

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена**

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовео комисију Наставно научно веће Факултета техничких наука. Датум: 13.07.2017. (012-199/27-2015)</p> <p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p>1. Др Властимир Радоњанин, редовни професор - председник, уно: Грађевински материјали, процена стања и санација конструкција, 28.03.2013., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад.</p> <p>2. Др Гордана Топличих-Ђурчић, ванредни професор - члан, уно: Грађевински материјали, 19.09.2014., Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет, Ниш.</p> <p>3. Др Зоран Грдић, редовни професор - члан, уно: Грађевински материјали, 01.04.2012., Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет, Ниш.</p> <p>4. Др Мирјана Малешев, редовни професор - ментор, уно: Грађевински материјали, процена стања и санација конструкција, 28.03.2013., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад.</p> <p>5. Др Мирослава Радека, редовни професор - ментор, уно: Грађевински материјали, процена стања и санација конструкција, 25.10.2013., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад.</p>
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Весна, Анђелко, Булатовић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: 02.09.1981., Шабац, Република Србија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив Факултет техничких наука, Техничке науке, Грађевинско инжењерство, Мастер инжењер грађевинарства</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија 2007. год., Грађевинарство</p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:</p> <p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:</p>

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

СУЛФАТНА ОТПОРНОСТ БЕТОНА НА БАЗИ РЕЦИКЛИРАНОГ АГРЕГАТА

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са знаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Докторска дисертација кандидата Весне Булатовић је написана на 448 страна на српском језику, латиничним писмом. Дисертација садржи 12 поглавља, 206 референци, 140 слика и 78 табела. На почетку докторске тезе дати су: списак табела и слика. Рад је електронски обрађен.

Докторска дисертација је структурирана кроз следећа поглавља:

1. Увод
2. Трајност бетона и порозност цементног камена
3. Портланд цемент и цементи са додатком згуре
4. Агрегат од рециклираног бетона и транзитна зона
5. Микроструктура и фазни састав цементног камена
6. Механизми сулфатне корозије бетона
7. Приказ и анализа истраживања у области дејства сулфата на пасте, малтере и бетоне
8. Експериментално истраживање
9. Анализа и дискусија резултата
10. Закључна разматрања и правци даљег истраживања
11. Литература
12. Прилози

У првом поглављу "Увод" дефинисани су предмет и циљеви истраживања, постављене су основне хипотезе и описана је методологија истраживања, као и оправданост и применљивост предметног истраживања.

У другом поглављу "Трајност бетона и порозност цементног камена" истакнут је значај трајности бетона у бетонским конструкцијама и сажето су описани фактори који највише утичу на трајност бетона. Посебно је анализирана порозност цементног камена и њена повезаност са пропустљивошћу гасова и течности. Дат је преглед основних врста пора као и најчешће коришћених техника за њихово проучавање.

У трећем поглављу "Портланд цемент и цементи са додатком згуром" укратко су дате теоријске основе везива која су одабрана за експериментални део дисертације. Дат је преглед основних клинкер минерала и укратко је приказан процес хидратације и продукти хидратације Портланд цемента. Описана је згура као додаток цементу и дате су основне карактеристике цемената са додатком згуре у високом проценту. На крају поглавља табеларно је дат преглед сулфатно-отпорних врста цемената према EN 197-1.

У четвртном поглављу "Агрегат од рециклираног бетона и транзитна зона" сажето су приказане теоријске основе агрегата од рециклираног бетона, као компонентног материјала истраживаних врста бетона. Описани су поступци производње агрегата, дат је преглед битних својстава и основних појмова везаних за агрегат од рециклираног бетона. Наглашена је улога транзитне зоне, која је посебно значајна у бетонима справљеним са овом врстом агрегата. Представљене су и методе које се користе за побољшање својстава бетона са рециклираним агрегатом, као и поступци који се могу користити за одређивање количине "старог" цементног камена везаног за зрно агрегата, као једне од најбитнијих карактеристика ове врсте агрегата.

У петом поглављу "Микроструктура и фазни састав цементног камена" приказане су технике које су одабране за проучавање промена у микроструктури са аспекта текстуре, минералношког и хемијског састава у оквиру експерименталног истраживања. Описане су методе SEM (Скенирајућа електронска микроскопија), XRD (Рендгенска дифракција) и FTIR (Инфрацрвена спетроскопија са

Фуријеовом трансформацијом) за квалитативно и BSE-EDS (Повратно расејани електрони са енергетско дисперзном спектроскопијом) за квантитативно одређивање поменутих својстава цементног камена.

У шестом поглављу "Механизми сулфатне корозије бетона" побројани су елементи конструкција који су подложни сулфатној корозији, као и средине за које је карактеристичан овај облик корозије бетона. Објашњени су механизми деловања сулфата, хемијске промене које се при томе дешавају у цементном камену, производи који при томе настају (етрингит, гипс, таумасит, бруцит) и видљиве манифестације на површини бетона. Кроз анализу радова других истраживача наглашени су проблеми и конфузије који се јављају приликом испитивања сулфатне отпорности очврслих паста, малтера и нарочито бетона због нехомогености и употребе хемијских и минералних додатака. Приказане су и препоруке за побољшање сулфатне отпорности бетона, како од стране одређених аутора тако и оних који се налазе у званичним стандардима појединих земаља.

У седмом поглављу "Приказ и анализа истраживања у области дејства сулфата на пасте, малтере и бетоне" дат је преглед актуелних истраживања из области деловања различитих сулфатних раствора на пасте, малтере и бетоне у којима су анализирани утицаји: врсте цемента, минералних додатака, водоцементног фактора, начина неге узорака, врсте и концентрације сулфатних раствора и режима деловања сулфата. Анализирано је и неколико радова о сулфатној отпорности бетона са рециклираним агрегатом. Такође су, кроз анализу радова, приказани и основни производи деловања сулфатних раствора у зависности од катјона који је везан у сулфатном једињењу.

У осмом поглављу "Експериментално истраживање" приказано је сопствено експериментално истраживање сулфатне отпорности бетона у којима су варирани две врсте крупног агрегата, две врсте цемента, два водоцементна фактора и две врсте сулфатних раствора. Дати су програм истраживања, подаци о компонентним материјалима, поступак и пројектовање састава бетонских мешавина, израда бетонских мешавина и узорака за лабораторијска испитивања, опрема и поступци испитивања, као и добијени резултати испитивања одабраних својстава свежег и очврслог бетона. На свежем бетону су мерени запреминска маса и конзистенција, а на очврслем бетону капиларно упијање воде, упијање воде под притиском, промена дужине узорака и чврстоћа при притиску. На посебно припремљеним узорцима урађене су микроструктурне анализе: порозност, SEM, BSE/EDS, XRD и FTIR. Сва наведена својства су мерена пре почетка излагања и након 3 и 6 месеци излагања сулфатним растворима.

У деветом поглављу "Анализа и дискусија резултата" анализирани су резултати сопственог експерименталног истраживања сулфатне отпорности одабраних врста бетона. Анализа сулфатне отпорности је урађена најпре у оквиру бетона справљених са истом врстом крупног агрегата, а затим је извршена и компаративна анализа бетона са речним и рециклираним крупним агрегатом. Дефинисан је утицај врсте цемента, водоцементног фактора и врсте сулфатног раствора на промену својстава одабраних за оцену сулфатне отпорности и оцењена је сулфатна отпорност испитиваних врста бетона коришћењем критеријума из анализиране литературе. Анализирани су и промена порозности и величине пора, као и промене у производима хидратације цемента и новонастала једињења услед деловања сулфатних раствора.

У десетом поглављу "Закључна разматрања" приказани су закључци по одабраним методама за проверу сулфатне отпорности, по врстама употребљеног агрегата, а затим је дата компаративна анализа у оквиру које су упоређени резултати добијени применом одабраних метода за проверу сулфатне отпорности, ради избора најпогодније методе. Посебно је урађена оцена сулфатне отпорности бетона са рециклираним крупним агрегатом у зависности од врсте цемента, водоцементног фактора и врсте сулфатног раствора и предложени су правци даљег истраживања. На основу свих изведених закључака формиран је коначни закључак о могућности примене агрегата од рециклираног бетона за производњу бетона отпорних на сулфатну корозију.

У једанаестом поглављу "Литература", дат је шири списак коришћене литературе и референци, као и називи стандарда који су коришћени у оквиру експерименталног дела дисертације.

У дванаестом поглављу "Прилози", табеларно су приказани резултати експерименталних испитивања - измерене величине и срачунате вредности својстава одабраних за анализу.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Дисертација садржи све неопходне елементе прописане важећим правилницима.

Докторску дисертацију чине четири целине.

У првој целини (првом поглављу) јасно су дефинисани предмет и циљ истраживања. Наглашена је потреба и оправданост истраживања у области сулфатне отпорности бетона са рециклираним агрегатом. Основне хипотезе су добро постављене, а методологија истраживања је одабрана тако да је омогућена и теоријска анализа добијених резултата и њихова директна примена у пракси.

Друга целина обухвата шест поглавља кроз која се сагледава кандидатова припремљеност за научноистраживачки рад у области трајности бетона. То су поглавља у којима је:

- истакнут значај трајности бетона,
- наглашена улога порозности цементног камена и њена повезаност са пропустљивошћу гасова и течности,
- сажето приказан процес хидратације и продукти хидратације Портланд цемента и улога згуре као додатка цементу у циљу добијања сулфатно отпорних везива и
- наглашена специфичност примене агрегата добијеног уситњавањем "старог" бетона и улога транзитне зоне.

Наведена поглавља су неопходна ради разумевања механизма деловања сулфата на цементни камен, добро су конципирана, садрже најважније податке и пропраћена су одговарајућим табелама, графиконима и формулама. У оквиру ове целине укратко су описане методе које су одабране за проучавање промена у микроструктури цементног камена са аспекта текстуре, минералског и хемијског састава (MIP, SEM, BSE/EDS, XRD и FTIR), што је веома корисно, с обзиром да су предмете методе специфичне, често су заступљене у анализираној литератури, а веома мало заступљене у инжењерској пракси.

Веома значајан део дисертације је шесто поглавље "Механизми сулфатне корозије бетона" у коме су побројани елементи конструкција који су подложни сулфатној корозији, као и средине за које је карактеристичан овај облик корозије бетона. Објашњени су механизми деловања сулфата, промене у микроструктури и минералском саставу цементног камена услед интеракције између компонената цемента и сулфатних једињења и продукти који при томе настају (етрингит, гипс, таумасит, бруцит). Такође су наглашени проблеми и конфузије који се јављају приликом испитивања сулфатне отпорности очврселих паста, малтера и нарочито бетона због нехомогености и употребе хемијских и минералних додатака.

Посебно вредан део друге целине дисертације је седмо поглавље, које се односи на преглед литературе у области истраживања. У овом поглављу дат је преглед актуелних истраживања из области деловања различитих сулфатних раствора на пасте, малтере и бетоне у којима су анализирани утицаји: врсте цемента, минералних додатака, водоцементног фактора, начина кондиционирања узорака, врсте и концентрације сулфатних раствора и режима и дужине деловања сулфата. Кроз приказ и анализу великог броја научних радова, дисертација, саопштења и књига, везаних за област сулфатне отпорности малтера и бетона, формирана је квалитетна база података на основу које је дефинисан програм сопственог експерименталног истраживања, тј. одабране су методе и критеријуми за оцену сулфатне отпорности, дефинисани су врсте и концентрације сулфатних раствора, облик и димензије узорака и режими излагања дејству сулфата. Закључено је да избор литературе и систематична, јасна и садржајна анализа научних истраживања у потпуности дају преглед достигнућа у области истраживане теме, при чему је наглашено да је у доступној литератури пронађено само неколико радова о компаративном истраживању утицаја различитих врста агрегата на сулфатну отпорност бетона, што оправдава избор теме ове докторске дисертације.

У трећој целини, која обухвата сопствено експериментално истраживање сулфатне отпорности бетона са рециклираним агрегатом (поглавље 8), детаљно је разрађен програм истраживања, који је заснован на компаративној анализи две групе бетона које се разликују у крупном агрегату (речни агрегат и агрегат добијен уситњавањем "старог" бетона), а у оквиру којих су варирани две врсте цемента (СЕМ I и СЕМ III) исте класе и два водоцементна фактора ($w/c=0,55$ и $w/c=0,38$). На

тај начин је добијено осам различитих бетонских мешавина, чија сулфатна отпорност је проверавана након 3 и 6 месеци боравка у 5% раствору натрујум сулфата и у 5% раствору магнезујум сулфата. При избору компонентних материјала, посебно се водило рачуна о аспекту одрживог грађевинарства, односно о примени отпадних материјала, како би се смањила потреба за депоновањем отпадних материјала и сачували природни ресурси (рециклирани агрегат и згура као додаток цемента). На очврслем бетону испитивани су капиларно упијање воде, промена дужине узорака и чврстоћа при притиску. На посебно припремљеним узорцима урађене су микроструктурне анализе: порозност, SEM, BSE/EDS, XRD и FTIR. Сва наведена својства су мерена пре почетка излагања и након 3 и 6 месеци излагања сулфатним растворима. Имајући у виду садржај овог поглавља, закључено је да су план и програм експерименталног истраживања осмишљени тако да добијени резултати омогућавају јасно сагледавање утицаја варираних параметара на истраживана својства бетона и да је испитивани узорак довољно велик и омогућава добијање поузданих резултата. Констатовано је да се у реализацији експеримента није одступило од плана и програма који су дефинисани у Пријави докторске дисертације. Такође је констатовано да је дато довољно података о компонентним материјалима, саставу бетонских мешавина, броју, облику и димензијама узорака и примењеним методама испитивања, тако де је омогућена поновљивост експерименталних истраживања. Ово поглавље је обогаћено хронолошки сложеним фотографијама које употпуњују слику о спроведеном експерименталном истраживању, а резултати експерименталног истраживања су јасно приказани на крају поглавља у виду табела.

Последња, четврта целина обухвата девето и десето поглавље у оквиру којих су приказани анализа резултата експерименталног истраживања и закључна разматрања. Анализа сулфатне отпорности је урађена најпре у оквиру бетона справљених са истом врстом крупног агрегата, а затим је извршена и компаративна анализа бетона са речним и рециклираним крупним агрегатом. Дефинисан је утицај врсте цемента, водоцементног фактора и врсте сулфатног раствора на промену својстава одабраних за оцену сулфатне отпорности и оцењена је сулфатна отпорност испитиваних врста бетона. За оцену сулфатне отпорности одабране су промена чврстоће при притиску и критеријум који је предложио Mehta и експанзија узорака и критеријум који су предложили Miller и Manson. Комисија је закључила да је анализа резултата систематично приказана, јасно изложена и спроведена уз примену адекватних метода нумеричке анализе, математичке статистике и теорије вероватноће. Такође је констатовано да ово поглавље садржи квалитетне SEM -EDS фотографије, добро осмишљене дијаграме и табеле који доприносе бољој и јаснијој анализи добијених резултата, нарочито са аспекта промена у микроструктури и минералошком саставу цементног камена. Закључци предметног истраживања представљају језгровиту и концизну синтезу јасно и систематично изложених резултата, па се констатује да су критички анализирани постављене хипотезе и испуњени постављени циљеви докторске дисертације. Дате су напомене и препоруке са предлозима могућих праваца даљих истраживања.

У једанаестом поглављу, на основу ширег списка литературе уочава се да је кандидат приликом израде докторске дисертације користио савремене резултате истраживања из проблематике која је проучавана у дисертацији.

У дванаестом поглављу, приказане су измерене величине и срачунате вредности својстава одабраних за анализу, на које се кандидат позивао током израде докторске дисертације.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Рад у часопису међународног значаја (M21)

1. **Bulatović V.**, Malešev M., Radeka M., Radonjanin V., Lukić I. (2017): Evaluation of sulfate of concrete with recycled and natural aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol. 152 (2017), pp. 614-631, (DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.161)

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (М33)

1. **Bulatović V.**, Radonjanin V., Malešev M., Radeka M., Lukić I. (2016): Comparative analysis of compressive strength and volume change for determination of sulfate resistance of RAC, Materials, Systems and Structures in Civil Engineering, Kopenhagen, RILEM Publication, ISBN 978-2-35158-163-6, Vol. 2, str. 523-532
2. **Bulatović V.**, Malešev M., Radonjanin V., Radeka M., Lukić I. (2016): Evaluation of sulfate resistance of portland and blastfurnace cement concretes using compressive strength and volume change tests, State and trends of civil and environmental engineering E-GTZ, Tuzla, Rudarsko-geološko-građevinski fakultet Tuzla, ISBN 978-9958-628-18-4, Vol. 3, str. 241-248
3. **Bulatović V.**, Malešev M., Radonjanin V., Radeka M., Lukić I. (2016): Effects of cement type and water to cement ratio on the sulfate resistance of concrete with RCA, Internacionalni naučno-stručni skup – Građevinarstvo nauka i praksa, Žabljak, Crna Gora, ISBN 978-86-82707-30-1, str. 689-699
4. **Bulatović V.**, Malešev M., Radeka M., Radonjanin V., Lukić I. (2015): Analysis of sulfate resistance of concrete using sodium and magnesium sulfate, iNDiS 2015, Novi Sad, UDK: 691, ISBN 978-86-7892, str. 161-171

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

С обзиром на комплексност анализе резултата истраживања изведен је већи број закључака са аспекта утицаја варираних параметара на својства која су одабрана за оцену сулфатне отпорности испитиваних врста бетона. Закључци су груписани по анализираним својствима: чврстоћа бетона при притиску, експанзија узорака бетона, капиларно упијање воде, порозност и XRD-EDS-FTIR.

На основу анализе **промене чврстоће при притиску** изведени су следећи најважнији закључци:

- Бетони са крупним речним агрегатом и са цементом СЕМ I имају веће чврстоће у односу на одговарајуће бетоне са крупним рециклираним агрегатом, без обзира на посматрани период, водоцементни фактор и врсту раствора. Изузетак је узорак бетона са рециклираним агрегатом и мањим водоцементним фактором (0,38), који је био 6 месеци потопљен у раствор $MgSO_4$.
- Бетони са цементом СЕМ III, $w/c=0,55$ и крупним речним агрегатом имају приближно исте вредности чврстоћа при притиску са одговарајућим бетонима са рециклираним агрегатом, без обзира на посматрани период и врсту раствора, уз констатацију да су чврстоће бетона са рециклираним агрегатом мање од одговарајућих са речним агрегатом. Супротан закључак је изведен упоређењем истих бетона само са $w/c=0,38$.
- Утицаји врсте цемента, водоцементног фактора и врсте сулфатног раствора на промену чврстоће при притиску узорака бетона са крупним речним агрегатом и бетона са крупним рециклираним агрегатом су мали и нису јасно видљиви за период изложености сулфатним растворима до 3 месеца. Бетони справљени са цементом СЕМ I, без обзира на вредност водоцементног фактора ($w/c=0,55$ и $w/c=0,38$) и врсту сулфатног раствора (натријум сулфат или магнезијум сулфат), након 3 месеца боравка у предметним растворима, не показују значајне разлике у чврстоћи при притиску у односу на одговарајуће референтне узорке. У случају бетонских узорака са цементом СЕМ III, потопљених 3 месеца у оба сулфатна раствора, вредности чврстоће при притиску зависе од водоцементног односа и врсте сулфатног раствора, међутим утицај ова два параметра на вредност чврстоће при притиску је у границама $\pm 10\%$ у односу на одговарајућу референтну чврстоћу.
- Након 6 месеци излагања узорака бетона сулфатним растворима, анализирана три параметра (врста цемента, водоцементни фактор и врста сулфатног раствора) почињу да утичу на промену чврстоће при притиску, али са различитим интензитетом. Сви бетони справљени са СЕМ I и крупним речним агрегатом показују смањење чврстоће при притиску у поређењу са одговарајућим референтним бетонима. Највеће смањење, од 22%, имао је бетон са $w/c=0,55$, потопљен у 5% Na_2SO_4 , што је веома близу критичне вредности предложене од стране Mehte. Бетони са цементом СЕМ III су мање осетљиви са аспекта промене чврстоће у односу на бетоне са СЕМ I. Смањење чврстоће бетона са СЕМ III не прелази 10% од одговарајућих референтних вредности, а при нижем водоцементном фактору, у раствору магнезијум сулфата, регистровано

је и извесно повећање чврстоће при притиску. Бетони справљени са СЕМ I и крупним рециклираним агрегатом такође показују смањење чврстоће при притиску у поређењу са одговарајућим референтним бетонима. Највеће смањење, од 34%, имао је бетон са $w/c=0,55$, потопљен у 5% Na_2SO_4 , што је веће од критичне вредности предложене од стране Mehte, док код осталих врста бетона предметно смањење чврстоће није веће од 10%. Бетони са цементом СЕМ III су мање осетљиви са аспекта промене чврстоће у односу на бетоне са СЕМ I. Смањење чврстоће бетона са СЕМ III не прелази 10% од одговарајућих референтних вредности.

- На основу компаративне анализе добијених вредности чврстоћа при притиску бетона справљених са крупним речним и бетона са крупним рециклираним агрегатом, који су били излагани различитим растворима (кречна вода, 5% раствор натријум сулфата и 5% раствор магнезијум сулфата) закључено је да врста агрегата има утицаја на сулфатну отпорност, али да је доминантнији утицај врсте цемента. Бетони справљени са СЕМ III имају мало смањење чврстоће при притиску и задовољавају сулфатну отпорност за обе вредности водоцементног фактора, обе врсте агрегата и у оба сулфатна раствора, тако да се може закључити да се сулфатна отпорност постиже избором ове врсте цемента. Сулфатна отпорност бетона справљених са СЕМ I зависи од вредности водоцементног фактора, од врсте агрегата али и од врсте сулфатног раствора. Бетон са СЕМ I, рециклираним агрегатом и вишим водоцементним фактором је осетљивији на дејство раствора натријум сулфата и нема задовољавајућу отпорност након 6 месеци деловања предметног раствора. Да би се постигли сулфатно-отпорни бетони са рециклираним агрегатом и СЕМ I, мора се усвајати нижи водоцементни фактор.

На основу анализе **промене дужине – експанзије узорака бетона** изведени су следећи најважнији закључци:

- Све измерене вредности експанзија еталонских узорака су мале и могу се занемарити, јер се крећу од 0,010 до 0,050‰
- Утицаји врсте цемента, водоцементног фактора и врсте сулфатног раствора на експанзију узорака бетона са крупним речним агрегатом и са крупним рециклираним агрегатом су уочљиви за период изложености сулфатним растворима до 3 месеца. Бетони справљени са цементом СЕМ I и речним агрегатом, без обзира на вредност водоцементног фактора ($w/c=0,55$ и $w/c=0,38$) и бетони справљени са СЕМ I и вишим водоцементним фактором ($w/c=0,55$) имају значајно веће експанзије у односу на одговарајуће бетоне справљене са цементом СЕМ III. Овај закључак је потврђен и факторијалном анализом. Међутим, измерене вредности експанзија бетона справљених са цементом СЕМ I су, за овај период изложености сулфатним растворима, мање од критичне вредности. У случају бетонских узорака са цементом СЕМ III потопљених 3 месеца у оба сулфатна раствора, вредности експанзије су мале и углавном мање од 0,05‰, што се у пракси сматра за занемарљиве вредности.
- Након 6 месеци излагања узорака свих врста бетона сулфатним растворима уочено је повећање вредности експанзије у односу на вредности измерене на 3 месеца. Експанзија је нарочито изражена у бетону са СЕМ I и $w/c=0,55$, без обзира на врсту крупног агрегата и врсту сулфатног раствора. Предметни закључак је такође потврђен факторијалном анализом. Оценом сулфатне отпорности испитиваних врста бетона помоћу критеријума који су предложили Miller и Manson закључено је да су достигнуте критичне вредности у раствору натријум сулфата. Измерене вредности експанзије бетона са СЕМ III су мале и углавном су блиске граници занемаривања.
- Уколико се за оцену сулфатне отпорности бетона користи метода праћења промене димензија узорака закључено је да врста агрегата има миноран утицај на сулфатну отпорност бетона који су 6 месеци боравили у сулфатним растворима. Врста сулфатног раствора има утицаја на сулфатну отпорност бетона, без обзира на врсту агрегата. У 5% раствору натријум сулфата, сулфатна отпорност бетона зависи од примењене врсте цемента. Сви бетони справљени са цементом СЕМ III, без обзира на вредност водоцементног фактора и врсту крупног агрегата, су сулфатно отпорни, док сулфатна отпорност бетона са цементом СЕМ I зависи од водоцементног фактора. Бетони са СЕМ I и $w/c=0,55$ и обе врсте крупног агрегата су сулфатно неотпорни. У 5% раствору магнезијум сулфата, све испитиване врсте бетона су показале задовољавајућу отпорност.

Упоређењем вредности **коэффицијента капиларног упијања воде** бетона који су справљени са крупним речним агрегатом и бетона справљеним са крупним рециклираним агрегатом закључено је:

- Вредности коэффициентјената капиларног упијања воде се смањују током 6 месеци потапања узорак бетона у сулфатне растворе у односу на еталонске узорак пре почетка потапања у сулфатне растворе (0 месеци), без обзира на врсту примењеног агрегата и врсту раствора (кречна вода, 5% Na_2SO_4 или 5% MgSO_4) у коме су узорци бетона боравили.
- Након 6 месеци потапања у сулфатне растворе, коэффициентјенти капиларног упијања бетона са речним и рециклираним агрегатом су већи од одговарајућих коэффициентјената еталонских узорак бетона осим код бетона са СЕМ III и $w/c=0,55$.
- Коэффицијенти капиларног упијања воде узорак бетона са рециклираним агрегатом пре почетка потапања у сулфатне растворе (0 месеци), као и након 3 и 6 месеци боравка у сулфатним растворима, већи су од одговарајућих коэффициентјената бетона са речним агрегатом, изузев код узорак бетона са $w/c=0,38$, који су боравили 3 месеца у раствору магнезијум сулфата.
- Вредности коэффициентјената капиларног упијања воде код бетона са рециклираним агрегатом су увек мање у раствору магнезијум сулфата у односу на одговарајуће вредности у натријум сулфату за исту врсту бетона, док код бетона са речним агрегатом вредности предметног коэффициентјента зависе од w/c и веће су у раствору натријум сулфата за $w/c=0,55$, а у раствору магнезијум сулфата када је $w/c=0,38$.
- Међусобним упоређењем вредности коэффициентјента капиларног упијања воде узорак бетона са крупним рециклираним агрегатом, након 3 и 6 месеци потапања у сулфатне растворе, уочено је да се коэффициентјенти капиларног упијања воде повећавају са повећањем дужине боравка у сулфатним растворима, што је супротно од закључка изведеног за бетон са речним агрегатом.
- Доминантни утицај на вредност коэффициентјента капиларног упијања воде има врста агрегата.
- Упоређењем закључака који су добијени анализом вредности коэффициентјената капиларног упијања воде са закључцима добијеним анализом **коначних вредности капиларног упијања воде** испитиваних врста бетона, констатовано је да су разлике у закључцима минималне. Оба параметра, коэффициентјент капиларног упијања воде и коначна вредност капиларног упијања воде, се могу равноправно, по сопственом избору, корисити за анализу капиларног упијања воде. Извесна предност се даје коэффициентјенту капиларног упијања воде, јер је и у одговарајућим стандардима прописан поступак за његово одређивање и могу се пронаћи резултати истраживања других аутора

Упоређењем вредности **укупне порозности** узорак бетонских мешавина на бази речног и рециклираног агрегата закључено је да:

- Бетонске мешавине на бази речног агрегата и на бази рециклираног агрегата, без обзира на врсту цемента (СЕМ I и СЕМ III) и вредност водоцементног фактора ($w/c=0,55$ и $w/c=0,38$), након излагања дејству сулфатних раствора у трајању од 3 и 6 месеци, имају мању или једнаку укупну порозност у односу на одговарајуће еталонске узорке.
- Упоређењем вредности укупних порозности након 3 и 6 месеци боравка у сулфатним растворима, закључено је да се порозност повећава, али, углавном, не прелази вредности укупне порозности еталона. Овај податак указује да до 3 месеца боравка у сулфатним растворима пропадава таложене продуката сулфатне корозије у слободном порном простору, а у периоду од 3 до 6 месеци долази до разлагања или до ширења продуката хемијских реакција који доводе до укрупњавања пора.
- У погледу расподеле пора узорак бетонских мешавина изложених 3 месеца дејству 5% Na_2SO_4 , највеће промене се запажају на узорцима бетонских мешавина направљеним од рециклираног агрегата са СЕМ I и $w/c=0,55$, који имају више пора у свим интервалима до $1\mu\text{m}$ у односу на узорке истог састава али са речним агрегатом. Повећање удела пора у овом интервалу може да укаже на везивање сулфатних јона за С-S-H гел у условима ограниченог, малог простора који је

лимитиран величином гелских пора. Недовољан простор за смештај насталих продуката у гелским порима доводи до њиховог укрупњавања и пораста удела пора у интервалу до 0,05 μ m.

– Након 6 месеци код узорака са рециклираним агрегатом се јављају само поре веће од 1 μ m. Овај податак указује да су кристалizacionи притисци, који се развијају у овим порима, нарасли до нивоа да долази до укрупњавања пора. Овај тренд се не односи на бетонску мешавину са СЕМ III и w/c=0,55.

– Слични односи важе и за узорке изложене дејству 5% MgSO₄.

Рендгеноструктурна анализа (**XRD**) је рађена на узорцима бетона који су справљени са цементом СЕМ I, w/c=0,55 и обе врсте крупног агрегата (речним агрегатом и рециклираним агрегатом) и указује на неколико битних промена у фазном саставу узорака бетонских мешавина након 6 месеци боравка у засићеном кречном раствору, 5% Na₂SO₄ и 5% MgSO₄. Идентификовано је да:

– потрошња портландита у узорцима бетона са речним агрегатом расте према редоследу: еталонски узорци → узорци у 5% MgSO₄ → узорци у 5% Na₂SO₄, док код бетона са рециклираним агрегатом расте по редоследу: еталонски узорци → узорци у 5% Na₂SO₄ → узорци у 5% MgSO₄. Највећа количина портландита је регистрована код еталонских узорака. Потрошња портландита се не може узети само за реакције са сулфатним јонима, с обзиром да је на основу рендгеноструктурне анализе регистрован и процес карбонизације. Процес карбонизације и настанак калцита је присутан код свих узорака.

– Присуство еtringита и гипса указује на напредовање реакције између продуката хидратације цемената и сулфатних јона. Релативни интензитети пика еtringита расту према следећем редоследу: еталонски узорци → узорци у 5% Na₂SO₄ → узорци у 5% MgSO₄, без обзира на врсту употребљеног агрегата, а присуство калцијум моносулфата и калцијум монокарбоната указује да постоје предуслови за даљу реакцију са сулфатним јонима и настанак новог еtringита. Када је у питању гипс, највиши пик је уочен код узорака бетона са речним агрегатом потопљених у 5% Na₂SO₄. Настанак гипса подразумева да се у анализираним узорцима концентрација реактивног алуминијума спустила на минимум, а концентрација сулфата значајно порасла.

– Присуство бруцита у узорцима потопљених у 5% MgSO₄ указује на одређено успоравање реакције сулфата са продуктима хидратације. Минерална фаза М-S-H није идентификована.

Најзначајнији допринос **FTIR** анализе узорака бетона који су справљени са цементом СЕМ I, w/c=0,55 и обе врсте крупног агрегата (речним агрегатом и рециклираним агрегатом) након 6 месеци боравка у засићеном кречном раствору, у 5% Na₂SO₄ и у 5% MgSO₄ је:

– ν_3 асиметричне вибрације при истезању Si-O веза Q₂ тетраедра, центриране на 1000cm⁻¹ показују да су таласни бројеви абсорпционих трака, које су уобичајене за асиметрично истезање веза у C-S-H гелу, смањени, што је много наглашеније у случају узорака изложених деловању сулфатних раствора у поређењу са референтним узорцима и указују на промену односа Ca/Si у C-S-H гелу.

– Деконволуција претходно поменутог абсорпционог пика унутар опсега таласних бројева 1200-850cm⁻¹ и фитовање кривих, указује на померање абсорпционог пика на 977 cm⁻¹ за еталонске узорке са речним агрегатом и 991 cm⁻¹ за еталонске узорке са рециклираним агрегатом, у односу на вредност 969 cm⁻¹ код пасте СЕМ I. Ово померање указује на појаву декалцификације и полимеризације C-S-H гела.

– Интензитет абсорпционог пика на 991 cm⁻¹ за еталонске узорке бетона са рециклираним агрегатом, је виши него интензитет пика центрираног на 977 cm⁻¹ код одговарајућег бетона са речним агрегатом, што указује на већу количину C-S-H гела у бетону са рециклираним агрегатом, него у бетону са речним агрегатом.

– Упоредом таласних бројева абсорпционих трака еталонског узорка бетона са речним агрегатом (977 cm⁻¹) и узорка од истог бетона изложеног дејству 5% MgSO₄ (979 cm⁻¹), уочен је виши ниво декалцификације код бетона изложеног деловању 5% MgSO₄, док у случају узорка исте бетонске мешавине изложеног дејству 5% Na₂SO₄ пик је померен ка мањим вредностима таласне дужине (973 cm⁻¹) и указује на рекалцификацију силикатног ланца. Код узорака бетона

са рециклираним агрегатом, који су били изложени дејству 5% Na₂SO₄ и дејству 5% MgSO₄, уочено је померање апсорпционог пика ка мањој вредности таласног броја (967 cm⁻¹) односу на вредност одговарајућег еталона (991 cm⁻¹), што указује на појаву рекалцификације. Појава рекалцификације узрокује карбонизацију C-S-H гела, што је додатно допринело деградацији структуре материјала.

На основу анализе резултата добијених помоћу **EDS** изведени су ниже наведени најважнији закључци. Први од наведених закључака је општег карактера, а остали се односе на анализу бетона справљених са цементом СЕМ I, w/c=0,55 и обе врсте крупног агрегата (речним агрегатом и рециклираним агрегатом) који су изложени деловању сулфатних раствора у периоду од 6 месеци.

- Промене у микроструктури које се јављају након излагања узорка деловању сулфатних раствора су повезане са смањењем чврстоће при притиску и експанзијом. Промена чврстоће при притиску показује да је након почетног повећања вредности, дошло до смањења, код већине бетонских мешавина. Претпоставља се да је почетни раст у чврстоћи при притиску (до 3 месеца боравка у сулфатним растворима) повезан са процесом хидратације и таложењем кристала еtringита у крупним порима у узорцима са СЕМ I, као и настанком хидроталцита у узорцима са СЕМ III када долази до попуњавања пора. Након тог периода долази до смањења чврстоће при притиску, што је вероватно повезано са експанзијом узрокованом физичко-хемијским процесима који се дешавају у узорцима изложеним деловању сулфатне корозије.
- EDS анализом је одређена дубина декалцификације од 2mm у односу на површину узорка. На основу анализе резултата утврђено је да декалцификација зависи од врсте сулфатног јона и врсте агрегата. Бетон са речним агрегатом је осетљивији на раствор Na₂SO₄, док је бетон са рециклираним агрегатом осетљивији на деловање раствора MgSO₄.
- Суперзасићење и ограничење раста кристала су два предуслова неопходна за развој кристалног притиска. Бетон са рециклираним агрегатом, који је изложен деловању раствора Na₂SO₄, задовољава оба ова услова. Наиме, однос S/Ca је био највиши и уочено је формирање fine мешавине C-S-H гела, еtringита, гипса и AFm фазе. Ово указује да су предуслови за развој кристалizacionог притиска присутни у великој мери и да је експанзија у овом случају била највећа.

На основу упоређења **метода за оцену сулфатне отпорности бетона** закључено је:

- Критеријум за оцену сулфатне отпорности праћењем смањења чврстоће бетона при притиску, предложен од стране Mehta и критеријум за оцену сулфатне отпорности праћењем експанзије узорка бетона, који су предложили Miller и Manson имају исти закључак о сулфатној отпорности испитиваних бетона за период изложености сулфатним растворима од 3 месеца, а веома мала разлика у закључку је примећена за период изложености од 6 месеци и то само у раствору натријум сулфата. Уочена разлика у оцени је прихватљива, с обзиром да су у питању нестандардизоване методе испитивања, без јединствених критеријума.
- Метода праћења смањења чврстоће бетона при притиску са критеријумом који је предложио Mehta и метода праћења експанзије узорка бетона са критеријумом који су предложили Miller и Manson, могу се равноправно користити за оцену сулфатне отпорности бетона, али се предност даје методи праћења експанзије, зато што је недеструктивна, експанзија се мери на истим узорцима током трајања експеримента, па је потребан значајно мањи број узорка, јер еталонски узорци нису потребни. Индиректно, наведене предности повлаче за собом и друге, као што су мањи простор за организацију експеримента, нижа цена итд.
- Одређивање сулфатне отпорности преко параметара капиларног упијања, као што су коефицијент капиларног упијања и укупно капиларно упијање воде, је према резултатима овог истраживања и компликованије и непоузданије од претходно споменуте две методе, па се не препоручује за праћење сулфатне отпорности бетона.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

На основу анализе докторске дисертације Весне Булатовић, комисија сматра да је она урађена систематично, да је добро структурирана и да је примењен адекватан научни приступ. Кроз приказ и анализу великог броја научних радова, дисертација, саопштења и књига, везаних за област сулфатне отпорности малтера и бетона, формирана је квалитетна база података на основу које је дефинисан програм сопственог експерименталног истраживања. Резултати сопственог експерименталног истраживања су адекватно обрађени и презентовани на разумљив и коректан начин, а анализа резултата је систематично приказана, јасно изложена и спроведена уз примену адекватних метода нумеричке анализе, математичке статистике и теорије вероватноће, као и одговарајућих, научно признатих рачунарских програма за минералошку анализу. На основу анализе резултата истраживања сулфатне отпорности одабраних врста бетона изведени су одговарајући закључци који су вредновани коришћењем научно признатих критеријума из анализираних литературе. Предложени су и правци даљих истраживања. Техничка обрада свих поглавља докторске дисертације је на високом нивоу. Дисертација је обogaћена хронолошки сложеним фотографијама које употпуњују слику о спроведеном експерименталном истраживању. Јасно написан текст је праћен квалитетним SEM -EDS фотографијама, добро осмишљеним дијаграмима и табелама који доприносе бољој и јаснијој анализи добијених резултата, нарочито са аспекта промена у микроструктури и минералошком саставу цементног камена. Комисија сматра да укупан рад кандидата, по свом карактеру и обиму, у потпуности одговара дефинисаној теми и наслову и такође сматра да ће резултати овог истраживања имати примену у грађевинској пракси и у будућим научним истраживањима из ових области.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

Комисија је констатовала да је дисертација Весне Булатовић у складу са образложењима наведеним у пријави теме. Испоштован је програм истраживања, урађено је планирано експериментално истраживање, проверене су хипотезе и изведени адекватни закључци. У оквиру теоријско-истраживачког дела дисертације, у циљу боље припреме за анализу резултата сопственог експерименталног истраживања, додатно су описани аспекти трајности бетона, порозност цементног камена, процес хидратације и продукти хидратације Портланд цемента, згура као додаток цементу, агрегати добијени уситњавањем старог бетона и улога транзитне зоне.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

Докторска дисертација, на основу назива теме, садржаја, обраде и тумачења резултата истраживања, садржи све битне елементе који се захтевају при изради радова овакве врсте.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Докторска дисертација кандидата Весне Булатовић је оригинални теоријско-експериментални научни рад на тему сулфатне отпорности бетона са крупним агрегатом од рециклираног бетона. Детаљном анализом досадашњих истраживања у области сулфатне корозије бетона закључено је да је ова научна област недовољно истражена, нарочито када је у питању примена специфичних врста агрегата, као што је агрегат добијен уситњавањем старог бетона, тако да су истраживања са овом тематиком високо цењена и у научној и у стручној јавности.

Научни допринос ове докторске дисертације се огледа у следећем:

– Доказана је основна хипотеза докторске дисертације да се применом крупног агрегата од рециклираног бетона и везива одговарајућег минералошког састава могу добити конструкцијски бетони, односно бетони са задовољавајућим механичким карактеристикама, али и са

<p>задовољавајућом трајношћу са аспекта сулфатне корозије.</p> <p>– Дефинисан је утицај врсте, односно минералшког састава цемента, водоцементног фактора и врсте сулфатног раствора на сулфатну отпорност бетона са крупним речним агрегатом и бетона у коме је 100% речног крупног агрегата замењено агрегатом од рециклираног бетона.</p> <p>– Формиране су препоруке за добијање сулфатно-отпорних "зелених" бетона у чији састав су укључени цемент са високим садржајем згуре и крупан агрегат добијен рециклирањем старог бетона. Применом згуре, као индустријског отпадног материјала, може се субституисати цементни клинкер и до 90%, чиме се значајно смањује емисија штетних гасова који се ослобађају при производњи цементног клинкера и штеди енергија. Заменом природног агрегата агрегатом од рециклираног "старог" бетона омогућено је очување природних налазишта агрегата и смањење депонија грађевинског отпада.</p> <p>– Критички су анализирани и упоређени три методе за оцену сулфатне отпорности бетона. Посебан допринос дисертације се огледа и у тумачењу промена у структури бетона и минералшком саставу цементног камена до којих долази услед дејства сулфата помоћу SEM, BSE/EDS, XRD и FTIR метода. Тиме је учињен још један искорак у дефинисању и схватању изузетно сложеног механизма сулфатне корозије бетона.</p>
<p>4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања</p> <p>На основу детаљне анализе рада кандидата комисија констатује да су испуњени постављени циљеви и да дисертација не садржи недостатке који би утицали на резултате истраживања.</p>
<p>X ПРЕДЛОГ:</p>
<p>На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:</p>
<p>- да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана</p> <p>- да се докторска дисертација враћа кандидату на дораду (да се допуни односно измени) или</p> <p>- да се докторска дисертација одбија</p>

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

Председник: Др Властимир Радоњанин, редовни професор,
Факултет техничких наука, Нови Сад

Члан: Др Гордана Топличић-Ћурчић, ванредни професор,
Грађевинско-архитектонски факултет, Ниш

Члан: Др Зоран Грдић, редовни професор,
Грађевинско-архитектонски факултет, Ниш

Ментор: Мирјана Малешев, редовни професор,
Факултет техничких наука, Нови Сад

Ментор: Мирослава Радека, редовни професор,
Факултет техничких наука, Нови Сад

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.