adobe Photoshop), software for numerical fluid dynamics simulations (Phoenix Flair), as well as software for mathematic calculations, design and HVAC calculations and design MATLAB, Origin, HEVA Comp, Carrier HAP E-II, 20, AirCalc, Design Builder, etc.

2. DISSERTATION DESCRIPTION

2.1. Content of the dissertation

The doctoral dissertation **“The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings”** („Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама“) by Tamara S. Bajc (dipl.mech.eng., PhD student) is written in English with an additional expanded abstract in Serbian (using the Cyrillic alphabet). It is 174 pages in A4 format with 76 figures, 69 tables, 63 numerated expressions and 10 page bibliography.

The dissertation chapters are as follows:

1. Introduction
 2. IEQ and thermal comfort – literature review
 3. Working productivity loss – literature review
 4. Experimental investigation
 5. Statistical Analysis
 6. Numerical simulations
 7. Amalgamation of measurements, statistical and numerical results
 8. Final conclusions and suggestions for future work
- References.

Additionally, the dissertation contains an expanded abstract in Serbian and English, a list of terms and an appendix, as well as the candidate's curriculum vitae and declaration of authorship, her declaration of the identity of the hard and electronic copies of the doctoral dissertation, and the declaration on the use of the submitted materials.

2.2. Brief description of selected chapters

The first chapter highlights the impact of healthy and energy efficient environments in occupied buildings on health, productivity and emissions reduction. The most significant published results regarding thermal comfort and its impact on occupants' productivity loss are shown here. When considering the case studies, it was noted that the study focused on quantifying the percentage of dissatisfied users and their productivity loss in non-residential buildings, with deviation value from the mean as a function of the local physical parameters of the environment. Then the subject, scientific methods and research goals are defined, taking into consideration the use of modern experimental, numerical and statistical research methods for quantifying the influence of the local indoor environment parameters condition (air temperature, radiant temperature, air relative humidity, air velocity and turbulence intensity) on the level of thermal comfort of interior spaces in non-residential buildings.

The specific objective of this doctoral thesis was the establishment of the correlation between thermal comfort conditions and the working productivity loss. The practical aim of this doctoral thesis was to provide novel techniques and guidelines to designers based on the research results in order to provide a comprehensive interdisciplinary approach to design, and to implement the consideration of quality thermal comfort conditions in the earliest stages of design.

The scientific research methods used are also presented and are divided into three groups: experimental, numerical and statistical methods. Experimental methods were used in the comparative analysis of the non-uniformity of physical fields and parameters in indoor

environments. The corresponding measurements of the air temperature and relative humidity, radiant temperature, air velocity and turbulence intensity were carried out in the measurement points selected in accordance with required characteristic variables, and in the defined time intervals.

Numerical simulations of physical parametric and thermal comfort indicators of the elected model space, within the defined scenarios, were used for evaluation and accuracy quantification of the heat transfer model and the determination of physical properties of air at the points within the room where it was not possible to perform the experimental measurements.

Statistical methods were also used as part of the doctoral dissertation creation process. Significant conclusions were derived from the statistical analysis of data provided by surveys of occupants in the monitored environments, and the amalgamation of experimental and numerical analyses. Based on this, empirical correlations for the determination of thermal comfort indicators and the intensity of loss of working ability were established.

A short review of the structure of the dissertation by chapter was also shown.

In the second chapter the results of research on thermal comfort accomplishment and the indoor environmental quality in global literature and legislation are discussed in detail. An overview of the most important standards and regulations within the field of thermal comfort and indoor environmental quality is also presented. Thermal comfort indicators, defined in the current world regulations are shown in detail, along with the maximum permissible values to achieve the desired comfort conditions in buildings.

The third chapter provides an overview of the published results on the impact of the indoor environmental quality and thermal comfort on occupants' productivity. The so far published correlations between thermal comfort indicator PMV and productivity loss are discussed together with possible directions for further research.

The focus of the fourth chapter is on the experimental research carried out during the PhD research. The climate area in which the researched building is located is described, as well as the basic climate characteristics for the Belgrade region over the past fifty years, based on data published by the Republic Hydrometeorological Institute. Additionally, the values of external temperature and humidity measured during the observed research period are shown.

The physical model was defined and the building - the classroom where the measurement were carried out - was selected accordingly. The characteristics of the room's thermal envelope, dimensions, orientation, and existing central heating system are described in details.

Following this is a detailed description of the measurement procedures, which were done during the experimental part of the research. Using the measurements protocol, the following values were defined and then measured: internal surface temperatures, air temperature and relative humidity in more than thirty points in the classroom, radiant temperature, air velocity, carbon-dioxide concentration and occupants' skin surface temperature. Four different scenarios were established, in terms of achieving different thermal comfort parameters of the interior environment in order to quantify the impact of these differences on thermal comfort indicators and the occupants' productivity. The features of the measuring devices used during the research are also presented in this chapter, as well as the exact position of the instruments during the implementation of the four pre-defined scenarios.

After this follows the results and analysis of the measurement of physical quantities, locally, for each seating position, and the average values for each scenario. The results of the thermal comfort indicator values and productivity loss obtained from physical measurements, based on calculations and suggested methods in the existing literature, are also shown. Special attention was dedicated to the local thermal comfort parameters. On the basis of the definition and methodology

recommended by standard ISO 7730: 2005, and based on the results of measured physical quantities in the space, values of the local thermal discomfort indicators were calculated, such as the vertical temperature difference, the percentage of dissatisfaction with floor temperature, the draught influence and the radiant asymmetry.

The influence of the local thermal comfort state on the occupants' skin surface temperature are also shown, based on the measurement results, which were performed during a four-week period, on a significant number of respondents. The correlation between the users' skin surface temperature and their votes regarding the thermal characteristics of the observed area were also presented.

The results of the thermal imaging camera recording of the observed classroom's thermal envelope and the surface of users' clothing are also shown at the end of this chapter. The results obtained by the thermal imaging camera recording were used as a control measurement within each of the scenarios.

In fifth chapter the methodology and results of the statistical survey conducted in the classroom are presented. The original questionnaires developed during this research, following the recommendations of current international regulations and standards, are presented and used for statistical data collection, along with a detailed description of the sections and questions given in the questionnaires. Two kinds of questionnaires were used during the research. The first kind collected general data related to age, sex, physical condition and clothing of the population that were surveyed, then the part with evaluation of the thermal comfort conditions; as well as the local parameters that can affect thermal discomfort and evaluation of parameters regarding the indoor environmental quality, as well as the subjective feeling of the users about the impact of these parameters on working productivity loss, concentration and overall health of the user. The second kind was a more specific questionnaire, which included a concentration test. A significant number of concentration tests were performed during the four-week period. Tests were carried out every day and the level of productivity, thus productivity loss, was determined using these results.

The diagrams and tables show the results of the statistical analyses for evaluating the indoor environment quality state and dissatisfaction with the local thermal comfort conditions. These results were discussed, from which valuable conclusions regarding occupants' subjective feelings were drawn. It was found that the users' subjective feelings about the indoor air quality generally correspond to the results of measurements. It has been shown that the occupants were most sensitive to higher temperatures in the space (radiant and air temperature), the vertical temperature difference, a high concentration of carbon dioxide and poor ventilation. A negative impact of indoor environmental conditions on users' health was noted, because in Scenario 3 and Scenario 4, users complained of headaches and the productivity and a decrease in concentration caused by staying in the classroom. A novel index for the quantitative subjective evaluation of the percentage of thermal comfort impact on the concentration and productivity loss (TIP) was developed in the research. The "TIP" index is expressed as a percentage (from 0 to 100%) and represents a quantitative subjective evaluation of the impact of thermal comfort on the concentration and productivity loss of users. Scenario 2 was rated as the scenario with the best working conditions, with influence on loss of working productivity at an average of 14%, while Scenario 4 was rated as the worst, with a TIP index value of almost 30%. Respondents also rated the local thermal comfort indicators and based on what is shown, all users in Scenario 2 declared that the intensity of the draught in the classroom was 0%, the percentage of those dissatisfied with the floor temperature was also 0%. The lowest percentage of those dissatisfied with the radiant asymmetry and the vertical air temperature difference was also observed during scenario 2, in comparison with all four scenarios.

Diagrams of the results of a total of 240 tests of students' productivity during the four-week study are also shown in this chapter. It has been shown that the maximum productivity of 68% was recorded during Scenario 2 and in Scenario 4, a significant loss of students' productivity of about 20% in comparison with Scenario 2 was recorded.

The sixth chapter presents the results of numerical simulations of the conditions in the classroom defined by the protocols in the four scenarios. A concise overview of the most important literature regarding this topic, with the possibility of different numerical models' applicability is shown, and which preceded the selection of a suitable turbulence model for solving complex problems of airflow, as well as the assessment of thermal comfort indicators in buildings. A detailed mathematical model describing the problem of natural convection, using equations of mass, momentum and energy conservation, together with additional equations of the equation system closure is presented, along with the radiation model that was used.

Following this, the commercial software package "Phoenics FLAIR", which was used for numerical simulation of physical parameters and the general and local thermal comfort in the representative classroom, is described. The geometry modeling of the interior space and grid forming is also described. The influence of the grid on simulation results was checked. The models were validated using the validation procedure, discussed in this section, and compared to the measurement results obtained by the experimental research. The simulation results for four scenarios are shown, which were validated for both physical parameters and the thermal comfort indicators. It has been shown that the agreement between the model and the measured values was very good, with a relative deviation of 5% for the physical parameters.

The seventh chapter presents the combined results obtained through experiment, statistical analysis and the use of numerical simulation. The most important results were analyzed and the correlation between the users' productivity and their subjective dissatisfaction with thermal comfort were established. The relationship between the newly introduced index "TIP" with the skin surface temperature of respondents are considered and the users' subjective feelings about thermal comfort conditions are also highlighted. Using a total number of 240 productivity test results, the complex nature of productivity loss was determined, which, as highlighted, does not only depend on the thermal comfort index, but also on the concentration of carbon-dioxide in the space, as well as on a variety of personal parameters, which are very complex in nature. Based on this analysis, a unique correlation equation between thermal comfort, the concentration of carbon dioxide in a space and productivity was established.

The dissertation's scientific contribution and potential applications of the established correlation equations are also considered in this chapter. The chapter considers existing published relations between thermal comfort and productivity, in the context of previous research by various authors, and compares these with the novel results obtained in this research. The need for the application of a correlation based on local values of thermal comfort parameters in combination with the quality of indoor environment and personal parameters is highlighted, which the simplified universal models published so far cannot describe. The importance of the performed complex experimental, statistical and numerical analysis is described, as well as the scientific contribution of the thesis. Finally, the most important conclusions obtained through combined analysis of the research results are emphasized.

The eighth section of the dissertation contains the conclusions drawn from the results and analysis, representing the amalgamation of the partial conclusions outlined in previous sections of the dissertation. Detailed conclusions with critical analysis of the achieved results are highlighted. The overall impact of the local thermal comfort conditions and indoor environmental quality on users' productivity loss in non-residential buildings are outlined. And directions for future research

to find new correlations that more closely quantify the various personal parameters, which are an inseparable part of the research analysis of users' productivity loss, are suggested. The dissertation's scientific contribution is highlighted, as well as the possibility of applying the achieved results to solve specific engineering problems.

The Contents and List of Terms precede the eight chapters of the thesis, while the Appendix and Bibliography follow after.

3. ASSESMENT OF DISSERTATION

3.1. Contemporary relevance and originality

The analysis literature conducted by the candidate, Tamara S. Bajc, before the selection of her thesis topic was based on a review of different publications by the renowned national, European and international organizations and institutions, such as the European Commission, World Health Organization, national and EU regulations, and a great number of papers published in national and international journals.

The main conclusion, based on this analysis, is that sustainable development and the design of healthy and energy efficient buildings are not only key focus areas, but also represent the ultimate demands for future scientific progress; bearing in mind the implementation of the results in practice, which would lead to improvements in working conditions, decreasing the risk of health problems, increased energy savings and a reduction of greenhouse gas emissions.

The most important conclusions from the literature survey on this subject, based on actual scientific ideas, can be summarized as follows:

- Previous research indicates that thermal discomfort can reduce productivity by about 5 to 15 % (Wargocki, 2009, Wayon, 1996).
- According to the results of 24 research studies on air temperature impacts on working productivity in offices (Seppanen et al., 2006), working productivity is decreased by around 1% for every 1% in temperature reduction, where an equilibrium is reached between the body and room temperatures.
- Looking at thermal comfort in school classrooms, studies on the productivity of pupils aged 10 and 12, imply that a temperature decrease from 24-25 °C to 20°C can improve verbal and numerical performance by about 2 to 4 % (Wargocki and Wyon, 2006).
- It is important to emphasize that these results are based on experiments that were performed in laboratories and do not include results obtained from occupants' personal evaluation of performance.
- There are attempts to correlate thermal discomfort with reduction of working performance through PMV and PPD indexes, but there are no studies that experimentally confirm this relation (Roelofsen, 2002, Kosonen, 2004).

It is precisely this fact that there are no experimental correlations between thermal comfort indicators and loss of working productivity in real conditions that indicates the novel approach and strong scientific contribution of this doctoral thesis.

The dissertation topic includes the development of unique correlations between thermal comfort indexes and occupants' productivity loss. The dissertation research also develops a novel index for the subjective evaluation of the state of thermal comfort and its percentage impact on

occupants' productivity loss. Based on the experimental and statistical research results, a novel TIP index correlation with the respondents' skin surface temperature was established and the impact of local thermal comfort conditions on users' subjective feelings was highlighted. From a total of 240 productivity test results, the complex nature of productivity loss was determined, which, as the research highlights, depends not only on the thermal comfort index, but also on the concentration of carbon dioxide in the space, as well as personal parameters that are very complex in nature. The research also establishes a novel correlation equation between thermal comfort, the concentration of carbon dioxide in a space and productivity; which contributed to the most important conclusions obtained by the combined analysis of the research results.

Due to the future need for new building design and construction, and the reconstruction of existing buildings, and bearing in mind that buildings are one of the largest areas of energy consumption, the research topic addressed in this thesis is current and relevant in terms of integrated building design, where it is necessary to achieve appropriate comfort conditions and healthy living environments for users. This research provides insight into one direction of development and improvement of existing calculation methodologies within the standards that prescribe the recommended thermal comfort parameter values in buildings.

The candidate has carried out a number of different experimental, statistical and numerical investigations in the research, based on which she has developed and improved various calculation models and created original, complex and coherent mathematical correlations between local thermal comfort indicators, indoor environmental quality and occupants' productivity. The candidate has also improved the methodology for measuring physical environmental parameters in real conditions, by introducing detailed continuous measurement in a large number of places within the volume. This approach enables the evaluation of the impact of physical parameters on the state of local thermal comfort for each individual space user, depending on the seating position in the room. Analysis of research results obtained in this way represents an important contribution to the quantification of impact of the local thermal comfort on occupants' health and productivity. For the numerical research, the candidate also developed models that enabled the analysis and evaluation of thermal comfort parameters in areas where it was not possible to carry out the measurement. Model validation was performed by comparison with the obtained detailed experimental results, whereby an excellent agreement between the model and the measured values was achieved, with a relative deviation of 5% for the physical parameters. The candidate has analyzed the impact of the local thermal comfort state on the users' working ability using statistical information obtained through surveys. Original questionnaires and tests to evaluate the productivity of building occupants were created in order to fulfill the research needs.

Valuable data was collected in real conditions during the ongoing winter semester, for adult occupants between the ages of 20 and 25. The results published so far in the literature are mainly based on research conducted in laboratory conditions, but the research conducted for the dissertation represents a significant contribution to the understanding of the correlation between local thermal comfort and working productivity loss in real conditions, in non-residential buildings. The need for this analysis came from the fact that it is difficult to predict productivity loss in non-residential buildings in real conditions, and that the correlation between the thermal comfort obtained in laboratory conditions substantially differs from the results in real classrooms and buildings of a similar sort, with large numbers of users. The research also analyzes the impacts of air velocity, radiant temperature, vertical air temperature differences, floor temperature and the concentration of carbon dioxide on occupants' productivity loss. Analyses have shown that the local value of the indicator of thermal comfort conditions differs significantly from the averaged values, and that this deviation is one of the causes of the occupants' productivity loss. The second

significant factor is carbon dioxide concentration which, when increased above the prescribed limits, leads to concentration loss, drowsiness and reduced productivity loss. The third, and also dominant, factor is the sum of complex personal parameters that are very difficult to quantify precisely, and therefore complex to separate and analyze individually. The obtained relations between the thermal comfort indicators state that the concentration of carbon-dioxide and occupants' productivity can be used in the design process of modern integrated building to improve the standards and recommendations to achieve the optimal conditions in buildings, taking into account the health of users.

An additional outcome of the research is also the development of the correlation between the subjective experience of the thermal comfort state and the actual users' productivity. Results of experimental, numerical and statistical research have contributed to a better understanding of the process of loss of working productivity in non-residential buildings, which is the consequence of a local thermal comfort state, but also other factors that have not been considered so far, as an inseparable part of the complex relations between environmental impacts and personal parameters. Creating models and combining this with numerical methods, further validated by experimental results, highlights the importance and potential of using numerical simulation during the planning and design phase of a building, as well as to make decisions on new systems of heating, cooling and air conditioning implementation, which significantly affect the optimal conditions for users' comfort and productivity.

3.2. Review of references and literature used

The list of references used during the thesis is presented in a separate chapter of the dissertation. The literature includes papers, legislation and books related to the phenomena of thermodynamics and heat transfer, fluid mechanics, numerical fluid mechanics, thermal comfort, indoor environmental quality, occupants' productivity, psychological and subjective influences, occupants' satisfaction with indoor environmental conditions etc. Reviewing the list references, it is concluded that the candidate had ample material available to them and made excellent use of this. It was the starting point to review the current situation in this field of research, but also the basis for selecting the evaluation methods for thermal comfort parameters and the creation of new correlations for modern, integrated and sustainable building design. A total of 103 references were used in the dissertation, most of which are current papers that have been published in leading international journals, or fundamental papers that provide a good foundation for contemporary problem solving.

Within the thesis the candidate refers to the analysis of the results and conclusions published in reference dissertations, books, papers in international journals, and relevant current standards in the field of thermal comfort, indoor environmental quality and occupants' productivity. The candidate has adequately studied and cited these sources.

3.3. Description and appropriateness of scientific methods

The methods used in this research include:

- A systematic approach to the classification of available literature, critical analysis and mutual comparison of different modeling approaches, and analysis of influential thermal comfort parameters.
- Experimental methods: in the specified classroom, corresponding measurements of the temperature and relative air humidity, radiant temperature, air velocity and turbulence

intensity were carried out in a variety of measurement points and in the defined time intervals. The results of these measurements were used for the comparative analysis of non-uniformity of physical parameter fields in the indoor environment, and for the verification of numerical models.

- Numerical methods: Using numeric simulations of the selected areas and defined scenarios, the accuracy of the heat transfer model was quantified, and the physical parameters of the air were determined in places within the volume where it was not possible to conduct experimental measurements. The validation of numerical simulation models was done using comparisons with measurement results. Using appropriate models for determining the local thermal comfort indicators and the percentage of occupants' working ability illustrated the mutual influence of these values, and significant deviations from the mean values.
- Statistical methods: Valuable data was provided in the doctoral thesis through the use of surveys of regular users of the observed space. The empirical correlation for determining the intensity of productivity loss as a function of the thermal comfort indicators and concentration of carbon dioxide in the space was established through statistical analysis of this data.

3.4. Applicability of results

The research results obtained candidate Tamara S. Bajc's (dipl.mech.eng., PhD student) doctoral research are new and improved recommendations and guidelines for the interdisciplinary design of healthy and energy-efficient buildings in the earliest design stages, that include the concept of healthy buildings in the design process. The new correlations developed to assess the impact of local thermal comfort indicators on the percentage of productivity loss are applicable both in the integrated design stage of new buildings, and in the performance enhancement of existing buildings and HVAC systems.

Using the applied models, the candidate carried out an extensive numerical study on the possibility of using numerical simulations to predict thermal comfort conditions in buildings, as well as in the prediction of the impact of local thermal comfort on human productivity, and the expected percentage of user dissatisfaction. The results can be used to make decisions about the future selection and design of buildings themselves, as well as HVAC systems. In 2011, the Republic of Serbia adopted new legislation on the energy efficiency certification of buildings. This introduced new requirements that demand proof of adequate levels of thermal comfort in buildings by designing and conducting energy efficiency reports.

The original questionnaires used in this research were developed to collect statistical data on the evaluation of the comfort conditions in non-residential buildings, which are generally applicable to any buildings with a large number of users, such education establishments, administrative buildings, office buildings and so on. This is particularly important when considering the thermal comfort and indoor environmental quality impacts on health and productivity, which is demonstrated throughout the dissertation. Irregularities in the function of HVAC systems can be determined based on these questionnaires, and hence the opportunity to improve these systems and buildings themselves. Achieving the appropriate comfort conditions in buildings significantly affects the health and productivity of users.

The thesis also develops a novel TIP index for the evaluation of the subjective impacts of environmental parameters on occupants' productivity and concentration. By using this index in the collection and analysis of questionnaire data, it is possible to detect the existence of factors that decrease levels of thermal comfort in buildings, based on which, these causes can be eliminated, thereby contributing to the development and promotion of the concept of healthy buildings.

3.5. Rating the candidate's skills and ability to conduct independent scientific work

The Members of the committee consider the candidate to have the skills and knowledge required to independently recognize and systematically solve engineering and scientific problems, and to use the available literature to successfully master modern research methods, applying modern theoretical, experimental, numerical and statistical methods. The results of the doctoral thesis are evidence of the candidate's ability to conduct independent scientific research.

4. ACHIEVED SCIENTIFIC CONTRIBUTION

4.1. Review of the achieved scientific contributions

Existing knowledge was confirmed and extended as part of the doctoral research, thus confirming its scientific contribution in the fields of thermomechanics and thermodynamics. Correlations between the local thermal comfort state and indoor environmental quality impact on occupants' productivity loss can rarely be found in the existing literature. Most of the available studies in this field are related to general models of thermal comfort, and the results are obtained mainly in the laboratory, using a small sample size. In the dissertation, the candidate's own results were obtained using a variety of experimental, numerical and statistical analysis methods, from which she develops novel correlations of local thermal comfort conditions and user productivity, obtained in real conditions, using a large sample group of respondents. The scientific contributions achieved in the doctoral dissertation are as follows:

- improved methodology for measuring the physical parameters of the environment in real conditions introducing detailed, continuous measurement across a large number of locations within the volume.
- quantification of the impact of local physical parameters of air non-homogeneity in indoor environments on the general and local thermal comfort indicators, using experimental methods.
- models for the complex numerical analysis of local thermal comfort parameters in all points of the observed space.
- original questionnaires for statistical data collection and a subjective evaluation of the parameters of general and local thermal comfort.
- novel tests for the evaluation of user productivity levels.
- a new TIP index for the quantification of the subjective impact of general and local thermal comfort on occupants' productivity.
- new correlation relations between local thermal comfort indicators and the level of occupants' productivity.
- new correlations between productivity and TIP index.
- recommendations and guidelines for the interdisciplinary design of new, healthy buildings during the earliest stages of design, as well as the inclusion of the concept of healthy buildings in the process of upgrading existing buildings and HVAC systems.
- increased levels of knowledge and consideration of the complex impacts of general and local thermal comfort conditions, and the quality of the indoor environment on the health and productivity of occupants in high-capacity non-residential buildings.

4.2. Critical analysis of the research results

The critical analysis of the results of the doctoral dissertation is achieved through the use of various scientific research methods, evaluated in international publications. The selection of methods in the thesis was carried out very carefully in order to correspond to the issues treated in the research, thus ensuring the relevance and general usefulness of the results. The relevance and validity of the results is achieved by using three completely different scientific methods, bearing in mind that an innovative approach was used in the thesis for determining the local values of the indoor environmental parameters.

A review and analysis of existing studies in the field of thermal comfort were used as a basis for the selection of the methodology and scientific methods. The selected scientific methods represent a good approach to explore the parameters of indoor environments in real conditions and provide representative results on the real values of both general and local thermal comfort parameters.

The development of numerical models contributed to the widening of knowledge of thermal comfort indicators in all observed spots of the volume, even in those where experimental measurements were not possible, which significantly contributes to the understanding of local parameter values, or local productivity loss for each occupant. Good agreement for the numerical model results in all four scenarios was achieved using data from the performed experiments. The simulation results present a good starting point for detailed analysis in combination with measurements on existing buildings, and can be an important tool in the design of new buildings, or in the renovation and management of HVAC systems in existing non-residential buildings.

The results collected in the statistical research, using original questionnaires developed for this research, represent a significant contribution to the understanding of the subjective perception of thermal comfort conditions in buildings. In contrast to the experimental, numerical, and existing published results, it was found that there are some discrepancies in the results of the subjective evaluation of users. The research framework used in this thesis demonstrates that it is possible to have 0% dissatisfaction with local thermal comfort parameters, if all the other parameters are within the desired ranges (proven by the floor temperature in Scenario 2, when the overall PMV value = 0.29).

The research demonstrates that the optimal solution is always a compromise between the different requirements and largely depends on the concentration of carbon dioxide in indoor environments, apropos the indoor air quality and ventilation space.

Furthermore, the results show that the influence of personal parameters on user productivity is significant. Previous research has only considered the impact of thermal comfort to humans, but within the thesis, it was shown that the occupants' working productivity is not only a function of thermal comfort conditions, but that it largely depends on personal parameters of the users, which are random variables and are difficult to quantify precisely. In order to try to quantify them, the research proposes the use of multidisciplinary research and neuro-behavioral tests, together with medical testing of subjects.

The correlations developed and presented in this research combine the influential parameters of thermal comfort conditions and indoor environmental quality, which allows better understanding and accurate quantification of productivity loss in non-residential buildings. By combining advanced original questionnaires and correlations with simple measurements of air quality in existing buildings, it is possible to significantly decrease the productivity loss of occupants and improve daily living and working conditions. This works to develop the concept of healthy buildings in an integrated design phase.

4.3. Verification of scientific contributions

The scientific contributions of the research can be verified by the publication of several sections of the candidate's work in papers for numerous international journals on the SCI list, national journals, and those presented at international conferences significant to the field of study. These papers applied numerical and experimental analyses of thermal comfort parameters and their impacts on health and productivity in non-residential buildings:

Category M21

1. **Bajc, T.**, Todorović, M., Svorcan, J., *CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand*, Energy and Buildings, 2015, VOL.98, ISSN0378-7788, doi:[10.1016/j.enbuild.2014.11.018](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.018), Elsevier, pp. 39-44. (M21, IF 2014 (2015): 2.884)

Category M23

2. **Bajc, T.**, Todorović M., Papadopoulos, A., *Indoor Environmental Quality in Non-residential Buildings – experimental investigation*, Thermal science, 2016, VOL.20, Supplement 5, ISSN 0354-9836, doi: [10.2298/TSCI16S5521B](https://doi.org/10.2298/TSCI16S5521B), Vinča Institute of Nuclear Sciences, pp. S1521-S1529 (M23, IF 2015: 0.939)

Category M24

3. Todorović, M., Ristanović, M., Lazić, D., Galić, R., **Bajc, T.**, *A novel laboratory set-up for the investigation of intelligent automatic control in complex HVAC systems*, FME Transactions, 2015/3, VOL.43, ISSN 1451-2092, Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade, pp. 243-248. (M24)

Category M33

4. **Bajc, T.**, Todorović M., Papadopoulos, A., *Indoor Air Quality in Office Buildings – experimental investigation*, 17th International symposium on Thermal science and engineering of Serbia, 20-23.10.2015., Sokobanja, Serbia, ISBN 978-86-6055-077-6, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, Proceedings on <http://simterm.masfak.ni.ac.rs>. (M33)
5. **Bajc, T.**, Todorović M., Stevanović, Žarko, Stevanović, Žana, Banjac, M., *Local thermal comfort indices impact on productivity loss in classrooms*, The 1st international conference on buildings, energy, systems and technology, 2.-4.11.2016., Belgrade, Serbia, Society of thermal engineers of Serbia, Proceedings on <http://www.best2016-conference.com/papers-presentations.php>. (M33)

5. CONCLUSION AND PROPOSAL

Based on the review and a detailed analysis of the candidates doctoral thesis “**The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings**” („Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама“), the committee for the review, assessment and defense of the doctoral dissertation concludes that the doctoral dissertation has been completed according to all standards in scientific research, as well as those fulfilling the conditions determined by the Law on Higher Education, and the standards and statute of the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade.

Based on the results and conclusions presented in the doctoral thesis, and the fact that the analysed topics is significant and current in the professional and scientific community, it is concluded that the candidate Tamara S. Bajc (dipl. mech. eng., PhD student) has successfully

completed her doctoral dissertation in accordance with the provided subject and appointed research objectives. The candidate achieved original results in the modeling and analysis of the effect of local thermal comfort conditions on productivity loss in non-residential buildings, using the available literature and experimental, statistical and numerical results. The research results are systematically analyzed and through this, valuable conclusions on the influence of local thermal comfort conditions on productivity loss in non-residential buildings are drawn out. The analysis and developed correlations are useful tools for solving specific engineering problems. The scientific and expert community are familiar with the research through the two papers published in international journals (1 paper in category M21 and 1 paper in category M23), an article in a national journal of international importance (1 paper in category M24), and 2 papers presented at conferences of international importance and printed in the proceedings (2 papers in category M33).

The committee for the assessment and defense of the doctoral thesis conclude that the dissertation presents original scientific work with scientific contributions in the field of engineering, specifically in the sub-fields of thermal-mechanics and thermal-dynamics, and accordingly suggests that the Teaching and Scientific Council of Mechanical Engineering, University of Belgrade, accepts the committee's report and addresses it to the Academic Council of Technical Sciences, University of Belgrade to approve the dissertation **“The local thermal comfort impact on working productivity loss in non-residential buildings”** („Утицај локалног стања топлотног комфора на смањење радне способности у нестамбеним зградама“) by candidate Tamara S. Bajc (dipl. mech. eng., PhD student), and make it available to the public.

Belgrade, 05.04.2017.

Committee members

Dr Milos Banjac, full-time professor
University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering

Dr Maja Todorovic, associate prof professor
University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering

Dr Milan Gojak, associate professor
University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering

Dr Agis Papadopoulos, full-time prof.,
Aristotle University Thessaloniki, Greece,
Faculty of Mechanical Engineering

Dr Zana Stevanovic, research scientist,
University of Belgrade, Vinca Institute of Nuclear Science

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:491/6
Датум: 20.04.2017. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 20.04.2017. године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„УТИЦАЈ ЛОКАЛНОГ СТАЊА ТОПЛОТНОГ КОМФОРА НА СМАЊЕЊЕ РАДНЕ СПОСОБНОСТИ У НЕСТАМБЕНИМ ЗГРАДАМА (THE LOCAL THERMAL COMFORT IMPACT ON WORKING PRODUCTIVITY LOSS IN NON – RESIDENTIAL BUILDINGS)“** студента **ТАМАРЕ БАЈЦ**, дипл. инж. маш.

Јавна одбрана докторске дисертације обавиће се по добијању сагласности Универзитета у Београду.

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-394/2-16, од 08.02.2016. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

Категорија M21

1. **Бајс, Т.**, Todorović, M., Svorcan, J., *CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand*, Energy and Buildings, 2015, VOL.98, ISSN 0378-7788, doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.018, Elsevier, pp. 39-44. (M21, IF 2014 (2015): 2.884)

Категорија M23

2. **Бајс, Т.**, Todorović M., Papadopoulos, A., *Indoor Environmental Quality in Non-residential Buildings – experimental investigation*, Thermal science, 2016, VOL.20, Supplement 5, ISSN 0354-9836, doi: 10.2298/TSCI16S5521B, Vinča Institute of Nuclear Sciences, pp. S1521-S1529 (M23, IF 2015: 0.939)

Одлуку доставити: студенту, ментору, Катедри за термомеханику и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић