

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ

ФАКУЛТЕТ: Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет



ИЗВЈЕШТАЈ

о оцјени урађене докторске тезе

ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

На основу члана 54. Статута Универзитета у Бањалуци, Наставно-научно вијеће Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета Универзитета у Бањалуци, на 31. сједници, одржаној дана 11.05.2016. године, донијело је одлуку (број одлуке: 14/3.534/16), о именовању Комисије за оцјену и одбрану урађене докторске тезе кандидата **мр Гордане Броћета, дипл.инж.грађ.**, под насловом "**Утицај врсте агрегата на трајност конструкција од самозбијајућег бетона**", у слиједећем саставу:

1. проф. др Мирјана Малешев, дипл.инж.грађ., редовни професор за ужу научну област Грађевински материјали, процјена стања и санација конструкција, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за грађевинарство – ментор – члан Комисије;

2. проф. др Властимир Радоњанин, дипл.инж.грађ., редовни професор за ужу научну област Грађевински материјали, процјена стања и санација конструкција, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за грађевинарство – коментор – члан Комисије;

3. проф. др Радомир Зејак, дипл.инж.грађ., редовни професор за ужу научну област Грађевински материјали и технологија бетона, Универзитет у Подгорици, Грађевински факултет – предсједник Комисије.

1. УВОДНИ ДИО ОЦЈЕНЕ ДОКТОРСKE ТЕЗЕ

Докторска теза кандидата мр Гордане Броћета, дипл.инж.грађ., наслова теме "Утицај врсте агрегата на трајност конструкција од самозбијајућег бетона", написана је на 761 страницу текста, укључујући 685 слика и графика и 399 табела.

Приликом израде тезе кориштено је 214 библиографских јединица.

Садржај тезе подијељен је у два дијела – теоријски и експериментални, кроз укупно 10 поглавља и то:

1. Увод

1.1. Уводне одредбе

1.2. Значај истраживања

1.3. Кратак историјски преглед

1.4. Кратак преглед нивоа истражености теме

- 1.5. Хипотезе са циљем истраживања
- 1.6. Материјал и методе рада
- 1.7. Научни допринос истраживања
2. Захтјеви за пројектовање бетонских конструкција у погледу трајности
 - 2.1. Основни захтјеви за прорачун конструкција
 - 2.2. Експлоатациони вијек
 - 2.3. Захтјеви у погледу трајности
3. Трајност бетонских конструкција
 - 3.1. Предност самозбијајућег бетона у погледу трајности
 - 3.2. Утицај параметара структуре самозбијајућег бетона на трајност
 - 3.3. Механизми деградације бетонских конструкција
 - 3.4. Побољшање карактеристика бетона у погледу трајности
4. Избор природног агрегата према аспектима трајности
 - 4.1. Класификација природног агрегата и ограничења за предметну примјену
 - 4.2. Својства природног агрегата битна са аспекта трајности
5. Рециклирани агрегат – технологија и примјена према аспектима трајности
 - 5.1. Технологија производње рециклираног агрегата
 - 5.2. Својства рециклираног агрегата
 - 5.3. Специфичности справљања бетона на бази рециклираног агрегата
 - 5.4. Својства бетона на бази рециклираног агрегата
 - 5.5. Структура бетона на бази рециклираног агрегата
 - 5.6. Препоруке и стандарди везани за рециклирани агрегат
 - 5.7. Еколошки, енергетски и економски аспекти примјене рециклираног агрегата
 - 5.8. Законска регулатива у области управљања грађевинским отпадом и опис стања у Републици Српској
6. Експериментално истраживање
 - 6.1. План и програм експерименталног истраживања
 - 6.2. Карактеристике компонентних материјала
 - 6.3. Састави бетонских мјешавина
 - 6.4. Реализација експерименталног истраживања
 - 6.5. Резултати експерименталног истраживања
 - 6.6. Анализа и дискусија резултата експерименталног истраживања
 - 6.7. Интерпретација резултата примјеном методе факторијалног експеримента
7. Закључна разматрања и правци даљих истраживања
8. Списак слика и табела
9. Литература
10. Прилози

Према предмету који је обрађен и карактеру истраживања, предметна тема припада

ужим научним областима Грађевински материјали и технологија бетона и Грађевинске конструкције, научног поља – Грађевинарство, за које је матичан Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет Универзитета у Бањалуци.

2. УВОД И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Истраживања у области савременог грађевинарства доминантно су фокусирана на усавршавање и побољшавање карактеристика постојећих грађевинских материјала и то првенствено бетонских композита, који се сматрају основним грађевинским материјалом XXI вијека, а за које се и даље везују нерјешени проблем угрожене трајности бетонских конструкција.

Процењује се да просјечна вриједност годишње производње бетона по глави становника планете премашује 1 m^3 бетона, при чему се, према свим научно-стручним прогнозама, сматра да се у наредних неколико деценија сигурно неће појавити материјал који би га замијенио. Истовремено, досадашња пракса да се аспекту трајности не посвети неопходна пажња још у фази пројектовања, као и то да брига о бетонским конструкцијама завршава са завршетком градње или уз недовољно и неадекватно одржавање, резултовала је евидентним посљедицама у виду оштећених и дотрајалих објеката, код којих је, поред функционалности, неријетко угрожена и носивост и стабилност, прије истека пројектованог експлоатационог периода.

Спроведене студије о узроцима пропадања бетонских конструкција, како је изнесено на посљедњој *RILEM*-овој конференцији посвећеној трајности бетонских конструкција, показале су да 51% ових проблема проузрокује недовољна пажња приликом грађења конструкција, 36% недовољна пажња посвећена аспекту трајности у фази пројектовања, 8% неправилан избор материјала и 5% неадекватно одржавање.

Дакле, разлози, због којих је спроведено истраживање предметне дисертације, су изузетно актуелни, не само код нас, него и у свјетским оквирима, тим више што је самозбијајући бетон новија и још увијек недовољно истражена врста бетонског композита, нарочито са аспекта трајности. Такође, у прилог наведеном, напомиње се да је од изузетног значаја и чињеница да су пројектовани бетони справљени са компонентним материјалима домаћег тржишта, али и материјалима за које Република Српска, као и регион, имају одличан и још увијек неискориштен потенцијал производње – рециклирани агрегат, који се добија дробљењем отпадног бетона и електрофилтерски пепео, нуспроизвод термоелектрана.

Кључни циљ дисертације био је да се примјеном метода научних истраживања идентификује и дефинише проблем угрожене трајности, утврде нивои значајности утицајних параметара на анализирана својства трајности самозбијајућих бетона, са акцентом на утицај врсте агрегата, те формирају одговарајући математички модели везе "утицајни параметри – својство бетона", што је успјешно и реализовано.

Детаљним прегледом литературе дефинисано је тренутно стање из предметне тематике, како у погледу законске регулативе, тако и у погледу најновијих и најзначајнијих истраживања код нас и у свијету. У вези са тим, напомиње се да су постојећи национални стандарди и прописи у врло скромним оквирима, те се очекује да ће добијени резултати овог научног истраживања допринијети стварању добре основе за доношење националних докумената везаних са самозбијајући бетон, примјену рециклираног агрегата, минералних додатака и дефинисање

критеријума за класификацију бетона према својствима трајности.

Анализом великог броја научних студија и истраживања установљено је да су поред механичких карактеристика, аспекти трајности самозбијајућих бетона сагледавани кроз испитивања: пропустљивости и то доминантно капиларног упијања, дифузије хлорида, отпорности на дејство мрза, те у мањој мјери и са аспекта симултаног дејства мрза и соли, хабања и микроструктурне анализе. При томе се напомиње да је у предметним истраживањима анализиран утицај само једне врсте агрегата на поједина својства бетона, док недостају синтезна истраживања, којима се, са аспекта трајности, упоређују бетони справљени са различитим врстама агрегата.

Истраживањем *L. A. P. de Oliveira* и сарадника (2014. година) анализирана су својства пропустљивости самозбијајућег бетона на бази рециклираног агрегата, са варирањем процента учешћа рециклираног агрегата у крупној фракцији, гдје је установљено да примјена рециклираног агрегата у самозбијајућем бетону нема значајан утицај на својство водонепропустљивости, те да се коефицијент капиларног упијања смањује повећањем учешћа рециклираног агрегата. Слично варирање учешћа рециклираног агрегата у самозбијајућим бетонима налази се и у истраживању *P. O. Modani* и *V. M. Mohitkar*-а (2014. година), гдје се показало да се примјеном рециклираног агрегата, у односу на природни, добијају већа упијања воде. Са тим у вези, истраживањем *М. Малешев* и сарадника (2014. година), показало се да својства самозбијајућег бетона на бази рециклираног агрегата - чврстоће, модул еластичности, пропустљивост, скупљање и течење, у значајној мјери зависе од карактеристика отпадног бетона, као сировине за производњу рециклираног агрегата и то првенствено његове чврстоће при притиску, али и од начина рециклирања, те познавања свих специфичности везаних за пројектовање састава и справљање ових врста бетона.

Истраживањем *М. Gesoglu* и сарадника (2015. година), у којем је варирана примјена ситне и/или крупних фракција ријечног и рециклираног агрегата, као и примјена силикатне прашине, у самозбијајућим бетонима, показало се да смањење водопрашкастог фактора и/или примјена силикатне прашине резултују мањим деформацијама услјед скупљања. Са аспекта пропустљивости самозбијајућих бетона, анализираних преко резултата испитивања плинпропусности, капиларног упијања и водонепропусности, показало се да се најмања пропустљивост бетона, по свим својствима добија примјеном ријечног агрегата, а највећа за бетоне справљене у потпуности са рециклираним агрегатом. Са тим у вези, још се показала повољнијом комбинација крупног рециклираног агрегата и ситне фракције ријечног агрегата, у односу на комбинацију крупног ријечног агрегата и ситне фракције рециклираног агрегата. Такође, са аспекта пропустљивости, истраживањем *К. S. Johnsirani* и сарадника (2015. година), показало се да самозбијајући бетон има мању способност капиларног упијања воде у односу на референтни конвенционални бетон, при чему примјена минералних додатака – електрофилтерског пепела и/или силикатне прашине значајно утиче на смањење способности самозбијајућег бетона да капиларно упија воду.

Истраживањем *И. Деспотовић* (2015. година), указује се да избор врсте минералног додатка има доминантан утицај на способност упијања самозбијајућег бетона поступним потапањем. У том смислу, показало се да највећу пропустљивост, измјерену упијањем методом поступног потапања, имају самозбијајући бетони на бази електрофилтерског пепела, затим значајно мању, имају бетони са кречњачким брашном, док су се као најповољнији, у предметном погледу, показали самозбијајући бетони справљени са силикатном прашином. Такође, показало се да

избор између ријечног и рециклираног агрегата има значајно мањи утицај, у односу на избор минералног додатка. При томе, примјена ријечног агрегата, у односу на рециклирани, резултује већим упијањем бетона, методом поступног потапања.

Замјена ситне фракције ријечног агрегата у самозбијајућем бетону, отпадним материјалима – мермерним прахом (преко 60% зрна ситнијих од 0,125 mm), добијеним као нуспроизвод у индустрији обраде мермера и ситним дробљеним кршом, добијеним из погона за дробљење стијенског материјала (D_{max} је за оба материјала у износу од 4,75 mm), према истраживањима *M. S. Hameed*-а и сарадника (2012. година), смањује пропустљивост бетона, оцијењену испитивањем упијања, водонепропусности и дифузије хлорида, док нема значајан утицај на чврстоћу самозбијајућег бетона при притиску.

Садржај хлорида у самозбијајућим бетонима, интересантан са аспекта корозије арматуре у бетону, према истраживањима *B. Beeralingegowda* и *V. D. Gundakalle* (2013. година) зависи од врсте примијењених минералних додатака и њиховог међусобног односа. У том смислу, показало се примјеном кречњачког брашна, у односу на примјену електрофилтерског пепела, добијају бетони са нижим садржајем хлорида.

Истраживање *N. Ganesan* и сарадника (2012. година), показује да доминантан утицај на отпорност самозбијајућег бетона према хабању има чврстоћа при притиску.

У анализираним доступним истраживањима других аутора срећу се међусобно опречни ставови у погледу компарације трајности са аспекта механизма дејстава мрза и симултаног дејства мрза и соли код самозбијајућих и конвенционалних бетона, у смислу да не постоји значајна разлика међу њиховим отпорностима према дејству мрза и симултаном дејству мрза и соли – Извјештај *RILEM*-овог техничког комитета *TC 205-DSC* (2008. година) и истраживање *G. De Schutter* (2012. година), да код самозбијајућих бетона долази до значајнијег пада чврстоће након 50 циклуса мржњења у односу на одговарајуће конвенционалне бетоне – истраживање *A. Илић* и *J. Шешић* (2010. година) и други, којих је значајно више, да се самозбијајући бетони карактеришу бољом отпорношћу на наведене утицаје у односу на конвенционалне бетоне – истраживања *D. Duh* (2008. година), *Md. Safiuddin* и сарадници (2008. година), *Б. Босиљков* и сарадници (2009. година), *S. D. Hwang* и *К. Н. Khayat* (2009. година), *К. Audenaert* и сарадници (2010. година) и *С. Amouri* и сарадници (2014. година). Изнесено се може објаснити разликама примјењених компонентних материјала и недостатком прописа у погледу предметне технологије.

Компаративном микроструктурном анализом самозбијајућих и конвенционалних бетона, како показују истраживања *L. Coppola* (2003. година), *М. Khrapko* (2007. година), *К. Н. Khayat* (2008. година), *Д. Јевтић* и сарадници (2014. година), показало се да цементни камен самозбијајућих бетона има уједначенију и мање порозну структуру, као и виши ниво квалитета прелазне зоне између цементног камена и зрна агрегата. Истраживања *L. Coppola* (2003. година) и *Х. Liu* и сарадника (2013. година) показују да наведеном умногоме доприноси примјена минералних додатака у самозбијајућим бетонима.

Коначно, констатује се да избор литературе и систематична, јасна и квалитативно садржајна анализа, научних домаћих и свјетских истраживања, у потпуности дају преглед достигнућа у области истраживане теме, при чему се напомиње, да у доступној литератури нема података о компаративном истраживању утицаја различитих врста агрегата на својства самозбијајућих бетона са аспекта трајности.

3. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Предмет истраживања докторске дисертације односи се на самозбијајући бетон, за који су, са циљем дефинисања аспеката трајности, приликом пројектовања састава, варирани различити компонентни материјали.

Избор компонентних материјала, за пројектовање 14 врста самозбијајућег бетона, извршен је са критеријумом да се примјењују материјали доступни на домаћем тржишту. При томе, избор је извршен тако да се приликом испитивања својстава самозбијајућег бетона може утврдити утицај традиционалних и савремених врста агрегата, као и минералних додатака, на физичко-механичка својства самозбијајућег бетона, а првенствено на својства трајности. Такође, при избору компоненти, посебно се водило рачуна о аспекту одрживог грађевинарства, односно о примјени отпадних материјала, како би се смањила потреба за депоновањем отпадних материјала и сачували природни ресурси.

Током истраживања примијењене су слиједеће научне методе: експериментална метода, компаративна метода, статистичка метода, метода анализе и синтезе и метода индукције. Наведеним методама обрађена су слиједећа својства различитих врста самозбијајућих бетона: запреминска маса очврслог бетона, чврстоћа при притиску у старостима од 2, 7, 14 и 28 дана, фигура лома, конструкциона повољност (путем коефицијента конструкционе повољности), хигроскопска влажност, упијање поступним потапањем природно влажног бетона, упијање поступним потапањем потпуно суhog бетона, упијање кувањем, упијање под вакуумом, zasiћеност бетона (путем коефицијента zasiћености), капиларно упијање, отпорност према хабању брушењем, садржај хлорида, отпорност на симултано дејство мрза и соли, отпорност на дејство мрза (150 и 200 циклуса), макроструктура и микроструктура.

Током реализације експерименталног истраживања испитано је 675 узорака бетона.

Имајући у виду изложено, Комисија констатује да су примијењене научне методе релевантне за предметну тему истраживања, поуздане и савремене, у складу са научно признатим методама на свјетском нивоу. При томе се напомиње се да је реализовано истраживање проширено у односу на план истраживања, који је дат приликом пријаве докторске тезе – конкретно, пројектоване су 2 врсте бетона више у односу на планираних 12 врста бетона. Разлог за наведено повећање броја врста бетона је јасније сагледавање утицаја рециклираног агрегата различитог поријекла на својства трајности самозбијајућег бетона.

План и програм експерименталног истраживања су осмишљени тако да добијени резултати омогућавају јасно сагледавање утицаја варираних параметара на истраживана својства самозбијајућих бетона. Такође, дато је довољно података о компонентним материјалима, саставу бетонских мјешавина и примијењеним методама испитивања, на основу чега је омогућена поновљивост експерименталних истраживања.

Анализа резултата је систематична, јасно изложена и спроведена уз примјену адекватних метода нумеричке анализе, математичке статистике и теорије вјероватноће. Закључци предметног истраживања представљају језгровиту и концизну синтезу јасно и систематично изложених резултата, те се констатује да су у потпуности испуњени постављени циљеви, реализовани постављени задаци и доказане постављене хипотезе.

4. РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

Резултати и закључци докторске дисертације кандидата мр Гордане Броћета дају изузетан научни и практични допринос рјешавању проблема угрожене трајности бетонских конструкција, изведених од самозбијајућег бетона. У прилог изнесеном, међу најзначајнијим резултатима је то што се доказало да је примјеном различитих врста агрегата (ријечних агрегата различитог поријекла, дробљеног агрегата, мјешавина ријечног и дробљеног агрегата, рециклираног агрегата познатог и непознатог поријекла) могуће пројектовати конструкцијске самозбијајуће бетоне задовољавајућих физичко-механичких карактеристика. Такође, доказало се да се примјеном отпадних материјала (рециклирани бетон и електрофилтерски пепео) могу произвести самозбијајући бетони задовољавајућих карактеристика у погледу трајности. Надаље, од изузетног је значаја и дефинисана величина утицаја варираних врста агрегата на својства трајности, те то што је формулисан значајан број математичких модела којима је успостављена веза својстава самозбијајућег бетона, са аспекта трајности, са врстама примијењеног агрегата и водоцементним фактором.

Као посебан допринос, истиче се да је доказано да се електрофилтерски пепео може користити као минерални додатак у самозбијајућим бетонима, самостално или у комбинацији са кречњачким филером, при чему се наглашава да је исти примијењен без додатне припреме (мљењења и просијавања), чиме се, кроз уштеду енергије, доприноси очувању животне средине и остварује економски бенифит.

Резултати анализирани примјеном факторијалног експеримента омогућили су дефинисање аналитичких израза у којима се јасно сагледава појединачни и интеракциони утицај варираних параметара (врста агрегата и примјена минералних додатака) на својства трајности самозбијајућег бетона.

Кандидат је у својој докторској дисертацији дошла и до нових сазнања у погледу утицаја кречњачког агрегата на квалитет прелазне зоне између цементног камена и зрна агрегата. Конкретно, потврђена су истраживања других аутора о високом нивоу квалитета прелазне зоне зрна кречњака, при чему је, за разлику од других аутора, доказано да не само да је квалитет ове зоне код зрна кречњака највишег нивоа, него и то да геометријске карактеристике и текстура кречњачког агрегата немају утицај на квалитет предметне зоне.

Исто тако, као посебан допринос кандидата истиче се да је на основу анализе коефицијената конструкционе повољности дата препорука о могућностима примјене самозбијајућих бетона, у зависности од врсте примијењеног агрегата, у сеизмички активним подручјима.

Представљени рад поставља нове задатке у смислу истраживања могућности примјене електрофилтерског пепела из Термоелектрана Републике Српске (Гацко, Угљевик и Станари), као и стратешког планирања искоришћења изузетно велике количине грађевинског отпада, од којег је у највећој мјери отпадни бетон, настао као посљедица недавних поплава. Такође, предметни рад представља и добру основу за усавршавање нових метода којима се испитују аспекти трајности бетона (нарочито оног који ће се примијенити за израду инфраструктурних објеката), као на примјер – комбиновање испитивања отпорности према симултаном дејству мраза и соли са испитивањем отпорности према хабању у једном циклусу, што би боље, него тренутно стандардима утврђене методе, симулирало деградирајуће механизме на бетонске коловозе и мостовске конструкције.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

Кандидат мр Гордана Броћета је својим радом дала значајан научни допринос у области истраживања трајности бетонских конструкција од самозбијајућег бетона и одрживом грађевинарству. Дисертација има посебан научни допринос, обзиром да трајност самозбијајућих бетона није довољно истражена у свјетској научној и стручној јавности, нарочито када је у питању примјена специфичних врста агрегата и минералних додатака, као и домаћих компонентних материјала. На основу обимног експерименталног истраживања и анализе засноване на примјени математичке статистике и теорији вјероватноће мр Гордана Броћета је дефинисала утицај врсте компонентних материјала на трајност конструкција, које се изводе од самозбијајућег бетона, са посебним нагласком на примјењене врсте агрегата. Такође, успостављене су и међусобне везе појединих анализираних својстава очврслог бетона, те формулисани математички модели зависности између својстава бетона са аспекта трајности и утицајних параметара, што даје могућност моделирања животног вијека приликом пројектовања бетонских конструкција.

У складу са изнесеним, Комисија позитивно оцјењује докторску тезу кандидата мр Гордане Броћета, под насловом "Утицај врсте агрегата на трајност конструкција од самозбијајућег бетона" и закључује да иста има оригинални научни допринос, те предлаже Наставно-научном Вијећу Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета Универзитета у Бањалуци да прихвати позитивну оцјену и одобри јавну одбрану.

У Бањалуци, 06.07.2016. године

ПОТПИС ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

1.



проф. др Мирјана Малешев, дипл.инж.грађ.
– ментор – члан Комисије

2.



проф. др Властимир Радоњанин, дипл.инж.грађ.
– коментор – члан Комисије

3.



проф. др Радомир Зејак, дипл.инж.грађ.
– предсједник Комисије