



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Slobodan Šupić

**PRIMENA PEPELA NASTALOG
SAGOREVANJEM ŽETVENIH OSTATAKA
KAO MINERALNOG DODATKA U
CEMENTNIM KOMPOZITIMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2019.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Штампана грађа
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Слободан Шупић
Ментор, МН:	Проф. др Властимир Радоњанин Проф. др Мирјана Малешев
Наслов рада, НР:	Примена пепела насталог сагоревањем жетвених остатака као минералног додатка у цементним композитима
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски/Енглески
Земља публиковања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УП:	Војводина
Година, ГО:	2019.
Издавач, ИЗ:	Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Место и адреса, МА:	Нови Сад, 21000, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: <small>(поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)</small>	12/448/206 /78/140/0/18
Научна област, НО:	Грађевинско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Теорија и технологија бетона
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Биопепео, минрални додаток, цементни композити, рециклирани агрегат од бетона, чврстоћа при притиску, капиларно упијање, скупљање
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека ФТН
Важна напомена , ВН:	
Извод, ИЗ:	У дисертацији су приказани резултати сопственог експерименталног истраживања могућности примјене биопепела, насталог сагоревањем жетвених остатака, као минералног додатка у цементним композитима: малтерима и бетонима. Истраживање је засновано на компаративној анализи 27 врста малтера у којима је варирана врста биопепела и врста ситнозрног агрегата и 12 врста бетона које се разликују у врсти везива и у крупном агрегату. На очврслом малтеру су испитани: конзистенција, чврстоћа при притиску и капиларно упијање воде, а на очврслом бетону испитивани су капиларно упијање воде, скупљање при сушењу, чврстоћа при притиску, динамички модул еластичности, отпорност на хабање, водонепропустљивост и чврстоћа на савијање. Истакнуто је да се примјеном биопепела као замјене дијела цемента могу добити конструкцијски малтери и бетони, односно бетони са задовољавајућим физичким и механичким карактеристикама.
Датум прихватања теме, ДП:	
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: др Мирослава Радека, ред. проф. Члан: др Немања Станисављевић, ванред. проф. Члан: др Иванка Нетингер-Грубеша, ванред. проф. Члан, ментор: др Властимир Радоњанин, ред. проф. Члан, ментор: др Мирјана Малешев, ред. проф.
	Потпис ментора



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :		
Identification number, INO :		
Document type, DT :	Monographic publication	
Type of record, TR :	Textual printed material	
Contents code, CC :	Doctoral dissertation	
Author, AU :	Slobodan Šupić	
Mentor, MN :	Prof. dr Vlastimir Radonjanin Prof. dr Mirjana Malešev	
Title, TI :	Application of biomass ash, generated by combustion of harvest residues, as a mineral additive in cement composites	
Language of text, LT :	Serbian	
Language of abstract, LA :	Serbian / English	
Country of publication, CP :	Serbia	
Locality of publication, LP :	Vojvodina	
Publication year, PY :	2019	
Publisher, PB :	Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad	
Publication place, PP :	Novi Sad, 21000, Trg Dositeja Obradovića 6	
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	12/448/206 /78/140/0/18	
Scientific field, SF :	Civil Engineering	
Scientific discipline, SD :	Theory and technology of concrete	
Subject/Key words, S/KW :	Biomass ash, mineral binder, cement composites, recycled concrete aggregate, compressive strength, capillary absorption, shrinkage	
UC		
Holding data, HD :	The Library of the Faculty of Technical Sciences	
Note, N :		
Abstract, AB :	The dissertation presents the results of an own experimental research on the possibility of using biomass ash as a mineral additive in cement composites: mortar and concrete. The research is based on a comparative analysis of 27 types of mortars in which the type of biomass ash and the type of fine-grained aggregate were varied, as well as 12 types of concrete that differ in the type of binder and coarse aggregate. Following properties were tested on hardened mortars: consistency, compressive strength and capillary water absorption, and on hardened concrete: capillary water absorption, drying shrinkage, compressive strength, dynamic modulus of elasticity, wear resistance, water permeability and flexural strength. It was pointed out that biomass ash can be used as a replacement of a part of cement, thereby obtaining satisfactory physical and mechanical characteristics.	
Accepted by the Scientific Board on, ASB :		
Defended on, DE :		
Defended Board, DB :		
President:	dr Miroslava Radeka, full professor	Menthor's sign
Member:	dr Nemanja Stanisavljević, associate professor	
Member:	dr Ivanka Netinger-Grubeša, associate professor	
Member, Mentor:	dr Mirjana Malešev, full professor	
Member, Mentor:	dr Vlastimir Radonjanin, full professor	

ZAHVALNOST

Najveću zahvalnost dugujem svojim mentorima, profesorima i velikim prijateljima Vlastimiru Radonjaninu i Mirjani Malešev, za ukazanu priliku, te dugogodišnje brižljivo praćenje mojih istraživanja, podršku, duboko razumjevanje, stručnost i pomoć oko svih problema sa kojima sam se susreo, kao i za neprocjenjive savjete koji su uticali na moj profesionalni i lični razvoj. Biti njihov saradnik je jedna velika privilegija.

Naročito hvala dragoj mentorki Mirjani Malešev za svaki trenutak zajedničkog rada u laboratoriji tokom kojih mi je inspirativno davala savete, sugestije, ukazivala povjerenje i spremnost na zajednički rad. Hvala joj što je uvijek surovo iskrena, nepopravljivo optimistična i sklona da iz svega i iz svakoga izvuče ono najbolje.

Veliku zahvalnost na lijepoj saradnji, pomoći i savjetima u tumačenju mikrostrukture materijala dugujem profesorici Miroslavi Radeki.

Najiskrenije se zahvaljujem profesoru Nemanji Stanisavljeviću, na savjetima i pomoći tokom obrade podataka u modelima za analizu toka materijala i toka supstanci.

Zahvalnost dugujem kolegama Vesni Bulatović, Ivanu Lukiću i Tiani Milović za nesebičnu pomoć oko izvođenja eksperimenta. Specijalno hvala mojim laborantima, Stevanu Tomiću i Darku Bradiću, za svu pozitivnu energiju i безусловnu pomoć, a bez kojih realizacija eksperimenta ne bi bila moguća. Za pomoć oko nabavke potrebnog materijala hvala dragoj Aleksandri Dmitrović.

Hvala svim kolegama na Departmanu za građevinarstvo i geodeziju koji su na bilo koji način doprinjeli oblikovanju i završetku ove teze a nisu prethodno pomenuti. Posebno, hvala Milošu Šešliji, Savu Staroviću, Stefanu Koziću i Jovanu Zelenoviću za pomoć u laboratoriji za vrijeme vrelih ljetnjih dana betoniranja.

Za značajnu materijalnu pomoć u vidu cementa zahvalost upućujem kompaniji "Lafarge BFC". Zahvaljujem se i kompaniji "Best izgradnja" za cjelokupnu količinu agregata. Za hemijske dodatke betonima i epoksidni premaz, hvala kompaniji "Sika Srbija".

Veliko hvala mojim roditeljima i sestri za безусловnu ljubav i pomoć koju mi uvijek daju. Hvala mojim prijateljima na razumijevanju, ljubavi i podršci. Apsolutnu odgovornost za sve greške i nedostatke u radu ostavljam sebi, sa nastojanjem da ih u svim budućim radovima bude što manje.

REZIME

U radu je analizirana mogućnost primjene pepela nastalog sagorjevanjem žetvenih ostataka kao mineralnog dodatka u cementnim kompozitima, sa aspekta fizičkih i mehaničkih svojstava kompozita i ekološkog uticaja supstitucije cementa u istima. U teorijsko-istraživačkom dijelu analizirana je raspoloživost biomase, kao obnovljivog izvora energije i pepela nastalog sagorjevanjem poljoprivredne biomase, u AP Vojvodini. Dat je pregled i analiza aktuelnih istraživanja iz oblasti primjene različitih vrsta biopepela kao cementa i/ili filera u cementnim kompozitima, na osnovu čega je formirana baza podataka pomoću koje je definisan program sopstvenog eksperimentalnog istraživanja. Istraživanje uticaja biopepela, kao zamjene za dio cementa, na fizička i mehanička svojstva cementnih kompozita je zasnovano na komparativnoj analizi 27 malterskih mješavina koje se razlikuju u sitnom agregatu (standardni CEN pjesak, pjesak za malterisanje i riječni frakcionisani agregat) i 2 vrste biopepela (pepeo pšenične slame i pepeo mješavine pšenične i sojine slame), te na 12 betonskih mješavina u kojima je variran nivo supstitucije cementa pepelom pšenične slame i vrsta krupnog agregata (riječni agregat i agregat dobijen usitnjavanjem "starog" betona. Urađena je karakterizacija obe ispitivane vrste biopepela, pri čemu su ispitana sva relevantna fizička i mehanička svojstva pepela, uključujući i analizu mikrostrukture. Na malterima su ispitani: konzistencija, čvrstoća pri pritisku i kapilarno upijanje vode i urađene su mikrostrukturne analize: XRD i FTIR. Na očvrslom betonu ispitivani su čvrstoća pri pritisku, kapilarno upijanje vode, skupljanje pri sušenju, dinamički modul elastičnosti, otpornost na habanje, vodonepropustljivost i čvrstoća na savijanje i urađene su mikrostrukturne analize: XRD i FTIR. Ukupan broj uzoraka koji je ispitan iznosi 243 za maltere i 178 za betone, a za njihovu izradu je upotrebjeno cca 0,06m³ maltera i 0,6m³ betona. Većina navedenih svojstava cementnih kompozita je ispitana pri starostima do 90 dana, u cilju sagledavanja razvoja mikrostrukture i uticaja stepena hidratacije i pucolanske reakcije biopepela na izabrana svojstva. Analiza fizičkih i mehaničkih svojstava betona je urađena najpre u okviru betona spravljenih sa istom vrstom krupnog agregata, a zatim je izvršena i komparativna analiza betona sa riječnim i agregatom od starog betona kao krupnim agregatom. Definisan je uticaj vrste i količine biopepela i vrste sitnozrnog agregata na svojstva maltera, odnosno količina biopepela i vrsta krupnog agregata na svojstva betona. Na osnovu komparativne analize zaključeno je da nivo supstitucije cementa biopepelom ima uticaj na svojstva cementnih kompozita, ali da je dominantniji uticaj vrste agregata. Pepeo pšenične slame se odlikuje boljim pucolanskim karakteristikama, u odnosu na pepeo mješavine pšenične i sojine slame, pri čemu je zaključeno da se pri nivou supstitucije cementa od 50% postižu, i u malterima i betonima, uporediva svojstva sa svojstvima referentnih cementnih kompozita. Pokazano je da je optimalan procenat zamjene cementa u malterima pepelom mješavine pšenične i sojine slame 30%. Pokazano je da se primjenom krupnog agregata od starog betona i pepela pšenične slame, u velikim količinama, mogu dobiti konstrukcijski betoni, odnosno betoni sa zadovoljavajućim fizičkim i mehaničkim karakteristikama. Na kraju rada istaknut je povoljan ekološki impakt primjene biopepela: smanjenje potrošnje prirodnih resursa, redukcija otpada, smanjenje emisije gasova staklene bašte i smanjenje koncentracije teških metala cementnih kompozita.

Ključne reči: biopepeo, eko-materijal, malter, beton, fizička i mehanička svojstva.

ABSTRACT

The paper analyzes the possibility of using biomass ash, generated by combustion of harvest residues as a mineral additive in cement-based composites, from the aspect of the physical and mechanical properties of composites and the ecological impact of cement substitution. In the theoretical and research part, the availability of biomass, as a renewable energy source and biomass ashes in AP Vojvodina, was analyzed. An overview and analysis of current research in the field of application of different types of biomass ashes as cement and/or filler in cement composites is provided. The overview has helped the formation of a database which has enabled the program of experimental research to be defined. The study of the influence of biomass ash as a replacement for a part of cement on the physical and mechanical properties of cement composites is based on a comparative analysis of 27 mortar mixtures that differ in a small aggregate (standard CEN sand, sand for plastering and river fractionated aggregate) and 2 types of biomass ashes (wheat straw ash – WSA and mixture of wheat and soya straw ash - WSSA), and of 12 concrete mixtures in which the level of substitution of cement with wheat straw ash and the type of coarse aggregate (river aggregate and recycled concrete aggregate) were varied. The characterization of biomass ashes was performed, whereby all relevant physical and mechanical properties of ashes, including microstructure analysis, were tested. Tested properties of mortars included: consistency, compressive strength, capillary water absorption and microstructural analyzes. Capillary water absorption, drying shrinkage, dynamic modulus of elasticity, wear resistance, waterproofness and flexural strength were tested for all hardened concrete types; and microstructural analyzes XRD and FTIR were performed. The total number of tested samples accounted 243 for mortars and 178 for concretes, and for their production approximately 0,06m³ of mortar and 0,6m³ of concrete were casted. Most of the properties of composites were tested at ages up to 90 days in order to examine the development of the microstructure and the influence of the degree of hydration and pozzolanic reaction of biomass ashes on selected properties. The analysis of the physical and mechanical properties was firstly carried out on the concretes with the same type of coarse aggregate, and then the comparative analysis of concretes with river and recycled coarse aggregate was performed. The influence of the type and quantity of biomass ash and the type of fine aggregate on the properties of the mortar, ie the amount of biomass ash and the type of coarse aggregate on the properties of concrete, were defined. Based on the comparative analysis, it has been concluded that the level of substitution of cement with biomass ash has an effect on the properties of cement composites, but that the influence of the type of aggregates is dominant. WSA is characterized by better pozzolanic characteristics compared to WSSA, hence it has been concluded that at the cement substitution of 50% with WSA, both in mortars and concrete, comparable properties with the properties of reference cement composites are achieved. It has been shown that the optimal percentage of cement replacement with WSSA in mortars ash is 30%. It has been pointed out that with the application of the recycled concrete aggregate from the and WSA, structural concretes can be obtained, i.e. concretes with satisfactory physical and mechanical characteristics. At the end of the paper, a favorable ecological impact of biomass ash application was emphasized: reduction of the consumption of natural resources, reduction of waste, reduction of greenhouse gas emissions and reduction of the concentration of heavy metals in cement-based composites.

Key words: biomass ash, eco-material, mortar, concrete, physical, mechanical properties.

SADRŽAJ

I UVOD.....	16
1. UVOD.....	4
2. POTREBA ZA ISTRAŽIVANJEM	5
3. PREDMET, CILJ I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	7
4. PRIMJENLJIVOST REZULTATA ISTRAŽIVANJA.....	10
5. KRATAK PRIKAZ SADRŽAJA RADA	11
II BIOMASA - OBNOVLJIVI IZVOR ENERGIJE U AP VOJVODINI	13
1. DEFINICIJA I KLASIFIKACIJA.....	14
2. POLJOPRIVREDNA BIOMASA	16
III BIOPEPEO	22
1. RASPOLOŽIVE VRSTE I KOLIČINE BIOPEPELA U AP VOJVODINI.....	23
1.1. Proizvođači biopepela - kompanija Mitrosrem, Sremska Mitrovica.....	23
1.2. Proizvođači biopepela - kompanija Soja Protein, Bečej.....	24
1.3. Proizvođači biopepela - kompanija Veterinarski Zavod, Subotica	25
1.4. Proizvođači biopepela - kompanija Hipol, Odžaci.....	26
1.5. Proizvođači biopepela - kompanija Victoria Starch, Zrenjanin	27
1.6. Proizvođači biopepela - kompanija ALMEX-IPOK, Zrenjanin.....	28
1.7. Proizvođači biopepela - kompanija Knot-Autoflex, Bečej.....	29
1.8. Proizvođači biopepela - kompanija DTD Ribarstvo, Lovćenac	30
1.9. Proizvođači biopepela - kompanija Victoria Oil, Šid	31
1.10. Proizvođači biopepela - kompanija Termoelektrana-Toplana (TETO), Sremska Mitrovica.....	32
1.11. Proizvođači biopepela – kompanija Sava Kovačević u Vrbasu	33
1.12. Proizvođači biopepela – kompanija PTK Panonija - farma Mecker	34
1.13. Pregled dobijenih podataka o raspoloživosti biopepela	35
IV PRIKAZ I ANALIZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI PRIMJENE BIOPEPELA KAO GRAĐEVINSKOG MATERIJALA	37
1. PRIKAZ I ANALIZA ZNAČAJNIH ISTRAŽIVANJA.....	38
1.1. Pepeo od pirinčane ljuske	38
1.2. Pepeo od pšenične slame.....	43
1.3. Pepeo od kukuruznog oklaska.....	50
1.4. Zaključak	56
V EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE.....	58
1. UVOD.....	59
2. PROGRAM EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA.....	59
3. PODACI O KOMPONENTNIM MATERIJALIMA.....	64
3.1. Cement.....	64
3.2. Agregat.....	65
3.3. Hemijski dodaci	71

3.4. Mineralni dodaci	72
3.5. Voda	77
4. SASTAV MALTERSKIH MJEŠAVINA	78
5. SASTAV BETONSKIH MJEŠAVINA	79
5.1. Primjer određivanja sastava referentnog betona sa prirodnim riječnim agregatom A0	80
5.2. Primjer određivanja sastava betona sa mješavinom riječnog i recikliranog agregata A50	81
5.3. Primjer određivanja sastava betona sa recikliranim agregatom A100 ..	83
5.4. Primjer određivanja sastava betona sa recikliranim agregatom D100 ..	84
5.5. Sastav betonskih mješavina	85
6. IZRADA MALTERSKIH MJEŠAVINA	87
7. IZRADA BETONSKIH MJEŠAVINA	88
8. POSTUPCI I TOK ISPITIVANJA	90
8.1. Malteri	90
8.2. Beton	92
8.3. Analiza mikrostrukture materijala (XRD, FTIR)	97
9. REZULTATI ISPITIVANJA	98
9.1. Malteri	98
9.2. Betoni	102
VI ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA	109
1. KARAKTERIZACIJA BIOPEPELA KAO MINERALNOG DODATKA	110
1.1. Hemijska svojstva biopepela	110
1.2. Fizička svojstva biopepela	116
1.3. Rekapitulacija karakterizacije biopepela kao mineralnog dodatka u skladu sa relevantnim standardima	120
2. MALTERI	123
2.1. Malteri sa standardnim kvarcnim pjeskom	123
2.2. Malteri sa frakcionisanim agregatom riječnog porjekla	129
2.3. Malteri sa sitnozrnim riječnim agregatom za malterisanje	135
2.4. Komparativna analiza	140
3. BETONI	149
3.1. Betoni sa riječnim agregatom	149
3.2. Betoni sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona kao krupnim agregatom	160
3.3. Betoni sa agregatom od starog betona kao krupnim agregatom	170
3.4. Komparativna analiza	180
VII EKOLOŠKI ASPEKTI PRIMJENE BIOPEPELA KAO MINERALNOG DODATKA ..	194
1. ASPEKTI EKOLOŠKE OCJENE BIOPEPELA KAO MINERALNOG DODATKA ..	195
1.1. Očuvanje prirodnih resursa	195
1.2. Upravljanje otpadom	202
1.3. Redukcija emisije CO ₂	203
1.4. Koncentracija teških metala u vezivnoj komponenti	208
1.5. Izluživanje teških metala iz očvrsljih kompozita: maltera i betona	233

1.6. Rekapitulacija dobijenih rezultata	235
VIII ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA	239
1. UVOD.....	240
2. KARAKTERIZACIJA BIOPEPELA KAO MINERALNOG DODATKA	241
2.1. Pepeo pšenične slame	241
2.2. Pepeo mješavine pšenične i sojine slame	241
3. PRIMJENA BIOPEPELA PRI SPRAVLJANJU MALTERA.....	242
3.1. Konzistencija	242
3.2. Čvrstoća pri pritisku	243
3.3. Kapilarno upijanje vode	243
4. PRIMJENA BIOPEPELA PRI SPRAVLJANJU BETONA.....	244
4.1. Konzistencija	244
4.2. Čvrstoća pri pritisku	244
4.3. Kapilarno upijanje vode	245
4.4. Dinamički modul elastičnosti.....	246
4.5. Upijanje vodom pod pritiskom	246
4.6. Otpornost na habanje.....	246
4.7. Skupljanje pri sušenju.....	247
4.8. Čvrstoća na savijanje	247
5. EKOLOŠKI ASPEKTI PRIMJENE BIOPEPELA KAO MINERALNOG DODATKA.....	247
6. PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA	249
IX LITERATURA	251
X PRILOZI	Error! Bookmark not defined.

PRILOG 1 - Određivanje hemijsko-fizičko-mehaničkih svojstava cementa.....	287
PRILOG 2 - Određivanje svojstava agregata.....	289
PRILOG 3 - Određivanje svojstava mineralnih dodataka.....	292
PRILOG 4 - Granulometrijski sastav agregata za betone A0-D0.....	293
PRILOG 5 - Granulometrijski sastav agregata za betone A50-D50.....	299
PRILOG 6 - Granulometrijski sastav agregata za betone A100-D100.....	300
PRILOG 7 - Određivanje konzistencije svježeg maltera.....	302
PRILOG 8 - Određivanje čvrstoće pri pritisku maltera.....	304
PRILOG 9 - Određivanje kapilarnog upijanja vode maltera.....	311
PRILOG 10 - Određivanje konzistencije svježeg betona.....	360
PRILOG 11 - Određivanje zapreminske mase svježeg betona.....	362
PRILOG 12 - Određivanje čvrstoće pri pritisku betona.....	391
PRILOG 13 - Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona.....	407
PRILOG 14 - Određivanje kapilarnog upijanja vode betona.....	413
PRILOG 15 - Određivanje upijanja vode betona pod pritiskom.....	429
PRILOG 16 - Određivanje otpornosti betona na habanje.....	431

PRILOG 17 - Određivanje skupljanja pri sušenju betona.....	434
PRILOG 18 - Određivanje čvrstoće na savijanje betona.....	434

Spisak slika

Slika 1 - Zalihe rol bala biomase u kompaniji Mitrosrem	24
Slika 2 - Deponija biopepela farme Mitrosrem	24
Slika 3 - Pšenična slama, pripremljena za sagorjevanje u kompaniji Soja Protein.....	25
Slika 4 - Skladište biopepela u kompaniji Soja Protein	25
Slika 5 - Skladište agro-peleta u kompaniji Veterinarski Zavod.....	26
Slika 6 - Generisani biopepeo, skladišten u kontejner, Veterinarski Zavod	26
Slika 7 - Peleti od sojine slame, pripremljeni za sagorjevanje u kompaniji Hipol.....	27
Slika 8 - Deponija generisanog biopepela, uskladištenog u posebnoj prostoriji, kompanija Hipol	27
Slika 9 - Agro-peleti, pripremljeni za sagorjevanje u kompaniji Victoria Starch.....	28
Slika 10 - Neuređena deponija biopepela u okolini kompanije Victoria Starch	28
Slika 11 - Sjeckalica za bale slame u kompaniji Almex-Ipok.....	29
Slika 12 - Generisan biopepeo, uskladišten u kontejner, kompanija Almex-Ipok.....	29
Slika 13 - Bale slame, kao energent u kompaniji Knot-Autoflex.....	30
Slika 14 - Koto na biomasu u kompaniji Knot-Autoflex.....	30
Slika 15 - Koto na biomasu u kompaniji DTD Ribarstvo, Lovćenac	31
Slika 16 - Suncokretova ljuska, kao energent u kompaniji Victoria Oil	32
Slika 17 - Biopepeo, privremeno uskladišten u kontejner, kompanija Victoria Oil	32
Slika 18 - Suncokretova ljuska, kao energent u kompaniji TETO.....	33
Slika 19 - Kotlovsko postrojenje na biomasu, kapaciteta 18MW u kompaniji TETO	33
Slika 20 - Oklasak kukuruza – energent u kompaniji Sava Kovačević	34
Slika 21 - Peć za sagorjevanje biomase, kompanija Sava Kovačević	34
Slika 22 - Sagorjevanje bala od pšenične slame u farmi Mecker	35
Slika 23 - Neuređena deponija biopepela u krugu farme Mecker	35
Slika 24 - Čvrstoća pri pritisku RHA betona	41
Slika 25 - Upijanje vode RHA betona.....	41
Slika 26 - Otpornost na prodor hlorida RHA betona.....	42
Slika 27 - Skupljanje pri sušenju RHA betona	42
Slika 28 - Čvrstoća pri pritisku paste pri starosti do 28 dana.....	46
Slika 29 - Upijanje vode paste pri starosti od 28 dana	46

Slika 30 - Pad čvrstoće pri pritisku paste nakon izlaganja dejstvu HCl pri starosti do 28 dana.....	46
Slika 31 - Pad čvrstoće pri pritisku paste nakon izlaganja dejstvu H ₂ SO ₄ pri starosti do 28 dana.....	46
Slika 32 - Relativna čvrstoća pri pritisku betona sa WSA i RHA maltera u odnosu na čvrstoću referentnog maltera	47
Slika 33 - Relativna čvrstoća pri savijanju betona sa WSA i RHA maltera u odnosu na čvrstoću referentnog maltera	47
Slika 34 - Relativna čvrstoća pri pritisku betona sa WSA i RHA maltera u odnosu na čvrstoću referentnog maltera	48
Slika 35 - Relativna čvrstoća pri savijanju betona sa WSA i RHA maltera u odnosu na čvrstoću referentnog maltera	48
Slika 36 -Relativna čvrstoća pri pritisku maltera sa WSA i referentnog maltera nakon izlaganja dejstvu natrijum sulfata (rastvor 10.000 mg/l)	49
Slika 37 - Relativna čvrstoća pri pritisku maltera sa WSA i referentnog maltera nakon izlaganja dejstvu magnezijum sulfata (rastvor 40.000 mg/l).....	49
Slika 38 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa CCA pepelom i referentnog maltera pri različitim procentima zamene, do starosti od 28 dana.....	53
Slika 39 - Čvrstoća pri pritisku betona sa CCA pepelom i referentnog betona pri različitim procentima zamene, do starosti od 50 dana.....	53
Slika 40 - Čvrstoća pri pritisku betona sa CCA pepelom i referentnog betona pri različitim procentima zamene, do starosti od 90 dana.....	54
Slika 41 - Izduženje pri dejstvu Na ₂ SO ₄ , do starosti od 9 meseci	55
Slika 42 - Izduženje pri dejstvu MgSO ₄ , do starosti od 9 meseci	55
Slika 43 - Način formiranja malterskih mješavina	61
Slika 44 - Izgled frakcija riječnog agregata.....	65
Slika 45 - Granulometrijske krive frakcija riječnog agregata.....	66
Slika 46 - Frakcije recikliranog agregata (4/8mm i 8/16mm).....	67
Slika 47 - Granulometrijske krive frakcija recikliranog agregata.....	68
Slika 48 - Granulometrijski sastav sitnozrnog agregata.....	70
Slika 49 - XRD mineraloška analiza za pjesak za malterisanje riječnog porjekla.....	71
Slika 50 - XRD mineraloška analiza za frakcionisani agregat riječnog porjekla.....	71
Slika 51 - Izgled mineralnih dodataka	73
Slika 52 - Komponentni materijali za ispitivanje pucolanske aktivnosti biopepela	74
Slika 53 - Standardne malterske prizmice za ispitivanje pucolanske aktivnosti biopepela.....	74
Slika 54 - Hermetički zatvoreni i izolovani uzorci za ispitivanje pucolanske aktivnosti biopepela	74
Slika 55 - Komponentni materijali za ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela.....	75
Slika 56 - Spravljanje mješavine za ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela u laboratorijskoj mješalici.....	75
Slika 57 - Kompaktiranje uzotaka za ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela na potresnom stolu	76
Slika 58 - Njega uzoraka za ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela	76

Slika 59 - Granulometrijska kriva mješavine agregata i referentne krive.....	81
Slika 60 - Granulometrijska kriva mješavine agregata i referentne krive.....	83
Slika 61 - Granulometrijska kriva mješavine agregata i referentne krive.....	84
Slika 62 - Spravljanje maltera u laboratorijskom mikseru.....	87
Slika 63 – Određivanje konzistencije maltera na potresnom stolu	87
Slika 64 - Kompaktiranje maltera na potresnom stolu	88
Slika 65 – Odležavanje uzoraka u kalupima u vlažnoj komori	88
Slika 66 – Izgled pripremljenih uzoraka maltera	88
Slika 67 - Spravljanje betonske mješavine	89
Slika 68 - Beton ugrađen u kalupe oblika cilindra	89
Slika 69 - Beton ugrađen u kalupe oblika kocke i cilindra.....	89
Slika 70 - Mjerenje konzistencije maltera na potresnom stolu	90
Slika 71 - Ispitivanje čvrstoće maltera pri pritisku.....	91
Slika 72 - Ispitivanje kapilarnog upijanja vode pritisku.....	91
Slika 73 - Mjerenje konzistencije (mjere slijeganja) za betone B100 i C50	92
Slika 74 - Određivanje čvrstoće pri pritisku	93
Slika 75 - Dispozicija ispitivanja brzine prolaza ultrazvuka.....	93
Slika 76 - Ispitivanje brzine prolaza ultrazvuka	94
Slika 77 - Ispitivanje upijanja vode pod pritiskom	94
Slika 78 - Ispitivanje upijanja vode pod pritiskom	95
Slika 79 - Mjerenje dubine prodora vode, nakon cijepanja uzorka	95
Slika 80 - Ispitivanje skupljanja pri sušenju betona.....	95
Slika 81 - Izgled uzoraka pripremljenih za ispitivanje.....	96
Slika 82 - Mjerenje širine otiska.....	96
Slika 83 - Izgled opreme za ispitivanje čvrstoće betona na savijanje.....	97
Slika 84 - Izgled uzorka nakon ispitivanja čvrstoće betona na savijanje	97
Slika 85 - Avansna tučkom i prah dobijen za ispitivanje mikrostukture materijala	98
Slika 86 – Hemijski sastav pepela pšenične slame.....	111
Slika 87 - Hemijski sastav pepela mješavine pšenične i sojine slame	111
Slika 88 - Indeks aktivnosti biopepela.....	118
Slika 89 - Indeks aktivnosti pepela SP prije i posle dodatnog mljevenja	119
Slika 90 – Konzistencija maltera sa standardnim kvarcnim pjeskom	123
Slika 91 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa standardnim kvarcnim pjeskom.....	124
Slika 92 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 1 i biopepelom MP.....	125
Slika 93 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 1 i biopepelom SP.....	125

Slika 94 - Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 1, 28 dana	126
Slika 95 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 1, 28 dana.....	127
Slika 96 - Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 1, 90 dana.....	127
Slika 97 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 1, 90 dana.....	128
Slika 98 - Konzistencija maltera sa frakcionisanim agregatom riječnog porjekla.....	129
Slika 99 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 2	130
Slika 100 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 2 i biopepelom MP	131
Slika 101 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 2 i biopepelom SP.....	131
Slika 102 - Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 2, 28 dana.....	132
Slika 103 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 2, 28 dana.....	133
Slika 104 - Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 2, 90 dana.....	133
Slika 105 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 2, 90 dana.....	134
Slika 106 - Konzistencija maltera sa sitnozrnim riječnim agregatom za malterisanje.....	135
Slika 107 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa sitnozrnim riječnim agregatom za malterisanje.....	136
Slika 108 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 3 i biopepelom MP	137
Slika 109 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 3 i biopepelom SP.....	137
Slika 110 - Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 3, 28 dana.....	138
Slika 111 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 3, 28 dana.....	138
Slika 112 - Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 3, 90 dana.....	139
Slika 113 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 3, 90 dana.....	139
Slika 114 - Konzistencija maltera sa pepelom MP	141
Slika 115 - Konzistencija maltera sa pepelom SP	141
Slika 116 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa pepelom MP.....	142
Slika 117 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa pepelom SP	144
Slika 118 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom MP, 28 dana.....	145
Slika 119 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom MP, 90 dana.....	146
Slika 120 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom SP, 28 dana.....	147
Slika 121 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom SP, 90 dana.....	148
Slika 122 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom SP, 90 dana.....	149
Slika 123 - Čvrstoća pri pritisku betona sa riječnim agregatom.....	150
Slika 124 - Kapilarno upijanje vode betona sa prirodnim agregatom, 28 dana.....	151
Slika 125 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa prirodnim agregatom, 28 dana.....	152
Slika 126 - Kapilarno upijanje vode betona sa prirodnim agregatom, 90 dana.....	152
Slika 127 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa prirodnim agregatom, 90 dana.....	153
Slika 128 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona sa prirodnim agregatom.....	154

Slika 129 - Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa prirodnim agregatom	155
Slika 130 - Vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti na habanje betona sa prirodnim agregatom	156
Slika 131 - Skupljanje pri sušenju betona sa riječnim agregatom	157
Slika 132 - Konačne vrijednosti skupljanja pri sušenju betona sa riječnim agregatom nakon 3 mjeseca ispitivanja	158
Slika 133 - Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim agregatom	159
Slika 134 - Konzistencija betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona	160
Slika 135 - Čvrstoća pri pritisku betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom	161
Slika 136 - Kapilarno upijanje vode betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, 28 dana	162
Slika 137 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, 28 dana	163
Slika 138 - Kapilarno upijanje vode betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, 90 dana	163
Slika 139 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, 90 dana	164
Slika 140 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom	165
Slika 141 - Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom	166
Slika 142 - Vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti na habanje betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom	167
Slika 143 - Skupljanje pri sušenju betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom	168
Slika 144 - Konačne vrijednosti skupljanja pri sušenju betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, nakon 3 mjeseca ispitivanja	169
Slika 145 - Čvrstoća na savijanje betona sa sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom	170
Slika 146 - Konzistencija betona sa agregatom od starog betona kao krupnim agregatom	171
Slika 147 - Čvrstoća pri pritisku betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom	172
Slika 148 - Kapilarno upijanje vode betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, 28 dana	173
Slika 149 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, 28 dana	173
Slika 150 - Kapilarno upijanje vode betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, 90 dana	174
Slika 151 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, 90 dana	174

Slika 152 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom	176
Slika 153 - Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom,	176
Slika 154 - Vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti na habanje betona sa agregatom od starog betona	177
Slika 155 - Skupljanje pri sušenju betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom	178
Slika 156 - Konačne vrijednosti skupljanja pri sušenju betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, nakon 3 mjeseca ispitivanja.....	179
Slika 157 - Čvrstoća na savijanje betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom	180
Slika 158 - Konzistencija ispitivanih vrsta betona.....	181
Slika 159 - Čvrstoća pri pritisku betona sa riječnim agregatom.....	182
--Slika 160 - Kapilarno upijanje vode betona, 28 dana	184
Slika 161 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona, 90 dana	185
Slika 162 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti svih ispitivanih vrsta betona.....	186
Slika 163 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona, po vrstama agregata.....	187
Slika 164 - Uticaj nivoa supstitucije cementa biopepelom na upijanje vodom pod pritiskom betona	188
Slika 165 - Uticaj vrste krupnog agregata na upijanje vodom pod pritiskom betona	189
Slika 166 - Vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti na habanje betona sa prirodnim agregatom	190
Slika 167 - Skupljanje pri sušenju betona	191
Slika 168 - Konačne vrijednosti skupljanja pri sušenju betona, nakon 3 mjeseca ispitivanja	192
Slika 169 - Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim agregatom.....	193
Slika 170 - Analiza toka materijala u proizvodnji cementa (Status Quo)	197
Slika 171 - Analiza toka materijala u proizvodnji cementa (Model 10%).....	198
Slika 172 - Analiza toka materijala u proizvodnji cementa (Model 20%)	199
Slika 173 - Analiza toka materijala u proizvodnji cementa (Model 50%).....	200
Slika 174 - Smanjenje potrošnje krečnjaka i gline u proizvodnji cementa, supstitucijom dijela cementa biopepelom, na nivou godišnje proizvodnosti fabrike La Farge.....	201
Slika 175 - Smanjenje potrošnje petroleum koksa u proizvodnji cementa, supstitucijom dijela cementa biopepelom, na nivou godišnje proizvodnosti fabrike La Farge.....	202
Slika 176 - Emisija CO ₂ pri proizvodnji miliona tona cementa (Model Status Quo)	204
Slika 177 - Emisija CO ₂ pri proizvodnji 900.000 tona cementa ((Model 10%).....	205
Slika 178 - Emisija CO ₂ pri proizvodnji 800.000 tona cementa ((Model 20%).....	206
Slika 179 - Emisija CO ₂ pri proizvodnji 500.000 tona cementa ((Model 50%).....	207
Slika 180 - Smanjenje emisije CO ₂ u proizvodnji veziva (cementa i biopepela), pri nivoima supstitucije cementa biopepelom 10%, 20% i 50%, na nivou godišnje proizvodnosti fabrike cementa La Farge u Beočinu.....	208

Slika 181 - Koncentracija ukupnog hroma referentnog veziva - 100% cement (Model Status Quo).....	211
Slika 182 - Koncentracija ukupnog hroma veziva 90% cement + 10% biopepeo (Model 10%).....	212
Slika 183 - Koncentracija ukupnog hroma veziva 80% cement + 20% biopepeo (Model 20%).....	213
Slika 184 - Koncentracija ukupnog hroma veziva 50% cement + 50% biopepeo (Model 50%).....	214
Slika 185 - Smanjenje koncentracije ukupnog hroma u vezivnoj komponenti supstitucijom cementa biopepelom i dozvoljene koncentracije prema Direktivi 1999/31/E.....	215
Slika 186 - Koncentracija arsena u vezivu: 100% cement (Model Status Quo)	217
Slika 187 - Koncentracija arsena u vezivu: 90% cement + 10% biopepeo (Model 10%)	218
Slika 188 - Koncentracija arsena u vezivu: 80% cement + 20% biopepeo (Model 20%)	219
Slika 189 - Koncentracija arsena u vezivu: 50% cement + 50% biopepeo (Model 50%)	220
Slika 190 - Smanjenje koncentracije arsena u vezivnoj komponenti supstitucijom cementa biopepelom i dozvoljene koncentracije prema Direktivi 1999/31/E	221
Slika 191 - Koncentracija olova u vezivu: 100% cement (Model Status Quo).....	223
Slika 192 - Koncentracija olova u vezivu: 90% cement + 10% biopepeo (Model 10%)	224
Slika 193 - Koncentracija olova u vezivu: 80% cement + 20% biopepeo (Model 20%)	225
Slika 194 - Koncentracija olova u vezivu: 50% cement + 50% biopepeo (Model 50%)	226
Slika 195 - Smanjenje koncentracije olova u vezivnoj komponenti supstitucijom cementa biopepelom i dozvoljene koncentracije prema Direktivi 1999/31/E	227
Slika 196 - Koncentracija kadmijuma u vezivu: 100% cement (Model Status Quo).....	229
Slika 197 - Koncentracija kadmijuma u vezivu: 90% cement + 10% biopepeo (Model 10%).....	230
Slika 198 - Koncentracija kadmijuma u vezivu: 80% cement + 20% biopepeo (Model 20%).....	231
Slika 199 - Koncentracija kadmijuma u vezivu: 50% cement + 50% biopepeo (Model 50%).....	232
Slika 200 - Smanjenje koncentracije kadmijuma u vezivnoj komponenti supstitucijom cementa biopepelom i dozvoljene koncentracije prema Direktivi 1999/31/E.....	233

Spisak tabela

Tabela 1. Potencijalne količine biomase iz ostataka poljoprivredne proizvodnje u Srbiji	16
Tabela 2. Najvažnije fizičke osobine biomase	17
Tabela 3. Energetska vrednost žetvenih ostataka ratarstva	18
Tabela 4. Količine žetvenih ostataka po opštinama i regionima [6]	19
Tabela 5. Raspoloživost biopepela u AP Vojvodini	35
Tabela 6. Hemijski sastav pepela pirinčane ljuske [9]	38
Tabela 7. Pregled značajnijih istraživanja cementnih kompozita sa pepelom RHA i vrste ispitivanja	39
Tabela 8. Hemijski sastav pepela pšenične slame [27]	44
Tabela 9. Pregled istraživanja cementnih kompozita sa pepelom WSA i vrste ispitivanja	44
Tabela 10. Hemijski sastav pepela kukuruznog oklaska [35]	50
Tabela 11. Pregled značajnijih istraživanja cementnih kompozita sa pepelom CCA i vrste ispitivanja	51

Tabela 12. Pregled malterskih mešavina po vrsti agregata	61
Tabela 13. Način formiranja betonskih mješavina	63
Tabela 14. Specifikacija uzoraka za malterske mješavine	64
Tabela 15. Specifikacija uzoraka za betonske mješavine.....	64
Tabela 16 - Rezultati ispitivanja riječnog agregata	67
Tabela 17 - Rezultati ispitivanja agregata od starog betona	69
Tabela 18. Osnovni podaci o primjenjenim superplastifikatorima	72
Tabela 19. Sadržaj reaktivnog S_iO_2 , slobodnog C_aO , rastvornih fosfata i hlorida u biopepelima	73
Tabela 20. Klasa pucolanske aktivnosti biopepela	75
Tabela 21. Indeks aktivnosti biopepela	76
Tabela 22. Indeks aktivnosti pepela mješavine pšenične i sojine slame bez i sa dodatnim mljevenjem	76
Tabela 23. Vrijeme vezivanja biopepela	77
Tabela 24. Stalnost zapremine biopepela	77
Tabela 25. Sastav malterskih mješavina pri primjeni agregata 1 i 2 (vodovezivni faktor 0,5).....	78
Tabela 26. Sastav malterskih mješavina pri primjeni agregata 3 (vodovezivni faktor 0,7).....	78
Tabela 27. Sastav betonskih mešavina.....	80
Tabela 28. Količine komponentnih materijala u $1m^3$ betona.....	86
Tabela 29. Rezultati ispitivanja konzistencije maltera	98
Tabela 30. Rezultati ispitivanja čvrstoće maltera pri pritisku	99
Tabela 31. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja maltera, 28 dana	100
Tabela 32. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja maltera, 90 dana	101
Tabela 33. Svojstva svježeg betona.....	102
Tabela 34. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku	103
Tabela 35. Dinamički modul elastičnosti betona.....	104
Tabela 36. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom ispitivanih betona.....	105
Tabela 37. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja betona, 28 dana	105
Tabela 38. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja betona, 90 dana	106
Tabela 39. Srednje vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti betona na habanje	107
Tabela 40. Skupljanje pri sušenju betonskih uzoraka [mm/m]	107
Tabela 41. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka	108
Tabela 42. Sadržaj važnijih oksida u hemijskom sastavu biopepela	111
Tabela 43. Gubitak žarenjem	112
Tabela 44. Sadržaj hlorida u biopepelima	112
Tabela 45. Sadržaj sulfata u biopepelima	113
Tabela 46. Sadržaj slobodnog CaO u biopepelima	113

Tabela 47. Sadržaj reaktivnog SiO ₂ u biopepelima.....	114
Tabela 48. Sadržaj alkalija u biopepelima.....	114
Tabela 49. Sadržaj fosfata u biopepelima.....	115
Tabela 50. Sadržaj rastvorljivih fosfata u biopepelima.....	115
Tabela 51. Sadržaj teških metala u biopepelima.....	116
Tabela 52. Specifična masa biopepela i cementa	116
Tabela 53. Specifična površina biopepela i cementa	116
Tabela 54. Finoća biopepela.....	117
Tabela 55. Pucolanska aktivnost biopepela	117
Tabela 56. Vrijeme vezivanja biopepela	119
Tabela 57. Stalnost zapremine biopepela	120
Tabela 58. Rekapitulacija ispitivanja fizičkih i hemijskih svojstava za MP pepeo	121
Tabela 59. Rekapitulacija ispitivanja fizičkih i hemijskih svojstava za SP pepeo	122
Tabela 60. Sadržaj ukupnog hroma u polaznim sirovinama i gorivu [101]	209
Tabela 61. Sadržaj ukupnog hroma u cementu i biopepelu.....	210
Tabela 62. Sadržaj arsena u polaznim sirovinama i gorivu [101].....	216
Tabela 63. Sadržaj arsena u cementu i biopepelu	216
Tabela 64. Sadržaj olova u polaznim sirovinama i gorivu [101]	222
Tabela 65. Sadržaj olova u cementu i biopepelu.....	222
Tabela 66. Sadržaj kadmijuma u polaznim sirovinama i gorivu [101]	228
Tabela 67. Sadržaj kadmijuma u cementu i biopepelu.....	228
Tabela 68. Sadržaj teških metala u malterima.....	234
Tabela 69. Sadržaj teških metala u betonima.....	234
Tabela 70. Granične koncentracije teških metala [98].....	234

I UVOD

1. UVOD

Sa potrošnjom od jedne tone po stanovniku planete godišnje, beton je drugi materijal na planeti po upotrebi odmah posle vode. Kroz primjenu dužu od 2.000 godina, od na daleko poznatih objekata Rimskog carstva, beton se dokazao da je jedan od najizdržljivijih građevinskih materijala. Iako beton danas suvereno vlada, budući da idealan građevinski material ne postoji, uvijek ima prostora za njegovo poboljšanje, naročito sa aspekta bezbjednosti, trajnosti i održivosti ovog materijala. Beton je danas jedan od prihvatljivijih materijala, kada se gleda utrošena energija u proizvodnji u odnosu na vijek trajanja objekata od betona.

Ipak, s obzirom da proizvodnja betona doprinosi ukupnoj godišnjoj emisiji CO₂ u iznosu od oko 8%, cementna industrija nastoji da smanji upotrebu neobnovljivih, prirodnih resursa, odnosno uvede korišćenje alternativnih vrsta goriva i sirovina prilikom proizvodnje cementa. Industrija betona ima velike potencijale za pozitivan pomak prema održivoj proizvodnji i smanjenju negativnog ekološkog uticaja. Jedna od mogućih strategija jeste korišćenje otpadnih materijala i nusproizvoda iz drugih industrija. Ovakvo zatvaranje kruga moguće je samo ako se u obzir uzmu svojstva pojedinog otpadnog materijala, te se ta svojstva iskoriste prilikom projektovanja betona specifične namjene, u kojima su ista zadovoljavajuća.

Drugi problem tradicionalne industrije betona jeste upotreba velike količine neobnovljivih resursa, prvenstveno prirodnog agregata. Kada se uzme u obzir podatak da 1m³ betona sadrži više od 1m³ agregata, onda sve prisutniji trend prekomjerne potrošnje agregata otvara pitanje iscrpljivanja prirodnih resursa agregata i potrebe za pronalaženjem novih mogućnosti za dobijanje istog. Trajni naponi i stalno traganje za načinima da se što više očuvaju ovi prirodni resursi treba da rezultuju zamjenom korišćenja prirodne sirovine alternativnim materijalima.

Te sekundarne sirovine su najčešće industrijski sekundarni proizvodi, poljoprivredni biljni otpad i građevinski otpad, čije deponovanje predstavlja veliki ekološki problem. Zamjenom cementa i/ili agregata u betonu alternativnim otpadnim materijalima, smanjuje se negativan ekološki uticaj cjelokupnog procesa proizvodnje, upotrebe i reciklaže betona na životnu sredinu, pa takve betone zovemo ekološkim (EKO) betonima.

U današnje vrijeme, sve više se uspješno koriste velike količine otpadnih materijala ili industrijskih nusproizvoda zahvaljujući napretku, koji se bilježi u tehnologiji betona. Takvi materijali mogu da se koriste kao mineralni dodaci ili kao punila-agregati, tj. za djelimičnu ili potpunu zamjenu prirodnog agregata i/ili cementa. Danas se u svijetu upotrebljavaju različiti nus-proizvodi generisani iz industrijskih, post-potrošačkih, kao i poljoprivrednih izvora. Isplative i dokazane tehnologije su već dostupne za korišćenje otpadnih materijala koji uključuju:

- nusproizvode sagorjevanja uglja,

- pepeo nastao sagorjevanjem drveta, pšenične slame, pirinčane ljuske,
- nusproizvode papirne industrije, livnica, metalurške industrije,
- polovne gume, plastiku, staklo,
- reciklirani Portland cement iz betonskog kolovoza, reciklirani asfalt kolovoza,
- ostatke izgradnje i rušenja objekata,
- prašinu iz cementih peći, itd.

Kao inženjerski materijali, ovi nusproizvodi mogu imati upotrebnu vrijednost, a, takođe, pomažu očuvanju nacionalnih kao i globalnih prirodnih resursa.

2. POTREBA ZA ISTRAŽIVANJEM

Obnovljivi izvori energije (OIE) predstavljaju neiscrpne izvore energije iz prirode koji se obnavljaju u određenom vremenskom intervalu, u cjelini ili djelimično. OIE se eksploatišu u cilju proizvodnje električne, toplotne i mehaničke energije, a njihova značajna održiva karakteristika jeste neškodljivost za okolinu, sa smanjenom emisijom CO₂ u procesu proizvodnje energije.

Republika Srbija raspolaže obnovljivim izvorima energije: Sunca, vode, vjetra, geotermalne energije i biomase. Potencijal Srbije u obnovljivim izvorima energije (OIE) iznosi oko 6 Mt (milion tona ekvivalenta nafte) godišnje. Iskorišćenjem ovog potencijala može se značajno smanjiti korišćenje fosilnih goriva. Pri tome je najveći potencijal biomasa koja obuhvata 64% u odnosu na sve ostale obnovljive izvore energije i iznosi oko 3,4 Mt godišnje. U strukturi planirane proizvodnje primarne energije u Srbiji za 2014. godinu, OIE učestvovali su sa 1,819 Mt, što je iznosilo oko 17% domaće proizvodnje primarne energije. Od toga, najveće je učešće čvrste biomase - 58%, dok ukupna raspoloživost biomase u Srbiji iznosi približno 12,5 miliona tona [1].

Biomasa je najveći obnovljivi izvor energije, a Srbija spada u vrh evropskih zemalja po količini raspoložive, a neiskorišćene biomase. Domaća industrija već proizvodi opremu za korišćenje biomase. Sve ovo ukazuje da postoji dobra perspektiva za veće korišćenje biomase, ali da bi se to i dogodilo, potrebno je da država zakonski zaokruži ovu oblast donošenjem potrebnih propisa, jer će time omogućiti razvoj tržišta u ovoj oblasti i veću primjenu biomase u svakodnevnom životu.

U našoj zemlji je istraživana mogućnost primjene žetvenih ostataka kao obnovljivog izvora energije. Međutim, upotreba pepela, koji pri tome nastaje, nije analizirana. Pepeo koji nastaje sagorjevanjem poljoprivrednih žetvenih ostataka predstavlja potencijalni izvor za proizvodnju mineralnih dodataka, koji se pod određenim uslovima, mogu koristiti kao zamjena za dio cementa u cementnim kompozitima. Ovaj pepeo, slično letećem pepelu, koji nastaje pri sagorjevanju uglja u termoelektranama, može imati pucolanske karakteristike.

Pucolani su prirodne ili vještačke silikatne, i siliko-aluminatne ili siliko-karbonantne supstance, ili njihove kombinacije, koje nemaju sopstvenu vezivnu moć ili je ona mala, ali koje u fino samljevenom obliku, u prisustvu vode, hemijski reaguju sa rastvorenim kalcijumhidroksidom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na običnim temperaturama, dajući nove produkte koji imaju hidraulična svojstva. Značajni sadržaji SiO_2 i Al_2O_3 u pepelu upućuju na mogućnost primene ovog materijala kao pucolanskog.

Supstitucijom cementa u malteru i betonu, sa pepelom nastalim sagorjevanjem žetvenih ostataka (pepeo koji sadrži Al, Ca, Fe, Mg, Na, P, Si), kao CO_2 neutralnim gorivom, smanjio bi se uticaj na globalno zagrevanje, dala nova upotrebna vrijednost i mogućnost ekonomskog vrijednovanja pepela kao novog proizvoda. Svi navedeni efekti bi predstavljali snažan podsticaj za stvaranje uslova za integralno upravljanje korišćenjem velike količine proizvedenog pepela od biomase porjeklom iz poljoprivrede u Vojvodini i Srbiji.

U Srbiji, većina otpada, nastalog sagorjevanjem biomase, se tretira ili odlaže u oblasti, odnosno regionu u kojem je i nastao. Pepeo biomase, kao đubrivo učestvuje u izgradnji nove biljne mase. Na taj način se vrši recikliranje ugljen-dioksida i čvrstih produkata u prirodi tako da se pri tome ne remeti postojeća ravnoteža, a za sistem se kaže da je zatvoren.

Recikliranje građevinskog otpada je socijalno-ekonomski prioritet, s obzirom da on predstavlja nezanemarljiv procenat u odnosu na ukupnu količinu otpada označenog kao produkt ljudskih aktivnosti. Količina otpada leži u direktnoj srazmjeri sa stepenom građevinskih djelatnosti, pa se razlikuje od države do države. Ukoliko se posmatraju procenti različitog otpadnog materijala u odnosu na ukupnu količinu građevinskog otpada, može se reći da beton zauzima prvo mjesto, u procentu od oko 75% u odnosu na ukupnu količinu građevinskog otpada na gradilištima, oko 70% u odnosu na ukupnu količinu otpada na mjestima rušenja konstrukcija, oko 40% na lokacijama opštih građevinskih radova i oko 70% u odnosu na cjelokupnu količinu otpada prilikom restauracija. Na osnovu dostupnih podataka, stepen recikliranja betona u Danskoj iznosi 80%, u Holandiji 75% i u Japanu 65% [2]. Da bi se postigao ovaj visoki stepen recikliranja, moraju se implementirati posebni uslovi na gradilištima, kao na primjer selektivno rušenje i razvrstavanje otpada. Različite vrste materijala (opeka, kamen, crep, beton i drvo) moraju se uklanjati zasebno, koliko je to moguće, i sortirati na licu mjesta, kako bi se omogućila efikasnija reciklaža.

Veliki procenat građevinskog otpada, zavisno od porjeka i sastava, uz određene tehnologije recikliranja, se može ponovno iskoristiti kao ekonomski vrijedna sirovina za upotrebu. Mogućnosti korištenja zavise od stanja materijala, tj. od ispunjavanja osnovnih svojstava kao agregata, ali i od zahtjeva za konačni betonski proizvod ili građevinu gdje će biti upotrebljen. Imajući u vidu velike količine građevinskog otpada i problem iscrpljivanja resursa prirodnog agregata, može se reći da je proizvodnja i upotreba

recikliranog betona kao agregata jedno od rješenja u susret principima održivog razvoja u građevinarstvu.

Upotreba agregata od starog betona kao komponente za spravljanje novog betona podrazumjeva potpuno (temeljno) poznavanje svojstava takvog agregata. Tu se, prije svega, misli na upijanje vode, zapreminsku i specifičnu masu, količinu prašinih (sitnih) čestica, sadržaj organskih i eventualno štetnih materija, drobljivost, otpornost prema habanju, kao i otpornost prema dejstvu mraza. Naime, ispitivanja su pokazala da, po pravilu, reciklirani agregat u odnosu na prirodni ima:

- veće upijanje vode,
- manju zapreminsku i specifičnu masu,
- veću količinu prašinih čestica,
- veći sadržaj organskih i eventualno drugih štetnih materija,
- veću drobljivost,
- manju otpornost prema habanju i
- manju otpornost prema dejstvu mraza [3].

Na osnovu dosadašnjih sprovedenih eksperimentalnih istraživanja, može se zaključiti da se primjenom agregata od starog betona za spravljanje novog betona mogu dobiti betoni zadovoljavajućih, pa čak i visokih performansi, što prvenstveno zavisi od čvrstoće pri pritisku betona čijim drobljenjem je dobijen agregat, a zatim i od poznavanja svih specifičnosti vezanih za projektovanje sastava i spravljanje ovih vrsta betona. Međutim, u praksi je za konstrukcijsku primenu, upotreba agregata od recikliranog betona limitirana prvenstveno zbog velikih varijacija u kvalitetu, što je direktna posledica porijekla i stanja "starog" betona [4].

Supstitucijom prirodnog agregata ovom vrstom recikliranog materijala (od starog betona, opeke ili kombinacija), smanjila bi se prekomjerna potrošnja prirodnih resursa, ali bi se pospešila i održivost u građevinarstvu, kroz zaštitu životne sredine i omogućilo zatvaranje kruga u proizvodnji, primjeni i odlaganju građevinskih materijala (engl. from cradle to grave). Upotrebom recikliranog materijala omogućilo bi se stvaranje uslova za održivo upravljanje korišćenjem velike količine građevinskog otpada u Srbiji.

3. PREDMET, CILJ I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja će biti konstrukcijski malteri i betoni, sa aspekta:

- sastava maltera i betona,
- osnovnih fizičkih i mehaničkih svojstava kompozita.

U okviru istraživanja će biti analizirana sledeća svojstva:

- a) Karakterizacija biopepela kao mineralnog dodatka u malterima i betonima, koja će obuhvatiti određivanja sledećih parametara:

hemijska svojstva:

- hemijski sastav,
- gubitak žarenjem,
- sadržaj hlorida,
- sadržaj rastvornih fosfata,
- sadržaj elemenata u tragovima,
- sadržaj slobodnog CaO,
- sadržaj reaktivnog SiO₂,

fizička svojstva:

- specifična masa,
- specifična površina,
- finoća,
- indeks aktivnosti,
- pucolanska aktivnost,
- vreme početka i kraja vezivanja,
- stalnost zapremine.

b) Analiza svojstava maltera u svježem i očvrslom stanju:

- konzistencija,
- čvrstoća pri pritisku,
- kapilarno upijanje vode.

c) Analiza svojstava betona u svježem i očvrslom stanju

- konzistencija,
- čvrstoća pri pritisku,
- skupljanje pri sušenju,
- kapilarno upijanje vode,
- dinamički modul elastičnosti,
- otpornost na habanje,
- upijanje vode pod pritiskom (vodonepropustljivost).

Predmet istraživanja su malteri čiji sastav odgovara standardnom cementnom malteru. Prilikom planiranja eksperimentalnog istraživanja, u sastavu maltera variraće se sadržaj (vrsta i količina) biopepela kao zamjena za dio cementa i vrsta sitnozrnog agregata. U cilju analize uticaja vrste i količine primjenjenog veziva, kao i mogućnosti supstitucije dijela cementa, planirani su sledeći materijali:

- portland cement CEM I 42,5 R – La Farge, Beočin, Srbija,
- biopepeo nastao sagorjevanjem pšenične slame, porjeklo: farma „Mitrosrem“ – Sremska Mitrovica, Srbija,
- biopepeo nastao sagorjevanjem mješavine pšenične i sojine slame, porjeklo: kompanija „Soja Protein“ – Bečež, Srbija.

Prilikom projektovanja sastava betonskih mešavina, u cilju zadovoljenja principa održivog razvoja i iskorišćavanja građevinskog otpada na ekološki održiv način, variraće se dvije vrste agregata. Kao sitan agregat koristiće se prirodni rečni agregat, a kao krupni agregat variraće se dvije vrste agregata pri čemu će, u osam betonskih mešavina biti samo jedna vrsta krupnog agregata, a u četiri betonske mešavine će se koristiti mešavina ovih agregata. Planirane vrste agregata su:

- prirodni frakcionisani agregat – Fabrika betona „Best“, Novi Sad, Srbija,
- agregat dobijen recikliranjem starog betona, usitnjavanjem betonskih kocki različitog kvaliteta betona, nepoznatog porjekla.

Cilj istraživanja je da se kroz teorijsku i eksperimentalnu analizu rezultata koji su dobijeni na odabranim vrstama maltera i betona opravda primjena istraživanih vrsta biopepela u građevinarstvu i da se ovom otpadnom materijalu definiše nova upotrebna vrijednost (engl. cradle-to-grave design).

Radi ostvarenja postavljenog cilja istraživanja planirano je da se odredi:

- 1) Uticaj vrste i količine biopepela na osnovna fizičko-mehanička svojstva maltera;
- 2) Uticaj vrste i količine biopepela u kombinaciji sa krupnim agregatom od recikliranog betona (RCA) na odabrana fizička i mehanička svojstva betona;
- 3) Analiza toka materijala i toka supstanci (Stan analiza).

Rezultati istraživanja i izvedeni zaključci biće podloga za definisanje preporuka za održivo korišćenje biopepela u cementnim kompozitima. Takođe, rezultati istraživanja će omogućiti da se definišu ograničenja za primjenu biopepela.

Na osnovu postavljenog cilja, kao osnova za definisanje plana i programa istraživanja, postavljene su polazne hipoteze:

Hipoteza 1: Vrsta i količina biopepela, kao zamjena dijela cementa u malteru i betonu, imaju značajan uticaj na osnovna fizičko-mehanička svojstva maltera i betona.

Hipoteza 2: Moguće je pronaći optimalan procenat zamjene cementa biopepelom, koji će pružiti rezultate uporedive sa rezultatima ispitivanja referentnih maltera i betona, sa aspekta njihovih fizičkih i mehaničkih svojstava.

Hipoteza 3: Supstitucija dijela cementa biopepelom ima osjetan ekološki impakt, sa aspekta: iskorištavanja prirodnih resursa, emisije CO₂ i sadržaja teških metala u cementnim kompozitima, što će se verifikovati analizom toka materijala i toka kritičnih supstanci.

Hipoteza 4: Rezultati eksperimentalnog istraživanja predmetne doktorske disertacije će definisati mogućnost primjene biopepela, nastalog sagorjevanjem biomase porjeklom iz Vojvodine, u cementnim kompozitima, čime će se obezbjediti

održivo upravljanje ovom vrstom otpada, zaštita životne sredine i dati nova upotrebna vrijednost ovom proizvodu u skladu sa principima održivog razvoja u građevinarstvu.

Kako bi se provjerile definisane hipoteze, sprovedene su sledeće aktivnosti:

- 1) Analiza raspoloživosti biopepela u svijetu i u AP Vojvodini, vrste koje se dominantno koriste u svijetu, varirani parametri, ograničenja za primjenu (u smislu finoće, hemijskog sastava), priprema materijala prije ispitivanja, i slično.
- 2) Karakterizacija biopepela kao mineralnog dodatka.
- 3) Eksperimentalno ispitivanje odabranih fizičko-mehaničkih svojstava maltera i betona u funkciji:
vrste primjenjenog agregata,
vrste veziva.
- 4) Donošenje opštih zaključaka o mogućnosti i načinu primjene odabranih komponentnih materijala za dobijanje konstrukcijskih betona, kao i opravdanosti primjene biopepela kao otpadnog materijala.

Imajući u vidu predmet i cilj istraživanja predložene doktorske disertacije, od izuzetnog je značaja pravilan izbor metoda naučno-istraživačkog rada. Na osnovu sinteze i kritičke analize rezultata postojećih istraživanja u ovoj oblasti definisani su plan i ciljevi istraživanja, a zatim i eksperimentalno istraživanje. Analiza rezultata ispitivanja bazirana je na komparativnoj metodi, a kao parametri za poređenje su korišćeni statistički obrađeni rezultati.

4. PRIMJENLJIVOST REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Rezultati eksperimentalnog istraživanja predmetne doktorske disertacije će definisati mogućnost primjene biopepela, nastalog sagorjevanjem žetvenih ostataka porjeklom iz Vojvodine, u cementnim kompozitima, čime će se obezbjediti održivo upravljanje ovom vrstom otpada, zaštita životne sredine i dati nova upotrebna vrijednost ovom proizvodu u skladu sa principima održivog razvoja u građevinarstvu.

Supstitucijom dijela cementa alternativnim materijalima (koji predstavljaju CO₂ neutralne izvore) u cementnim kompozitima, smanjuje se negativan ekološki uticaj cementne industrije na životnu sredinu, redukcijom CO₂ emisije. S druge strane, korišćenje agregata od starog betona kao zamjene za dio prirodnog agregata, ograničava se trend prekomjerne potrošnje neobnovljivih prirodnih resursa agregata, a istovremeno reguliše problem građevinskog otpada, čime se omogućava stvaranje uslova za održivi razvoj u ovom segmentu privrede.

5. KRATAK PRIKAZ SADRŽAJA RADA

U prvom poglavlju definisani su predmet i ciljevi istraživanja, postavljene su osnovne hipoteze i opisana je metodologija istraživanja, kao i opravdanost i primjenljivost predmetnog istraživanja.

U drugom poglavlju predstavljen je potencijal biomase kao obnovljivog izvora energije u Srbiji i AP Vojvodini. Data je definicija i klasifikacija biomase, pri čemu je stavljen akcenat na poljoprivrednu biomasu, kao vrstu biomase sa najvećim potencijalom za upotrebu u energetske svrhe. Na osnovu ostvarenih prinosa i zasejanih površina, predstavljene su potencijalno raspoložive količine žetvenih ostataka na području AP Vojvodine.

U trećem poglavlju sumirani su rezultati analize raspoloživosti žetvenih ostataka i pepela nastalog sagorjevanjem istih na području AP Vojvodini. Na osnovu prikupljenih podataka u više kompanija, farmi, instituta, koji koriste žetvene ostatke kao energent, procjenjene su orijentacione godišnje količine biopepela koji se generiše kao otpadni materijal pri sagorjevanju biomase.

Treće poglavlje obuhvata pregled stanja u oblasti istraživanja maltera i betona sa različitim vrstama biopepela. U ovom poglavlju je dat pregled aktuelnih istraživanja relevantnih fizičkih i mehaničkih svojstava maltera i betona izrađenih sa različitim vrstama biopepela, kao i uporedna analiza dobijenih rezultata. Akcenat je stavljen na rezultate ispitivanja sa materijalima (vrstama biopepela) koji se koriste u eksperimentalnom istraživanju predmetne doktorske disertacije (pepeo od pšenične slame i pepeo mješavine pšenične i sojine slame), i to na malterima i betonima sa običnim i recikliranim agregatom.

Četvrto poglavlje se odnosi na plan i program eksperimentalnog istraživanja. U ovom poglavlju je opisan način izbora parametara koji se variraju, veličina i broj uzoraka za ispitivanje kao i postupci ispitivanja komponentnih materijala, analiziranih fizičkih i mehaničkih svojstava maltera i betona. Pored toga, definisan je i plan i raspored ispitivanja komponentnih materijala, maltera i betona, postupci projektovanja mješavina i redoslijed izrade mješavina.

U petom poglavlju analizirani su rezultati sopstvenog eksperimentalnog istraživanja. Sprovedena je karakterizacija biopepela kao mineralnog dodatka, u skladu sa relevantnim standardima. Analiza mogućnosti primjene biopepela kao vezivnog materijala je urađena u okviru maltera spravljenih sa dvije različite vrste biopepela i tri različite vrste sitnozrnog agregata. U sledećoj fazi je izvršena i komparativna analiza fizičkih i mehaničkih svojstava betona sa riječnim agregatom i agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, pri čemu je korišćena optimalna vrsta biopepela iz prethodne faze. Definisan je uticaj količine veziva i vrste krupnog agregata na osnovna fizička i mehanička svojstva betona.

U šestom poglavlju dati su rezultati analize toka materijala i toka supstanci. Analizom toka materijala, kvantifikovani su ekološki aspekti supstitucije cementa sa biopepelom, u cilju upravljanja otpadom, očuvanja resursa i smanjenja dugoročnog rizika uslijed deponovanja otpada. Razvijena su četiri scenarija: status quo i scenariji u kojima se određen procenat cementa supstituiše biopepelom (10, 20 i 50%). Nakon analize tokova materijala, kvantifikovani su tokovi šest supstanci indikatora (C, N, As, Cd, Pb i Hg) i sprovedena i evaluacija dobijenih rezultata za svaki scenario.

U sedmom poglavlju prikazani su zaključci po ispitvanim svojstvima za obe vrste cementnih kompozita: maltera i betona, po vrstama upotrebljenog agregata. Istaknute su prednosti i nedostaci primjene biopepela kao mineralnog dodatka sa aspekta fizičkih i mehaničkih svojstava kompozita. Ocjenjen je i ekološki aspekt primjene biopepela, na osnovu rezultata sprovedenih analiza toka materijala i tokova supstanci indikatora. Na osnovu svih izvedenih zaključaka formiran je konačni zaključak o mogućnosti primjene biopepela kao mineralnog dodatka u cementnim kompozitima.

U osmom poglavlju, dat je širi spisak korišćene literature i referenci, kao i nazivi standarda koji su korišćeni u okviru eksperimentalnog dijela disertacije.

U devetom poglavlju, tabelarno ili u vidu dijagrama su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja - izmjerene veličine i sračunate vrijednosti svojstava odabranih za analizu.

II BIOMASA - OBNOVLJIVI IZVOR ENERGIJE U AP VOJVODINI

1. DEFINICIJA I KLASIFIKACIJA

Biomasa, kao najčešći oblik obnovljive energije, je u širokoj upotrebi u zemljama u razvoju, ali manje nego u zapadnom dijelu svijeta. Pod terminom biomasa se podrazumjevaju proizvodi, otpadne materije i ostaci organskog porekla (biljnog i životinjskog), koji su biorazgradljivi i predstavljaju sporedni proizvod iz poljoprivredne proizvodnje, procesa prerade drveta ili su otpadni materijal iz industrije ili predstavljaju gradski otpad.

Na osnovu Evropske direktive 2009/28/CE, biomasa se koristi kao zamjena za fosilna goriva. Ona predstavlja obnovljiv izvor energije, sa najvećim potencijalom za upotrebu u energetske svrhe. U poslednje vrijeme mnogo pažnje je usmjereno na identifikovanje pogodnih vrsta biomase, koje mogu da zamjene konvencionalne izvore energije, kao što su fosilna goriva, pružajući visoko-energetske izlaze. Materijale na bazi biomase karakteriše niža emisija gasova staklene bašte od onih iz neobnovljivih izvora, kao što su nafta i ugalj. Pri sagorjevanju biomase dolazi do emisije polutanata, ali ne u tolikoj mjeri kao pri sagorjevanju fosilnih goriva.

Biomasa, kao gorivo, je dostupna u mnogim oblicima i može se dobiti iz različitih izvora. Biomasa se može podijeliti na:

- biomasu iz šumarstva (neiskorišćeno drvo, ostaci panjeva, poludivlje drveće, itd.),
- poljoprivrednu biomasu (slama, lišće, delovi voćaka, različite vrste šećerne repe, šećerna trska, kukuruz, itd.),
- energetske zasade (repa, krompir i drveće, kao što je vrba ili hibridni platan, itd),
- biomasu sa farmi životinja,
- industrijski otpad (industrije koje proizvode organski otpad, kao što je slučaj sa industrijom pića, prehrambena industrija i sl.),
- gradski otpad (papir i biljni ostaci koji se mogu iskoristiti kao izvor biomase).

Svjetska kretanja u oblasti korišćenja obnovljivih izvora energije (OIE) pokazuju da se sve razvijene zemlje ubrzano orijentišu na njihovo intenzivno korišćenje. Evropska zajednica je blagovremeno izmjenila svoje planove u ovoj oblasti te povećala udio biomase u proizvodnji komercijalne energije od planiranih 6% na 12% do 2010. godine, a strategijom Evropa 2020 obavezala se da će ostvariti „20/20/20“ klimatsko-energetski cilj: 20% smanjenja emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte u odnosu na 1990. godinu, (ili čak za 30% ako dozvole uslovi), 20% povećanje udjela obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji i za 20% povećanje energetske efikasnosti. Sprovodeći ovaj program, neke od zemalja Evrope već danas imaju više od 20% komercijalne energije

proizvedene iz biomase (Austrija, Švedska, Finska), dok je kod nerazvijenih zemalja to daleko manji procenat.

Energetska vrijednost biomase i samo iskorišćenje biomase u znatnoj mjeri ima veliki energetski potencijal u obnovljivim izvorima energije, ali on nije u dovoljnoj mjeri iskorišćen, ili uopšte nije iskorišćen kada je riječ o iskorišćenosti energije iz biomase. Obnovljivi izvori energije imaju znatno nižu operativnu cijenu u poređenju sa konvencionalnim izvorima energije. Ukupna cijena energije poljoprivredne biomase povoljnija je na osnovu analize tehnoloških ciklusa, a posebno posmatrano sa ekološkog aspekta [5].

Dosadašnja mala iskorišćenost biomase prvenstveno je prouzrokovana niskom toplotnom vrijednošću biomase po jedinici transportne zapremine i veoma izraženom prostornom disperzijom. Zbog ovih karakteristika, najveći dio trenutno neiskorišćene biomase ne može da bude ekonomično eksploatisan. Bez obzira na to, uslijed ogromnih potencijala biomase, navedene činjenice nimalo ne umanjuju njen značaj kao izvora energije. Stoga se može zaključiti da primarna prednost biomase kao izvora energije nije u njenom ogromnom potencijalu, pošto je isti iskoristiv samo ograničeno, već u obnovljivosti. Upravo obnovljivost daje suštinsku prednost biomasi nad klasičnim, fosilnim gorivima koja su u relevantnom vremenskom periodu neobnovljiva i samim time ne mogu biti osnov za planiranje održivog rasta koji podrazumjeva racionalno korišćenje energije [6].

Najvažniji ostaci poljoprivredne proizvodnje u svijetu su: otpaci šećerne trske, ljuske pirinča, vlakna jute, kokosova ljuska, stabljike pamuka, pšenična slama, sojina slama, ljuske suncokreta itd. Ponovna upotreba takvog otpada kao građevinskog materijala čini se kao održivo rješenje ne samo sa aspekta zagađenja, već i sa aspekta deponovanja, očuvanja prirodnih resursa za buduće generacije i visoke cijene građevinskog materijala.

U Srbiji se biomasa uglavnom upotrebljava na tradicionalan način i to u vidu energije za grijanje, kuvanje ili zagrijavanje tople vode. Pored ovih vidova upotrebe, biomasa se može koristiti i u postrojenjima za proizvodnju električne i toplotne energije, potom kao sirovina za proizvodnju biogoriva, a može se koristiti i u industriji za proizvodnju vlakana i hemikalija.

Na teritoriji AP Vojvodine je zastupljena intenzivna ratarska proizvodnja sa dominantnom žetvenom površinom pod kukuruzom (preko milion hektara), potom slijedi pšenica sa oko 500.000 hektara. Procjenjeno je da se svake godine u Srbiji proizvede 12,5 miliona tona biomase, od čega je u Vojvodini 9 miliona tona (72%) [7].

2. POLJOPRIVREDNA BIOMASA

U Tabela 1 dat je pregled potencijala biomase iz poljoprivrede u Srbiji. Analiza strukture biomase iz ostataka poljoprivredne proizvodnje pokazuje da više od polovine resursa leži u kukuruznoj biomasi, više od četvrtine u slami strnih žita, prije svega pšenice, a ostatak od oko 15 odsto u žetvenim ostacima suncokreta, soje, uljane repice ili rezidbenim ostacima voćnjaka i vinograda. S druge strane, potencijali šumske biomase kao drugog važnog resursa biomase u Srbiji, leže u preradi oko 1,5 miliona m³ šumskog prirasta godišnje u vidu odsječaka, odrezaka, kore, piljevine i sl. [8].

Tabela 1. Potencijalne količine biomase iz ostataka poljoprivredne proizvodnje u Srbiji

Biomasa	Biomasa za sagorjevanje (10 ³ t)	Donja toplotna moć (MJ/kg)	Ekvivalentna vrijednost lakog uglja za loženje (10 ³ t)
Pšenična slama	743,75	14	247,92
Ječmena slama	103,13	14,2	34,87
Ovsena slama	6,4	14,5	2,21
Ražena slama	3	14	1
Kukuruzovina	1809,06	27,35	581,66
Oklasak	357	14,7	124,95
Stabljika suncokreta	200	14,5	69,05
Ljuske suncokreta	30	17,55	12,54
Sojina slama	80	15,7	29,9
Slama uljane repice	75	17,4	31,07
Stabljika hmelja	1,98	14	0,66
Stabljika duvana	0,26	13,85	0,09
Ostaci rezidbe u voćniacima	289,44	14,15	97,5
Ostaci rezidbe u vinogradima	71,55	14	23,85
Stajnjak	110	23	60,24
UKUPNO:	3880,57	14,26	1317,51

Biomasa se može koristiti kao energent iz raznih ostataka poljoprivredne proizvodnje, a samim tim se povećava stepen energetske autonomnosti poljoprivredne proizvodnje. U ovom pogledu, u značajne poljoprivredne izvore spadaju ostaci godišnjih kultura kao što su: slama, kukuruzovina, oklasak, stabljike, ljuske, koštice. Početkom 21. vijeka, u Republici Srbiji, a posebno u AP Vojvodini, postaje značajna upotreba ostataka i otpadaka iz poljoprivrede u cilju dobijanja toplotne energije, a i električne, imajući u vidu da se 58% teritorije Republike Srbije nalazi pod obradivim površinama.

U Vojvodini, obradive površine čine 84% njene teritorije, a prirodna plodnost je poboljšana mrežom kanala za navodnjavanje, tako da je od 1,78 miliona hektara obradive zemlje oko 0,5 miliona hektara drenirano. Oko 70% prinosa sa ovih polja otpada na žitarice, 20% na industrijsko bilje, a 10% na ostale kulture [6].

Prednosti u korišćenju poljorivredne biomase kao energenta pokazuju opravdanost sa privrednog i ekološkog aspekta. Ekološki aspekti korišćenja biomase su: izvrsna biorazgradivost biomase u tlu - skoro 95% materije biomase se razgradi za 28 dana, biogoriva sadrže neznatne količine sumpora pa u produktima nema sumpor-dioksida (to je neizbježan produkt sagorjevanja fosilnih goriva), prilikom sagorjevanja biomase dobija se tzv. čisti pepeo - nema emisije ugljovodonika. Sa aspekta zaštite životne sredine, biomasa predstavlja CO₂ neutralan izvor energije. U procesu fotosinteze, količina CO₂ koju biljka usvoji iz atmosfere ekvivalentna je količini CO₂ koja se oslobodi prilikom sagorijevanja biomase biljnog porijekla. Ukoliko se adekvatno koristi, biomasa je održivo gorivo, koje može znatno da utiče na smanjenje neto emisije ugljenika iz CO₂, u poređenju sa primjenom fosilnih goriva u energetske svrhe.

Korišćenje biomase u energetske svrhe nije novijeg datuma, ali u većini slučajeva riječ je o ekstenzivnim metodama ubiranja, transporta i uskladištenja biomase, koje su ekonomski i organizaciono neodržive u savremenom okruženju. Nemogućnost da se zanemari veliki potencijal ovog resursa i njegova obnovljivost traže rješenja koja su u mogućnosti da obezbjede ekonomski isplativu eksploataciju resursa. Trenutno biomasa nema dominantan udio u potrošnji energije.

Veliki rast potrošnje u poslednjoj deceniji ostvaruje gas, čiji porast iznosi 15%, u isto vrijeme potrošnja nafte je porasla za 13,1%, dok je potrošnja uglja opala za 5,3%. Porast potrošnje hidroenergije je iznosio 22,8%, nuklerne energije 25,7%, a povećanje potrošnje ostalih oblika primarne energije, u koje spada i biomasa iznosilo je 68,1%. Iako je potrošnja ovih oblika primarne energije imala najveći rast, njihov udio u ukupnoj potrošnji energije je ostao veoma skroman, samo oko 1,3%. Najveći udio i dalje imaju tečna goriva, 39,8%, a zatim ugalj sa 23,2% i prirodni gas sa 22,4% [6].

U većini slučajeva žetveni ostaci se sagorjevaju na polju. Zagađivanje sredine, odustajanje od korišćenja barem trećine prinosa i uništavanja prirodnih resursa, u prvom redu humusa, negativne su posledice ovih postupaka.

Energetska vrijednost žetvenih ostataka definiše se na standardnom nivou sadržaja vlage koji se kreće od 10% kod slame, do 25% kod kukuruzovine. U navedenim slučajevima, njihova energetska vrednost je od 14.000 do 18.000 kJ/kg, što je blisko energetske vrijednosti drveta. Najvažnije fizičke osobine biomase date su u mogućim rasponima u Tabela 2 [6].

Tabela 2. Najvažnije fizičke osobine biomase

Fizičke osobine	Vrijednost
Toplotna moć	5-10 MJ/kg (zavisno od vlažnosti)
Gustina	400 – 900 kg/m ³
Nasipna gustina	40 – 600 kg/m ³
Toplotna moć po m ³	0,7 – 12 MJ/m ³
Sadržaj vlage	8 – 50%
Sadržaj pepela	1 – 10%
Sadržaj isparljivih gorivnih materija	50 – 70%
Temperatura sinterovanja pepela	650 – 800 °C

Žetveni ostaci ratarstva su relativno izjednačeni po svojim energetske potencijalima. U Tabela 3 su prikazane energetske vrijednosti žetvenih ostataka ratarstva [6].

Tabela 3. Energetska vrednost žetvenih ostataka ratarstva

Redni broj	Vrsta žetvenih ostataka	Energetska vrijednost (MJ/kg)
1	Slama strnih žita	16,2
2	Kukuruzovina	17,1
3	Sojina slama	18,2
4	Stabljika suncokreta	15,7
5	Suncokretova ljuska	17,6

Dosadašnje analize ukazuju na to da su glavni problemi za ekonomično korišćenje slame i drugih žetvenih ostataka visoki troškovi prikupljanja (ubiranje i baliranje ili drugi oblik sabijanja), transporta od mjesta proizvodnje do mesta potrošnje, te manipulacije i skladištenja. Ovakvu troškovnu problematiku prvenstveno izaziva dispergovanost na velikim površinama i mala zapreminska gustina svih oblika žetvenih ostataka. Zbog toga se ulažu napor da se konstruišu efikasne i visokoproduktivne mašine koje će obaviti ovaj posao sa što manje utrošene energije i ljudskog rada.

Balirana biomasa može da se koristi u industrijskim ložištima direktnim sagorjevanjem ili postupkom gasifikacije. Ovaj način korišćenja razvijen je uslijed opšte tendencije nedostatka tečnih i gasovitih goriva, kao i radi pozitivnih ekonomskih efekata proizvodnje toplotne energije proizvedene na ovaj način. Znajući da je ova primjena, zbog troškova transporta prostorno ograničena, ekonomična upotreba se obično ograničava na zagrijavanje prostorija poljoprivrednih uprava, za sušenje poljoprivrednih proizvoda, za zagrijavanje prostorija za stoku i slične namjene. U skladu sa time počinje se sa sve većim korišćenjem biomase u energetske svrhe. Pokazalo se da biomasa u vidu

slame, kukuruznih oklasaka, piljevine i drugih otpadaka samljevena, presovana u granule ili brikete može u velikoj mjeri zamjeniti tečna i gasovita goriva. I kod nas, i u tehnički razvijenim zemljama svijeta, ulažu se napor da se proširi područje primjene biomase na račun goriva dobijenih iz naftnih derivata. U tom cilju konstruisane su nove peći za što potpunije sagorevanje biomase.

Međutim, za šire korišćenje biomase kao energenta u individualnim ložištima (pećima u domaćinstvu) biomasa se mora još više energetske koncentrisati, odnosno sabiti i dovesti u pogodniji oblik za transport i manipulaciju. Dakle, mora postati pogodna za robni promet. U tom cilju obavlja se briketiranje i peletiranje biomase.

Slama soje je pogodnija za energetske korišćenje u odnosu na žetvene ostatke pšenice, kukuruza i suncokreta. Ona ima povoljan odnos hranljivih materija, odnosno veći sadržaj proteina, što čini ovaj nusproizvod ratarstva kaloričnijim.

Količina slame koja se može sakupiti po hektaru najčešće se kreće od 3.000 do 4.500 kg, a u velikoj mjeri zavisi od usjeva, vremenskih uslova, dužine stajanja na zemljištu i drugih faktora. Orientacione količine ostataka poljoprivredne proizvodnje kao izvora energije mogu se utvrditi ako se analizira prosječna količina po hektaru površine datog usjeva. Ova veličina, unutar pojedinih usjeva, zavisi od ukupnog prinosa, sorte, te uslova proizvodnje. Procjenjene količine ostataka, po hektaru površine, su:

- slama strnih žita 3–4 t/ha,
- sojina slama 2–3 t/ha,
- kukuruzovina 4–5 t/ha,
- stabljika suncokreta 2–3 t/ha,
- oklasak kukuruza 0,7–0,9 t/ha [6].

Na osnovu ostvarenih prinosa i zasejanih površina, moguće je utvrditi potencijalno raspoložive količine žetvenih ostataka (Tabela 4). Ali, bez obzira na potencijale žetvenih ostataka koji su u našoj zemlji znatni, osnov ekonomski prihvatljive energetske eksploatacije ovoga resursa čine efikasno izvedene mjere sakupljanja, transporta, manipulacije i skladištenja.

*Tabela 4. Količine žetvenih ostataka po opštinama i regionima [6]
(Izvor: Statistička evidencija)*

Region/ Opština	Površine pod usjevima (ha)				
	Pšenica	Ostala strna žita	Kukuruz	Suncokret	Soja
Bačka	116.642	14.562	231.055	37.221	111.076

Zapadno-bačka oblast	38.032	3.892	70.987	13.962	25.133
Apatin	5.302	750	6.656	1.092	3.576
Kula	8.897	604	16.412	4.154	2.512
Odžaci	4.780	759	11.366	352	8.378
Sombor	19.053	1.780	36.553	8.364	10.667
Južnobačka oblast	44.996	3.435	97.293	8.961	82.870
Grad Novi Sad	6.526	199	11.960	176	10.924
Novi Sad	6.299	173	11.565	170	10.779
Petrovaradin	226	26	395	6	145
Bač	2.201	208	5.576	125	13.547
Bačka Palanka	6.134	422	16.335	323	14.661
Bački Petrovac	2.200	139	6.407	408	4.499
Beočin	805	48	2.078	215	140
Bečej	8.567	852	13.154	3.906	6.743
Vrbas	4.998	778	10.832	1.080	3.951
Ђabalj	6.071	104	9.454	397	9.366
Srbobran	2.769	287	8.152	770	11.735
Sremski Karlovci	155	15	155	8	58
Temerin	908	95	5.589	76	4.793
Titel	3.662	286	7.600	1.475	2.453
Severnobačka oblast	33.613	7.236	62.774	14.298	3.073
Bačka Topola	11.137	3.365	23.020	4.917	1.640
Mali Iđoš	4.654	927	5.731	1.896	753
Subotica	17.822	2.944	34.024	7.485	680
Sremska oblast	54.928	4.001	86.810	8.756	28.851
Inđija	6.786	207	11.958	1.818	764
Irig	2.971	104	3.864	188	852
Pećinci	8.420	1.088	8.235	2.251	866

Ruma	11.063	590	16.651	1.422	4.063
Sremska Mitrovica	13.284	724	21.432	1.139	8.240
Stara Pazova	6.076	907	13.166	1.033	2.551
Šid	6.329	380	11.504	905	11.515
Mačvanska oblast	29.992	7.619	61.617	227	6.682
Bogatić	6.662	1.188	12.569	12	1.849
Vladimirci	5.100	1.308	8.301	59	921
Koceljeva	2.435	964	5.367	13	289
Krupanj	555	570	2.493	0	26
Loznica	2.776	953	8.599	5	1.335
Ljubovija	225	232	1.536	0	1
Mali Zvornik	69	34	591	0	2
Šabac	12.170	2.369	22.162	138	2.261
Ukupno	201.562	26.182	379.481	46.204	146.609

III BIOPEPEO

1. RASPOLOŽIVE VRSTE I KOLIČINE BIOPEPELA U AP VOJVODINI

U kompanijama u AP Vojvodini, koje koriste biomasu u energetske svrhe, kao materijal za sagorjevanje koristi se čvrsta biomasa biljnih ostataka primarne poljoprivredne proizvodnje i prerađivačke industrije. Navedene vrste biomase su slične po elementarnom sastavu i tehničkim karakteristikama sa aspekta njihove upotrebe kao biogoriva. Ali, i pored toga, postoje značajne specifičnosti koje su uslovile razvoj posebnih tehnologija i tehnike za njihovo korišćenje u energetske svrhe.

U konsultacijama sa licima koja su uključena u projektovanje i rad navedenih postrojenja došlo se do sledećih okvirnih saznanja:

- Kao energent se koristi slama različitih svojstava, pri čemu se razlike prvenstveno odnose na sadržaj vlage,
- Prosječna vlažnost biomase procjenjena je na 14%,
- Količina pepela koji se javlja kao ostatak procesa sagorjevanja se kreće od 3-15%, pri čemu se prosječna vrijednost procjenjuje sa cca 8%, od čega 7% otpada na pepeo koji se prikuplja u ložištu, dok se ostalih 1% odnosi na leteći pepeo; ova količina je niža u slučaju ljuske suncokreta gde se ista procjenjuje na maksimalno 5%,
- Temperatura koja se ostvaruje u ložištu varira između 400-1200 stepeni celzijusa,
- Prilikom sagorjevanja se ne koriste aditivi.

U regionu, koji je uključen u istraživanje (Bačka, Srem i Mačva), locirano je jedanaest kompanija koje koriste žetvene ostatke kao energent za dobijanje toplotne energije. Tom prilikom su uzeti uzorci biopepela i prikupljeni su osnovni podaci o procesu proizvodnje, koji su obuhvatili:

- vrstu korišćene biomase,
- tehnologiju sagorjevanja,
- postignute temperature sagorjevanja u peći,
- generisane količine biopepela na godišnjem nivou,
- način odlaganja biopepela.

U nastavku je dat kratak prikaz dobijenih informacija i podataka.

1.1. Proizvođači biopepela - kompanija Mitrosrem, Sremska Mitrovica

Mitrosrem je poljoprivredno preduzeće koje u svom posjedu ima 4.000ha površine i zakupljuje dodatnih 1.000ha za uzgoj biljnih kultura. Uzgajaju se: pšenica, kukuruz, soja, suncokret, ječam, uljana repica i slačica. Žetveni ostaci pšenice i soje se baliraju u rol bale ili bale pravougaone osnove (uglavnom u rol bale, dužine 1m i prečnika 90cm).

Zavisno od zbijenosti bale i sadržaja vlage u njoj, varira i sastav i kvalitet pepela koji se generiše sagorjevanjem bala. Sagorjevanjem biomase generišu se tri vrste biopepela:

- ložišni pepeo,
- pepeo iz multiciklona i
- leteći pepeo.

Tokom toplijih dana dominantno se koristi pšenična slama (Slika 1). Pšeničnu slamu karakteriše brže sagorjevanje i niža kalorijska vrednost. Upotreba sojine slame preovladava u hladnijim danima, zbog sporijeg sagorjevanja i više energetske vrednosti. Najčešće se pšenična i sojina slama mješaju. Postignuta temperatura u ložištu je u opsegu od 600-650°C. Prosječno se godišnje generiše 15 tona biopepela kao otpadnog proizvoda sagorjevanja biomase, koji se odlaže na neuređenu deponiju u krugu firme (Slika 2).



Slika 1 - Zalihe rol bala biomase u kompaniji Mitrosrem



Slika 2 - Deponija biopepela farme Mitrosrem

1.2. Proizvođači biopepela - kompanija Soja Protein, Bečej

Soja Protein je najveća fabrika za preradu soje u Srbiji, a po raznovrsnosti i kvalitetu proizvoda, kao i kapacitetu prerade od 250.000 tona godišnje, spada u najznačajnije prerađivače soje u Evropi. 2009. godine instaliran je novi kotao kapaciteta 15 tona pare na sat, a takođe je izgrađeno podno skladište za skladištenje bala pšenične slame. Kao gorivo u kotlu se koriste:

- pšenična i sojina slama (Slika 3),
- silosni otpad,
 - suncokretova ljuska (iz kompanije Victoria Oil u Šidu),
 - sojina ljuska.
- melasa.

Koja vrsta energenta će se koristiti, zavisi od sezone i roda. Tokom 2017. godine, dominantno je korištena slama (pšenična i sojina), a 2018., usled velikog roda

suncokreta, iz ekonomskih razloga, koristio se uglavnom silosni otpad. Sagorjevanjem biomase generišu se tri vrste biopepela:

- ložišni pepeo,
- pepeo iz multiciklona i
- leteći pepeo.

Kao nusproizvod alkoholne ekstrakcije, generiše se i velika količina melase, pa se, radi održivosti i iskorišćenosti sistema, mjesečno sagorjeva i melasa (cca 2000 tona). Postignuta temperatura u peći je u opsegu od 700-900°C.

Prosječno se dnevno generišu 3 tone biopepela (Slika 4). Na godišnjem nivou se generiše oko 1100 tona pepela biomase.



Slika 3 - Pšenična slama, pripremljena za sagorjevanje u kompaniji Soja Protein



Slika 4 - Skladište biopepela u kompaniji Soja Protein

1.3. Proizvođači biopepela - kompanija Veterinarski Zavod, Subotica

Veterinarski Zavod Subotica predstavlja najzaokruženiji sistem u oblasti veterine u Srbiji i danas je jedina kompanija koja pruža kompletno rješenje u stočarskoj proizvodnji – od preventive, preko ishrane, do liječenja životinja. Tokom 2014. godine u kompaniji su rekonstruisali stari kotao i prilagodili ga za sagorjevanje agro-peleta, umjesto uglja (Slika 5). U kompaniji se, do 2018., koristio agro pelet, porjeklom iz kompanije Victoria Starch, od pšenične i sojine slame. Sagorjevanjem biomase generišu se tri vrste biopepela:

- ložišni pepeo,
- pepeo iz multiciklona i
- leteći pepeo.

Postignuta temperatura u ložištu peći je u opsegu od 450-550°C. Oko 200 tona agro peleta se sagorjeva mjesečno, od čega se generiše 10% pepela, tj. ≈20 tona pepela

biomase mjesečno (Slika 6). U 2018. je kompanija Victoria Starch pala pod stečaj, pa je ugašen i kotao na biomasu u kompaniji Veterinarski Zavod.



Slika 5 - Skladište agro-peleta u kompaniji Veterinarski Zavod



Slika 6 - Generisani biopepeo, skladišten u kontejner, Veterinarski Zavod

1.4. Proizvođači biopepela - kompanija Hipol, Odžaci

Hipol a.d. je petrohemijska industrijska kompanija koja se nalazi u Odžacima, čija je osnovna djelatnost proizvodnja polipropilena, homopolimera, za većinu vrsta prerade: ekstrudiranje, punjenje, brizganje, tekstilna vlakna i ostalo. Kapacitet kompanije je 100 tona propilena dnevno, odnosno 30.000 tona godišnje. Od 2014. godine, instaliran je kotao, u kojem se, umjesto naftnog goriva, sagorjevaju agro peleti. U kotlarnicama se sagorjeva energent i proizvodi para. U 2017. godini ostvareni učinak je iznosio 50.000 tona pare. Dominantno se koristi pelet od sojine slame kao izvor energije (Slika 7). Sagorjevanjem biomase generišu se tri vrste biopepela:

- ložišni pepeo,
- pepeo iz multiciklona i
- leteći pepeo.

Postignuta temperatura u ložištu peći je u opsegu od 800-1000°C. Približno 10.000 tona agro peleta se sagorjeva godišnje, od čega se generiše oko 10% pepela, što čini 700 tona pepela. Pepeo se deponuje u posebnom kontejneru, a zatim se dalje transportuje do gradske deponije (Slika 8).



Slika 7 - Peleti od sojine slame, pripremljeni za sagorjevanje u kompaniji Hipol



Slika 8 - Deponija generisanog biopepela, uskladištenog u posebnoj prostoriji, kompanija Hipol

1.5. Proizvođači biopepela - kompanija Victoria Starch, Zrenjanin

Victoria Starch, najmlađa kompanija članica u okviru poslovnog sistema Victoria Group, započela je kontinuiranu proizvodnju agro peleta, tj. peleta od poljoprivredne biomase, sredinom 2013. godine u Zrenjaninu. Agro pelet je proizvod cilindričnog oblika, glatke strukture, bez mirisa. Dobija se presovanjem biomase - žetvenih ostataka (slame od soje, pšenice i uljane repice) pod visokim pritiskom, bez dodavanja bilo kakvih vezivnih sredstava (Slika 9). Agro pelet ima dvije osnovne primjene: služi za sagorjevanje u kotlovima – kao energent i kao prostirka za uzgoj životinja.

Energetski pelet je agro pelet od žetvenih ostataka sa sadržajem sojine slame min. 50%. Može se koristiti u pećima za individualne korisnike i javne ustanove na agro pelet, kao i u pećima za pelet sa mehaničkim čišćenjem rešetke. Agro pelet za prostirku se proizvodi od pšenične slame. Kapacitet kompanije je preko 1.200 tona agro peleta mesečno. Preko 50% peleta distribuira se kompaniji "ALMEX DOO" - "IPOK" Zrenjanin (oko 1000 tona agro peleta mesečno). Kompanija ima nekoliko vlastitih kotlovskih peći manjeg kapaciteta, gdje se agro-peleti sagorjevaju. Kao otpadni proizvod sagorjevanja biomase, mjesečno se proizvodi oko 700 kg biopepela. Pepeo se deponuje na neuređenoj deponiji u blizini kompanije (Slika 10). U 2018., kompanija je pala pod stečaj.



Slika 9 - Agro-peleti, pripremljeni za sagorjevanje u kompaniji Victoria Starch



Slika 10 - Neuređena deponija biopepela u okolini kompanije Victoria Starch

1.6. Proizvođači biopepela - kompanija ALMEX-IPOK, Zrenjanin

Glavna djelatost kompanije ALMEX je poljoprivredna proizvodnja: ratarstvo (proizvodnja kukuruza, šećerne repe, pšenice, soje, suncokreta, lucerke, graška, boranije, kukuruza šećerca, semenskog kukuruza i suncokreta) i stočarstvo (proizvodnja svinjskog i goveđeg mesa i sirovog kravljeg mleka). Oblasti poslovanja obuhvataju i skladištenje, transport i trgovinu poljoprivrednim proizvodima, prodaju i transport naftnih derivata, proizvodnju skroba, stočne hrane, prodaju poljoprivredne mehanizacije, prodaju rezervnih delova i servisiranje poljoprivredne mehanizacije. ALMEX obrađuje 17.000 ha poljoprivrednog zemljišta.

ALMEX-IPOK je hemijska kompanija u Zrenjaninu čija je osnovna djelatnost prerada kukuruza i proizvodnja skroba, kapaciteta od 280 tona dnevne obrade kukuruza. U 2016. godini investirali su u ugradnju novog kotla, koji je trebalo da koristi bale pšenične slame (Slika 11) kao gorivo. Zbog problema u sjeckanju slamnih bala, kompanija je počela da koristi agro-pelete iz Victoria Starch u Zrenjaninu. Za proizvodnju agro peleta, uglavnom se kao sirovine koriste pšenična slama, sojina slama i uljana repica.

Sagorjevanjem agro-peleta generiše se biopepeo koji se odlaže u kontejnere, a odatle se dalje transportuje na gradsku deponiju kao otpad. Na dnevnom nivou se sagorjeva 40 tona agro peleta, pri čemu se generiše 2,5 do 3 tone biopepela (Slika 12).

Od 2018., kada je kompanija Victoria Starch obustavila proizvodnju agropeleta, u kompaniji se kao energent koristi sunokretova ljuska, porjeklom iz Srpske Crnje i Zrenjanina.



Slika 11 - Sjeckalica za bale slame u kompaniji Almex-Ipok



Slika 12 - Generisan biopepeo, uskladišten u kontejner, kompanija Almex-Ipok

1.7. Proizvođači biopepela - kompanija Knot-Autoflex, Bečej

Odmah po osnivanju, u decembru 2003., firma KNOTT Autoflex YUG započinje proizvodnju obujmica za potporne točkove, a ubrzo potom i blatobrana od pocinkovanog lima. Od 2005. kompanija počinje sa proizvodnjom prvih torzionih osovina, nosivosti do 750 kg. Danas, proizvodne hale preduzeća zauzimaju prostor od 17.000 kvadratnih metara, u kojima se proizvodi godišnje 300.000 torzionih osovina, 200.000 blatobrana, kao i 25.000 šasija za autoprikolice.

Tokom zime, grijanje u kompaniji reguliše jedna kotlarnica (Slika 14). Kotlarnica koristi biomasu kao izvor energije, u kojoj se sagorjevaju bale slame (Slika 13): pšenica, kukuruz, soja, uljana repica itd. U prelaznom periodu kompanija koristi toplotne pumpe za grijanje ili hlađenje. Preduzeće se snabdjeva biomasom od strane lokalnih farmera, pri čemu se koriste rol bale ili bale sa kvadratnom ili pravougaonom osnovom.

Približno 21 bala slame se sagorjeva u toku dana, odnosno 610 tona biomase po grejnoj sezoni (godišnje). Prilikom sagorjevanja biomase, $\approx 10\%$ pepela se generiše, tj. ≈ 60 tona pepela biomase godišnje. Generišu se dvije vrste pepela:

- ložišni pepeo i
- pepeo iz multiciklona.

Pepeo se privremeno skladišti u kontejnere za otpad, koje dalje preuzima komunalno preduzeće Potisje i potom odlaže na gradsku deponiju.



Slika 13 - Bale slame, kao energent u kompaniji Knot-Autoflex



Slika 14 - Kotao na biomasu u kompaniji Knot-Autoflex

1.8. Proizvođači biopepela - kompanija DTD Ribarstvo, Lovćenac

DTD Ribarstvo u agrarnom sektoru bavi se poljoprivrednom proizvodnjom na tri lokacije u Vojvodini, od kojih oranice u Lovćencu uz koridor 10 zauzimaju površinu od 2.207 ha. Na imanjima se proizvode ratarske kulture, žitarice i uljarice, u strogo kontrolisanim uslovima koje se kao sirovinska baza koriste za potrebe Fabrike za proizvodnju riblje hrane u Bačkom Jarku, dok jedan dio proizvoda ide u slobodnu prodaju, a jedan dio se koristi za sopstvene potrebe (za grijanje).

Ogranak kompanije u Lovćencu koristi 50 ha za sopstvenu proizvodnju, pri čemu se sadi i balira sojima slama za potrebe grijanja. Grijanje, od 2015. godine, reguliše jedna kotlarnica na biomasu (Slika 15).

Tokom grejne sezone, od novembra do aprila, balira se oko 7.000 bala sojine slame, što čini 90 tona biomase (1 bala \approx 15kg). Prilikom sagorjevanja biomase, \approx 10% pepela se generiše, tj. \approx 9 tona pepela biomase godišnje. Generiše se jedna vrsta pepela: ložišni pepeo. Pepeo se odlaže u obližnji kanal, koji služi kao deponija.



Slika 15 - Kotao na biomasu u kompaniji DTD Ribarstvo, Lovćenac

1.9. Proizvođači biopepela - kompanija Victoria Oil, Šid

Osnovna djelatnost kompanije Victoria Oil je proizvodnja sirovih i rafiniranih ulja. Danas ova fabrika na godišnjem nivou preradi blizu 220.000 tona suncokreta i preko 85.000 tona soje, a tehnologija prerade omogućava punu fleksibilnost proizvodnog procesa rafinacije uljarica. U kompaniji se nalazi i najmoderniji pogon za punjenje i ambalažiranje jestivog ulja, kapaciteta 14.000 litara na sat.

Prerađivački kapacitet kompanije je:

- 1.200 t suncokreta na dan,
- 800 t soje na dan,
- 800 t uljane repice na dan.

Proizvodni kapacitet fleksibilnog pogona rafinerije je:

- 300 t rafiniranih ulja na dan.

Dnevno se proizvede ≈ 140 tona ljuski suncokreta (Slika 16), pri čemu se jedan dio koristi u kompaniji (≈ 80 tona), a jedan dio se otprema Termoelektrani-Topani u Sremskoj Mitrovici.

Od 2013. godine, u kompaniji se za proizvodnju tehnološke pare, za potrebe proizvodnje, koristi automatizovani kotao na biomasu. Kapacitet kotla je 24 tone pare po satu. Kotlarnica radi kontinualno, pri čemu se dnevno sagorjeva oko 80 tona suncokretove ljuske.

Nakon sagorjevanja, generiše se $\approx 3\%$ pepela, što čini ≈ 60 tona pepela biomase na mesečnom nivou, odnosno 720 tona biopepela godišnje. Generišu se dvije vrste pepela:

- ložišni i
- leteći pepeo.

Pepeo se privremeno skladišti u kontejnere (Slika 17). Specijalizovanim vozilima se dalje, u kontrolisanim uslovima, transportuje 200km do deponije u Lapovu.



Slika 16 - Suncokretova ljuska, kao energent u kompaniji Victoria Oil



Slika 17 - Biopepeo, privremeno uskladišten u kontejner, kompanija Victoria Oil

1.10. Proizvođači biopepela - kompanija Termoelektrana-Toplana (TETO), Sremska Mitrovica

Po obimu i kapacitetu, Termoelektrana-toplana u Sremskoj Mitrovici (TE-TO Sremska Mitrovica) najmanji je energetska objekat u sastavu Panonskih TE-TO.

TE-TO Sremska Mitrovica je projektovana kao industrijska energana za snabdevanje tehnološkom parom industrijskog kompleksa „Matroz“ i obližnje šećerane i za snabdevanje grada Sremska Mitrovica toplotnom energijom za grijanje. S obzirom da je, zbog prestanka rada ovih potrošača, prestala isporuka tehnološke pare „Matrozu“ 2005. godine, a šećerani 2008. godine, od tada postrojenja u TE-TO Sremska Mitrovica rade isključivo kao energetska postrojenje za proizvodnju toplotne energije za grijanje grada i veoma malo kao rezervni izvor EPS-a za proizvodnju električne energije.

U cilju povećanja ekonomičnosti u proizvodnji toplotne energije za grijanje, 2012. godine je izgrađeno i pušteno u rad kotlovsko postrojenje koje umjesto prirodnog gasa kao gorivo koristi biomasu - suncokretovu ljusku (Slika 18), koja se obezbeđuje od kompanije Victoria Oil iz Šida. Kotlovsko postrojenje je snage 18 MW i predstavlja trenutno najveće ovakvo postrojenje u okruženju (Slika 19). Na taj način ostvarena cijena proizvodnje toplotne energije je za oko 20% niža u odnosu na do sada korišćeno gorivo – prirodni gas, a ovim se postiže da 80% toplotne energije grada Sremska Mitrovica biva proizvedeno iz obnovljivih izvora energije.

Dnevno se sagori ≈ 50 tona ljuski suncokreta. Nakon sagorijevanja, generiše se $\approx 3\%$ pepela, što čini ≈ 40 tona pepela biomase na mesečnom nivou, odnosno 240 tona biopepela godišnje (po grejnoj sezoni). Generišu se tri vrste pepela:

- ložišni pepeo,
- pepeo iz multiciklona i
- leteći pepeo.

Po izlasku iz postrojenja, pepeli se mješaju, odlažu privremeno u kontejnere, odakle ih preuzima kompanija Victoria Oil i dalje transportuje do deponije u Lapovu.



Slika 18 - Suncokretova ljuska, kao energent u kompaniji TETO



Slika 19 - Kotlovsko postrojenje na biomasi, kapaciteta 18MW u kompaniji TETO

1.11. Proizvođači biopepela – kompanija Sava Kovačević u Vrbasu

„Sava Kovačević“ raspolaže skladišnim kapacitetima za 25.000 tona žitarica sa dva prijemna mesta. 2006. godine je izgrađen i pušten u pogon centar za doradu sjemenskog kukuruza sa prijemnim kapacitetom od 360t. 2013. godine je izgrađen novi doradni centar sa prijemnim kapacitetom od 260t. Ovako izgrađen doradni centar se svrstava u jedan od najvećih u državi Srbiji. Za sušenje sjemenskog kukuruza koristi se vazduh koji se zagrijava sagorjevanjem oklaska od kukuruznog klipa u pećima, na horizontalnoj rešetki.

Centar raspolaže sa četiri peći i jednim kotlom:

- 1 peć, snage 2MW, sagorjeva 800kg oklaska/sat,
- 3 peći, snage 850kW, sagorjevaju po 200kg oklaska/sat (trenutno se u funkciji 2 peći),
- 1 kotao na oklasak, snage 180kW, za proizvodnju tople vode za zagrijavanje.

Prijem i dorada sjemenskog kukuruza se rade oko 2 mjeseca godišnje (avgust i septembar) - Slika 20. Tokom sezone, sagori se količina od cca 1700t oklaska. Pri

sagorjevanju kukuruznog oklaska, generiše se 2% pepela, pa je procjenjena količina biopepela na godišnjem nivou 30 tona.

Temperatura u ložištu ne prelazi 600°C - Slika 21.

Pepeo, nastao sagorjevanjem oklaska od semenskog kukuruza, odlaže se na deponiju u krugu postrojenja, i miješa sa ostalim otpadom.



Slika 20 - Oklasak kukuruza – energent u kompaniji Sava Kovačević



Slika 21 - Peć za sagorjevanje biomase, kompanija Sava Kovačević

1.12. Proizvođači biopepela – kompanija PTK Panonija - farma Mecker

Glavna djelatnost farme je stočarstvo. Farma se bavi i ratarskom proizvodnjom. Obraduje se 3.000ha zemlje, pri čemu se gaje biljne kulture: soja, pšenica, kukuruz, uljana repica. Dio ostataka se, nakon žetve, koristi kao energent, a dio (manji ostaci) se usitne i zaoravaju.

U okviru farme, 95% grejanja je regulisano sagorjevanjem biomase, kao obnovljivog izvora energije. Biomasa se balira u veće bale (težine oko 200kg) i manje bale (težine oko 10kg), koje se ubacuju u peći sa sagorjevanje.

Farma raspolaže sa tri peći:

- 1 velika peć, snage 750kW; u ovoj peći se sagorjevaju velike bale, uglavnom od sojine slame,
- 2 male peći, snage 500kW; u ovoj peći se sagorjevaju male bale, uglavnom od pšenične slame - Slika 22.

Tokom grejne sezone, u trajanju od 6 meseci, sagori se 30.000 malih bala i 2.000 velikih bala, što čini oko 700 tona biomase. Pri sagorjevanju biomase, generiše se cca 8% pepela, pa je procjenjena količina biopepela na godišnjem nivou **60 tona**.

Temperatura u ložištu je 500-600°C.

Pepeo, nastao sagorjevanjem biomase, odlaže se na neuređenu deponiju u krugu farme (Slika 23).



Slika 22 - Sagorjevanje bala od pšenične slame u farmi Mecker



Slika 23 - Neuređena deponija biopepela u krugu farme Mecker

1.13. Pregled dobijenih podataka o raspoloživosti biopepela

U Tabela 5, dati su sumirani podaci o raspoloživosti biopepela u AP Vojvodini.

Tabela 5. Raspoloživost biopepela u AP Vojvodini

Kompanija	Vrsta biomase	Temperatur a sagorjevanj a	Vrste biopepela	Proizvedene količine pepela godišnje (t)
Mitrosrem Sremska Mitrovica	pšenična slama sojina slama	600-650°C	1. ložišni pepeo 2. pepeo iz multiciklona 3. leteći pepeo	15
Soja Protein Bečej	pšenična slama sojina ljuska	700-900°C	1. ložišni pepeo 2. pepeo iz multiciklona 3. leteći pepeo	1100
Veterinarski Institut Subotica	agro peleti od pšenične i sojine slame	450-550°C	1. ložišni pepeo 2. pepeo iz multiciklona 3. leteći pepeo	240
Hipol Odžaci	agro peleti od sojine slame	800-1000°C	1. ložišni pepeo 2. pepeo iz multiciklona 3. leteći pepeo	700

Victoria Starch Zrenjanin	agro peleti od pšenične i sojine slame	nepoznato	1. ložišni pepeo	8,5
Almex-IPOK Zrenjanin	agro peleti od pšenične i sojine slame	700-900°C	1. ložišni pepeo 2. pepeo iz multiciklona 3. leteći pepeo	1100
Knot Autoflex Bečej	pšenična slama sojina slama kukuruzovina	nepoznato	1. ložišni pepeo 2. pepeo iz multiciklona	60
DTD Ribarstvo Lovćenac	sojina slama	nepoznato	1. ložišni pepeo	9
Victoria Oil Šid	suncokretova ljuska	700-1000°C	1. ložišni pepeo 2. leteći pepeo	720
TETO Sremska Mitrovica	suncokretova ljuska	1000-1200°C	1. ložišni pepeo 2. pepeo iz multiciklona 3. leteći pepeo	240
Sava Kovačević Vrbas	oklasak kukuruza	<600°C	1. ložišni pepeo	30
Farma Mecker Panonija	pšenična slama sojina slama	500-600°C	1. ložišni pepeo	60

Na osnovu dobijenih podataka može se zaključiti da raspoloživa količina biopepela u Vojvodini, na ovom stepenu analize, iznosi cca 4.200t na godišnjem nivou. Što se tiče načina odlaganja pepela, zaključeno je da se mala količina pepela odlaže na neuređene deponije u krugu firmi, a najveća količina pepela se odlaže u kontejnere i odvozi na gradske deponije.

IV PRIKAZ I ANALIZA
ISTRAŽIVANJA U OBLASTI
PRIMJENE BIOPEPELA
KAO GRAĐEVINSKOG
MATERIJALA

1. PRIKAZ I ANALIZA ZNAČAJNIH ISTRAŽIVANJA

U XXI veku, u svijetu su intenzivirani eksperimentalni i naučno-istraživački radovi vezani za istraživanje mogućnosti primjene pepela nastalog sagorjevanjem raznih tipova biomase kao potencijalnog veziva i/ili agregata u cementnim kompozitima. Razlozi za primjenu su višestruki:

- ekološki apsekti (zaštita životna sredine, smanjenje količine otpada, održivi razvoj, redukcija emisije CO₂, očuvanje prirodnih resursa),
- ekonomski apsekti (zamjena cementa - najskuplje komponente betona, 'niska' cijena otpadnog materijala).

U nastavku je dat kratak pregled različitih vrsta pepela biomase, koji su dominantno upotrebljavani u eksperimentalnim istraživanjima dostupnim u literaturi i rezultati ostvareni u istima.

1.1. Pepeo od pirinčane ljuske

Pepeo od pirinčane ljuske (RHA) je nusprodukt nastao sagorjevanjem ljuski zrna pirinča, kao otpadnog poljoprivrednog materijala. Indija je druga zemlja na svijetu po proizvodnji pirinča, odmah nakon Kine, sa 104 miliona tona proizvedenog pirinča godišnje. Godišnje se proizvede gotovo 3,7 miliona tona ljuski pirinča. Ljuska sadrži približno 50% celuloze, 25-30% lignina i 15-20% silikatnog gela. Nakon sagorjevanja, pepeo se prevashodno sastoji od amorfnog silicijum dioksida i ima veliku specifičnu površinu. Pepeo pirinčane ljuske se dodatno karakteriše niskim sadržajem oksida aluminijuma i kalcijuma i relativno niskim sadržajem alkalija - Tabela 6 [9].

Tabela 6. Hemijski sastav pepela pirinčane ljuske [9]

Hemijski sastav	%
Gubitak žarenjem	3,13
Silicijum dioksid (SiO ₂)	91,71
Kalcijum oksid (CaO)	0,86
Aluminijum oksid (Al ₂ O ₃)	0,36
Željezni oksid (Fe ₂ O ₃)	0,9
Magnezijum oksid (MgO)	0,31
Kalijum oksid (K ₂ O)	1,67
Natrijum oksid (Na ₂ O)	0,12
Ukupno SiO ₂ + Al ₂ O ₃	92,07

Pepeo pirinčane ljuske je, među vrstama biopepela, sa aspekta primjene kao vezivo u cementnim kompozitima, najviše istraživano. Urađena su brojna eksperimentalna istraživanja, na cementnim pastama, malterima i betonima, gdje je pepeo pirinčane ljuske korišten kao zamjena dijela cementa i pri tome su ispitana brojna svojstva cementnih kompozita u svježem i očvrslom stanju - Tabela 7.

Tabela 7. Pregled značajnijih istraživanja cementnih kompozita sa pepelom RHA i vrste ispitivanja

Autor	Vrsta kompozita	Ispitana svojstva	Dodatni komentar
		čvrstoća pri pritisku	w=0,33
Ha Thanh Le i ostali (2014) [9]	beton	čvrstoća na cepanje otpornost na habanje otpornost na prodor hlorida	procenat zamjene cementa do 20% beton marke MB60
R. Zerbino i ostali (2012) [11]	malter beton	alkalno-silikatna reakcija: ekspanzija	varirane su dvije vrste pepela: u prirodnom i fino samlevenom obliku
Ki-Bong Park i ostali (2014) [12]	posta	stepen hidratacije upijanje vode	-
V. Kannan i ostali (2014) [13]	beton	čvrstoća pri pritisku otpornost na prodor hlorida otpornost na hemijsku agresiju: sulfate i hloride	w=0,55 procenat zamjene cementa do 30% beton marke MB30
A.L.G. Gastaldini i ostali (2007) Error! Reference source not found.	beton	karbonatizacija otpornost na prodor hlorida	procenat zamjene cementa do 20%
Ha Thanh Le i ostali (2016) [15]	beton	samougradljivost čvrstoća pri pritisku	w=0,26
Hwang Chao-Lung i ostali (2011) [16]	beton	čvrstoća pri pritisku električna provodljivost brzina prostiranja zvuka	w=0,23: 0,35 i 0,47 pepeo mljeven 1h procenat zamjene cementa do 30% ostvarena čvrstoća

			betona 66MPa
V. Sata i ostali (2012) [17]	malter	čvrstoća pri pritisku	w=0,50: 0,575 i 0,65 procenat zamjene cementa do 40%
B. Chatveera i ostali (2009) [18]	malter	otpornost na sulfatnu agresiju: čvrstoća pri pritisku i ekspanzija	w=0,55 i 0,65 procenat zamjene cementa do 50%
Mahboubeh Zahedi i ostali (2014) [19]	malter	čvrstoća pri pritisku električna provodljivost kapilarno upijanje vode otpornost na prodor hlorida	w=0,485 procenat zamjene cementa do 20%
Josephin Alex, J.i ostali (2016) [20]	beton	uticaj vremena mlevenja na svojstva u svježem stanju i čvrstoću pri pritisku, cepanju i zatezanju	varirano je vrijeme mljevenja 0,15 i 60 minuta
A.L.G. Gastaldini i ostali (2010) [21]	beton	uticaj dužine njege na otpornost na prodor hlorida i čvrstoću pri pritisku	varirano je vrijeme nege u vlažnoj komori 3,7 i 28 dana ispitivanje pri starosti 90 dana
Huanghuang Huang i ostali (2017) [22]	beton	čvrstoća pri pritisku upijanje vode otpornost na prodor hlorida	-

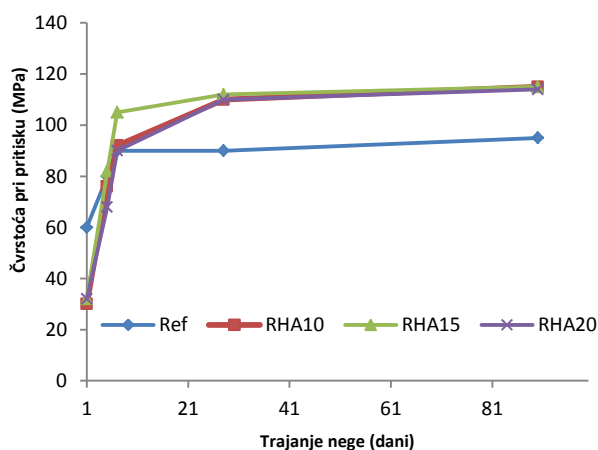
Ako se pepeo pirinčane ljuske dodatno usitni mljevenjem, povećaće mu se specifična površina, pa samim tim i pucolanska aktivnost i otpornost na alkalno-silikatnu reakciju, pa se ova vrsta pepela pirinčane ljuske koristi i za smanjenje neželjenih efekata alkalno-silikatne reakcije pri projektovanju i spravljanju betona. R. Zerbino et al. [11] su sproveli eksperimentalno istraživanje uticaja alkalno-silikatne reakcije u malterima i betonima, u kojima je dio cementa zamjenjen sa pepelom pirinčane ljuske u dva oblika: prirodnom (NRHA) i samljevenom obliku (GRHA). Napravljene su mješavine u kojima je variran procenat zamjene cementa biopepelom, kombinovano sa variranjem reaktivnog i ne-reaktivnog agregata. Pri ispitivanju ekspanzije maltera, referentni malter je dosegao graničnu ekspanziju od 0,1% do starosti od 16 dana. Pri istoj starosti, malteri GRHA15 i GRHA25 su imali ekspanzije 0.069% i 0.187%, respektivno, dok se ekspanzija drastično

povećala pri korištenju NRHA pepela, sa vrednostima 0,37% i 0,513% za mješavine NRHA15 i NRHA25, respektivno. Pri ispitivanju ekspanzije na betonima, sve mješavine sa GRHA su imale ekspanziju manju od granične vrijednosti 0,4%, pri čemu su, kao što je i očekivano, vrijednosti bile veće pri korištenju reaktivnog agregata. Sve vrste betona sa NRHA su imale značajne vrijednosti ekspanzije, čak i pri korištenju ne-reaktivnog agregata.

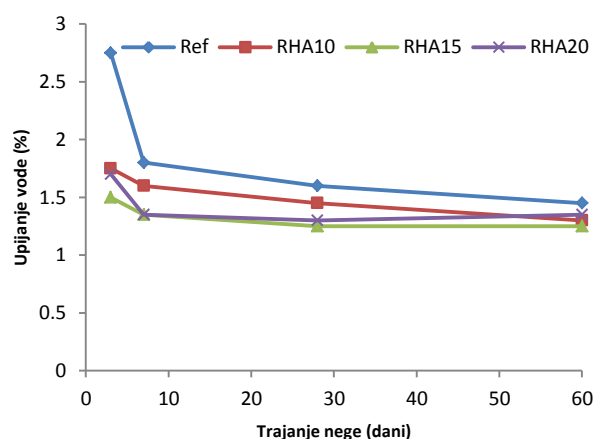
Korišćenjem RHA, kao zamjene dijela cementa, smanjuje se ugradljivost svježeg betona, uslijed velike specifične površine RHA, koja zahtjeva veću količinu vode za očuvanje iste konzistencije. Kao posledica smanjene količine cementa i pucolanske aktivnosti pepela, produžava se vrijeme početka vezivanja. Kao posledica filer-efekta (veoma sitne čestice RHA) dobija se vrlo gusta struktura sa smanjenom propustljivošću, smanjenim skupljanjem usled sušenja i većom čvrstoćom pri pritisku.

Faktori koji utiču na vrijednosti čvrstoće pri pritisku betona sa pepelom pirinčane ljuske su vodovezivni odnos, trajanje nege i procenat zamjene cementa sa pepelom. Analizom rezultata eksperimentalnih istraživanja velikog broja autora, može se zaključiti da se pri vodovezivnim odnosima 0,30; 0,32 i 0,34, čvrstoća betona sa pepelom povećava u odnosu na referentni beton, pri trajanju nege 7, 28 i 90 dana.

Mahmud i ostali [23] su istraživali uticaj pepela pirinčane ljuske na čvrstoću pri pritisku i trajnosna svojstva betona sa visokim performansama. Napravljene su 4 betonske mješavine u kojima je variran procenat zamjene cementa pepelom (0, 10, 15 i 20%), pri čemu je vodovezivni faktor bio konstantan – 0,25, a ukupna masa veziva 550 kg/m^3 . Rezultati ukazuju na to da se zamjenom cementa do 20% pepelom pirinčane ljuske poboljšavaju ispitivana svojstva betona: čvrstoća pri pritisku betona sa pepelom je za 20% veća u odnosu na čvrstoću referentnog betona (Slika 24). U početnom stadijumu, upijanje vode RHA betona je za 25-75% manje u odnosu na referentni beton i ne mijenja se mnogo tokom vremena, dok pri starosti od 60 dana ova razlika se smanjuje na 5%, uslijed hidratacije referentnog cementnog betona (Slika 25).



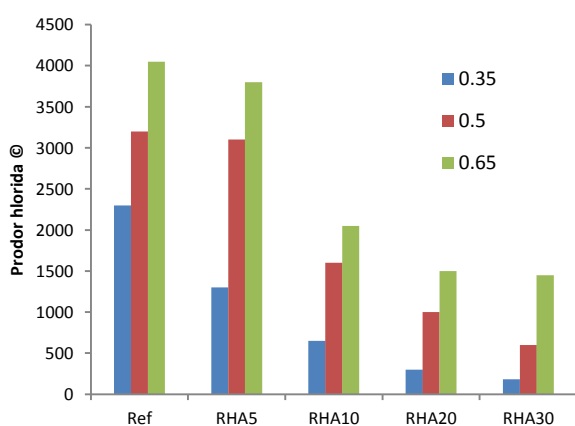
Slika 24 - Čvrstoća pri pritisku RHA betona



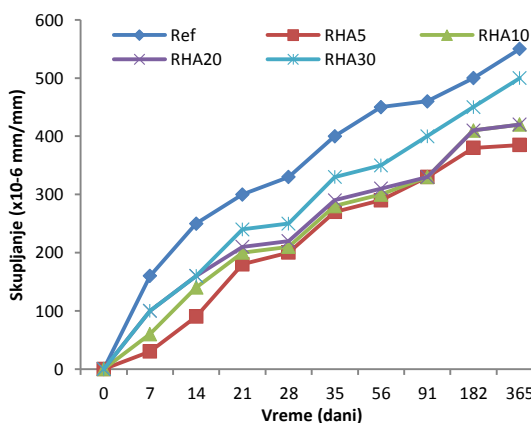
Slika 25 - Upijanje vode RHA betona

Foong i ostali [24] su, pored čvrstoće pri pritisku, ispitivali i modul elastičnosti betona sa RHA. Sa dodatkom RHA, dolazi do povećanja Young-ovog modula elastičnosti i do 25% (pri zamjeni cementa sa 15% RHA), što se objašnjava velikom finoćom mliva RHA čestica koje efikasno popunjavaju pore i dovode do bolje tranzitne zone između agregata i cementne matrice.

Istraživanja u kojima je do 20% cementa zamjenjeno sa RHA, su pokazala i do 89% manju propustljivost na prodor hlorida. Upotrebom RHA, kao zamjenom dijela cementa, povećava se i otpornost betona na dejstvo mraza, pa se može zaključiti da upotreba ove vrste pepela doprinosi trajnosnim svojstvima cementnih kompozita. A.L.G. Gastaldini i ostali [25] su ispitivali skupljanje pri sušenju i otpornost betona sa RHA pepelom na prodor hlorida. U predmetnom eksperimentalnom istraživanju, napravljeno je 5 betonskih mešavina u kojima je variran procenat zamjene cementa pepelom (0, 5, 10, 20 i 30%) i vodovezivni odnos (0,35; 0,5 i 0,65) kome odgovara ukupna masa veziva (487; 359 i 284 kg/m³ respektivno). Rezultati ukazuju da se sa povećanjem procenta zamjene cementa pepelom, smanjuje propustljivost betona, što je rezultat redukovane električne provodljivosti pornog rastvora. Sa povećanjem sadržaja RHA, smanjuje se sadržaj pora krupnijih od 50nm, a povećava sadržaj sitnijih pora, što dovodi do smanjenja električne provodljivosti i, posledično, propustljivosti betona na prodor hlorida (Slika 26). Nakon 365 dana sušenja uzoraka u laboratorijskim uslovima, referentni beton se odlikovao najvećim skupljanjem pri sušenju, a beton RHA5 najmanjim. Sa povećanjem procenta zamjene cementa pepelom, vrijednosti skupljanja se povećavaju – Slika 27. Vrijednosti skupljanja za RHA betone se kreću u rasponu 366 - 533 x 10⁻⁶ mm/mm, što se smatra niskom vrijednošću za bilo koju vrstu betona.



Slika 26 - Otpornost na prodor hlorida RHA betona



Slika 27 - Skupljanje pri sušenju RHA betona

Grupa autora B. Chatveera i P. Lertwattanaruk [26] su istraživali doprinos RHA pepela sulfatnoj otpornosti cementnih maltera. U eksperimentalnom istraživanju, ispitana je trajnost maltera (u kojima je variran procenat zamjene cementa pepelom 0, 10, 20, 30 i 50%) izloženih dejstvu 5% rastvora Na₂SO₄ i MgSO₄, preko mjerenja čvrstoće pri

pritisku i ekspanzije maltera nakon izlaganju agresivnom dejstvu. Pri ispitivanju otpornosti maltera na dejstvo Na_2SO_4 , upotreba RHA pepela se pokazala kao povoljna, i sa aspekta ekspanzije i pada čvrstoće. Malter RHA10 je imao ekspanziju 0,05% pri starosti od 6 meseci, što je ocjenjeno kao vrlo visoka otpornost. Malteri RHA30 i RHA50 su imali ekspanziju 0,04%, što je uporedivo i sa sulfatno-otpornim malterima. Sa aspekta otpornosti na dejstvo MgSO_4 , upotreba RHA pepela je imala pozitivan efekat u smanjenju ekspanzije maltera. Međutim, sa povećanjem procenta zamjene, pad čvrstoće maltera sa RHA pepelom je bio veći u odnosu na pad čvrstoće referentnog maltera.

Na osnovu pregleda dostupne literature i analize rezultata velikog broja sprovedenih istraživanja, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Hemijski sastav pepela pirinčane ljuske pokazuje visok sadržaj reaktivnog SiO_2 , što predstavlja dobru osnovu za primjenu ovog materijala kao pucolanskog,
- Kao posledica velike specifične površine biopepela, paste sa dodatkom RHA pepela zahtjevaju više vode za očuvanje standardne konzistencije, u poređenju sa standardnim cementnim pastama i ova količina vode se povećava se sa povećanjem procenta zamjene cementa pepelom,
- Zapreminska masa betona sa RHA je u rangju zapreminskih masa normalnih betona,
- Čvrstoća betona sa RHA zavisi od vodovezivnog faktora, ali sa procentom zamjene minimalno 10% RHA, dolazi do rasta čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentni beton,
- Gusta, nepropusna mikrostruktura za otpornost na agresivna dejstva, kao što su sulfati, hloridi i dr., kao i dobra ponašanje betona sa RHA sa aspekta skupljanja pri sušenju, omogućavaju široku primjenu ovih betona, izvanrednih trajnosnih svojstava.

1.2. Pepeo od pšenične slame

Pšenica je jedan od glavnih izvora hrane za više od 2,5 milijardi ljudi. Godišnja proizvodnja pšenice na globalnom nivou je preko 700 miliona tona, od čega 530 miliona tona čini pšenična slama. Pšenična slama je poljoprivredna biomasa koja je veoma rasprostranjena kod nas. U Vojvodini se svake godine generiše preko 6 miliona tona otpadne biomase, od koje najveći deo čine kukurozovina (stablo i oklasak) sa 54,8% (odnosno 3,29 miliona tona) i pšenična slama sa 18,7% (odnosno 1,12 miliona tona). Ako se uzme u obzir da se trećina otpadne biomase može koristiti u energetske svrhe, procjenjuje se da je energetski potencijal pšenične slame oko 5.300 TJ godišnje, odnosno oko 130 hiljada tona ekstra lakog ulja za loženje.

Hemijski sastav pepela (WSA), nastalog sagorjevanjem pšenične slame, karakterišu: visok sadržaj K_2O (18.43%), nizak sadržaj Al_2O_3 (0.19%) i znatan sadržaj SiO_2 (51.93%) - Tabela 8. Ovaj sastav najvjerovatnije vodi ka stvaranju staklaste faze na relativno niskim temperaturama. Formiranje staklaste faze i ne tako visoke temperature u kotlu

pri sagorevanju (760°C), može da znači veću količinu amorfne faze, veću pucolansku aktivnost i moguću primjenu kao vezivnog materijala u cementnim kompozitima [27].

Tabela 8. Hemijski sastav pepela pšenične slame [27]

Hemijski sastav	%
Gubitak žarenjem	9,27
Silicijum dioksid (SiO ₂)	51,93
Kalcijum oksid (CaO)	14,28
Aluminijum oksid (Al ₂ O ₃)	0,19
Željezni oksid (Fe ₂ O ₃)	1,39
Magnezijum oksid (MgO)	2,07
Kalijum oksid (K ₂ O)	18,43
Natrijum oksid (Na ₂ O)	0,43
Ukupno SiO ₂ + Al ₂ O ₃	52,12

Pepeo pšenične ljuske je, među različitim vrstama biopepela, sa aspekta primjene kao vezivo u cementnim kompozitima, istraživan u relativno malom obimu. Urađena su nekolika eksperimentalna istraživanja, na cementnim pastama i malterima, gdje je pepeo pšenične slame korišten kao zamjena dijela cementa ili pjeska i pri tome su ispitana neka od osnovnih svojstava cementnih kompozita u svježem i očvrslom stanju - Tabela 9.

Tabela 9. Pregled istraživanja cementnih kompozita sa pepelom WSA i vrste ispitivanja

Autor	Vrsta kompozita	Ispitana svojstva	Dodatni komentar
Ondřej Jankovský i ostali (2017) [28]	pasta	vreme vezivanja poroznost čvrstoća pri pritisku čvrstoća pri savijanju modul elastičnosti	procenat zamjene cementa do 20%
Rao Arsalan Khushnood i ostali (2015) Error! Reference source not found.	pasta	čvrstoća pri pritisku čvrstoća pri savijanju upijanje vode	procenat zamjene cementa 10%

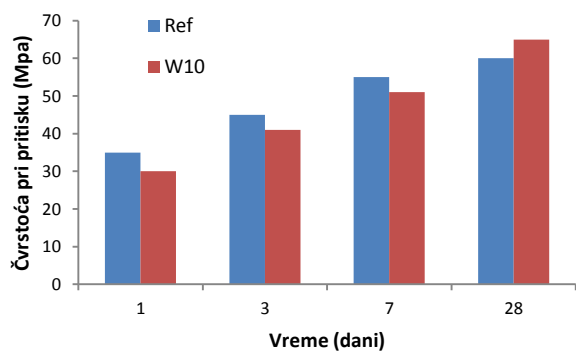
		otpornost na agresivno dejstvo 5% rastvora kiselina: HCl i H ₂ SO ₄	
Ajay Goyal i ostali (2007) [30]	malter	čvrstoća pri pritisku čvrstoća pri savijanju	procenat zamjene cementa do 15%
Sani A. i ostali [31]	malter	čvrstoća pri pritisku čvrstoća pri savijanju	procenat zamjene cementa do 50%
Amardeep B. Dehane i ostali (2015) [32]	malter	čvrstoća pri pritisku upijanje vode	procenat zamjene cementa do 37,5%
Hasan Biricik i ostali (2000) [33]	malter	otpornost maltera na dejstvo MgSO ₄ i Na ₂ SO ₄	procenat zamjene cementa do 24%
Nabil M.A. i ostali (2002) [34]	malter	čvrstoća pri pritisku čvrstoća pri savijanju čvrstoća na zatezanje	procenat zamjene peska do 10,9%
Abdul Qudoos i ostali (2018) [35]	malter	čvrstoća pri pritisku SEM Termalna analiza Brzina prostiranja ultrazvuka	varirano vrijeme mljevenja pepela u laboratorijskom mlinu od 30min do 2h procenat zamjene cementa do 30%

Abdul Qudoos i ostali [35] su ispitivali uticaj vremena mljevenja pepela, nastalog sagorjevanjem pšenične slame, na čvrstoću maltera u kojima je cement zamjenjen sa 0-30% biopepelom. Vrijeme mljevenja u laboratorijskom mlinu je varirano u intervalima: 30min, 1h i 2h. Osim ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera, pri starosti do 90 dana, urađeni su i: termalna analiza, SEM mikroskopija i brzina prostiranja ultrazvuka na očvrslim malterskim prizmama. Rezutati ukazuju da se sa povećanjem dužine trajanja mljevenja pepela, povećava njegova specifična površina i, posledično, pucolanska reaktivnost materijala kao mineralnog dodatka i čvrstoća pri pritisku maltera, spravljenih sa istim. Zaključeno je da se pepeo pšenične slame može koristiti kao zamjena dijela cementa do 20%, bez ugrožavanja mehaničkih svojstava maltera.

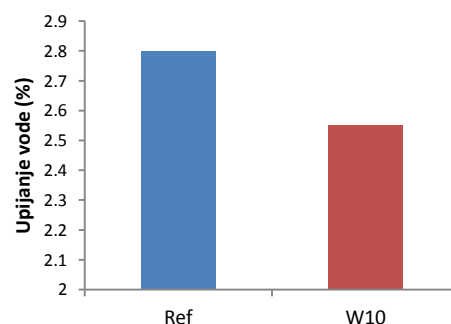
Ondřej Jankovský i saradnici [28] su istraživali mogućnost primjene pepela pšenične slame kao pucolanskog materijala. Ispitana su osnovna fizičko-hemijska svojstva pepela. Hemijski sastav pepela se odlikuje visokim sadržajem alkalija (sadržaj K₂O=11%), što je ocjenjeno kao vrlo visoka vrijednost, zbog moguće alkalno-silikatne reakcije u cementnim kompozitima. Kao jedno od rješenja za smanjenje sadržaja alkalija, predloženo je prethodno 'tretiranje' pepela ispiranjem vodom. U okviru predmetnog

istraživanja, spravljene su cementne paste u kojima je variran procenat zamjene cementa sa pepelom (10,15 i 20%, po masi) i ispitana su svojstva u svježem stanju, te čvrstoće pri pritisku i savijanju i modul elastičnosti (na standardnim malterskim prizmicama) pri starosti od 28 dana. Sa zamjenom cementa WSA pepelom, obradljivost paste se poboljšava, vrijeme vezivanja se značajno prolongira (uslijed usporene hidratacije i pucolanske reakcije), opada vrijednost zapreminske mase, kao i ukupna otvorena poroznost paste sa WSA, u odnosu na referentnu cementnu pastu. Primjena pepela u dozaži 10 i 15% se pokazala kao povoljna sa aspekta svih ispitanih mehaničkih svojstava i čvrstoće su bile veće u odnosu na čvrstoću referentne cementne paste.

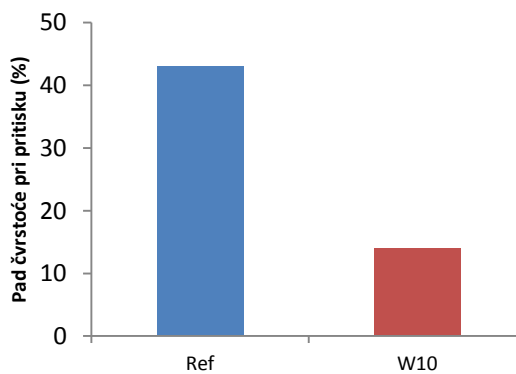
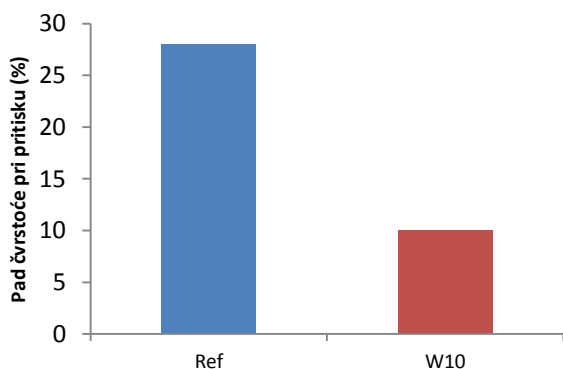
Slično istraživanje, u većem obimu, sprovela je grupa autora Rao Arsalan Khushnood i ostali **Error! Reference source not found.** U eksperimentalnom istraživanju, analiziran je uticaj WSA pepela, kao zamjene za 10% cementa u cementnim pastama i pri tome su ispitana svojstva u svježem stanju, čvrstoće pri pritisku i savijanju, upijanje vode i otpornost na agresivno dejstvo 5% rastvora kiselina: HCl i H₂SO₄ očvrsljih kompozita pri starosti od 28 dana. Pasta sa WSA pepelom je, usled veće specifične površine i finoće mliva, zahtjevala veću količinu vode i dodatak superplastifikatora za očuvanje konzistencije. Ova pasta se odlikovala i unapređenim mehaničkim i trajnosnim svojstvima: veća čvrstoća pri pritisku, manje upijanje vode i manji pad čvrstoće nakon izlaganja agresivnim dejstvima, u odnosu na referentnu cementnu pastu, što je posledica pucolanske reakcije, filer efekta i redukovane poroznosti sistema (Slike 28-31).



Slika 28 - Čvrstoća pri pritisku paste pri starosti do 28 dana



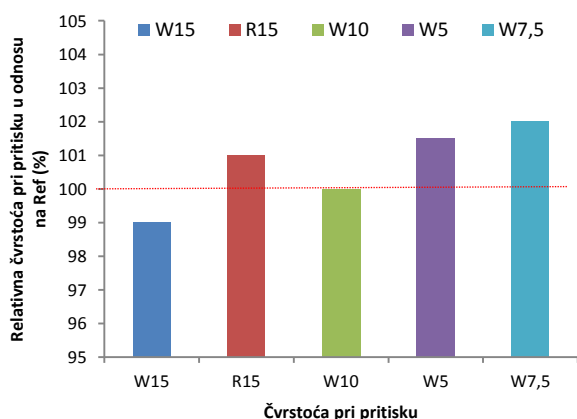
Slika 29 - Upijanje vode paste pri starosti od 28 dana



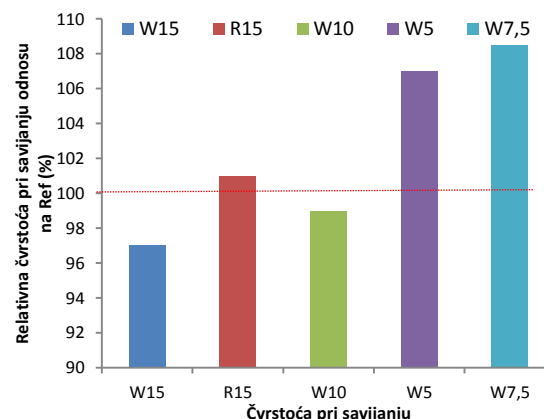
Slika 30 - Pad čvrstoće pri pritisku paste nakon izlaganja dejstvu HCl pri starosti do 28 dana

Slika 31 - Pad čvrstoće pri pritisku paste nakon izlaganja dejstvu H₂SO₄ pri starosti do 28 dana

Ajay Goyal i saradnici [30] su analizirali sinergetski uticaj pepela od pšenične slame (W) i pepela pirinčane ljuske (R), kao zamjene dijela cementa, na mehanička svojstva cementnih maltera. Količina pepela je varirana u iznosu 0-15% mase cementa (kombinacije 0%W+15%R; 5%W+10%R; 7,5%W+7,5%R; 10%W+5%R; 15%W+0%R) i sprovedena je komparativna analiza čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju maltera sa biopepelom u odnosu na referentni malter CTR (100% cement). Rezultati su pokazali da je optimalni procenat zamjene cementa biopepelom 7,5%W+7,5%R sa aspekta i čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju. Pri starosti od 3 dana, malteri W10, W7,5 i W5 su imali veće čvrstoće pri pritisku od referentnog maltera, što je posledica filer efekta sitnih čestica biopepela u malterskoj mešavini. Sa progresom hidratacije, čvrstoća referentnog maltera je prekoračila čvrstoće ostalih maltera. Međutim, nakon 56 dana, kada je većina cementa hidratizovala, pucolanska reakcija biopepela je došla do izražaja i čvrstoće pojedinih maltera su ponovo prekoračile čvrstoću referentnog maltera. Čvrstoća pri pritisku maltera pri starosti od 180 dana je bila u sledećem odnosu: W7>W5>R15>CTR>W10>W15 (Slika 32). Sa aspekta čvrstoće pri savijanju, pri starosti od 180 dana, opet su se malteri W7,5 i W5 odlikovali najvećim vrijednostima (Slika 33).



Slika 32 - Relativna čvrstoća pri pritisku betona sa WSA i RHA maltera u odnosu na čvrstoću referentnog maltera

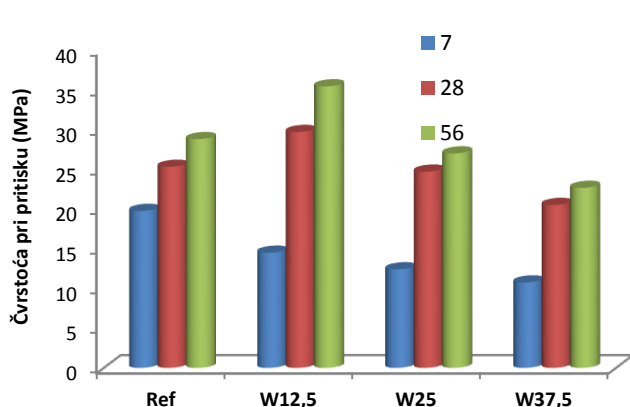


Slika 33 - Relativna čvrstoća pri savijanju betona sa WSA i RHA maltera u odnosu na čvrstoću referentnog maltera

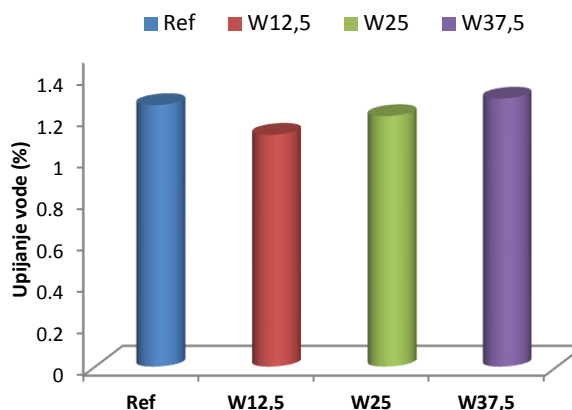
Sani A. i Kashim I.Y. [31] su sprovedli slično istraživanje. Izvršeno je ispitivanje svojstava maltera u svežem stanju i čvrstoće pri pritisku pri starosti do 28 dana. Varirana je količina pepela pšenične slame do 50% zamjene cementa (u intervalima po 10%). Rezultati su pokazali da zamjena dijela cementa biopepelom dovodi do produženja vremena vezivanja maltera, što je posledica pucolanske reakcije biopepela i usporene hidratacije. Sa povećanjem udjela biopepela, smanjuje se obradljivost i mjera rasprostiranja svježje malterske mešavine. Takođe, sa većim sadržajem biopepela, smanjuje se i čvrstoća pri pritisku maltera, pri čemu procenat smanjenja opada sa

vremenom. Optimalan procenat zamjene cementa biopepelom je 10% pri starosti od 28 dana (5% manja čvrstoća od referentnog maltera).

Amardeep B. Dehane [32] je sa saradnicima (Amardeep B. Dehane et al., 2015) istraživao uticaj zamjene cementa WSA pepelom na čvrstoću pri pritisku i upijanje vode cementnih maltera. Sadžaj pepela je variran u procentima zamene: 12,5; 25 i 37,5% mase cementa. Pri starosti od 28 dana, čvrstoća maltera W12,5 je premašila čvrstoću referentnog maltera, a ova razlika se, uslijed pucolanske reakcije, povećala tokom vremena (Slika 34). Malteri W12,5 i W25 su se odlikovali i manjim upijanjem vode u odnosu na upijanje referentnog maltera pri starosti od 28 dana (Slika 35).



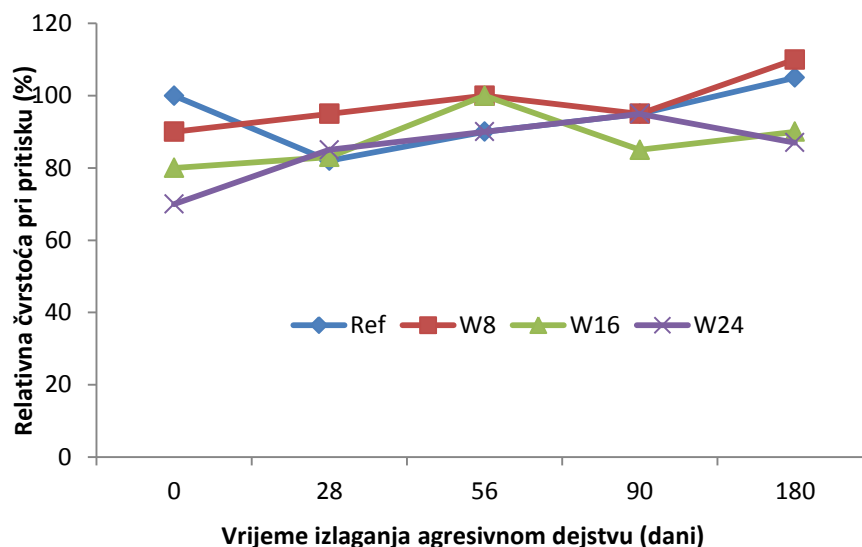
Slika 34 - Relativna čvrstoća pri pritisku betona sa WSA i RHA maltera u odnosu na čvrstoću referentnog maltera



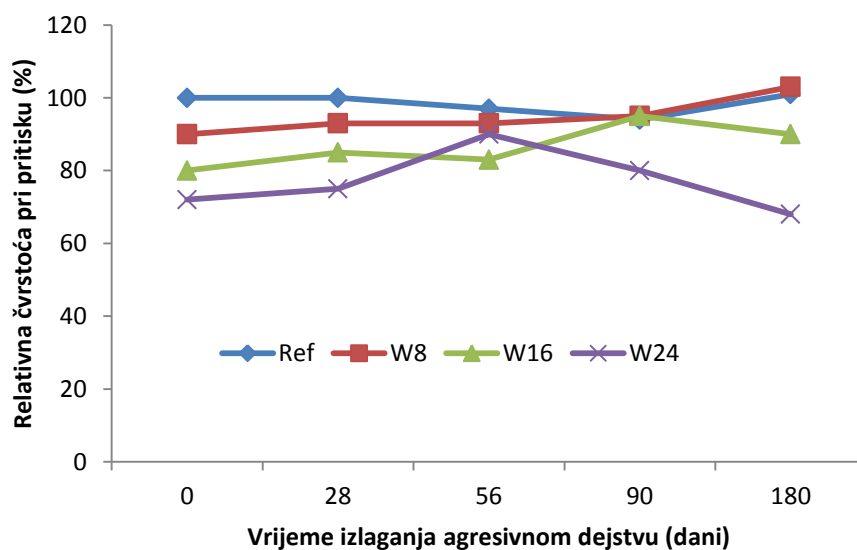
Slika 35 - Relativna čvrstoća pri savijanju betona sa WSA i RHA maltera u odnosu na čvrstoću referentnog maltera

Hasan Biricik i saradnici [33] su istraživali otpornost maltera sa pepelom pšenične slame na dejstvo sulfata (rastvori 10.000 i 40.000 mg/l magnezijum sulfata i natrijum sulfata). U okviru eksperimentalnog istraživanja, urađena je komparativna analiza mehaničkih karakteristika (čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju) referentnog maltera i maltera sa biopepelom, prije i posle izlaganja agresivnom dejstvu. Količina biopepela je varirana u iznosu 8-24% (sa inkrementom 8%) mase cementa. Pri starosti od 28 dana, čvrstoće maltera sa biopepelom su bile niže u odnosu na referentni malter (za 10%, 20% i 29%, respektivno). Međutim, zahvaljujući pucolanskim karakteristikama, do starosti od 180 dana, čvrstoće maltera sa biopepelom su dostigle čvrstoće referentnog maltera. Prije izlaganja dejstvu sulfata, pri starosti od 28 dana, čvrstoća pri savijanju maltera sa biopepelom je bila viša u odnosu na čvrstoću referentnog maltera. Međutim, sa povećanjem starosti, ove čvrstoće su se izjednačile do starosti od 180 dana. Zamjena cementa biopepelom u količini 8% je pozitivno uticala na čvrstoću pri pritisku i čvrstoću pri savijanju maltera izloženog dejstvu natrijum sulfata, za obe koncentracije rastvora (Slika 36) i na čvrstoću pri pritisku maltera izloženog dejstvu magnezijum sulfata, za koncentraciju rastvora 40.000 mg/l (Slika 37). Nakon

izlaganja dejstvu magnezijum sulfata za koncentraciju rastvora 10.000 mg/l, čvrstoće maltera sa WSA pepelom su bile niže u odnosu na čvrstoću referentnog maltera.



Slika 36 - Relativna čvrstoća pri pritisku maltera sa WSA i referentnog maltera nakon izlaganja dejstvu natrijum sulfata (rastvor 10.000 mg/l)



Slika 37 - Relativna čvrstoća pri pritisku maltera sa WSA i referentnog maltera nakon izlaganja dejstvu magnezijum sulfata (rastvor 40.000 mg/l)

Nabil M.A. i saradnici [34] su istraživali uticaj pepela od pšenične slame na mehanička svojstva autoklaviranih maltera. Autoklaviranje je vrlo efektivno u slučaju primjene cementnih materijala, zbog pucolanske reakcije između SiO_2 i Ca(OH)_2 oslobođenog tokom hidratacije cementa. U okviru pripreme malterskih mešavina, sadržaj pjeska je zamjenjen sa 3,6%, 7,3% i 10,9% pepela pšenične slame. Rezultati pokazuju da se sa povećanjem udjela biopepela poboljšavaju mehaničke karakteristike (čvrstoće pri pritisku, na zatezanje i savijanje). Povećanje čvrstoće pri pritisku, u odnosu na referentni

uzorak, je bilo: 12%, 75%, odnosno 87%; za čvrstoću na zatezanje: 3,6%, 7,3%, odnosno 10,9%, a za savojnu čvrstoću: 9%, 35%, odnosno 71%, za procenete zamjene peska pepelom 3,6%, 7,3% i 10,9%, respektivno.

Na osnovu pregleda dostupne literature i analize rezultata ograničenog broja sprovedenih istraživanja u kojima je korišten pepeo pšenične slame, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Hemijski sastav pepela pšenične slame pokazuje relativno visok sadržaj reaktivnog SiO_2 , što predstavlja dobru osnovu za primjenu ovog materijala kao pucolanskog. Hemijski sastav se odlikuje i visokim sadržajem alkalija, što može predstavljati problem u slučaju primjene reaktivnog agregata i nastanka alkalno-silikatne reakcije u cementnim kompozitima,
- Paste sa dodatkom WSA pepela zahtjevaju više vode za očuvanje standardne konzistencije, u poređenju sa standardnim cementnim pastama i ova količina vode se povećava se sa povećanjem procenta zamjene cementa pepelom,
- Čvrstoća betona sa WSA pepelom zavisi od vodovezivnog faktora, ali sa procentom zamene minimalno 10% WSA, dolazi do rasta čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentni beton, naročito pri višim starostima, uslijed pucolanske reakcije biopepela,
- Usled guste strukture i filer efekta, WSA pepeo se pokazao kao povoljan za otpornost na agresivna dejstva, kao što su sulfati, hloridi i dr., što podržava primjenu istog za projektovanje cementnih kompozita dobrih trajnosnih svojstava.

1.3. Pepeo od kukuruznog oklaska

Godišnje se u svijetu proizvede preko 500 miliona tona kukuruza. SAD su najveći proizvođači kukuruznog oklaska sa 43%, zatim sledi Afrika sa 7%. Prema Statističkom godišnjaku Srbije u 2016. godini bilo je ukupno zasejano 1.010.097 hektara pod kukuruzom, dok je u Vojvodini bilo 571.835 hektara. Požnjevena količina kukuruza, na nivou Republike Srbije, je u 2016. bila 7.987.479 tona (Zavod za statistiku Srbije).

Prethodna istraživanja su pokazala da pepeo kukuruznog oklaska (CCA) sadrži više od 65% SiO_2 , a kumulativno sa Al_2O_3 više od 70%, tako da se može koristiti kao materijal sa pucolanskim svojstvima [35]. Hemijski sastav pepela CCA karakteriše i umjeren sadržaj alkalija: K_2O (4,92%) i MgO (2,06%) - Tabela 10.

Tabela 10. Hemijski sastav pepela kukuruznog oklaska [35]

Hemijski sastav	%
Silicijum dioksid (SiO_2)	66,38
Aluminijum oksid (Al_2O_3)	7,48

Kalcijum oksid (CaO)	11,57
Željezni oksid (Fe ₂ O ₃)	4,44
Magnezijum oksid (MgO)	2,06
Kalijum oksid (K ₂ O)	4,92
Natrijum oksid (Na ₂ O)	0,41
Ukupno SiO ₂ + Al ₂ O ₃	73,86

Pepeo od kukuruznog oklaska je, sa aspekta primjene kao vezivo u cementnim kompozitima, istraživan u velikom obimu. Urađena su brojna eksperimentalna istraživanja na malterima i betonima, gdje je pepeo korišten kao zamjena dijela cementa ili pjeska i pri tome je ispitan niz svojstava cementnih kompozita u svježem i očvrslom stanju - Tabela 11.

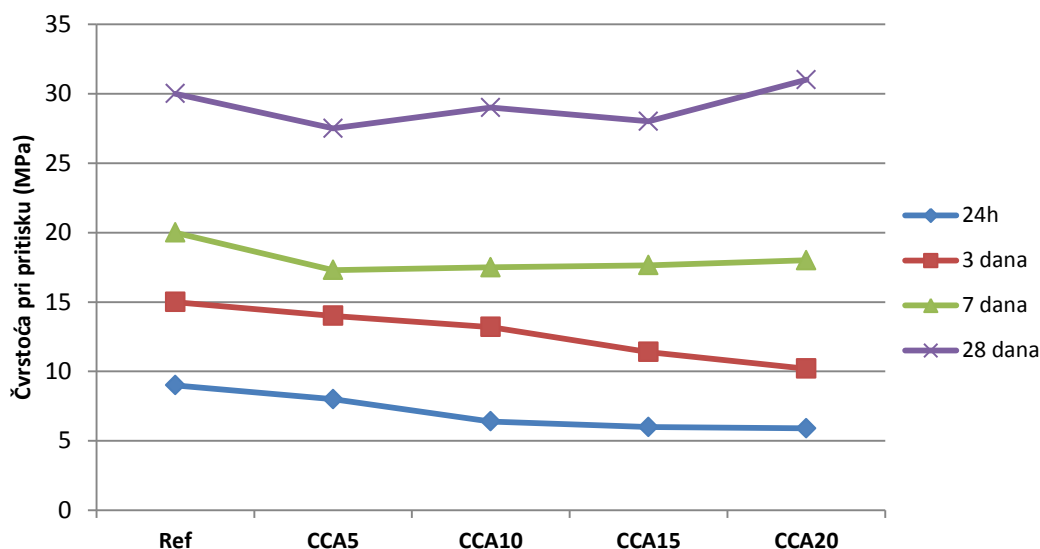
Tabela 11. Pregled značajnijih istraživanja cementnih kompozita sa pepelom CCA i vrste ispitivanja

Autor	Vrsta kompozita	Ispitana svojstva	Dodatni komentar
D.A. Adesanya i ostali (2009) [36]	pasta	fizička i hemijska svojstva finoća vreme vezivanja stalnost zapremine	procenat zamjene cementa do 25%
P Suwanmaneechot i ostali (2012) [37]	malter beton	čvrstoća pri pritisku (malteri i betoni) čvrstoća na cepanje (betoni)	procenat zamjene cementa do 20%
D. A. Adesanya i ostali (1996) [38]	malter beton	čvrstoća pri pritisku upijanje vode	procenat zamjene cementa do 50%
Ahangba Augustine i ostali (2016) [39]	beton	svojstva betona u svježem stanju čvrstoća pri pritisku čvrstoća na savijanje	procenat zamjene cementa do 25%

Antonio Price i ostali (2014) [40]	beton	svojstva betona u svežem stanju čvrstoća pri pritisku toplotna provodljivost	procenat zamjene cementa do 20%
D.A. Adesanya i ostali (2010) [41]	malter beton	upijanje vode (betoni) otpornost na agresivno dejstvo kiselina: HCl i H ₂ SO ₄ (malteri)	w=0,5: 0,6 i 0,7 procenat zamjene cementa do 25%
Hanifi Binici i ostali (2008) [42]	beton	vodonepropustljivost otpornost na habanje čvrstoća pri pritisku otpornost na dejstvo sulfata	procenat zamjene peska do 6%
John Kamaui ostali (2016) [43]	beton	svojstva betona u svežem stanju čvrstoća pri pritisku čvrstoća na zatezanje otpornost na dejstvo sulfata	procenat zamjene cementa do 30%
Jorge Pinto i ostali (2012) [44]	beton	čvrstoća pri pritisku toplotna provodljivost	procenat zamjene peska do 20%
K. A. Mujedui ostali (2014) [45]	beton	svojstva betona u svežem stanju čvrstoća pri pritisku	w=0,5: 0,6 i 0,7 procenat zamjene cementa do 50%
Olafusi Oladipupo i ostali (2015) [46]	beton	čvrstoća pri pritisku čvrstoća na cepanje čvrstoća pri zatezanju	procenat zamjene cementa do 20%
Oluborode K.D. i ostali (2010) [47]	beton	čvrstoća pri pritisku	procenat zamjene cementa do 30%

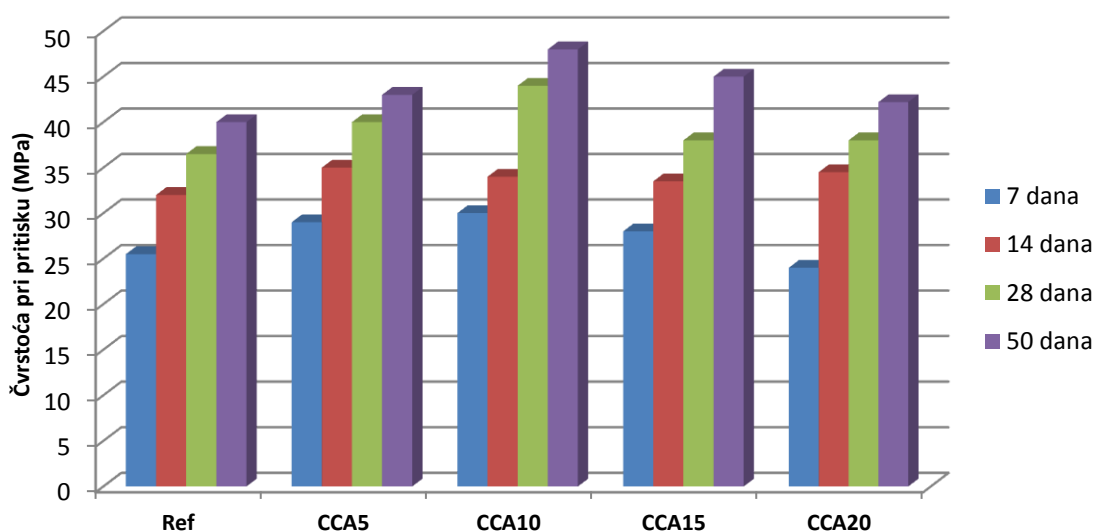
U eksperimentalnom istraživanju, koje su sproveli P. Suwanmaneechot i saradnici [37] ispitana su osnovna fizička i hemijska svojstva CCA pepela i mogućnost korištenja istog u cementnim malterima, kao zamjene cementa od 0 do 20% (sa inkrementom 5%). Dodatno, spravljani su i betoni u kojima je pepeo variran u istim količinama, a ispitane su čvrstoće pri pritisku i na cijepanje, pri starostima do 50 dana. Sa aspekta hemijskog sastava pepela, ukupan sadržaj oksida SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ prelazi 70%, što podržava moguću primjenu ovog materijala kao pucolanskog. Sa povećanjem inkrementa zamjene cementa sa pepelom, povećava se i potražnja vode (za očuvanje konzistencije) i vrijeme vezivanja cementne paste. U početnom periodu hidratacije, u prva tri dana starosti, sa

povećanjem procenta zamjene opada čvrstoća pri pritisku maltera sa pepelom. Pri starosti od 28 dana, pojedine malterske mešavine sa pepelom su prevazišle čvrstoću referentnog maltera (Slika 38).



Slika 38 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa CCA pepelom i referentnog maltera pri različitim procentima zamene, do starosti od 28 dana

Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoća betona, procenat zamjene cementa sa 10% CCA pepela se pokazao kao optimalan i sa aspekta čvrstoće pri pritisku i čvrstoće na cijepanje. Pri starosti od 50 dana, čvrstoća betona svih vrsta betona sa CCA pepelom je prevazišla čvrstoću referentnog betona (Slika 39).

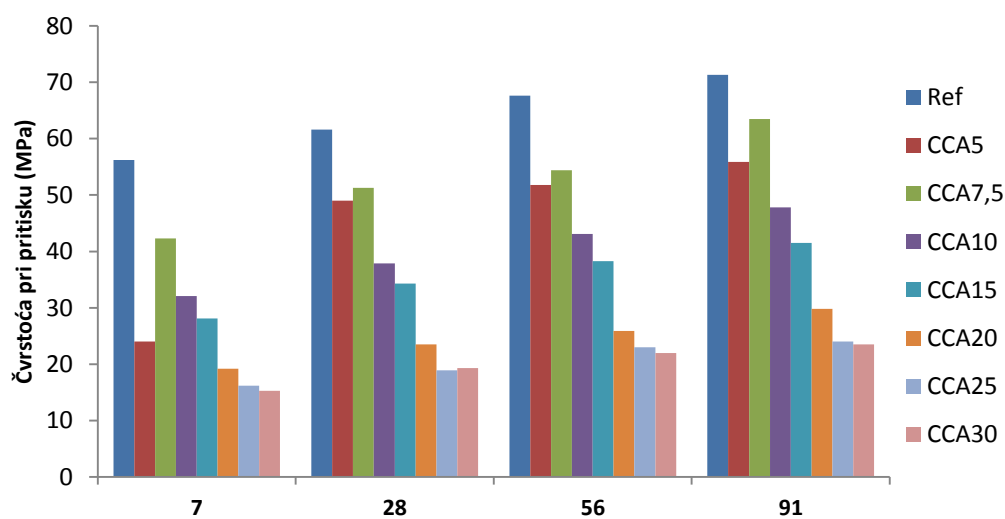


Slika 39 - Čvrstoća pri pritisku betona sa CCA pepelom i referentnog betona pri različitim procentima zamene, do starosti od 50 dana

Slično istraživanje su sprovedi A. Augustine i T. Michael [39]. Oni su ispitivali mehaničke karakteristike betona sa pepelom od oklaska, pri čemu je sadržaj pepela variran od 5-25% mase cementa. Pri starosti od 28 dana, sa porastom udjela biopepela, čvrstoća betona se smanjila u odnosu na referentni beton u opsegu 5% (pri zamjeni cementa sa 5% biopepela) do 44% (pri zamjeni 25%). Sličan trend je uočen i sa aspekta čvrstoće pri savijanju. Pri zamjeni 5% došlo je do smanjenja čvrstoće za 7,5%, a pri zamjeni od 25% smanjenje je bilo 47%. Zaključeno je da je optimalna količina biopepela 10%, iznad koje dolazi do većeg pada mehaničkih karakteristika betona pri ovoj starosti.

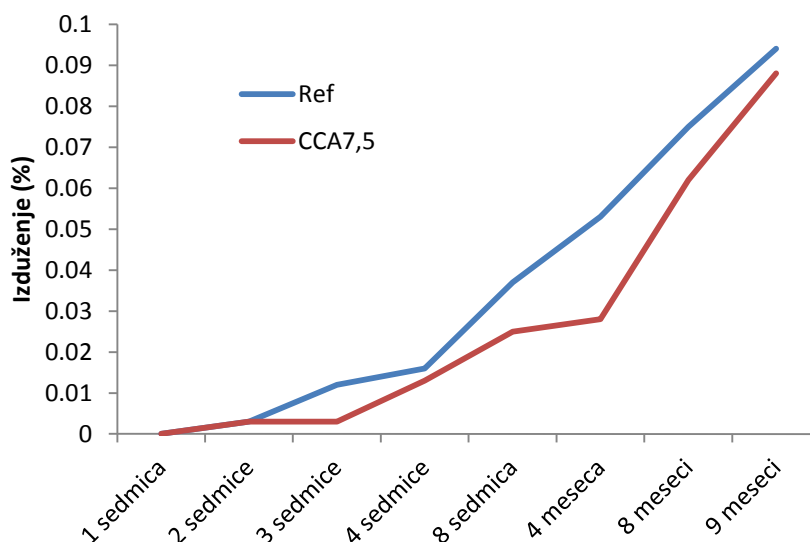
D.A. Adesanya i A.A. Raheem [41] su ispitivali trajnosna svojstva betona sa CCA pepelom: upijanje vode i otpornost na agresivno dejstvo kiselina: HCl i H₂SO₄ očvrsljih kompozita pri starosti od 28 dana. Procenat zamjene cementa pepelom je variran do 25%, a vodovezivni odnos je bio u rasponu 0,26 do 0,29. Generalno, primjena CCA pepela se pokazala odlično sa aspekta svih ispitivanih svojstava. Sa aspekta upijanja vode, beton CCA10 je imao najmanje upijanje vode, a sa aspekta otpornosti na dejstvo kiselina, betoni sa CCA pepelom u količini do 15% su imali 50% i 40% manji gubitak mase pri dejstvu HCl i H₂SO₄, respektivno, u odnosu na gubitak mase referentnog betona.

Grupa autora John Kamau i ostali [43] su ispitivali mehanička svojstva betona sa CCA pepelom i otpornost istih na dejstvo sulfata pri starostima do 90 dana. Variran je sadržaj pepela do 30% mase cementa, ciljana je marka betona C32/40, a vodovezivni odnos je zadržan na 0,5. Ispitane su čvrstoća pri pritisku, čvrstoća na zatezanje cijepanjem i izduženje uzoraka izlaganih dejstvu rastvora Na₂SO₄, MgSO₄ i pomješanom rastvoru. Pri procentima zamjene cementa do 15%, pri starosti od 90 dana, postignuta je zahtjevana marka betona (Slika 40). Među ispitanim vrstama betona sa CCA pepelom, beton sa CCA15 je imao najveću čvrstoću pri pritisku, pa je ova vrsta betona podvrgnuta ispitivanju otpornosti na dejstvo sulfata.

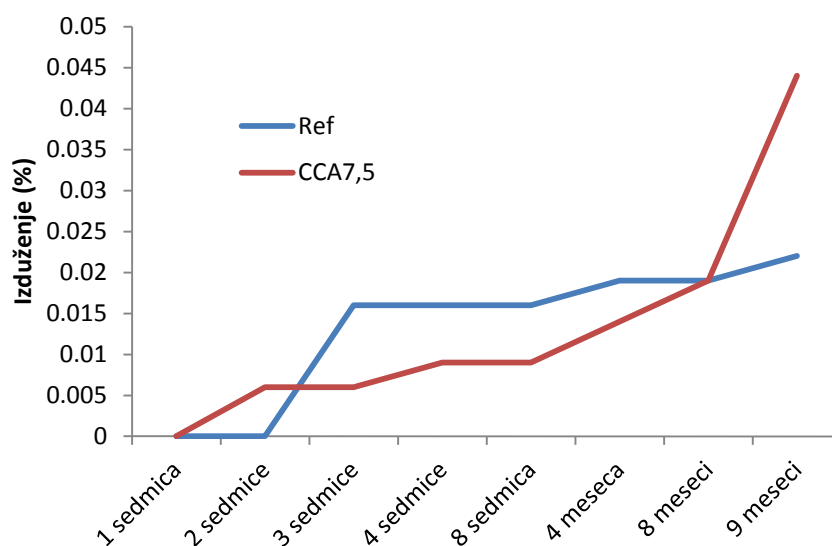


Slika 40 - Čvrstoća pri pritisku betona sa CCA pepelom i referentnog betona pri različitim procentima zamene, do starosti od 90 dana

Sa aspekta čvrstoće na zatezanje cijepanjem, sa porastom procenta zamjene cementa pepelom, vrijednost čvrstoće opada. Izduženje uzoraka betona CCA15 je, pri starosti do 9 mjeseci, bilo manje od referentnog betona u rastvoru Na_2SO_4 (Slika 41) i mješovitom rastvoru sulfata, ali veće u rastvoru MgSO_4 (Slika 42). Poboljšana otpornost na dejstvo sulfata je rezultat pucolanske reakcije, zgušnjavanja strukture pri 'konzumaciji' slobodnog $\text{Ca}(\text{OH})_2$, te filer efekta finih čestica CCA pepela. Dodatno, rastvara se i troši mineral C_3A , smanjuje se i ukupna količina formiranog gipsa i, posledično, ekspanzija pri dejstvu Na_2SO_4 .



Slika 41 - Izduženje pri dejstvu Na_2SO_4 , do starosti od 9 meseci



Slika 42 - Izduženje pri dejstvu MgSO_4 , do starosti od 9 meseci

Na osnovu pregleda literature i analize rezultata sprovedenih istraživanja u kojima je korišten pepeo kukuruznog oklaska, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Pepeo kukuruznog oklaska sadrži više od 65% SiO_2 , a kumulativno sa Al_2O_3 više od 70%, tako da se može koristiti kao materijal sa pucolanskim svojstvima,
- Optimalan procenat zamjene cementa u malterima i betonima CCA pepelom je, na osnovu većine sprovedenih istraživanja, limitiran na 10% i pri ovom procentu ne dolazi do većeg pada mehaničkih karakteristika cementnih kompozita. Usljed pucolanske reakcije i usporene hidratacije pepela, prirast čvrstoće dolazi do izražaja pri kasnijim starostima.
- Usljed guste strukture i filer efekta, CCA pepeo se pokazao kao povoljan za otpornost na agresivna dejstva, kao što su sulfati, hloridi i dr., što dalje omogućava primjenu istog za projektovanje cementnih kompozita dobrih trajnosnih svojstava.

1.4. Zaključak

Iz datog pregleda literature može se zaključiti da se pepeo, nastao sagorjevanjem biomase, može uspješno koristiti pri projektovanju i spravljanju malterskih i betonskih mješavina, kao zamjena dijela cementa, do određenih procenata. Glavni razlog, koji opravdava mogućnost ove primene, leži u hemijskom sastavu biopepela. Naime, biopepeo u sastavu, redovno, sadrži velike količine reaktivnog SiO_2 i Al_2O_3 i uz prisustvo vlage može hemijski reagovati sa kalcijum hidroksidom pri uobičajenim temperaturama i formirati produkte koji imaju pucolanska svojstva.

Postoji velika raznolikost u ostvarenim rezultatima sa aspekta uticaja količine zamjene cementa pepelom biomase na ispitivana svojstva cementnih kompozita. U početnoj fazi, pri starosti do 28 dana, sa povećanjem udjela biopepela u malteru/betonu, opadaju i mehaničke karakteristike. Zahvaljujući pucolanskim karakteristikama i naknadnom formiranju C-S-H produkata, pri hidrataciji biopepela, s vremenom dolazi do zgušnjavanja strukture i mehaničke karakteristike maltera/betona sa biopepelom postaju uporedive sa karakteristikama referentnih cementnih kompozita. S druge strane, kao posledica filer-efekta (čestice raznih vrsta biopepela su sitnije od čestica cementa), dolazi do stvaranja gušće, kompaktnije strukture, što pozitivno utiče na propustljivost maltera/betona i trajnosna svojstva istih.

Na osnovu uporednih analiza prikazanih istraživanja, kao i pregleda šire literature iz ove oblasti, može se zaključiti da su predmet istraživanja najčešće bili betoni normalnih čvrstoća i, izuzetno, betoni visokih performansi, u kojima je kao vezivo korišten pepeo nastao sagorjevanjem biomase (dominantno pepeo pirinčane ljuske i pepeo kukuruznog oklaska) u procentima zamjene cementa do 30%.

Kao posledica različitih osnovnih parametara (receptura mješavina, uslovi sagorjevanja pepela, uslovi njege, metodologija ispitivanja, oblik i dimenzije uzoraka...) i uslova u kojima su prikazana eksperimentalna istraživanja izvedena, postoje razlike u zaključcima do kojih su autori došli. Najčešće, za spravljanje betona je upotrebljivan čist portland cement, ali postoji značajan broj radova u kojima nije navedena vrsta cementa.

Kao agregat, dominantno je korišten prirodni agregat, a korištene su i različite vrste lakih agregata pri projektovanju i spravljanju lakih betona.

Međutim, bez obzira na razlike i velika rasipanja rezultata prikazanih u prethodnom dijelu ovog poglavlja, može se sa dovoljnom pouzdanošću zaključiti da se primjenom biopepela mogu dobiti konstrukcijski malteri i betoni sa svojstvima vrlo uporedivim sa običnim kompozitima na bazi portland cementa. U nekoliko sprovedenih istraživanja je, pri manjim procentima zamjene cementa pepelom postignuta izuzetno visoka marka betona, koja odgovara betonima visokih performansi.

Uvažavajući rezultate i zaključke do kojih su došli drugi autori, sadržaj eksperimentalnog dijela predmetne disertacije je koncipiran tako da definiše mogućnost primjene domaćih otpadnih materijala, nastalih sagorjevanjem žetvenih ostataka na području AP Vojvodine, kao mineralnog dodatka u cementnim kompozitima, na osnovu ispitivanja i analize osnovnih fizičko-mehaničkih svojstava spravljenih cementnih kompozita.

Za istraživanje u okviru predmetne doktorske disertacije odabran je pepeo od pšenične slame, budući da je pšenična slama, kao biljna kultura, nakon kukuruza, najrasprostranjenija u Vojvodini, a pepeo nastao sagorjevanjem iste, dostupan u relativno velikim količinama. Pregledom literature, uočeno je da je sproveden relativno mali broj istraživanja, u kojima je analiziran uticaj zamjene cementa pepelom od pšenične slame, sa aspekta procesa projektovanja sastava betona i, posledično, fizičko-mehaničkih svojstava istih. Istraživanja vezana za primjenu pepela od sojine slame u cementnim kompozitima nisu pronađena. U našoj zemlji, ova istraživanja još uvek nisu rađena, tako da će se prvi put koristiti domaći otpadni materijali ove vrste pri spravljanju maltera i betona.

Pregledom literature, nisu pronađeni radovi u kojima je istovremeno korišten pepeo nastao sagorjevanjem biomase, kao zamjena za deo cementa i agregat od starog betona, kao zamjena za prirodni agregat.

Budući da su predmet doktorske disertacije EKO betoni, variranjem komponenti na opisan način postiže se sledeće:

- U susret principima održivog razvoja, supstitucijom cementa u malteru i betonu, sa pepelom nastalim sagorjevanjem biomase (pepeo koji sadrži Al, Ca, Fe, Mg, Na, P, Si), kao CO₂ neutralnim gorivom, smanjio bi se negativan uticaj cementne industrije na globalno zagrevanje redukovanjem globalne emisije CO₂,
- Supstitucijom prirodnog agregata recikliranim agregatom, djelimično bi se ograničio trend prekomjerne potrošnje neobnovljivih resursa prirodnih agregata i riješio problem deponovanja enormnih količina građevinskog otpada koji potiče od rušenja starih objekata.

V EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

1. UVOD

Analizom dostupne literature iz oblasti primjene biopepela kao mineralnog dodatka, uočeno je da postoji relativno mali istraživanja u kojima su primjenjeni pepeo pšenične i pepeo sojine slame. Pepeo pšenične slame se uglavnom koristio pri projektovanju i spravljanju pasti i maltera, a pepeo sojine slame nije istraživana sa aspekta ove primjene. Uobičajeni maksimalni procenat supstitucije cementa je u literaturnim podacima 30%, a svojstva očvrslih kompozita su rijetko ispitivana pri većim starostima, u kojima dolazi do izražaja pucolanska aktivnost biopepela. Uporedna istraživanja u kojima se dio cementa supstituiše sa biopepelom, a prirodni agregat agregatom od starog betona, nisu pronađena.

Cilj istraživanja je da se na osnovu eksperimentalnih rezultata i njihove analize zaključi da li betoni, u kojima se dio cementa supstituiše sa biopepelom u procentima zamjene i do 50% (kako bi se predmetni beton mogao nazvati EKO-beton), a krupan prirodni agregat supstituiše agregatom od "starog" betona, imaju ista ili uporediva fizička i mehanička svojstva kao referentni cementni betoni sa prirodnim agregatom. Osim toga, istraživanjem je obuhvaćeno i ispitivanje uticaja različitih vrsta sitnozrnog agregata na fizička i mehanička svojstva cementnih maltera u kojima se dio cementa supstituiše biopepelom do 50%.

Rezultati istraživanja i izvedeni zaključci biće podloga za definisanje preporuka za održivo korišćenje biopepela u građevinskim proizvodima. Takođe, rezultati istraživanja će omogućiti da se definišu mogućnosti ili ograničenja za primjenu ovih vrsta maltera i betona.

Veći dio ispitivanja je obavljen u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala Departmana za građevinarstvo i geodeziju, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Ispitivanje hemijskog sastava pojedinih materijala urađeno je u Institutu IMS u Beogradu. Testovi izluživanja teških metala su obavljani u Institutu zaštite na radu u Novom Sadu. Za potrebe ispitivanja mikrostrukture materijala, dio ispitivanja je urađen u Univerzitetskom centru za elektronsku mikroskopiju-Novu Sad i Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu.

Ispitivanja su obavljena u periodu: januar 2018 - mart 2019. godine.

2. PROGRAM EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA

U cilju blagovremenog planiranja svih aktivnosti predviđenih planom istraživanja i kontrole njegove realizacije, sastavljen je detaljan program ispitivanja. Ovaj program je obuhvatio:

- izbor komponentnih materijala,
- priprema i nabavka komponentnih materijala,
- ispitivanje kvaliteta komponentnih materijala, uključujući i kategorizaciju biopepela kao mineralnog dodatka,

- određivanje sastava malterskih mješavina,
- određivanje sastava betonskih mješavina,
- izbor svojstava maltera i betona pomoću kojih će se ocjenjivati moguća upotreba biopepela kao mineralnog dodatka,
- definisanje oblika, dimenzija i broja uzoraka za ispitivanje maltera i betona,
- izradu dinamičkog plana ispitivanja odabranih svojstava maltera i betona.

Za izradu malterskih mješavina odabrani su sledeći komponentni materijali:

- Portland cement CEM I 42.5R ("Lafarge", Beočinska fabrika cementa).
- Pepeo dobijen sagorjevanjem pšenične slame – MP ("Mitrosrem", Sremska Mitrovica).
- Pepeo dobijen sagorjevanjem mješavine pšenične i sojine slame - SP ("Soja Protein", Bečej).
- Standardni kvarcni pjesak (CEN).
- Sitan agregat (riječni agregat, rijeka Drina, 0/4mm).
- Sitan agregat za malterisanje (Dunavac).
- Superplastifikator (tip "Sika ViscoCrete 3070", proizvođač "Sika" Švajcarska).
- Dejonizovana voda.

U okviru malterskih mješavina varirane su tri vrste sitnozrnog agregata, pri čemu je standardni kvarcni pjesak posmatran kao referentni agregat. Variran je i nivo supstitucije cementa sa dvije različite vrste biopepela do 50%. Vrsta biopepela koja se pokazala bolje sa aspekta dobijenih rezultata ispitivanja fizičkih i mehaničkih svojstava maltera (pepeo pšenične slame), primjenjena je dalje za projektovanje, spravljanje i ispitivanje betona.

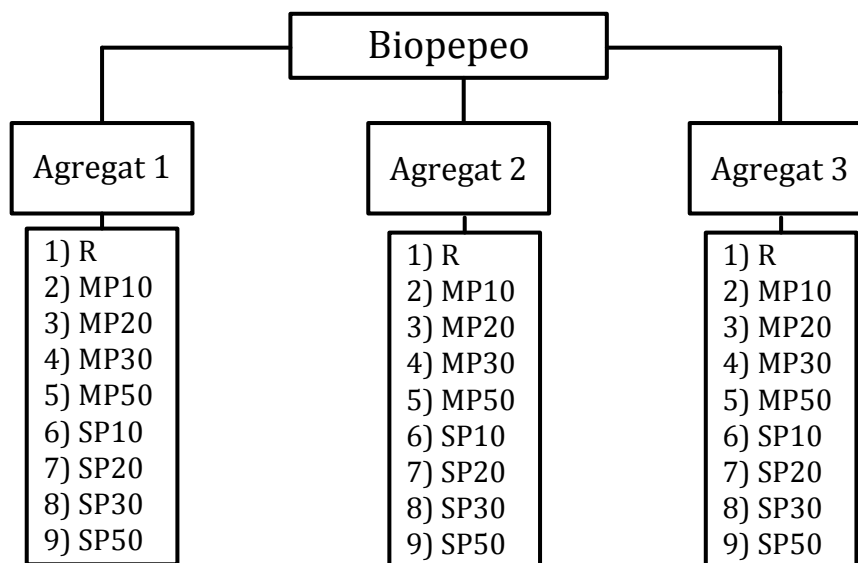
U skladu sa planom istraživanja, analizirana su svojstva malterskih mješavina u kojima se variraju sledeći parametri (Tabela 12):

- vrsta biopepela kao mineralnog dodatka, koja se koristi kao zamjena za dio cementa:
 - pepeo pšenične slame i
 - pepeo mješavine pšenične i sojine slame.
- količina biopepela kao zamjena za dio cementa (po masi): 10-50%,
- vrsta sitnozrnog agregata:
 - standardni kvarcni pjesak (CEN) – tip agregata 1,
 - frakcionisani agregat riječnog porjekla – frakcija 0/4mm – tip agregata 2,
 - pjesak za malterisanje riječnog porjekla – tip agregata 3.

Tabela 12. Pregled malterskih mešavina po vrsti agregata

PROCENAT ZAMJENE CEMENTA BIOPEPELOM									
	0%	10%	20%	30%	50%	10%	20%	30%	50%
Mješavina	C	MP10	MP20	MP30	MP50	SP10	SP20	SP30	SP50

Variranjem sastava mješavina na opisan način, napravljeno je 9 različitih malterskih mešavina za svaku vrstu sitnozrnog agregata, što čini ukupno 27 malterskih mješavina. Način formiranja opisanih malterskih mješavina šematski je predstavljen na Slika 43.



Slika 43 – Način formiranja malterskih mješavina

Sastav malterskih mješavina odgovara sastavu standardnog cementnog maltera, u skladu sa EN 196-1:

- odnos mase agregata i mase veziva je 3:1;
- vodovezivni faktor 0,5 (izuzetak su malterske mješavine spravljene sa agregatom tipa 3, gdje su mješavine bile suve i neugradljive, pa je vodovezivni faktor povećan na 0,7);
- količina superplastifikatora je zasnovana na potrebi da se postigne zahtjevana konzistencija (0,1-0,2% mase veziva).

Od svake mješavine napravljeni su uzorci na kojima su ispitana sledeća svojstva:

- konzistencija (mjera pokretljivosti na potresnom stolu), prema SRPS EN 1015-3 [48],
- čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28, 56 i 90 dana, prema EN 196-1 [49],
- kapilarno upijanje vode, prema ASTM C1585 [50].

Uzorci su oblika standardnih prizmi, dimenzija 40x40x160mm. Uzorci za ispitivanje čvrstoće pri pritisku su njegovani u običnoj vodi do dana ispitivanja.

Za sve betonske mješavine odabran je prirodni - riječni agregat kao sitan, a kao krupan, prirodni - riječni i agregat od starog betona. Agregat od starog betona je dobijen drobljenjem betonskih kocki nepoznatog sastava i porjekla. Ovakvim izborom krupnog agregata utvrdio bi se uticaj starog cementnog kamena na fizičko-mehanička svojstva betona i njegovu trajnost.

Za izradu betonskih mješavina odabrani su sledeći komponentni materijali:

- Portland cement CEM I 42.5R ("Lafarge", Beočinska fabrika cementa).
- Pepeo dobijen sagorjevanjem pšenične slame - MP ("Mitrosrem", Sremska Mitrovica).
- Sitan agregat (riječni agregat, rijeka Drina, 0/4mm).
- Krupan agregat (riječni agregat, rijeka Drina i reciklirani beton, 4/8 i 8/16mm).
- Superplastifikator (tip "Sika ViscoCrete 3070", proizvođač "Sika" Švajcarska).
- Voda iz gradskog vodovoda.

Variranje udjela biopepela i vrste agregata u mješavinama omogućiće definisanje optimalnog sastava novih mješavina sa aspekta fizičkih i mehaničkih svojstava očvrslih cementnih kompozita.

U skladu sa planom istraživanja, analiziraće se svojstva sledećih grupa betonskih mješavina:

- Grupa A - mješavine spravljene sa cementom kao jedinim vezivom;
- Grupa B - mješavine spravljene sa cementom i biopepelom kao zamjenom 10% cementa;
- Grupa C - mješavine spravljene sa cementom i biopepelom kao zamjenom 20% cementa;
- Grupa D - mješavine spravljene sa cementom i biopepelom kao zamjenom 50% cementa.

U okviru svake grupe variraće se nivo supstitucije prirodnog krupnog agregata agregatom od starog betona (0%, 50% i 100%). Variranjem sastava mješavina na opisan način, planirano je da se napravi 12 različitih betonskih mješavina. Način formiranja opisanih mješavina šematski je predstavljen u Tabela 13.

Tabela 13. Način formiranja betonskih mješavina

		Učešće recikliranog agregata		
		0%	50%	100%
Učešće biopepela	0%	A0	A50	A100
	10%	B0	B50	B100
	20%	C0	C50	C100
	50%	D0	D50	D100

Predviđeno je da se od svake mješavine naprave uzorci na kojima će se ispitati sledeća svojstva:

- čvrstoća pri pritisku pri starosti betona od 28, 56 i 90 dana, u skladu sa SRPS EN 12390-3:2009 [51];
- skupljanje pri sušenju, prema UNI 11307 [52];
- kapilarno upijanje vode, u skladu sa ASTM C1585 [50];
- vodonepropustljivost betona (upijanje vode pod pritiskom), prema SRPS EN 12390-8 [53];
- otpornost betona na habanje, prema SRPS EN 1338 [54];
- dinamički modul elastičnosti, prema ASTM E1876 – 01 [55];
- čvrstoća na savijanje betona, prema SRPS EN 12390-5 [56].

Pored toga, planirana su standardna ispitivanja svežeg betona:

- zapreminska masa u svežem stanju,
- konzistencija betona.

Na očvrslim kompozitima (malteri i betoni), kao i na biopepelima, uradiće se.

- analiza mikrostrukture: FTIR, XRD,
- test izluživanja teških metala.

Variranjem navedenih parametara će biti izrađeno 27 receptura za maltere i 12 receptura za betone. Ukupan broj uzoraka koji će biti ispitan je 243 za maltere i 178 za betone, a za njihovu izradu predviđeno je spravljanje 0,062m³ različitih vrsta maltera i 0,56m³ različitih vrsta betona.

U Tabela 14 dat je pregled broja uzoraka i količina materijala potrebnih za maltere. Potreban broj i dimenzije uzoraka za nabrojana ispitivanja određen je prema odgovarajućim standardima. Uzorci su oblika prizme dimenzija 4x4x16cm.

Tabela 14. Specifikacija uzoraka za malterske mješavine

Ispitivano svojstvo	Oblik i dimenzije uzoraka	Broj uzoraka	Količina materijala
Čvrstoća pri pritisku	Prizme 4x4x16 cm		$243 \times 0,000256 = 0,062 \text{m}^3$
Kapilarno upijanje vode	Prizme 4x4x16 cm	$27 \times 9 = 243$	
Ukupno:		243	0,062 m³

U Tabela 15 dat je pregled broja uzoraka i količina betona potrebnih za betone. Uzorci su oblika kocke ivice 15cm, prizme dimenzija 10x10x50cm i cilindri dimenzija $\phi 100\text{mm}$, L=50mm. Potreban broj i dimenzije uzoraka za nabrojana ispitivanja određen je prema odgovarajućim standardima.

Tabela 15. Specifikacija uzoraka za betonske mješavine

Ispitivano svojstvo	Oblik i dimenzije uzoraka	Broj uzoraka	Količina betona
Čvrstoća pri pritisku	Kocka ivice 15cm	$4 \times 3 \times 9 = 108$	$(9 \times 12) \times 0,003375 = 0,3645 \text{m}^3$
Skupljanje pri sušenju	Prizme dimenzija 10x10x50cm	$12 \times 3 = 36$	$12 \times 3 \times 0,005 = 0,18 \text{m}^3$
Kapilarno upijanje	Cilindri, $\phi 100\text{mm}$, L=50mm	$12 \times 3 = 36$	$12 \times 3 \times 0,000393 = 0,014148 \text{m}^3$
Ukupno:		178	0,56m³

3. PODACI O KOMPONENTNIM MATERIJALIMA

3.1. Cement

Za eksperimentalno istraživanje odabran je Portland cement oznake PC 42,5R (CEM I 42,5R), porjekla – fabrika cementa "Lafarge", Beočinska fabrika cementa. Cement ispunjava uslove kvaliteta prema Pravilniku o kvalitetu cementa [56]. U Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala provjerena su osnovna fizička i mehanička svojstva cementa prema standardima SRPS EN 196-1 [49], SRPS EN 196-3 [58] i SRPS EN 196-6 [59]. Rezultati ispitivanja dati su u Prilogu 1. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je

da cement zadovoljava propisana fizičko-hemijska i mehanička svojstva definisana u Pravilniku o kvalitetu cementa i SRPS EN 197-1 [60].

Osim standardnih ispitivanja koja su navedena, određen je i hemijsko-mineraloški sastav, a rezultati su dati u Prilogu 1.

3.2. Agregat

Granulometrijski sastav frakcija i fizička svojstva riječnog i recikliranog agregata ispitana su prema standardima SRPS EN 1097-3 [61], SRPS EN 1097-6 [62] i SRPS EN 933-1 [63].

Pri projektovanju i spravljanju malterskih mješavina varirane su tri vrste sitnog agregata, pa su, radi komparativne analize, određeni i njihovi granulometrijski sastavi, specifična masa i moduli finoće.

3.2.1. Riječni agregat

Riječni agregat upotrebljen u ovom istraživanju je porjeklom iz rijeke Drine. Pran je i separisan u tri frakcije 0/4mm, 4/8mm i 8/16mm (Slika 44). Separacija sa koje je agregat preuzet je "Best izgradnja" Novi Sad.



Frakcija 0/4



Frakcija 4/8



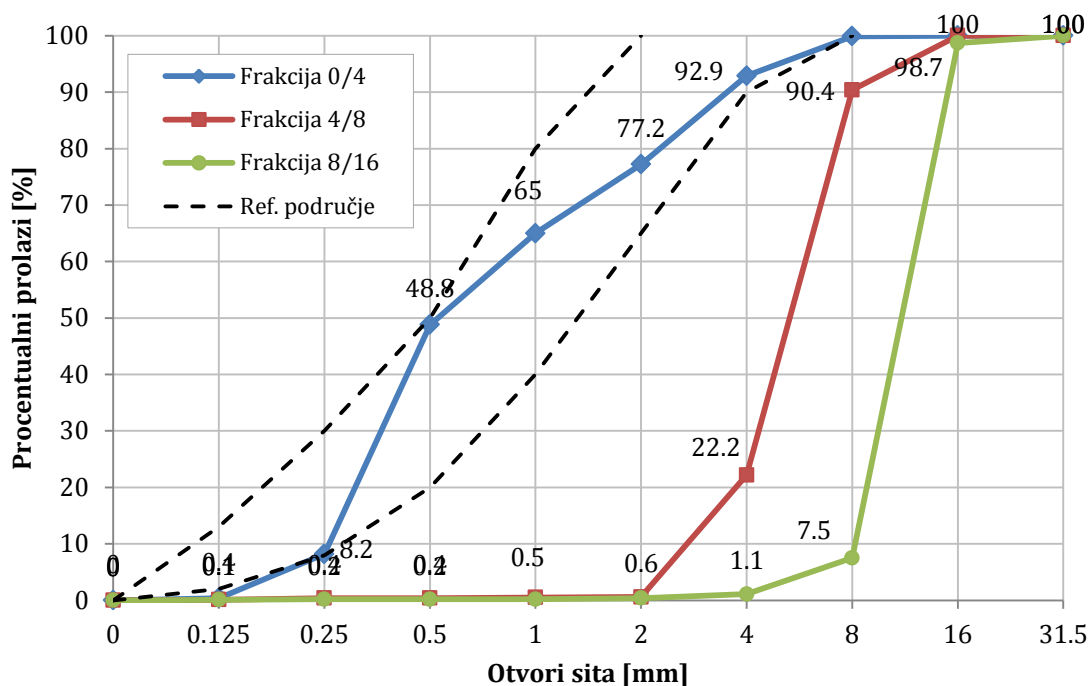
Frakcija 8/16

Slika 44 – Izgled frakcija riječnog agregata

U Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala provjerena su sledeća svojstva riječnog gregata:

- Granulometrijski sastav frakcija agregata (SRPS EN 933-1) [64] i
- Oblik zrna-Indeks oblika (SRPS EN 933-4) [64].

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava dati su Prilogu 2, a granulometrijske krive su prikazane na Slika 45.



Slika 45 – Granulometrijske krive frakcija riječnog agregata

Agregat je pogodan za spravljanje betona ako je njegova granulometrijska kriva unutar referentnog područja (obilježeno crtkastim linijama).

Sitan agregat: Sa Slika 45 se vidi da da frakcija 0/4 ima nešto manji sadržaj zrna sitnijih od 0,125mm. Razlika u prolazima između dva susjedna sита ne prelazi dozvoljenu vrijednost ($\leq 45\%$). Modul finoće iznosi 2,88 i nalazi se u dozvoljenim granicama (2,3-3,6).

Krupan agregat: Frakcije 4/8 i 8/16 zadovoljavaju uslove kvaliteta u pogledu podmjerenih i nadmjerenih zrna.

Dio rezultata ispitivanja dat je u Tabela 16, radi lakšeg projektovanja sastava betona i analize rezultata eksperimentalnog dijela. U tabeli su, osim rezultata ispitivanja dati i standardi prema kojima je ispitivanje urađeno, kao i preporuke za granične vrijednosti prema EN 206.

Tabela 16 - Rezultati ispitivanja riječnog agregata

Svojstvo	Standard	Preporuka (prema EN 206)	Rezultat		
			0/4mm	4/8mm	8/16mm
Količina sitnih čestica [%]	EN 933-1 [64]	/	0,75	0	0
Oblik zrna	EN 933-4 [65]	$\leq SI_{55}$	/	9,1 (SI ₁₅)	10,8 (SI ₁₅)
Otpornost na drobljenje (LA)	EN 1097- 2 [65]	$\leq LA_{50}$	23,8 (LA ₂₅)	23,8 (LA ₂₅)	25,3 (LA ₃₀)
Zapreminska masa vodom zasićenog, površinski suvog uzorka [kg/m ³]	EN 1097- 6 [62]	/	2650	2650	2650
Upijanje vode [%]	EN 1097- 6 [62]	/	1,0	0,6	0,7

Na osnovu analize dobijenih rezultata, može se zaključiti da prirodni frakcionisani agregat zadovoljava zahtjevane kriterijume za ispitivana svojstva.

3.2.2. Reciklirani agregat

Reciklirani agregat je dobijen drobljenjem betonskih kocki, nepoznatog kvaliteta i porijekla. Separacija ovako dobijenog agregata urađena je u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala Departmana za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Za spravljanje betonskih mešavina izabrane su frakcije 4/8mm i 8/16mm (Slika 46).



Slika 46 - Frakcije recikliranog agregata (4/8mm i 8/16mm)

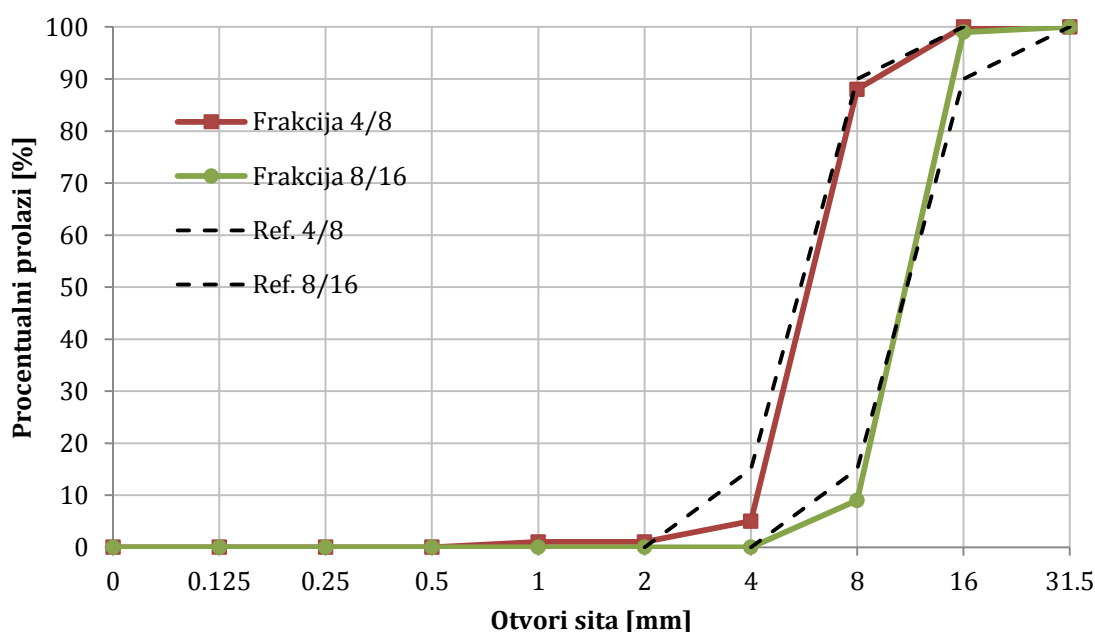
Na separisanom recikliranom agregatu ispitana su sledeća svojstva:

- Granulometrijski sastav frakcija agregata (SRPS EN 933-1) [63];

- Finoća mliva (SRPS EN 933-10) [63];
- Oblik zrna-Indeks oblika (SRPS EN 933-4) [64];
- Zapreminska masa i upijanje vode (SRPS EN 1097-6) [62].

Sva navedena ispitivanja urađena su u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala Departmana za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava frakcija recikliranog agregata dati su u Prilogu 2, a granulometrijske krive su prikazane na Slika 47.



Slika 47 – Granulometrijske krive frakcija recikliranog agregata

Krupan agregat: Frakcija 4/8 ima nešto veći sadržaj nadmjerjenih zrna (12%). Frakcija 8/16 ispunjava uslove u pogledu granulometrijskog sastava.

Rezultati ispitivanja odabranih fizičkih, mehaničkih i geometrijskih svojstava agregata od starog betona, dati su u Tabela 17, radi lakšeg projektovanja sastava betona i analize rezultata eksperimentalnog dijela. U tabeli su, osim rezultata ispitivanja dati i standardi prema kojima je ispitivanje urađeno kao i preporuke za granične vrijednosti prema EN 206.

Tabela 17 - Rezultati ispitivanja agregata od starog betona

Svojstvo	Standard	Preporuka (prema EN 206)	Rezultat	
			4/8mm	8/16mm
Količina sitnih čestica [%]	EN 933-1 [63]	/	0,03	0,04
Oblik zrna	EN 933-4 [64]	$\leq SI_{55}$	7,2 (SI ₁₅)	4,1 (SI ₁₅)
Otpornost na drobljenje (LA)	EN 1097-2 [65]	$\leq LA_{50}$	27,8 (LA ₃₀)	27,8 (LA ₃₀)
Uticaј na vrijeme početka vezivanja	EN 1744-6 [66]	$\leq A_{40}$	25min (A ₄₀)	25min (A ₄₀)
Zapreminska masa u suvom stanju [kg/m ³]	EN 1097-6 [62]	$\geq 2100 \text{ kg/m}^3$	2285	2285
Upijanje vode [%]	EN 1097-6 [62]	/	6,2	5,5

Pored navedenih svojstava, određena je i količina maltera vezana za prirodni agregat. Odabrana je metoda ratvaranja vezanog maltera pomoću 16% hlorovodonične kiseline [67]. Ispitivanjem je dobijeno da količina vezanog maltera iznosi 40%.

Na osnovu analize dobijenih rezultata može se zaključiti da agregat od starog betona zadovoljava zahtjevane uslove kvaliteta za ispitivana svojstava.

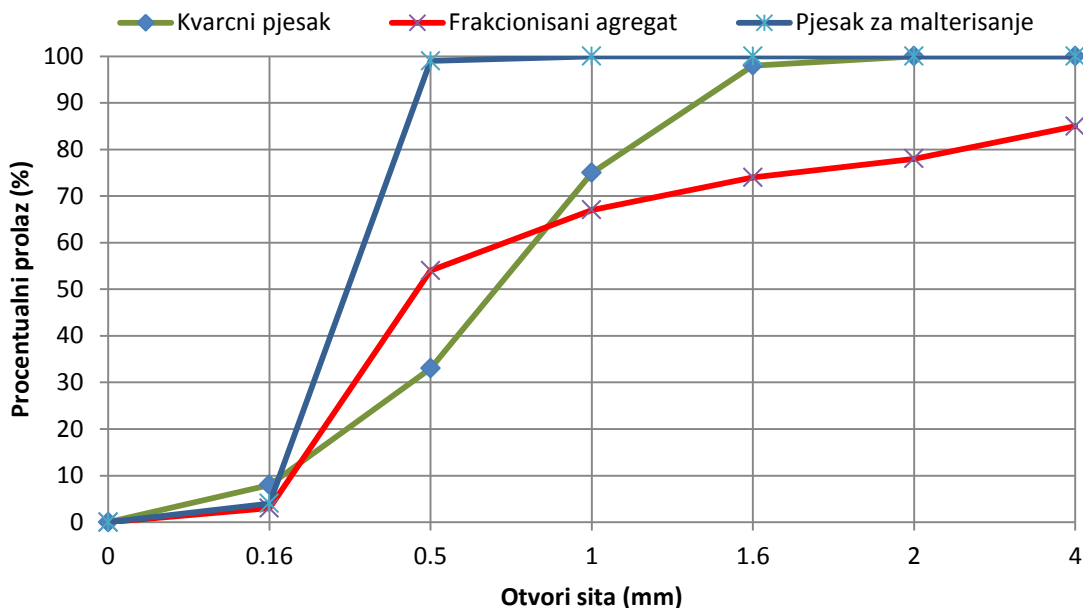
Prilikom određivanja sastava betonskih mješavina vodilo se računa o upijanju vode agregata od starog betona. Za određivanje ove količine vode (dodatna voda) korišćeni su rezultati upijanja vode agregata nakon 30 minuta koji su dati u Prilogu 2.

3.2.3. Sitnozrni agregati korišćeni za spravljanje malterskih mješavina

Pri projektovanju sastava malterskih mješavina varirane su sledeće vrste sitnozrnog agregata:

- standardni kvarcni pjesak (CEN) – tip agregata 1,
- frakcionisani agregat riječnog porjekla – frakcija 0/4mm – tip agregata 2,
- pjesak za malterisanje riječnog porjekla – tip agregata 3.

Granulometrijski sastav svih vrsta sitnozrnog agregata je određen metodom prosijavanja, u skladu sa SRPS EN 933-2 [67]. Rezultati su prikazani na Slika 48.

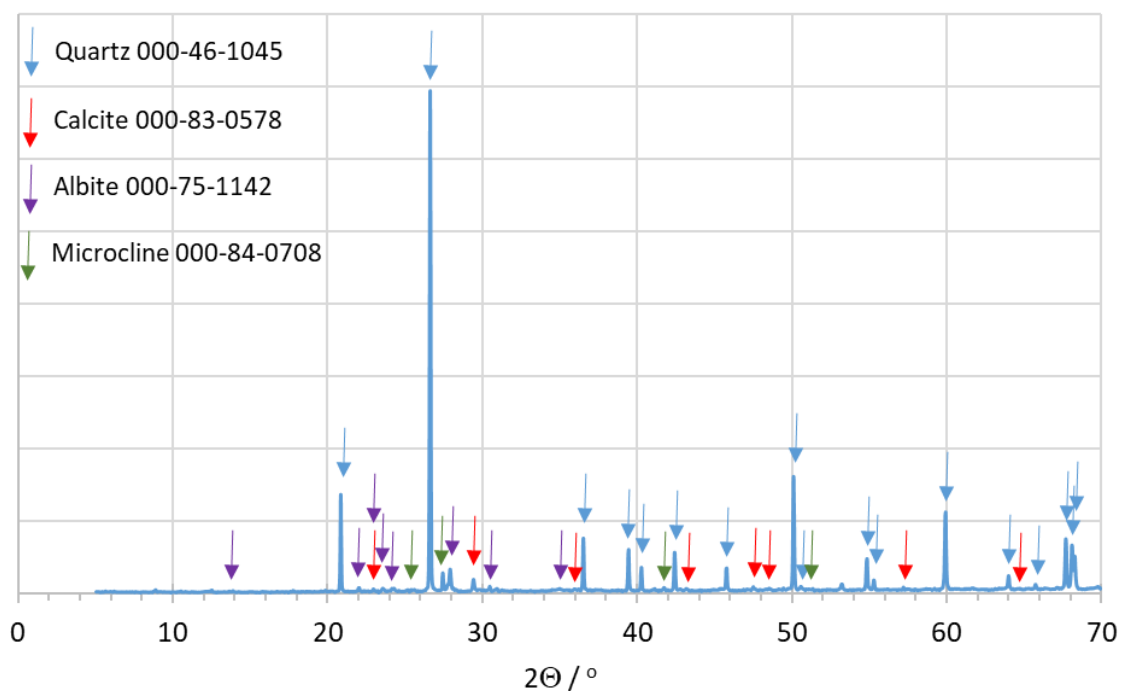


Slika 48 - Granulometrijski sastav sitnozrnog agregata

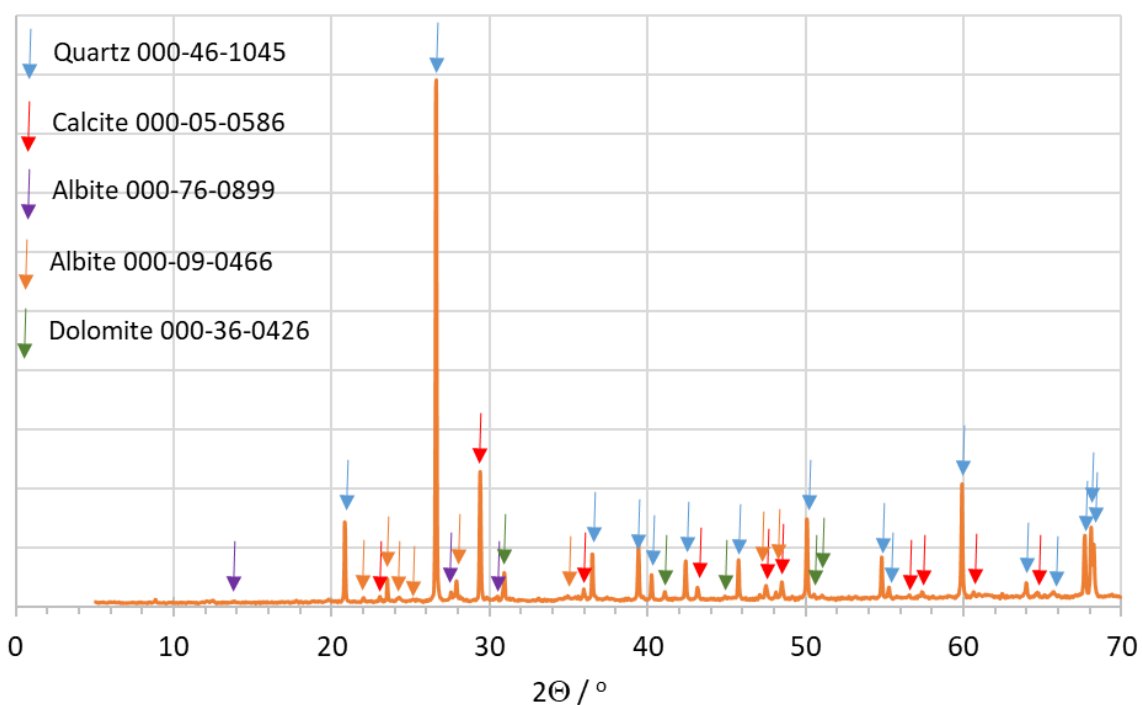
Može se uočiti da pjesak za malterisanje (tip agregata 3) ima čestice veće finoće, koje su koncentrisane u jednom intervalu sita (0,16-0,5mm) u poređenju sa druge dvije vrste agregata. Prema rezultatima, zaključeno je da tip agregata 1 (CEN standardni pjesak) ima najmanji sadržaj čestica sitnijih od 0,5mm. Ove razlike u finoći agregata imaju dominantan uticaj na ugradljivost malterskih mješavina.

Specifična masa i moduli finoće sitnozrnog agregata dati su u Prilogu 2.

Rezultati XRD analize pjeska za malterisanje riječnog porekla ukazuju da je kvarc dominantni mineral (82%). Pored toga, prisutni su albit, kalcit i mikroklin, Slika 49. Mineraloški sastav prirodnog frakcionisanog riječnog agregata pokazuje kvarc (76%) kao prevladavajući mineral. Pored kvarca, kalcita i albita, prisutan je i dolomit, **Error! Reference source not found.** Slika 50. Rezultati ispitivanja XRD analize su dati u Prilogu 2.



Slika 49 - XRD mineraloška analiza za pjesak za malterisanje riječnog porjekla



Slika 50 - XRD mineraloška analiza za frakcionisani agregat riječnog porjekla

3.3. Hemijski dodaci

Za poboljšanje ugradljivosti betona predviđena je upotreba superplastifikator "Sika ViscoCrete 3070" (modifikovani polikarboksilat). Osnovni podaci o primjenjenom superplastifikatoru prikazani su u Tabela 18.

Tabela 18. Osnovni podaci o primjenjenim superplastifikatorima

Vrsta superplastifikatora	Zapreminska masa [kg/m ³]	Sadržaj suve materije [%]	Uobičajeno doziranje (%m _c)
Sika ViscoCrete 3070	1090	30	0,6-1,2

3.4. Mineralni dodaci

Svojstva sledećih vrsta biopepela su analizirana u cilju utvrđivanja mogućnosti njihove primjene kao mineralnog dodatka u cementnim kompozitima:

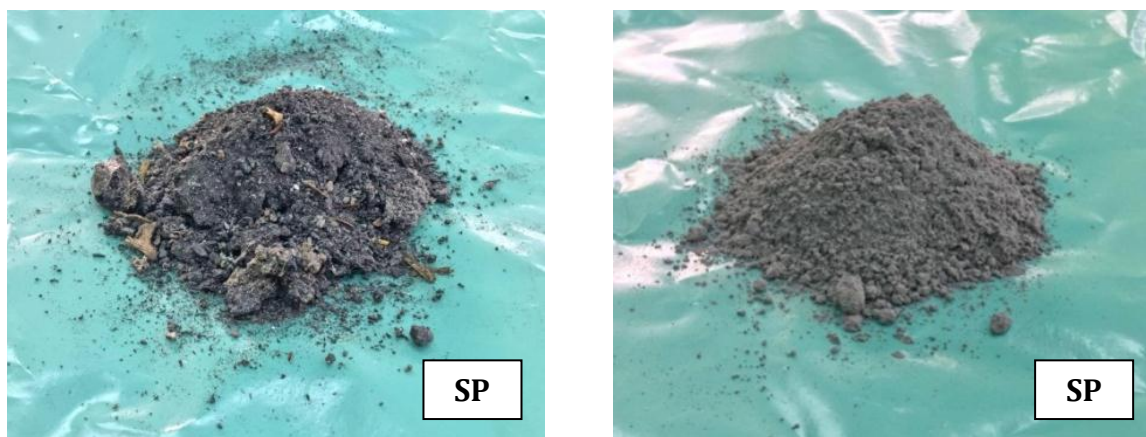
- Pepeo od pšenične slame (oznaka MP), porjeklo: pro "Mitrosrem", Sremska Mitrovica,
- Pepeo mješavine pšenične i sojine slame, u masenom odnosu 1:1, (oznaka SP), porjeklo: "Soja Protein", Bečej.

3.4.1. Priprema materijala

Obe vrste biopepela su grubo prosijane (kroz sito otvora 4mm) u cilju zadržavanja slame i ostalih krupnih nečistoća. Urađene su nekolike probe prosijavanja pepela kroz cijelu garnituru sita (sa ciljem dobijanja pepela veličine <0,25mm), ali zbog velike krupnoće čestica, prolaz kroz sito je bio manji od 10%. Prosijavanje kroz sito 0,25mm je bilo otežano, pa je za rješenje usvojeno usitnjavanje čestica - mljevenje do potrebne finoće, bez faze prosijavanja.

Usvojen je kriterijum da specifična površina biopepela bude dovoljno velika ($S \geq 4.000 \text{ cm}^2/\text{g}$). Izgledi biopepela prije prosijavanja i nakon mljevenja su dati na narednim Slikama. Pepeo suncokretove ljuske je imao dovoljno veliku specifičnu površinu, te nije dodatno usitnjavan mljevenjem. Izgledi različitih vrsta biopepela, prije i posle prosijavanja, prikazani su na Slika 51.





Slika 51 - Izgled mineralnih dodataka

3.4.2. Karakterizacija biopepela

Ispitivanje fizičkih svojstava biopepela

Nakon pripreme uzoraka biopepela, ispitana su fizička svojstva materijala: specifična masa, prema standardu SRPS B.B8.032 [69] i specifična površina po Blenu, u skladu sa SRPS EN 196-6 [59]. Rezultati su dati u Prilogu 3.

Ispitivanje finoće biopepela

Ispitivanje finoće je urađeno vazдушnim prosijavanjem materijala Air Jet metodom, u skladu sa procedurom datom u standardu EN 933-10, a kategorija finoće je ocjenjena prema EN 450-1. Rezultati su dati u Prilogu 3.

Ispitivanje hemijskog sastava biopepela

Ispitivanje hemijskog sastava biopepela, određivanje sadržaja reaktivnog SiO_2 , slobodnog CaO , rastvorljivih fosfata, hlorida i elemenata u tragovima, urađeno je u Institutu IMS u Beogradu, pomoću opreme: fluorescentni spektrometar, EDXRF 2000, u skladu sa standardima: EN 196-2 [70] i ISO 29581-2 [71]. Rezultati su dati u Prilogu 3.

Kako je za pucolansku reaktivnost materijala najvažniji sadržaj oksida SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 , a naročito sadržaj amorfnog (reaktivnog) SiO_2 , ovaj dio rezultata je prikazan i u Tabela 19.

Tabela 19. Sadržaj reaktivnog SiO_2 , slobodnog CaO , rastvornih fosfata i hlorida u biopepelima

Pepeo	MP	SP
Sadržaj reaktivnog SiO_2 (%)	67,1	41,0

Ispitivanje klase pucolanske aktivnosti biopepela

Pucolanska aktivnost je ispitana na uzorcima pripremljenim prema proceduri datoj u SRPS B.C1.017-2001 [72]. Klasa pucolanske aktivnosti je određena na osnovu 7-dnevne čvrstoće pri pritisku (fp) i čvrstoće na savijanje (fzs) standardnih malterskih prizmica (SRPS B.C1.018-2001, [73]). Malteri su pripremljeni od biopepela, hidratisanog kreča i standardnog peska (**Error! Reference source not found.**), sa slijedećim masenim odnosima: $m_{hk} : m_{bp} : m_p = 1 : 2 : 9$ i vodovezivnim odnosom 0,5 (gdje je: m_{hk} - masa hidratisanog kreča, m_{bp} - masa biopepela, m_p - masa CEN standardnog peska) - **Error! Reference source not found.** Nakon kompaktiranja, uzorci su hermetički upakovani (**Error! Reference source not found.**) i njegovani 24h na 20°C, a zatim 5 dana na 55°C. Nakon hlađenja uzoraka, u narednih 24h, do temperature od 20°C, ispitane su čvrstoća pri pritisku i čvrstoća na zatezanje pri savijanju.



Slika 52 - Komponentni materijali za ispitivanje pucolanske aktivnosti biopepela



Slika 53 - Standardne malterske prizmice za ispitivanje pucolanske aktivnosti biopepela



Slika 54 - Hermetički zatvoreni i izolovani uzorci za ispitivanje pucolanske aktivnosti biopepela

Rezultati ispitivanja klase pucolanske aktivnosti biopepela su dati u Prilogu 3, a postignute klase su date u Tabela 20.

Tabela 20. Klasa pucolanske aktivnosti biopepela

Oznaka	Vrsta biomase	$f_{zs,sr}$ [MPa]	$f_{zs,min}$ [MPa]	KLASA	$f_{p,sr}$ [MPa]	$f_{p,min}$ [MPa]	KLASA
MP	pšenična slama	3,4	3,3	10	11,0	10,3	10
SP	mješavina pšenične slame i sojine ljuske	3,6	3,3	10	9,3	8,75	5

Ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela

Indeks aktivnosti je ispitan na uzorcima pripremljenim prema standardu EN 450-1 [74]. Indeks aktivnosti se definiše kao odnos (u procentima) čvrstoće pri pritisku standardnog maltera, pripremljenog sa vazivom koje sadrži 75% portland cementa (CEM I) i 25% letećeg pepela, po masi, i čvrstoće pri pritisku standardnog cementnog maltera, pripremljenog sa 100% portland cementa (CEM I), koje su ispitane pri istim starostima (28 i 90 dana) - **Error! Reference source not found.** Priprema standardnih maltera i ispitivanje čvrstoće pri pritisku je urađena u skladu sa EN 196-1 – Slike 56-58.



Slika 55 - Komponentni materijali za ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela



Slika 56 - Spravljanje mješavine za ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela u laboratorijskoj mješalici



Slika 57 - Kompaktiranje uzotaka za ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela na potresnom stolu



Slika 58 - Njega uzoraka za ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela

Svi rezultati su dati u Prilogu 3, a sumirani rezultati su prikazani u Tabela 21.

Tabela 21. Indeks aktivnosti biopepela

	$f_{p,sr,28d}$ [MPa]	INDEX, 28d (%)	$f_{p,sr,90d}$ [MPa]	INDEX, 90d (%)
C	50,26	-	54,53	-
MP	52,39	104,24	58,96	108,12
SP	32,65	65,0	42,4	75,5

Poboljšanje indeksa aktivnosti biopepela povećanjem finoće mliva

Budući da biopepeli na bazi mješavine pšenične i sojine slame i sojine slame nisu zadovoljili kriterijum za indeks aktivnosti, u cilju njihove aktivacije povećanjem finoće mliva, urađeno je dodatno mljevenje pepela u laboratorijskom mlinu. Optimalan učinak mlina je bio takav da se dobio materijal relativno velike specifične površine, cca 15.000 cm²/g. Nakon ovog tretmana, na pepelima je ponovo ispitan indeks aktivnosti. Svi rezultati su dati u Prilogu 3, a sumirani rezultati su prikazani u Tabela 22.

Tabela 22. Indeks aktivnosti pepela mješavine pšenične i sojine slame bez i sa dodatnim mljevenjem

	$f_{p,sr,28d}$ [MPa]	INDEX, 28d (%)	$f_{p,sr,90d}$ [MPa]	INDEX, 90d (%)
SP	32.65	65,0	42.4	75.5
SP*	46.1	91.7	51.56	91.8

*Dodatno mljeven pepelo

Ispitivanje vremena vezivanja biopepela

Početak vremena vezivanja određen je na cementnoj pasti spravljennoj od 25% biopepela i 75% cementa (po masi) u skladu sa standardima EN 196-3 i EN 197-1. Prema ovim standardima, vrijeme koje prođe od spravljanja paste do početka vezivanja biopepela ne sme biti više od dvostruko veće od istog vremena referentne cementne paste spravljene sa 100% cementom (kriterijum 1). Rezultati su dati u Prilogu 3 (Tabela 27) i sumirani su u Tabela 23.

Tabela 23. Vrijeme vezivanja biopepela

	Početak vremena vezivanja (minute)	Kraj vremena vezivanja (minute)
C	120	155
MP	210	320
SP	350	420



Ispitivanje stalnosti zapremine biopepela

Stalnost zapremine je utvrđena na cementnoj pasti spravljennoj od 30% biopepela i 70% cementa (po masi) u skladu sa standardima EN 196-3 i EN 197-1. Prema ovim standardima, stalnost zapremine, izražena preko ekspanzija paste, ne sme biti veća od 10mm. Rezultati su dati u Prilogu 3 (Tabela 28), a sumirani su u Tabela 24.

Tabela 24. Stalnost zapremine biopepela

	Ekspanzija (mm)
C	0
MP	0,5
SP	1



3.5. Voda

Za spravljanje betona korišćena je voda iz gradskog vodovoda, koja se može upotrebiti bez prethodnih ispitivanja.

4. SASTAV MALTERSКИH MJEŠAVINA

Sastav maltera odgovara standardnom cementnom malteru, u skladu sa standardom EN196-1:

- odnos mase veziva i agregata je zadržan kao 1:3,
- ukupna masa veziva je 450g, a masa agregata 1350g,
- vodovezivni faktor je variran od 0,5 (za maltere u kojima su kao agregat korišteni agregati tip 1 i 2) do 0,7 (za maltere u kojima je kao agregat korišten agregat tip 3).

Količine komponentnih materijala za malterske mješavine, u kojima su kao agregat korišteni agregati tip 1 i 2, date su u Tabela 25, a za mješavine u kojima je kao agregat korišten agregat tip 3 - Tabela 26.

Tabela 25. Sastav malterskih mješavina pri primjeni agregata 1 i 2 (vodovezivni faktor 0,5)

Mortar type	C	MP10	MP20	MP30	MP50	SP10	SP20	SP30	SP50
Cement, g	450	405	360	315	225	405	360	315	225
MP pepeo, g	-	45	90	135	225	-	-	-	-
SP pepeo, g	-	-	-	-	-	45	90	135	225
Voda, g	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Agregat, g	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350

Tabela 26. Sastav malterskih mješavina pri primjeni agregata 3 (vodovezivni faktor 0,7)

Mortar type	C	MP10	MP20	MP30	MP50	SP10	SP20	SP30	SP50
Cement, g	450	405	360	315	225	405	360	315	225
MP pepeo, g	-	45	90	135	225	-	-	-	-
SP pepeo, g	-	-	-	-	-	45	90	135	225
Voda, g	315	315	315	315	315	315	315	315	315
Agregat, g	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350

Malteri su spravljeni u laboratorijskoj mešalici, po programiranom režimu mješanja, u skladu sa procedurom datom u standardu EN 196-1. Ugrađivanje u kalupe dimenzija

4x4x16 cm je urađeno na laboratorijskom vibro-stolu. Nakon toga su uzorci stavljeni u vlažnu komoru, sa vlažnošću $\varphi=90\%$, gdje su kondicionirani 24h, a potom izvađeni iz kalupa i njegovani u vodi $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ do dana ispitivanja.

Izuzetak od ove procedure je napravljen za malterske mješavine spravljene sa agregatom 3 – sitnozrni pjesak za malterisanje. Ovaj tip agregata se odlikuje većom finoćom, te čestice u većoj mjeri apsorbiraju i vežu vodu, u odnosu na druge vrste agregata. Pri spravljanju ove vrste maltera sa vodovezivnim faktorom 0.5, dobila se suva mješavina, koja se nije mogla ugraditi u kalupe. Čak i pri primjeni superplastifikatora u maksimalnoj preporučenoj količini ($1,2\%m_{cem}$), ugradljivost se nije popravila, te je za ovu vrstu maltera, vodovezivni faktor povećan na 0,7, a malteri su kondicionirani 48h u vlažnoj komori, nakon čega su izvađeni iz kalupa.

5. SASTAV BETONSKIH MJEŠAVINA

Sastav betonskih mješavina za sve vrste agregata određen je na osnovu sledećih uslova:

Ukušna količina veziva (cementa ili mješavine cementa i biopepela) iznosi $400\text{kg}/\text{m}^3$

Vodo-vezivni faktor iznosi 0,45.

Granulometrijski sastav mješavine frakcija agregata je u obliku kontinualne krive.

Dodatna količina vode je određena na osnovu vrijednosti upijanja recikliranog agregata.

Za kompaktiranje betona koristiće se laboratorijski vibro sto. Nakon ugradnje, svi uzorci betona su 24 časa njegovani u kalupima, prekriveni PVC folijom. Uzorci oblika kocke, za ispitivanje čvrstoće pri pritisku i upijanja vode pod pritiskom su zatim njegovani u vodi $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ do dana ispitivanja, a uzorci oblika cilindra za ispitivanje kapilarnog upijanja vode i prizme za ispitivanje skupljanja pri sušenju i dinamičkog modula elastičnosti njegovani u skladu sa relevantnim standardima.

Kombinacijom izabranih materijala i prethodno definisanih uslova, definisan je sastav 12 betonskih mješavina. U Tabela 27 date su oznake betonskih mješavina usvojene radi lakše uporedne analize.

Tabela 27. Sastav betonskih mešavina

Procenat zamjene prirodnog agregata agregatom od starog betona	Procenat zamjene cementa biopepelom			
	0%	10%	20%	50%
0%	C-A0	C-B0	C-C0	C-D0
50%	C-A50	C-B50	C-C50	C-D50
100%	C-A100	C-B100	C-C100	C-D100

5.1. Primjer određivanja sastava referentnog betona sa prirodnim riječnim agregatom A0

Sastav betonske mješavine A0 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I i riječnim, sitnim i krupnim agregatom) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

Količina cementa $m_c=400\text{kg/m}^3$;

Količina vode određena na osnovu usvojenog vodo-vezivnog faktora $m_v/m_{vez}=0,45$ iznosi $m_v=180\text{kg/m}^3$;

Učešća pojedinih frakcija agregata i granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata usvojeni da odgovaraju Fuller-ovoj krivi (Prilog 4). Učešća frakcija iznose:

- frakcija 0/4 - $X_{0/4}=48\%$;
- frakcija 4/8 - $X_{4/8}=23\%$;
- frakcija 8/16 - $X_{8/16}=29\%$.

U cilju postizanja optimalne ugradljivosti betonske mješavine, dodat je superplastifikator u količini od $0,6\%m_c$;

Količina agregata je dobijena iz sume apsolutnih zapremina materijala u 1m^3 betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha $\Delta p=2\%$.

$$\frac{400}{3100} + \frac{180}{1000} + \frac{m_a}{2650} + \frac{2,4}{1090} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1773 \text{ kg/m}^3$$

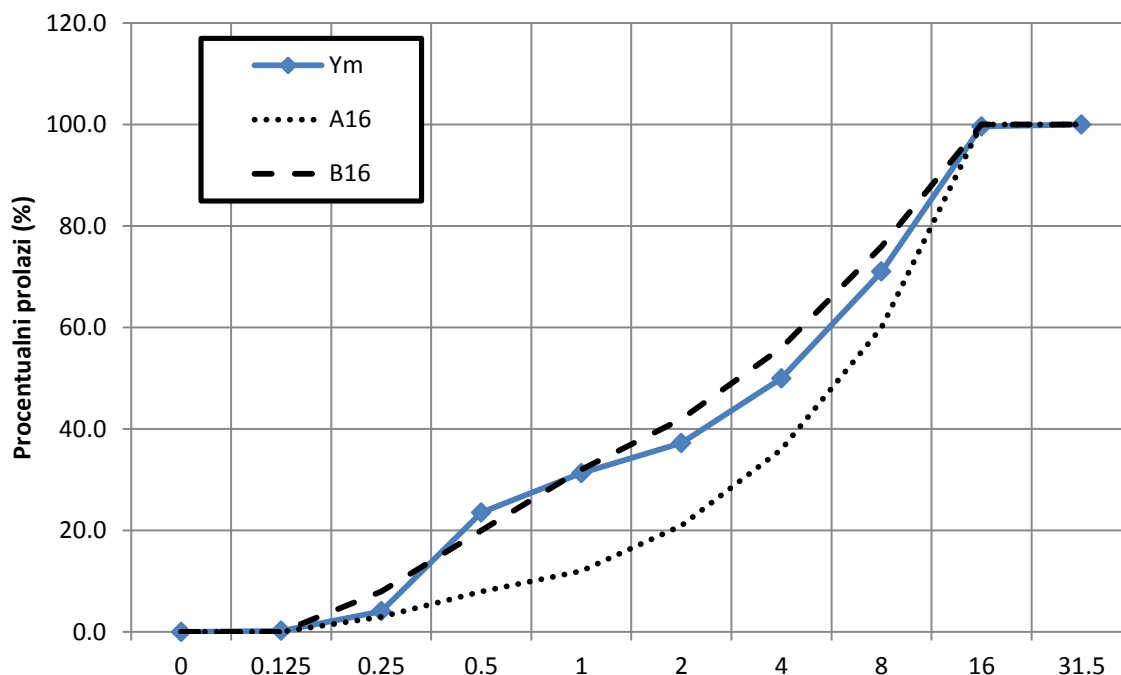
Količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:

- frakcija 0/4 - $m_{0/4}=850\text{kg}$;
- frakcija 4/8 - $m_{4/8}=412\text{kg}$;
- frakcija 8/16 - $m_{8/16}=513\text{kg}$

Zapreminska masa betona u svježem stanju iznosi:

$$\gamma_{b,sv} = 400 + 180 + 1773 + 2,4 = 2353\text{kg/m}^3$$

Na Sliku 59 prikazane su vrijednosti ordinata dobijene granulometrijske krive kao i referentnih krivi za povoljan granulometrijski sastav (A₁₆ i B₁₆).



Slika 59 - Granulometrijska kriva mješavine agregata i referentne krive

5.2. Primjer određivanja sastava betona sa mješavinom riječnog i recikliranog agregata A50

Sastav betonske mješavine A50 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I, riječnim sitnim i mješavinom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

Količina veziva (cementa) $m_{vez}=400\text{kg/m}^3$;

Količina vode određena na osnovu usvojenog vodo-vezivnog faktora $m_v/m_{vez}=0,45$ iznosi $m_v=180\text{kg/m}^3$;

Imajući u vidu veliko upijanje vode agregata od starog betona, ovom agregatu je, u cilju njegovog zasićenja, 24h prije spravljanja betona dodata količina vode koju agregat može da upije;

Količina hemijskog dodatka je smanjena sa 0,6% na 0,5% m_c , u odnosu na referentni beton A0;

Učešća pojedinih frakcija agregata i granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata usvojeni da odgovaraju Fuller-ovoj krivi (Prilog 5). Učešća frakcija iznose:

- frakcija 0/4 – $X_{0/4}=50\%$;

- frakcija 4/8 – $X_{4/8}=21\%$;
- frakcija 8/16 – $X_{8/16}=29\%$.

Količina agregata je dobijena iz sume apsolutnih zapremina materijala u 1m^3 betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha $\Delta p=2\%$;

$$\frac{400}{3100} + \frac{180}{1000} + \frac{0,5 \cdot m_a}{2650} + \frac{0,25 \cdot m_a}{2650} + \frac{0,25 \cdot m_a}{2285} + \frac{2,0}{1090} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1634 \text{ kg/m}^3$$

Količine pojedinačnih frakcija, u skladu sa usvojenim učešćima iznose:

Frakcija 0/4 – $m_{0/4}=817\text{kg}$

Frakcija 4/8 – $m_{4/8}=343\text{kg}$

- riječni agregat: $m_{4/8}=171,5\text{kg}$
- reciklirani agregat: $m_{4/8}=171,5\text{kg}$

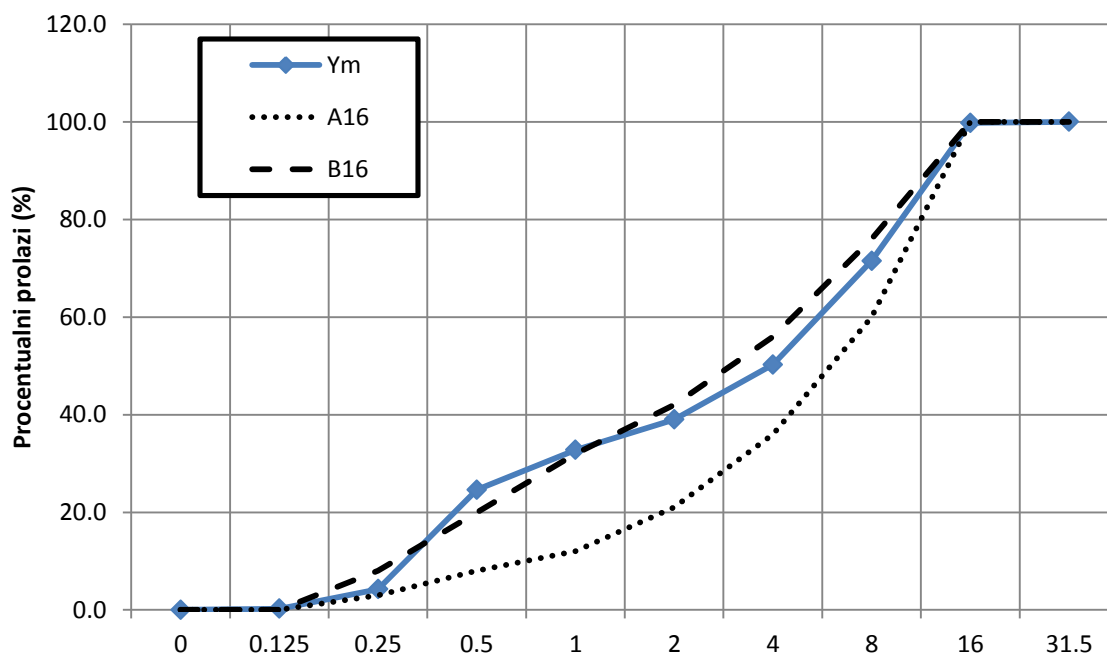
Frakcija 8/16 – $m_{8/16}=474\text{kg}$

- riječni agregat: $m_{4/8}=237\text{kg}$
- reciklirani agregat: $m_{4/8}=237\text{kg}$

Zapreminska masa betona u svježem stanju iznosi:

$$\gamma_{b,sv} = 400 + 180 + 1634 + 2 = 2217\text{kg/m}^3$$

Na Slika 60 prikazane su vrijednosti ordinata dobijene granulometrijske krive kao i referentnih krivi za povoljan granulometrijski sastav (A₁₆ i B₁₆).



Slika 60 - Granulometrijska kriva mješavine agregata i referentne krive

5.3. Primjer određivanja sastava betona sa recikliranim agregatom A100

Sastav betonske mješavine A100 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I, riječnim sitnim i agregatom od starog betona kao krupnim agregatom) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

Količina veziva (cementa) $m_{vez}=400\text{kg/m}^3$;

Količina vode određena na osnovu usvojenog vodo-vezivnog faktora $m_v/m_{vez}=0,45$ iznosi $m_v=180\text{kg/m}^3$;

Imajući u vidu veliko upijanje vode agregata od starog betona, ovom agregatu je, u cilju njegovog zasićenja, 24h prije spravljanja betona dodata određena količina vode;

Količina hemijskog dodatka je smanjena sa 0,6% na 0,4% m_c , u odnosu na referentni beton A0;

Učešća pojedinih frakcija agregata i granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata usvojeni da odgovaraju Fuller-ovoj krivi (Prilog 6). Učešća frakcija iznose:

- frakcija 0/4 – $X_{0/4}=51\%$;
- frakcija 4/8 – $X_{4/8}=19\%$;
- frakcija 8/16 – $X_{8/16}=30\%$.

Količina agregata je dobijena iz sume apsolutnih zapremina materijala u 1m^3 betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha $\Delta p=2\%$:

$$\frac{400}{3100} + \frac{180}{1000} + \frac{0,51 \cdot m_a}{2650} + \frac{0,49 \cdot m_a}{2285} + \frac{1,6}{1090} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1530 \text{ kg/m}^3$$

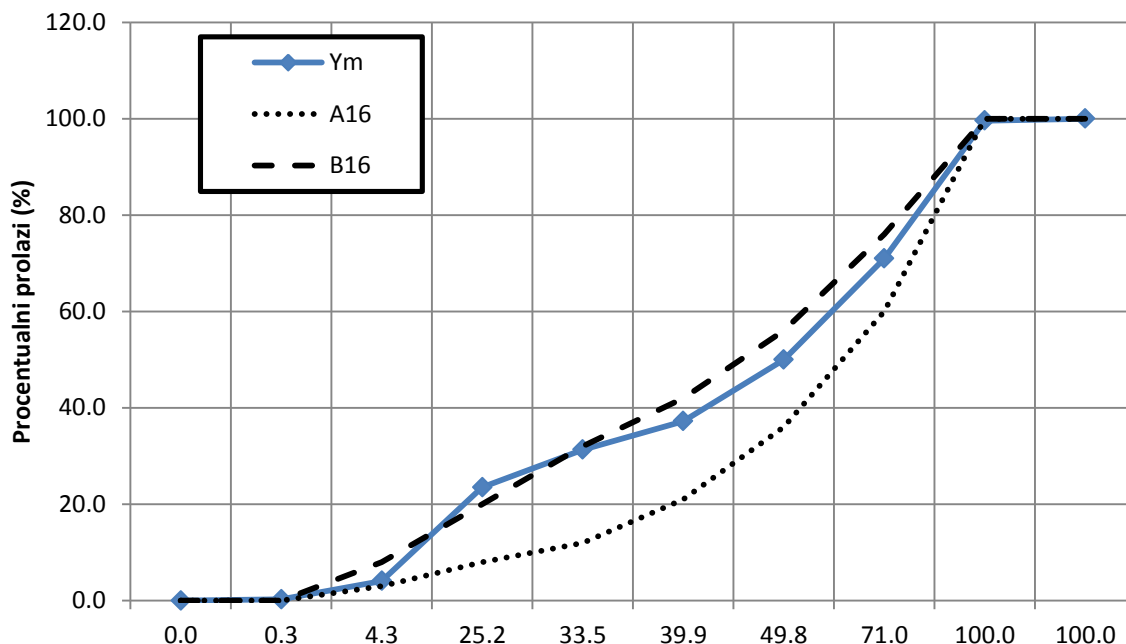
Količine pojedinačnih frakcija, u skladu sa usvojenim učešćima iznose:

- Frakcija 0/4 – $m_{0/4}=781\text{kg}$
- Frakcija 4/8 – $m_{4/8}=291\text{kg}$
- Frakcija 8/16 – $m_{8/16}=459\text{kg}$

Zapreminska masa betona u svežem stanju iznosi:

$$\gamma_{b,sv} = 400 + 180 + 1530 + 1,6 = 2112\text{kg/m}^3$$

Na Slika 61 prikazane su vrijednosti ordinata dobijene granulometrijske krive kao i referentnih krivi za povoljan granulometrijski sastav (A₁₆ i B₁₆).



Slika 61 - Granulometrijska kriva mješavine agregata i referentne krive

5.4. Primjer određivanja sastava betona sa recikliranim agregatom D100

Sastav betonske mješavine D100 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I i biopepelom, riječnim sitnim i agregatom od starog betona kao krupnim agregatom) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- Količina cementa $m_{vez}=200\text{kg/m}^3$;
- Količina biopepela $m_{bio}=200\text{kg/m}^3$;
- Količina vode određena na osnovu usvojenog vodo-vezivnog faktora $m_v/m_{vez}=0,45$ iznosi $m_v=180\text{kg/m}^3$;
- Imajući u vidu veliko upijanje vode agregata od starog betona, ovom agregatu je, u cilju njegovog zasićenja, 24h prije spravljanja betona dodata određena količina vode;
- Količina hemijskog dodatka je smanjena sa 0,6% na 0,5% m_c , u odnosu na referentni beton A0;
- Učešća pojedinih frakcija agregata i granulometrijski sastav mješavine frakcija agregata usvojeni da odgovaraju Fuller-ovoj krivi (Prilog 6). Učešća frakcija iznose:
 - frakcija 0/4 – $X_{0/4}=51\%$;
 - frakcija 4/8 – $X_{4/8}=19\%$;
 - frakcija 8/16 – $X_{8/16}=30\%$.

Količina agregata je dobijena iz sume apsolutnih zapremina materijala u 1m^3 betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha $\Delta\rho=2\%$:

$$\frac{200}{3100} + \frac{200}{2400} + \frac{180}{1000} + \frac{0,51 \cdot m_a}{2650} + \frac{0,49 \cdot m_a}{2285} + \frac{1,6}{1090} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a \\ = 1487 \text{ kg/m}^3$$

Količine pojedinačnih frakcija, u skladu sa usvojenim učešćima iznose:

- Frakcija 0/4 – $m_{0/4}=758\text{kg}$
- Frakcija 4/8 – $m_{4/8}=283\text{kg}$
- Frakcija 8/16 – $m_{8/16}=446\text{kg}$

Zapreminska masa betona u svježem stanju iznosi:

$$\gamma_{b,sv} = 200 + 200 + 180 + 1487 + 1,6 = 2072\text{kg/m}^3$$

5.5. Sastav betonskih mješavina

Na osnovu prethodno prikazanih postupaka proračuna, određeni su sastavi svih betonskih mješavina (ukupno 12), čiji su postupci projektovanja prikazani u Prilozima 4-6. Sastavi predmetnih betonskih mješavina dati su u Tabela 28.

Tabela 28. Količine komponentnih materijala u 1 m³ betona

Oznaka	Cement [kg/m ³] CEM I	Voda [kg/m ³]		Agregat [kg/m ³]			Mineralni dodatak [kg/m ³]	Hemijski dodatak [kg/m ³]	Zapreminska masa [kg/m ³]
		m _v	m _{v,dod}	Rečni	4/8	8/16			
A0	400	180	-	850	412	513	-	2,4	2212
B0	360	180	-	844	409	509	40	2,4	2284
C0	320	180	-	839	407	507	80	2,4	2291
D0	200	180	-	825	400	498	200	2,4	2280
A50	400	180	24	821	173	238	173	238	2283
B50	360	180	24	817	172	237	172	237	2275
C50	320	180	24	812	171	236	171	236	2268
D50	200	180	23	798	168	232	168	232	2253
A100	400	180	43	781			291	459	2261
B100	360	180	43	776			289	457	2237
C100	320	180	43	771			287	454	2236
D100	200	180	42	758			283	446	2228

6. IZRADA MALTERSKIH MJEŠAVINA

Spravljanje malterskih mješavina izvršeno je u laboratorijskom mikseru po programiranom režimu mješanja za standardni cementni malter, u skladu sa EN196-1 - **Error! Reference source not found.** Nakon spravljanja maltera, provjerena je konzistencija na potresnom stolu i određena mjera rasprostiranja maltera u dva upravna pravca - **Error! Reference source not found.** Zatim je spravljena mješavina ugrađena na potresnom stolu u standardne kalupe, dimenzija 4x4x16cm, pri čemu je kompaktiranje trajalo 30 sekundi - Slika 64. Uzorci, ugrađeni u kalupe, su ostavljeni 24h u vlažnoj komori - Slika 65, pri $\varphi=90\%$, a nakon toga su izvađeni iz kalupa i njegovani u vodi do dana ispitivanja. Izgled obilježenih uzoraka za ispitivanje svojstava maltera u očvrslom stanju prikazan je na Slika 66.



Slika 62 - Spravljanje maltera u laboratorijskom mikseru



Slika 63 – Određivanje konzistencije maltera na potresnom stolu



Slika 64 - Kompaktiranje maltera na potresnom stolu



Slika 65 – Odležavanje uzoraka u kalupima u vlažnoj komori



Slika 66 – Izgled pripremljenih uzoraka maltera

7. IZRADA BETONSKIH MJEŠAVINA

Spravljanje betonskih mješavina izvršeno je u laboratorijskoj mješalici za beton zapremine 60 litara, proizvođača ZRMK Ljubljana - Slika 67. Vrijeme mješanja komponenti betona iznosilo je ukupno 4 minute. U mješalicu su prvo dodate potrebne količine svih frakcija agregata, mješane u suvo 30 sekundi, pa je postepeno dozirana jedna polovina potrebne količine vode, u cilju površinskog kvašenja agregata. Nakon 2 minute od početka rada mješalice, dodato je vezivo (cement i biopepeo), pa je postepeno dozirana druga polovina vode u koju je bio rastvoren superplastifikator, uz kontinualno mješanje. Kod svih receptura sa recikliranim agregatom, 24h prije spravljanja betona,

izvršeno je kvašenje agregata količinom vode (dodatna voda) koju agregat može da upije.

Prosječna temperatura u toku spravljanja betonskih mješavina iznosila je 30°C.

Nakon mjerenja temperature svježeg betona, određivana je konzistencija (metodom slijeganja), a zatim je beton ugrađivan u metalne kalupe (oblika kocke i prizme) i plastične kalupe (oblika cilindra). Ugrađivanje je, za uzorke oblika cilindra, urađeno ručnim nabijanjem - Slika 68, a za uzorke oblika kocki i prizmi vibriranjem na vibrostolu u trajanju od 30 sekundi. Nakon kompaktiranja, uzorci su držani u kalupima 24h, a zatim vađeni iz kalupa i njegovani: u vodi do dana ispitivanja (kocke), u uslovima relativne vlažnosti 55-70% (prizme), po programiranom režimu njege u skladu sa ASTM C1585 (cilindri). Izgled uzoraka ugrađenih u kalupe oblika kocki i prizmi prikazan je na Slika 69. Nakon vađenja iz kalupa, na svim uzorcima je označena vrsta betona i redni broj uzorka.



Slika 67 - Spravljanje betonske mješavine



Slika 68 - Beton ugrađen u kalupe oblika cilindra



Slika 69 - Beton ugrađen u kalupe oblika kocke i cilindra

8. POSTUPCI I TOK ISPITIVANJA

8.1. Malteri

8.1.1. Konzistencija

Konzistencija svježeg maltera ispitivana je metodom rasprostiranja na potresnom stolu, u skladu sa SRPS EN 1015-3 [75]. Nakon mješanja komponenti i spravljanja maltera, a prije ugrađivanja, određen je srednji prečnik rasprotstiranja, kao aritmetička sredina prečnika rasprostiranja u dva upravna pravca. Na Slika 70, prikazan je postupak određivanja konzistencije maltera, a rezultati mjerenja dati su u Prilogu 7.



Slika 70 - Mjerenje konzistencije maltera na potresnom stolu

8.1.2. Čvrstoća pri pritisku

Ispitivanje čvrstoće maltera pri pritisku vršeno je prema standardu EN 196-1 na standardnim prizmama dimenzija 40x40x160mm. Uzorci su njegovani u vodi do dana ispitivanja, a čvrstoća pri pritisku je ispitana pri starosti maltera od 28, 60 i 90 dana i određena kao srednja vrijednost čvrstoća dobijenih na tri uzorka, za svaku vrstu maltera.

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku je prikazano na Slika 71, a rezultati mjerenja, sila loma i čvrstoća pri pritisku za svaki uzorak dati su u Prilogu 8.



Slika 71 - Ispitivanje čvrstoće maltera pri pritisku

8.1.3. Kapilarno upijanje vode

Ispitivanje kapilarnog upijanja vode maltera ispitano je na standardnim prizmama, u skladu sa standardom ASTM C1585. Ispitivanje kapilarnog upijanja vode je prikazano na Slika 72, a rezultati mjerenja, vrijednosti upijanja i koeficijenti absorpcije za svaki uzorak dati su u Prilogu 9.

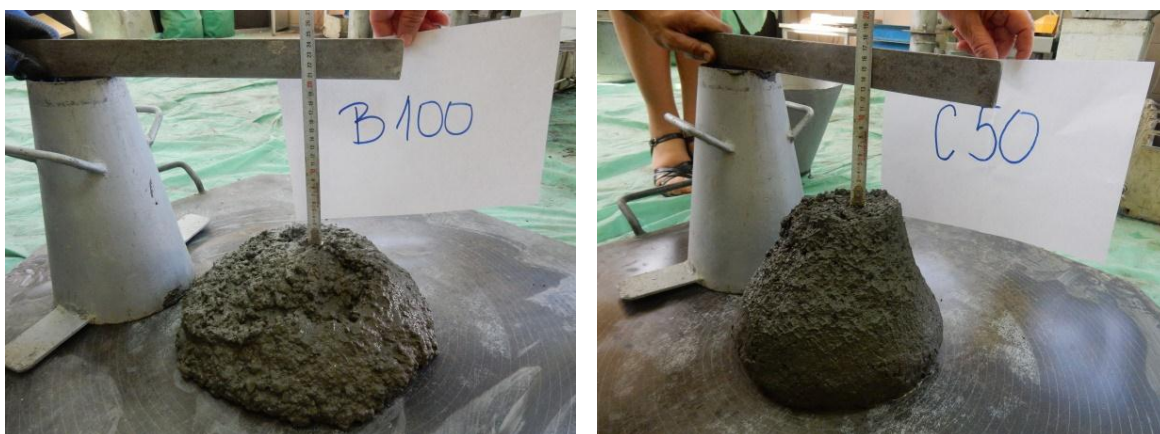


Slika 72 - Ispitivanje kapilarnog upijanja vode pritisku

8.2. Beton

8.2.1. Konzistencija

Konzistencija svježeg betona ispitivana je metodom slijeganja u skladu sa standardom SRPS EN 12350-2 [77]. Mjerenje je vršeno nakon 5min ili 15min (za betone tečnije konzistencije) od početka spravljanja. Na Slika 73 je prikazan postupak određivanja konzistencije betona, a rezultati mjerenja dati su u Prilogu 10.



Slika 73 - Mjerenje konzistencije (mjere slijeganja) za betone B100 i C50

8.2.2. Zapreminska masa

Zapreminska masa betona određena je prema standardu SRPS ISO 6276 [77] za svaku vrstu betona. Srednje vrijednosti zapreminske mase u svježem stanju za svaku vrstu betona date su u Prilogu 11.

8.2.3. Čvrstoća betona pri pritisku

Ispitivanje čvrstoće betona pri pritisku vršeno je prema standardu SRPS EN 12390-3 na uzorcima oblika kocke sa ivicom 15cm pri starostima 28, 56 i 90 dana, a čvrstoća je određena kao srednja vrijednost čvrstoća dobijenih na tri uzorka, za svaku vrstu betona. Određivanje sile loma je vršeno pomoću hidraulične prese kapaciteta 3000kN, a brzina nanošenja opterećenja iznosila je 0,4MPa/s.

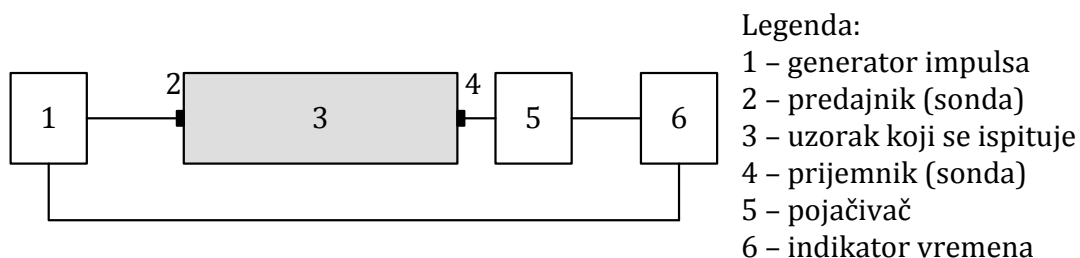
Neposredno prije ispitivanja, određene su dimenzije i masa uzoraka. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku je prikazano na Slika 74, a rezultati mjerenja, sila loma i čvrstoća pri pritisku za svaki uzorak dati su u Prilogu 12.



Slika 74 - Određivanje čvrstoće pri pritisku

8.2.4. Dinamički modul elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti određen je na osnovu brzine ultrazvuka. Metoda se zasniva na mjerenju vremena prolaska longitudinalnih ultrazvučnih talasa kroz uzorak betona od sonde odašiljača do sonde prijemnika. Vremenski interval od trenutka kada impuls napušta prvu sondu pa do trenutka prijama impulsa u drugu sondu je vrijeme prolaska impulsa (t) kroz uzorak betona dužine (l). Mjerenje je izvršeno pomoću ultrazvučnog aparata „Pundit“ sa sondama frekvencije 82kHz. Standard koristi pojednostavljenu pretpostavku da je beton homogen, izotropan i savršeno elastičan materijal. Na Slika 75 prikazana je dispozicija mjernog uređaja i ispitivanog elementa, a ispitivanje brzine prolaska ultrazvuka je prikazano na Slika 76. Rezultati mjerenja dati su u Prilogu 13.



Slika 75 - Dispozicija ispitivanja brzine prolaza ultrazvuka



Slika 76 - Ispitivanje brzine prolaza ultrazvuka

8.2.5. Kapilarno upijanje vode

Kapilarno upijanje vode betona je ispitano na uzorcima oblika cilindra prečnika $\approx 105\text{mm}$ i visine $\approx 50\text{mm}$, u skladu sa standardom ASTM C1585.

Rezultati mjerenja kapilarnog upijanja vode su dati u Prilogu 16, a ispitivanje je prikazano na Slika 77.



Slika 77 - Ispitivanje upijanja vode pod pritiskom

8.2.6. Ispitivanje vodonepropustljivosti (upijanje vode pod pritiskom)

Upijanje vode pod pritiskom (ispitivanje vodonepropustljivosti betona) je sprovedeno prema EN 12390-8 (Slika 5.27). Ispitivanja su vršena na uzorcima oblika kocke ivice 150mm , pri starosti betona od 60 dana. Rezultati mjerenja upijanja vode pod pritiskom dati su u Prilogu 15. Ispitivanje upijanja vode pod pritiskom je prikazano na Slika 78, a mjerenje dubine prodora vode, nakon cijepanja uzorka na Slika 79.



Slika 78 - Ispitivanje upijanja vode pod pritiskom



Slika 79 - Mjerenje dubine prodora vode, nakon cijepanja uzorka

8.2.7. Skupljanje betona pri sušenju

Skupljanje pri sušenju betona (promjena dužine betonskih uzoraka) određeno je u skladu sa UNI 11307 na prizmama dimenzija 100mmx100mmx500mm (Slika 80). Za registrovanje deformacija upotrebljen je deformetar proizvođača Insize (Kina). Tačnost uređaja iznosi 0,001mm. Promjena dužine je merena u osi uzorka, na mjernoj bazi dužine 500mm. Mjerodavna vrijednost promjene dužine određena je kao aritmetička sredina rezultata dobijenih na tri prizme. Ispitivanje je sprovedeno na 12 vrsta betona, za režim negovanja uzoraka u uslovima relativne vlažnosti vazduha od 55-70%. Promjena dužine je mjerena na svakih sedam dana u toku 3 mjeseca. U Prilogu 9 dati su rezultati mjerenja.



Slika 80 - Ispitivanje skupljanja pri sušenju betona

8.2.8. Otpornost betona na habanje

Otpornost betona na habanje je ispitana na uzorcima oblika kvadra, dužine 150mm, dimenzija poprečnog presjeka 50x50mm. Uzorci su isječeni iz kocki ivice 150mm, na kojima je prethodno ispitana vodonepropustljivost betona. Izgled uzoraka pripremljenih za ispitivanje je prikazan na Slika 81.

Ispitivanje je izvršeno pri starosti betona od 60 dana, prema metodi 'širokog točka', standard: EN1338. Test se vrši izlaganjem podužne spoljašnje strane elementa abrazivnom dejstvu materijala (kvarcnog pjeska). Rezultat ispitivanja predstavlja širina otiska, koja betone klasifikuje u dvije klase (Slika 82). Rezultati ispitivanja otpornosti betona na habanje su dati u Prilogu 15.



Slika 81 - Izgled uzoraka pripremljenih za ispitivanje



Slika 82 - Mjerenje širine otiska

8.2.9. Čvrstoća betona na savijanje

Čvrstoća betona na savijanje je ispitana na prizmama oblika kvadra, dimenzija 100x100x400mm, pri starosti od 6 mjeseci na hidrauličnoj presi proizvođača Veb Werkstoffprufmaaschinen, kapaciteta 400kN. Ispitivanje je urađeno u skladu sa standardom EN 12390-5. Prizme su postavljene na 2 valjka prečnika 40mm, udaljena po 50mm od krajeva elementa, tako da je međusobno rastojanje valjaka bilo 300mm. Sa gornje strane je postavljen valjak prečnika 30mm, preko kojeg je nanošeno opterećenje u vidu koncentrisane sile u sredini raspona. Prirast opterećenja je bio konstantan - 0,04MPa/s. Izgled opreme za ispitivanje čvrstoće betona na savijanje prikazan je na Slika 83, a izgled uzorka nakon ispitivanja na Slika 84.



Slika 83 - Izgled opreme za ispitivanje čvrstoće betona na savijanje



Slika 84 - Izgled uzorka nakon ispitivanja čvrstoće betona na savijanje

8.3. Analiza mikrostrukture materijala (XRD, FTIR)

Analiza mikrostrukture materijala (XRD, FTIR) je obavljena na biopepelima, na malterima spravljenim sa biopepelom i betonima spravljenim sa biopepelom.

Rendgensko-strukturna analiza (XRD) je urađena na instrumentu Philips PW-1710 pod sledećim eksperimentalnim uslovima: monohromatska $\text{CuK}\alpha$ radijacija sa talasnom dužinom od $1,5418\text{\AA}$, opseg snimanja je između 2θ od $10-65^\circ$, sa brzinom skeniranja od $0,02^\circ$ i $0,5\text{s}$ po koraku, pri naponu od 40kV i struji 30mA .

Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR), Thermo-Nicolet Nexus 670, je izvedena pod sledećim eksperimentalnim uslovima: uzorci su pripremljeni tako što je ispitivana supstanca izmešana sa fino spravljenim i osušenim KBr, u odgovarajućem kalupu u vakuumu, pri spektralnoj rezoluciji od 4cm^{-1} , opsega $4000-400\text{cm}^{-1}$ i 32 skeniranja po jednom merenju. Rađena je dekonvolucija apsorpcionih traka u opsegu $1200-850\text{cm}^{-1}$ pomoću Gausove funkcije. Dekonvolucija i fitovanje omogućavaju ispitivanje različitih individualnih veza u slučaju njihovog preklapanja u FTIR spektru.

Priprema uzoraka je obuhvatila drobljenje uzorka u laboratorijskom avanu, i prosijavanje kroz sito $0,1\text{mm}$ radi dobijanja praha sa veličinom čestica manje od $0,1\text{mm}$, Slika 85.



Slika 85 - Avan sa tučkom i prah dobijen za ispitivanje mikrostrukture materijala

9. REZULTATI ISPITIVANJA

9.1. Malteri

9.1.1. Konzistencija

Na osnovu rezultata mjerenja datih u Prilogu 7 i Prilogu 8, u Tabela 29 prikazane su vrijednosti konzistencije svježeg maltera, izražene preko srednjeg prečnika rasprostiranja na potresnom stolu, vrijednosti vodovezivnog faktora i količine superplastifikatora.

Tabela 29. Rezultati ispitivanja konzistencije maltera

Vrsta maltera	R_{sr} [mm]	w	m_{sup} (% m_{vez})
C-K	132	0,5	/
MP10-K	158	0,5	/
MP20-K	145	0,5	/
MP30-K	138	0,5	/
MP50-K	153	0,5	0,2
SP10-K	146	0,5	/
SP20-K	144	0,5	/
SP30-K	148	0,5	/
SP50-K	151	0,5	0,2
C-F	136	0,5	/
MP10-F	146	0,5	/
MP20-F	142	0,5	/
MP30-F	144	0,5	/
MP50-F	148	0,5	0,2
SP10-F	138	0,5	/
SP20-F	143	0,5	/

SP30-F	147	0,5	/
SP50-F	144	0,5	0,1
C-D	140	0,7	/
MP10-D	137	0,7	/
MP20-D	139	0,7	/
MP30-D	131	0,7	/
MP50-D	165	0,7	0,2
SP10-D	153	0,7	/
SP20-D	144	0,7	/
SP30-D	141	0,7	/
SP50-D	153	0,7	/

U tabeli, oznake imaju sledeća značenja:

R_{sr} – srednji prečnik rasprostiranja maltera na potresnom stolu

w – vodovezivni faktor

m_{sup} – masa superplastifikatora, izražena u procentima u odnosu na masu veziva

9.1.2. Čvrstoća pri pritisku

Rezultati pojedinačnih ispitivanja dati su u Prilogu 10. Sračunate srednje vrijednosti čvrstoća pri pritisku, za svaku vrstu maltera prikazane su u Tabela 30.

Tabela 30. Rezultati ispitivanja čvrstoće maltera pri pritisku

Vrsta betona	$\gamma_{z,om,28}$ (kg/m ³)	Čvrstoća pri pritisku, f_m [MPa]		
		$f_{m,28}$	$f_{m,56}$	$f_{m,90}$
C-K	2211	52,76	54,53	55,21
MP10-K	2268	51,67	57,19	58,13
MP20-K	2193	57,08	63,13	64,48
MP30-K	2195	51,56	58,54	59,79
MP50-K	2201	48,85	55,63	57,29
SP10-K	2189	46,98	48,96	51,2
SP20-K	2155	40,00	43,96	47,71
SP30-K	2120	43,75	49,79	50,10
SP50-K	2138	38,13	40,00	40,63
C-F	2240	49,27	51,67	52,08
MP10-F	2283	54,69	56,35	58,44
MP20-F	2290	52,71	57,40	58,65
MP30-F	2294	52,50	59,64	60,21
MP50-F	2267	45,83	51,09	51,15

SP10-F	2188	46,56	48,44	52,81
SP20-F	2195	45,31	46,35	48,13
SP30-F	2174	42,29	46,25	49,43
SP50-F	2158	34,79	38,44	41,30
C-D	2053	24,48	29,58	30,21
MP10-D	2081	26,67	30,73	32,08
MP20-D	2122	28,83	35,42	37,71
MP30-D	2108	27,50	31,04	33,96
MP50-D	2074	25,63	31,67	34,79
SP10-D	2085	22,29	23,33	30,00
SP20-D	2052	20,21	21,88	26,46
SP30-D	2017	21,04	22,50	25,83
SP50-D	2021	19,17	20,00	26,04

U tabeli, oznake imaju sledeća značenja:

$\gamma_{z,om,28}$ – zapreminska masa očvrslog maltera, pri starosti od 28 dana

$f_{m,28}$ – čvrstoća maltera pri pritisku pri starosti od 28 dana

$f_{m,56}$ – čvrstoća maltera pri pritisku pri starosti od 60 dana

$f_{m,90}$ – čvrstoća maltera pri pritisku pri starosti od 90 dana

9.1.3. Kapilarno upijanje vode

Mjerenje kapilarnog upijanja vode određeno je prema odredbama standarda ASTM C1585, pri starostima maltera od 28 i 90 dana. Rezultati pojedinačnih mjerenja kapilarnog upijanja vode na tri uzorka za svaku vrstu maltera dati su u Prilogu 16. Upijanje vode je određeno kao promjena mase uzoraka tokom vremena, podjeljena sa površinom poprečnog presjeka uzorka i specifičnom masom vode. Inicijalno upijanje vode (S_i , mm/s^{1/2}) je određeno kao nagib linije koja se najbolje uklapa u dobijene podatke upijanja između 1min i 6h. Sekundarno upijanje vode (S_s , mm/s^{1/2}) je određeno kao nagib linije koja se najbolje uklapa u dobijene podatke između 1 i 7 dana. Jednačine upijanja, kao i faktori korelacije, za inicijalno i sekundarno upijanje, su prikazani u Tabela 31.

Oznake imaju sledeća značenja:

S_i – inicijalno upijanje

S_s – sekundarno upijanje

Tabela 31. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja maltera, 28 dana

Malter	Inicijalno upijanje	Koeficijent inicijalnog upijanja S_i	Sekundarno upijanje	Koeficijent sekundarnog upijanja S_s
--------	---------------------	--	---------------------	--

		(mm/s ^{1/2})		(mm/s ^{1/2})
C-K	0.0008t ^{1/2} + 0.0156	0,0008	y = 0.1792	*
MP10-K	0.0008t ^{1/2} + 0.0278	*	y = 1479	*
MP20-K	0.0008t ^{1/2} + 0.0397	*	y = 1635	*
MP30-K	0.0016t ^{1/2} + 0.0703	*	0.00005t ^{1/2} + 0.3269	*
MP50-K	0.0024t ^{1/2} + 0.1489	*	0.00004t ^{1/2} + 0.5037	*
SP10-K	0.0006t ^{1/2} + 0.1555	*	y = 0.1240	*
SP20-K	0.0005t ^{1/2} + 0.0322	*	y = 0.1182	*
SP30-K	0.0009t ^{1/2} + 0.0551	*	y = 0.2042	*
SP50-K	0.0053t ^{1/2} + 0.2691	*	0.0001t ^{1/2} + 1.0105	*
C-F	0.0020t ^{1/2} + 0.0363	0,002	0.0003t ^{1/2} + 0.3701	0,0003
MP10-F	0.0034t ^{1/2} + 0.1165	*	0.0001t ^{1/2} + 0.6612	*
MP20-F	0.0029t ^{1/2} + 0.1281	*	0.0001t ^{1/2} + 0.5686	*
MP30-F	0.0028t ^{1/2} + 0.1721	*	0.0002t ^{1/2} + 0.5429	0,0002
MP50-F	0.0045t ^{1/2} + 0.2009	*	0.0002t ^{1/2} + 0.8984	*
SP10-F	0.0038t ^{1/2} + 0.1131	*	0.0001t ^{1/2} + 0.7652	*
SP20-F	0.0041t ^{1/2} + 0.1254	*	0.0001t ^{1/2} + 0.809	*
SP30-F	0.0023t ^{1/2} + 0.0888	*	y = 0.4807	*
SP50-F	0.0034t ^{1/2} + 0.0987	*	y = 0.7651	*
C-D	0.0046t ^{1/2} + 0.0487	0.0046	0.0002t ^{1/2} + 1.2137	*
MP10-D	0.0031t ^{1/2} + 0.0298	0.0031	0.00005t ^{1/2} + 0.6431	*
MP20-D	0.0058t ^{1/2} + 0.1583	*	0.0002t ^{1/2} + 1.076	*
MP30-D	0.0067t ^{1/2} + 0.1624	*	0.0001t ^{1/2} + 1.2335	*
MP50-D	0.0068t ^{1/2} + 0.1807	*	0.0002t ^{1/2} + 1.2577	*
SP10-D	0.007t ^{1/2} + 0.1526	0.007	y = 1.3224	*
SP20-D	0.0061t ^{1/2} + 0.1749	*	y = 1.0802	*
SP30-D	0.0082t ^{1/2} + 0.3847	*	y = 1.5328	*
SP50-D	0.0085t ^{1/2} + 0.2326	*	0.0001t ^{1/2} + 1.584	*

* Faktor korelacije je manji od 0,98, trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se ne može uspostaviti jednačina zavisnosti.

Tabela 32. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja maltera, 90 dana

Malter	Inicijalno upijanje	Koeficijent inicijalnog upijanja S _i (mm/s ^{1/2})	Sekundarno upijanje	Koeficijent sekundarnog upijanja S _s (mm/s ^{1/2})
C-K	0.0025t ^{1/2} + 0.0957	*	0.0001t ^{1/2} + 0.5353	*
MP10-K	0.0025t ^{1/2} + 0.1257	*	0.00002t ^{1/2} + 0.4990	*
MP20-K	0.0020t ^{1/2} + 0.0957	*	0.00002t ^{1/2} + 0.3908	*
MP30-K	0.0020t ^{1/2} + 0.0926	*	0.00001t ^{1/2} + 0.3829	*
MP50-K	0.0028t ^{1/2} + 0.1255	*	0.00002t ^{1/2} + 0.5252	*

SP10-K	$0.0045t^{1/2} + 0.1033$	*	$0.0004t^{1/2} + 0.8614$	*
SP20-K	$0.0054t^{1/2} + 0.1419$	*	$0.0003t^{1/2} + 0.9436$	*
SP30-K	$0.0055t^{1/2} + 0.1347$	*	$0.0002t^{1/2} + 0.9345$	*
SP50-K	$0.0081t^{1/2} + 0.0945$	*	$0.0004t^{1/2} + 1.3822$	*
C-F	$0.00008t^{1/2} + 0.0136$	*	$y = 0.0219$	*
MP10-F	$0.0002t^{1/2} + 0.0143$	*	$y = 0.0318$	*
MP20-F	$0.0003t^{1/2} + 0.0202$	*	$y = 0.0531$	*
MP30-F	$0.0004t^{1/2} + 0.0384$	*	$y = 0.0875$	*
MP50-F	$0.0010t^{1/2} + 0.0672$	*	$y = 0.1844$	*
SP10-F	$0.0031t^{1/2} + 0.0581$	0,002	$0.0002t^{1/2} + 0.6133$	*
SP20-F	$0.0037t^{1/2} + 0.0698$	0,031	$0.0001t^{1/2} + 0.7193$	*
SP30-F	$0.0054t^{1/2} + 0.1419$	0,037	$0.0002t^{1/2} + 0.9593$	*
SP50-F	$0.0082t^{1/2} + 0.2081$	*	$0.0002t^{1/2} + 1.6041$	*
C-D	$0.0008t^{1/2} + 0.0188$	0,0046	$y = 0.1776$	*
MP10-D	$0.0005t^{1/2} + 0.0205$	*	$y = 0.0786$	*
MP20-D	$0.0008t^{1/2} + 0.0286$	*	$y = 0.1276$	*
MP30-D	$0.0010t^{1/2} + 0.0496$	*	$y = 0.1714$	*
MP50-D	$0.0012t^{1/2} + 0.0731$	*	$y = 0.2167$	*
SP10-D	$0.0034t^{1/2} + 0.0011$	0,0034	$0.00004t^{1/2} + 0.7623$	*
SP20-D	$0.0024t^{1/2} + 0.0325$	0,0024	$y = 0.4375$	*
SP30-D	$0.0026t^{1/2} + 0.0844$	*	$y = 0.5$	*
SP50-D	$0.0031t^{1/2} + 0.1651$	*	$y = 0.6333$	*

* Faktor korelacije je manji od 0,98, trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se ne može uspostaviti jednačina zavisnosti.

9.2. Betoni

9.2.1. Konzistencija

Na osnovu rezultata mjerenja datih u Prilogu 7 i Prilogu 8, u **Error! Reference source not found.** prikazane su vrijednosti zapreminske mase i konzistencije svježeg betona.

Tabela 33. Svojstva svježeg betona

Vrsta betona	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m ³]	Δh [mm]	m_{sup} (% m_{vez})
A0	2305	22	0,6
B0	2284	21	0,6
C0	2291	20	0,6
D0	2280	14,5	0,6
A50	2283	22	0,5
B50	2275	18	0,4

C50	2268	13,5	0,4
D50	2253	15,5	0,5
A100	2261	22	0,4
B100	2237	21	0,4
C100	2236	11	0,4
D100	2228	20,5	0,5

U tabeli, oznake imaju sledeća značenja:

$\gamma_{b,sv}$ – zapreminska masa betona u svježem stanju

Δh – vrijednost slijeganja

m_{sup} – masa superplastifikatora, izražena u procentima u odnosu na masu veziva

9.2.2. Čvrstoća pri pritisku

Rezultati pojedinačnih ispitivanja dati su u Prilogu 10. Sračunate srednje vrijednosti čvrstoća pri pritisku, za svaku vrstu betona prikazane su u Tabela 34.

Tabela 34. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku

Vrsta betona	$\gamma_{b,ob}$ [kg/m ³]	Čvrstoća pri pritisku, f_c [MPa]		
		$f_{c,28}$	$f_{c,56}$	$f_{c,90}$
A0	2305	55,18	55,94	56,27
B0	2284	50,59	54,21	55,49
C0	2291	51,69	53,64	54,61
D0	2280	49,05	54,86	58,41
A50	2283	46,3	48,25	50,55
B50	2275	45,52	52,60	54,39
C50	2268	48,67	53,60	56,82
D50	2253	44,40	53,17	56,45
A100	2261	45,59	49,85	52,26
B100	2237	47,97	51,33	54,46
C100	2236	49,61	53,73	58,44
D100	2228	42,20	50,84	53,45

U tabeli, oznake imaju sledeća značenja:

$\gamma_{b,ob}$ – zapreminska masa očvrslog betona

$f_{c,28}$ – čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 28 dana

$f_{c,56}$ – čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 60 dana

$f_{c,90}$ – čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 90 dana

9.2.3. Dinamički modul elastičnosti

U Tabela 35 date su vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti određenog preko brzine prolaza ultrazvuka (Prilog 13).

Tabela 35. Dinamički modul elastičnosti betona

Vrsta betona	Dinamički modul elastičnosti E_d [GPa]			
	E_1	E_2	E_3	$E_{d,sr}$
A0	46,41	46,21	47,50	46,70
B0	46,12	45,88	44,85	45,61
C0	45,27	46,81	47,18	46,42
D0	45,57	46,27	45,05	45,63
A50	43,30	42,43	41,32	42,35
B50	44,54	44,21	43,44	44,06
C50	45,36	43,51	43,79	44,22
D50	42,51	42,04	40,98	41,84
A100	41,44	41,61	40,11	41,06
B100	40,94	40,74	40,59	40,76
C100	40,97	42,03	42,24	41,74
D100	38,25	36,68	37,50	37,48

9.2.4. Vodonepropustljivost (upijanje vode pod pritiskom)

Rezultati mjerenja dubine prodora i količine upijene vode date su Prilogu 15. U toku eksperimenta mjerena je masa uzoraka prije i nakon izlaganja dejstvu vode pod pritiskom, ma osnovu čega je upijanje izraženo u kg/m^2 . U Tabela 36 date su srednje vrijednosti upijanja vode pod pritiskom i dubine prodora za svaku vrstu betona. Upijanje vode izračunato prema izrazima:

$$U_{sr} = m_2 - m_1 \text{ [kg]}$$

$$U_{sr} = \frac{m_2 - m_1}{A} \text{ [kg}/\text{m}^2]$$

U datim izrazima, oznake imaju sledeća značenja:

U_{sr} – vrijednost upijanja u kg ili kg/m^2 ,

m_1 – masa uzorka prije ispitivanja,

m_2 – masa uzorka nakon djelovanja vode pod pritiskom,

A – kontaktna površina (krug prečnika 7.5cm)

Tabela 36. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom ispitivanih betona

Vrsta betona	Upijanje vode		Dubina prodora
	U_{sr} [kg]	U_{sr} [kg/m ²]	$d_{max,sr}$ [mm]
A0	0.007	1.58	20
B0	0.003	0.68	17
C0	0.007	1.58	12
D0	0.005	1.13	19
A50	0.003	0.68	20
B50	0.011	2.49	18
C50	0.012	2.72	10
D50	0.014	3.17	15
A100	0.01	2.26	10
B100	0.007	1.58	6
C100	0.001	0.23	15
D100	0.004	0.91	8

9.2.5. Kapilarno upijanje vode

Mjerenje kapilarnog upijanja vode ispitivanih vrsta betona određeno je prema odredbama standarda ASTM C1585, pri starostima 28 i 90 dana. Rezultati pojedinačnih mjerenja kapilarnog upijanja vode na tri uzorka za svaku vrstu betona dati su u Prilogu 16. Upijanje vode je određeno kao promjena mase uzorka tokom vremena, podjeljena sa površinom poprečnog presjeka uzorka (površine kruga, prečnika 100mm) i specifičnom masom vode. Inicijalno upijanje vode (S_i , mm/s^{1/2}) je određeno kao nagib linije koja se najbolje uklapa u dobijene podatke upijanja između 1min i 6h. Sekundarno upijanje vode (S_s , mm/s^{1/2}) je određeno kao nagib linije koja se najbolje uklapa u dobijene podatke između 1 i 7 dana. Jednačine upijanja, kao i faktori korelacije, za inicijalno i sekundarno upijanje, su prikazani u Tabela 37.

Oznake imaju sledeća značenja:

S_i – inicijalno upijanje

S_s – sekundarno upijanje

Tabela 37. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja betona, 28 dana

Beton	Inicijalno upijanje	Koeficijent inicijalnog upijanja S_i (mm/s ^{1/2})	Sekundarno upijanje	Koeficijent sekundarnog upijanja S_s (mm/s ^{1/2})
A0	$0.0027t^{1/2} + 0.0722$	*	$0.0004t^{1/2} + 0.4722$	0,0004
B0	$0.0007t^{1/2} + 0.1200$	0,0007	$0.0002t^{1/2} + 0.1200$	0,0002
C0	$0.0007t^{1/2} + 0.0267$	*	$0.0001t^{1/2} + 0.1347$	0,0001

D0	$0.0010t^{1/2} + 0.0455$	*	$0.0001t^{1/2} + 0.2146$	*
A50	$0.0007t^{1/2} + 0.0181$	0,0007	$0.0001t^{1/2} + 0.1497$	*
B50	$0.0008t^{1/2} + 0.0295$	0,0008	$0.00006t^{1/2} + 0.1689$	*
C50	$0.0007t^{1/2} + 0.0201$	0,0007	$0.00001t^{1/2} + 0.1507$	*
D50	$0.0010t^{1/2} + 0.0445$	*	$0.00003t^{1/2} + 0.2251$	*
A100	$0.0013t^{1/2} + 0.0137$	0,0013	$0.00023t^{1/2} + 0.2800$	*
B100	$0.0007t^{1/2} + 0.0272$	*	$0.00002t^{1/2} + 0.1582$	*
C100	$0.0011t^{1/2} + 0.0473$	*	$0.00001t^{1/2} + 0.2308$	*
D100	$0.0010t^{1/2} + 0.0401$	*	$0.00001t^{1/2} + 0.2157$	*

* Faktor korelacije je manji od 0,98, trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se ne može uspostaviti jednačina zavisnosti.

Tabela 38. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja betona, 90 dana

Beton	Inicijalno upijanje	Koeficijent inicijalnog upijanja S_i (mm/s ^{1/2})	Sekundarno upijanje	Koeficijent sekundarnog upijanja S_s (mm/s ^{1/2})
A0	$0.0008t^{1/2} + 0.0169$	0,0008	$0.000004t^{1/2} + 0.1855$	*
B0	$0.0011t^{1/2} + 0.0329$	*	$0.00001t^{1/2} + 0.2325$	*
C0	$0.0011t^{1/2} + 0.0320$	0,0011	$0.00002t^{1/2} + 0.2338$	*
D0	$0.0016t^{1/2} + 0.0574$	*	$0.00003t^{1/2} + 0.3479$	*
A50	$0.0007t^{1/2} + 0.0073$	0,0007	$y = 0.1269$	*
B50	$0.0014t^{1/2} + 0.0666$	*	$0.00005t^{1/2} + 0.2997$	*
C50	$0.0014t^{1/2} + 0.0876$	*	$y = 0.2889$	*
D50	$0.0017t^{1/2} + 0.1129$	*	$0.00004t^{1/2} + 0.3778$	*
A100	$0.0009t^{1/2} + 0.0378$	0,0009	$y = 0.0895$	*
B100	$0.0013t^{1/2} + 0.0631$	*	$y = 0.2243$	*
C100	$0.0011t^{1/2} + 0.0556$	*	$y = 0.216$	*
D100	$0.0018t^{1/2} + 0.1323$	*	$y = 0.3664$	*

* Faktor korelacije je manji od 0,98, trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se ne može uspostaviti jednačina zavisnosti.

9.2.6. Otpornost na habanje

Pojedinačni rezultati ispitivanja otpornosti na habanje betona, prikazani preko gubitka mase i širine otiska širokog točka, su dati u Prilogu X. Srednje vrijednosti ovih indikatora su date u Tabela 39.

Oznake imaju sledeća značenja:

m_{sr} – obrušena masa

d_{sr} – širina otiska

Tabela 39. Srednje vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti betona na habanje

Vrsta betona	Obrušena masa	Širina otiska
	m_{sr} [kg]	d_{sr} [mm]
A0	1,65	20,02
B0	0,883	20,04
C0	0,48	21,17
D0	0,953	21,80
A50	4,093	20,75
B50	0,937	21,29
C50	1,03	21,45
D50	1,073	22,12
A100	1,37	20,66
B100	0,79	20,39
C100	0,81	20,85
D100	0,95	22,24

9.2.7. Skupljanje pri sušenju

Na osnovu rezultata pojedinačnih mjerenja skupljanja pri sušenju betonskih uzoraka iz Priloga 9, u Tabela 40 su prikazane izračunate srednje vrijednosti skupljanja pri sušenju za svaku vrstu betona u mm/m ($\%$), za mjernu bazu od 500mm.

Tabela 40. Skupljanje pri sušenju betonskih uzoraka [mm/m]

Vrijeme [dani]	Vrsta betona											
	A0	B0	C0	D0	A50	B50	C50	D50	A100	B100	C100	D100
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0253	0,0027	0,0020	0,0010	0,0100	0,0607	0,0390	0,0010	0,1487	0,0010	0,0800	0,0005
7	0,0920	0,0570	0,0040	0,0020	0,0133	0,0620	0,0900	0,0100	0,2020	0,0513	0,1007	0,0640
14	0,1900	0,0673	0,0727	0,0920	0,0633	0,1300	0,1070	0,0200	0,2393	0,2033	0,1767	0,0960
21	0,2867	0,1407	0,1087	0,1107	0,1273	0,1870	0,1630	0,0790	0,3187	0,2547	0,1867	0,1053
28	0,3680	0,2067	0,1693	0,1520	0,1607	0,2290	0,1690	0,0920	0,3587	0,2887	0,2310	0,1350
35	0,4107	0,2493	0,1780	0,1780	0,2507	0,2570	0,2130	0,1880	0,3640	0,3507	0,2507	0,1847
42	0,4327	0,2567	0,2240	0,2327	0,2867	0,2820	0,2410	0,2070	0,4027	0,4540	0,2907	0,2740
49	0,4567	0,3167	0,2460	0,2633	0,3267	0,3550	0,2520	0,2350	0,4600	0,4807	0,3440	0,3013
56	0,4760	0,3440	0,2940	0,2773	0,3867	0,3840	0,3040	0,2450	0,5300	0,5440	0,4260	0,3473
63	0,4910	0,3813	0,3480	0,3373	0,4720	0,4370	0,3760	0,3010	0,5673	0,5653	0,4587	0,3887
70	0,5020	0,4453	0,3960	0,3867	0,5000	0,4560	0,4190	0,3340	0,6167	0,5853	0,4807	0,4340
77	0,5087	0,4727	0,4147	0,4013	0,5273	0,4740	0,4420	0,3720	0,6393	0,5873	0,4900	0,4547
84	0,5133	0,5067	0,4720	0,4153	0,5487	0,4770	0,4520	0,3820	0,6733	0,5940	0,4993	0,4573
91	0,5147	0,5180	0,4720	0,4233	0,5533	0,4820	0,4600	0,3920	0,6827	0,5947	0,5013	0,4580

9.2.8. Čvrstoća betona na savijanje

U Tabela 41 su prikazane određene sile lome, u kN i čvrstoće na savijanje za svaku vrstu betona u MPa.

Tabela 41. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka

	F (kN)	fzs (MPa)	fzs,sr (MPa)
	15,6	7,02	
A0	15,5	6,975	6,795
	14,2	6,39	
	15,3	6,885	
B0	15,1	6,795	6,810
	15	6,75	
	16,9	7,605	
C0	14,8	6,66	7,185
	16,2	7,29	
	13,4	6,03	
D0	15,5	6,975	6,510
	14,5	6,525	
	14,2	6,39	
A50	16,2	7,29	6,990
	16,2	7,29	
	18	8,1	
B50	15,5	6,975	7,410
	15,9	7,155	
	15,8	7,11	
C50	14,3	6,435	6,915
	16	7,2	
	13,8	6,21	
D50	11,5	5,175	5,700
	12,7	5,715	
	14,8	6,66	
A100	15,4	6,93	6,690
	14,4	6,48	
	15,8	7,11	
B100	14,5	6,525	6,855
	15,4	6,93	
	13,1	5,895	
C100	13,4	6,03	6,045
	13,8	6,21	
	10,9	5,4	
D100	12,5	5,625	5,520
	12,3	5,535	

VI ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA

1. KARAKTERIZACIJA BIOPEPELA KAO MINERALNOG DODATKA

Karakterizacija biopepela, nastalog sagorjevanjem žetvenih ostataka, kao mineralnog dodatka u cementnim kompozitima, urađena je u skladu sa odredbama standarda EN 450-1. Karakterizacija je urađena nakon pripreme materijala (prosijavanje, mljevenje...), što je objašnjeno u Poglavlju V. Karakterizacija je obuhvatila sledeća ispitivanja:

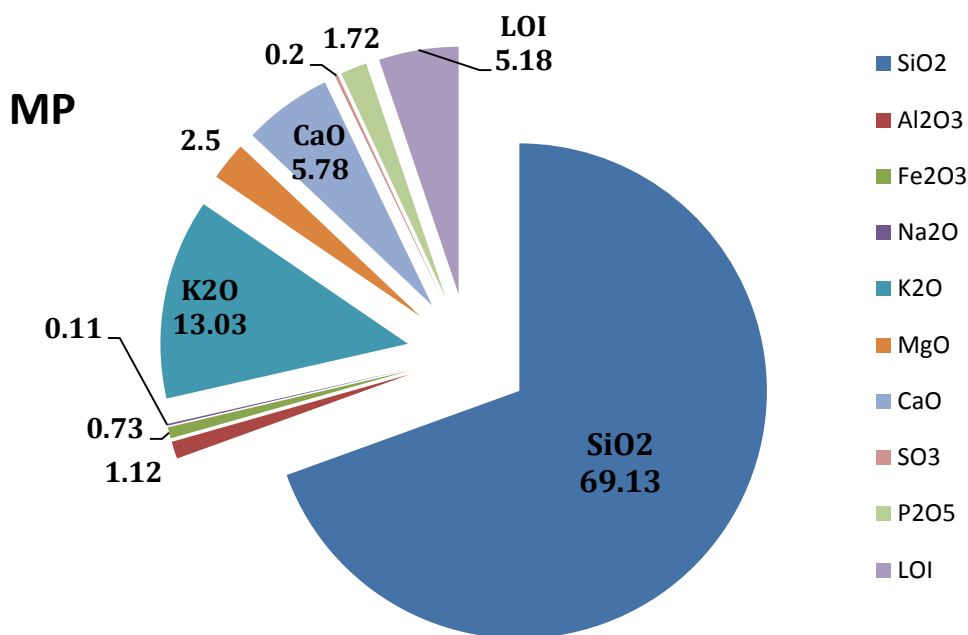
- I. Hemijska svojstva:
 - hemijski sastav,
 - gubitak žarenjem,
 - sadržaj hlorida,
 - sadržaj rastvorljivih fosfata,
 - sadržaj elemenata u tragovima,
 - sadržaj slobodnog CaO,
 - sadržaj reaktivnog SiO₂,
- II. Fizička svojstva:
 - specifična masa,
 - specifična površina,
 - finoća,
 - indeks aktivnosti,
 - pucolanska aktivnost,
 - vreme početka i kraja vezivanja,
 - stalnost zapremine.

1.1. Hemijska svojstva biopepela

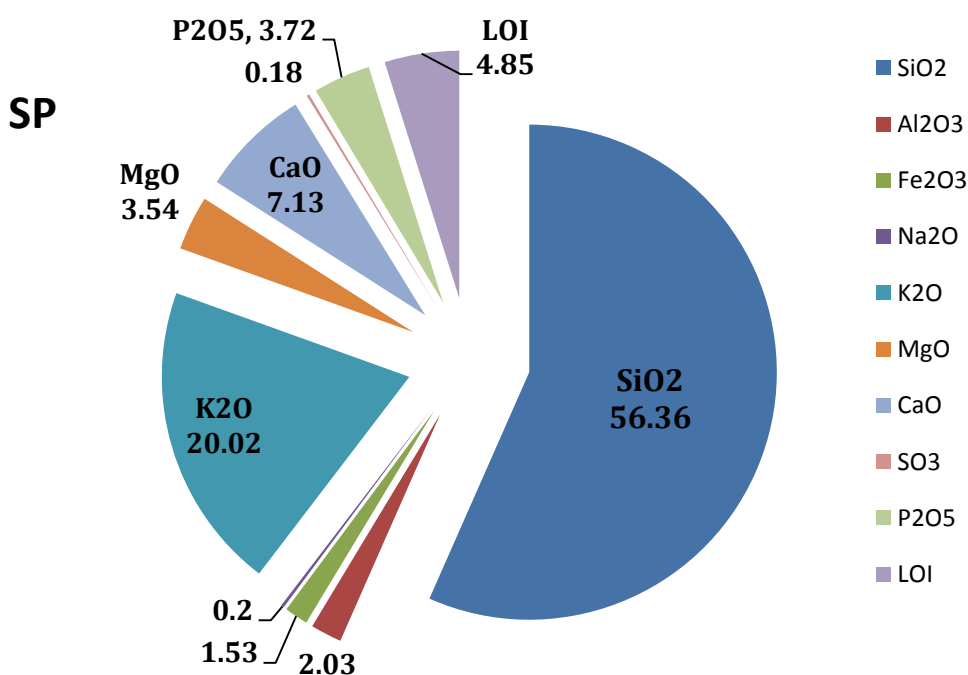
1.1.1. Hemijski sastav

Hemijski sastav dvije ispitivane vrste biopepela: pepeo pšenične slame (MP) i pepeo mješavine pšenične i sojine slame (SP), dat je u Prilogu 3.

Hemijski sastav pepela pšenične slame sa istaknutim sadržajima dominantnih oksida prikazan je grafikonom na Slika 86, a hemijski sastav mješavine pšenične i sojine slame na Slika 87.



Slika 86 – Hemijski sastav pepela pšenične slame



Slika 87 - Hemijski sastav pepela mješavine pšenične i sojine slame

Za upotrebu nekog materijala kao pucolanskog, najvažniji je sadržaj oksida: SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃ - Tabela 42. Sadržaj ovih oksida je određen u skladu sa principima datim u standardu EN196-2. Minimalni ukupni sadržaj ovih oksida je, prema standardu EN 450-1, definisan sa 70%.

Tabela 42. Sadržaj važnijih oksida u hemijskom sastavu biopepela

Pepeo (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Kategorija (ASTM C608)	Kriterijum (EN 450-1)
MP	69.13	1.12	0.73	70.98	F	ZADOVOLJEN
SP	56.36	2.03	1.53	57.12	C	NIJE ZADOVOLJEN

Pepeo MP se odlikuje visokim, a pepeo SP umjerenim sadržajem ovih oksida: 71% i 57%, respektivno. Prema standardu ASTM C618 [78], materijali sa ukupnim sadržajem silike, aluminata i ferita preko 70% se svrstavaju u kategoriju F, a materijali sa preko 50% u kategoriju C pucolanskih materijala.

Pepeo MP zadovoljava kriterijum dat u standardu EN 450-1 ($\geq 70\%$), dok pepeo SP isti ne zadovoljava.

1.1.2. Gubitak žarenjem

Gubitak žarenjem je određen u skladu sa principima datim u standardu EN196-2. Svrha ovog zahtjeva je ograničiti ostatak nesagorjelog ugljenika u pucolanskom materijalu. Kroz direktno mjerenje nesagorjelog ugljeničnog ostatka, potrebno je pokazati da sadržaj istog ulazi u ograničenja navedenih kategorija, datih u standardu EN 450-1. Gubitak žarenjem je utvrđen na 950 °C, a rezultati su prikazani u Tabela 43.

Tabela 43. Gubitak žarenjem

Pepeo (%)	LOI	Kategorija (EN 450-1)
MP	5,18	B
SP	4,85	A

Prema standardu EN 450-1, sa gubitkom žarenjem koji ne prelazi granicu od 5% (po masi), materijal pripada kategoriji A, sa gubitkom žarenjem do 7% kategoriji B, a sa gubitkom do 9% kategoriji C. Pepeo MP pripada kategoriji B (blizak je kategoriji A), a pepeo SP kategoriji A.

1.1.3. Sadržaj hlorida

Hloridni joni u cementnim kompozitima snižavaju pH vrijednost, što za posledicu ima povećanje izluživanja kalcijum oksida i poroznosti kompozita i negativno se odražava na fizičko-mehanička svojstva istih. Dodatno, bazna sredina cementne paste spriječava koroziju armature u armiranom betonu. Sadržaj hlorida je određen u skladu sa principima datim u standardu EN196-2, a prema standardu EN 450-1, limitiran je na 0,10% po masi materijala. Rezultati ispitivanja sadržaja hlorida su dati u Tabela 44.

Tabela 44. Sadržaj hlorida u biopepelima

Pepeo (%)	Cl ⁻	Kriterijum (EN 450-1)
MP	0,060	ZADOVOLJEN
SP	0,025	ZADOVOLJEN

1.1.4. Sadržaj sulfata

Povećan sadržaj SO₃ uzrokuje ekspanziju cementnih materijala (formiranje etringita), smanjuje količinu alita i aluminata u cementu i prolongira vremene vezivanja. Sadržaj sulfata je određen u skladu sa principima datim u standardu EN196-2, a prema standardu EN 450-1, limitiran je na 3%, po masi materijala. Rezultati ispitivanja sadržaja sulfata su dati u Tabela 45.

Tabela 45. Sadržaj sulfata u biopepelima

Pepeo (%)	SO ₃	Kriterijum (EN 450-1)
MP	0,2	ZADOVOLJEN
SP	0,18	ZADOVOLJEN

Obe vrste biopepela se karakterišu niskim sadržajem sulfata ($\leq 0,2\%$), te zadovoljavaju postavljeni kriterijum.

1.1.5. Sadržaj slobodnog CaO

Sadržaj slobodnog CaO je određen u skladu sa principima datim u standardu EN451-1 [79], a prema standardu EN 450-1, limitiran je na 1,5%, po masi materijala. Rezultati ispitivanja sadržaja slobodnog CaO su dati u Tabela 46.

Tabela 46. Sadržaj slobodnog CaO u biopepelima

Pepeo (%)	Slobodni CaO	Kriterijum (EN 450-1)
MP	0,14	ZADOVOLJEN
SP	0,28	ZADOVOLJEN

Obe vrste biopepela imaju nizak sadržaj slobodnog CaO ($\leq 0,28\%$), te zadovoljavaju postavljeni kriterijum.

1.1.6. Sadržaj reaktivnog SiO₂

Reaktivni SiO_2 je najvažnija komponenta u hemijskom sastavu materijala, sa aspekta njegove pucolanske aktivnosti. Reaktivni SiO_2 ima tendenciju da reaguje sa raspoloživim Ca(OH)_2 , formirajući pri tome produkte (C-S-H jedinjenja) sa vezivnim svojstvima. Sadržaj reaktivnog SiO_2 je analiziran u skladu sa principima datim u standardu EN197-1[79], a prema standardu EN 450-1, donja granica je za ovaj sadržaj je definisana sa 25%, po masi materijala. Rezultati ispitivanja sadržaja reaktivnog SiO_2 su dati u Tabela 47.

Tabela 47. Sadržaj reaktivnog SiO_2 u biopepelima

Pepeo (%)	Slobodni CaO	Kriterijum (EN 450-1)
MP	67,07	ZADOVOLJEN
SP	40,99	ZADOVOLJEN

Pepeo MP ima visok, a pepeo SP umjeren sadržaj reaktivnog SiO_2 , koji prelazi 25%, te biopepeli zadovoljavaju postavljeni kriterijum.

1.1.7. Ukupan sadržaj alkalija

U betonu, u kontaktu s agregatom, alkalije mogu izazvati alkalno-silikatnu reakciju, pa se njihov sadržaj ograničava. Ako agregat sadrži SiO_2 u amorfnom obliku, u očvrslom betonu može doći do ovakve reakcije, pri čemu novonastali produkti imaju veću zapreminu nego produkti koji su ušli u hemijsku reakciju. Na taj način nastaju unutrašnja naprezanja, koja dovode do pukotina u betonu. Ukupan sadržaj alkalija je određen prema standardu EN 196-2, a prema EN 450-1, isti je limitiran sa 5%, po masi materijala. Rezultati ispitivanja sadržaja alkalija su prikazani u Tabela 48.

Tabela 48. Sadržaj alkalija u biopepelima

Pepeo (%)	Na_2O	K_2O	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ($\text{Na}_2\text{O}+0,658 \text{K}_2\text{O}$)	Kriterijum (EN 450-1)
MP	0.11	13.03	8,68	NIJE ZADOVOLJEN
SP	0.2	20.02	13,37	NIJE ZADOVOLJEN

Obe vrste biopepela se karakterišu visokim sadržajem K_2O , pa ukupan sadržaj alkalija prelazi dozvoljenu vrijednost (5%). S druge strane, pucolanski materijali, u fino samljevenom obliku, sa visokim sadržajem reaktivnog SiO_2 , imaju tendenciju da reaguju sa alkalijama dok je beton još u svježem stanju i time smanjuju sadržaj slobodnih alkalija koji bi stupili u reakciju sa reaktivnim agregatima i izazvali alkalno-silikatnu reakciju.

1.1.8. Sadržaj fosfata

Sadržaj fosfata (P_2O_5) se ograničava u cementu na vrlo nizak nivo (2,5%), budući da fosfati djeluju nepovoljno na klinker mineral alit (C_3S), dovode do njegove dekompozicije na mineral belit (C_2S) i CaO. Ovim se smanjuje vrijednost odnosa alita i belita, a poznato je da je alit glavni nosilac čvrstoće cementnih materijala [83]. Takođe, fosfati u prisustvu vlage mogu dovesti do formiranja fosforne kiseline, koja može da smanji pH vrijednost, izazove koroziju armature u betonu, pa čak i izazove sporu dezintegraciju cementnih materijala.

Sadržaj fosfata je određen u skladu sa principima datim u standardu ISO 29581-2 [80], a prema standardu EN 450-1, limitiran je na 5%, po masi materijala. Rezultati ispitivanja sadržaja fosfata su dati u Tabela 49.

Tabela 49. Sadržaj fosfata u biopepelima

Pepeo (%)	P_2O_5	Kriterijum (EN 450-1)
MP	1,72	ZADOVOLJEN
SP	3,72	ZADOVOLJEN

Obe vrste biopepela imaju nizak sadržaj fosfata ($\leq 4\%$), te zadovoljavaju postavljeni kriterijum.

1.1.9. Sadržaj rastvorljivih fosfata

Rastvorljivi fosfati negativno utiču na vrijeme vezivanja cementnih kompozita, produžavajući ga sa povećanjem koncentracije. Sadržaj rastvorljivih fosfata (P_2O_5) je određen u skladu sa principima datim u Aneksu C standarda EN 450-1 i limitiran je na 100mg/kg. Rezultati ispitivanja sadržaja rastvorljivih fosfata su dati u Tabela 50.

Tabela 50. Sadržaj rastvorljivih fosfata u biopepelima

Pepeo (mg/kg)	Rastvorljivi P_2O_5	Kriterijum (EN 450-1)
MP	13,77	ZADOVOLJEN
SP	115,95	ZADOVOLJEN

Obe vrste biopepela imaju nizak sadržaj rastvorljivih fosfata ($\leq 0,06\%$), te zadovoljavaju postavljeni kriterijum.

1.1.10. Sadržaj elemenata u tragovima u biopepelima

Sadržaj elemenata u tragovima je određen u skladu sa principima datim u standardu EN 196-2. Rezultati ispitivanja su dati u Prilogu 3, a sadržaj važnijih elemenata – teških metala je istaknut u Tabela 51.

Tabela 51. Sadržaj teških metala u biopepelima

Pepeo (mg/kg)	Cd	As	Cr	Pb
MP	<0,03	<0,03	71,25	<0,01
SP	<0,03	<0,03	87,25	<0,01

Sadržaj teških metala: kadmijum, arsen i olovo je vrlo nizak u obe vrste biopepela, dok je sadržaj hroma umjeren.

1.2. Fizička svojstva biopepela

1.2.1. Specifična masa

Specifična masa biopepela je određena prema standardu SRPS B.B8.032, piknometarskom metodom, pomoću vakuuma. Rezultati ispitivanja su dati u Tabela 52.

Tabela 52. Specifična masa biopepela i cementa

Mineralni dodatak	Specifična masa [g/cm ³]
MP	2,38
SP	2,37
C	3.1

Obe vrste biopepela imaju specifičnu masu cca 2400 kg/m³ i ista je manja u odnosu na specifičnu masu cementa – 3100 kg/m³.

1.2.2. Specifična površina

Specifična površina biopepela je određena prema standardu SRPS EN 196-6, aerometarskom metodom, pomoću Blenovog aparata. Rezultati ispitivanja su dati u Tabela 53.

Tabela 53. Specifična površina biopepela i cementa

Mineralni dodatak	Specifična površina [cm ² /g]
-------------------	---

MP	9400
SP	5500
C	4020

Nakon pripreme materijala, koja je obuhvatila mljevenje biopepela u trajanju od 6h, isti se odlikuje velikom finoćom mliva, koja je izražena preko određene specifične površine. Stoga, čestice biopepela su sitnije od čestica cementa. Finoća mliva igra važnu ulogu u hemijskim reakcijama i utiče na indeks aktivnosti pucolanskih materijala, budući da sitniji materijali lakše stupaju u reakciju, brže reaguju i bolje se rastvaraju.

1.2.3. Finoća

Finoća materijala, prema standardu EN 450-1, određena je kao procentualni ostatak biopepela na situ otvora 0,045mm, nakon prosijavanja vazdušnim putem pod pritiskom - Air-Jet metodom, u skladu sa metodom datom u EN 933-10 [82]. Rezultati ispitivanja finoće su dati u Tabela 54.

Tabela 54. Finoća biopepela

Mineralni dodatak	Finoća (%)	Kategorija (EN 450-1)
MP	10,5	S
SP	19,2	P

Materijali se, prema EN 450-1, klasifikuju u dvije kategorije po finoći: kategorija N – za finoću materijala do 40% i kategorija S - za finoću materijala do 12%, sa tolerancijom $\pm 10\%$.

1.2.4. Ispitivanje klase pucolanske aktivnosti biopepela

Pucolanska aktivnost je ispitana na uzorcima pripremljenim prema proceduri datoj u SRPS B.C1.017-2001 [72]. Klasa pucolanske aktivnosti je određena na osnovu 7-dnevne čvrstoće pri pritisku (f_p) i čvrstoće na savijanje (f_{zs}) standardnih malterskih prizmica (SRPS B.C1.018-2001, [73]). Rezultati ispitivanja su dati u Tabela 55.

Tabela 55. Pucolanska aktivnost biopepela

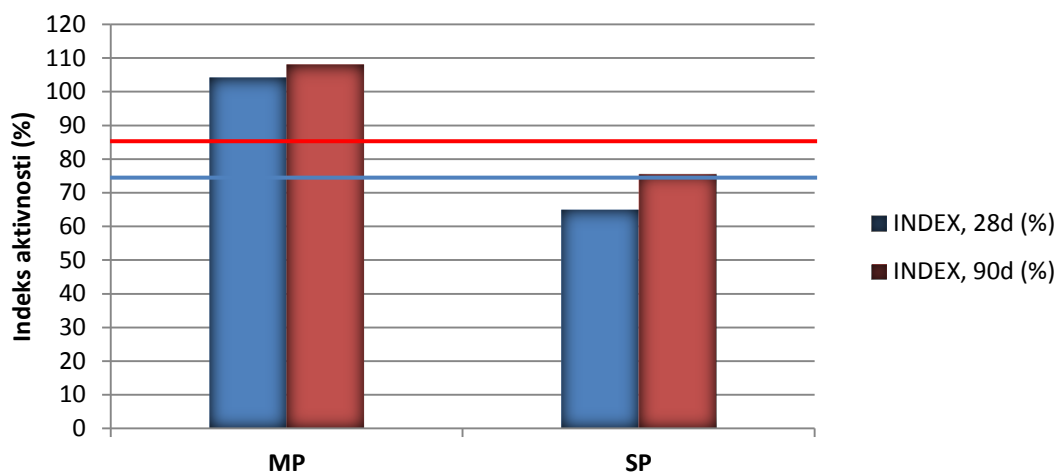
Oznaka	Vrsta biomase	$f_{zs,sr}$ [MPa]	$f_{p,sr}$ [MPa]	KLASA
MP	pšenična slama	3,4	11,0	10

SP	mješavina pšenične slame i sojine ljuske	3,6	9,3	5
----	---	-----	-----	---

Pucolanska aktivnost materijala zavisi od njegovog hemijskog sastava, prevashodno od sadržaja reaktivnog (amorfno) SiO_2 , te od finoće mliva materijala. Veći sadržaj reaktivnog SiO_2 i veća usitnjenost materijala vode ka boljoj pucolanskoj aktivnosti. Obe vrste pepela imaju blisku finoću mliva, ali se pepeo MP odlikuje većim sadržajem reaktivnog SiO_2 – 67%, što je rezultovalo visokom klasom pucolanske aktivnosti – Klasa 10. Pepeo SP ima umjeren sadržaj reaktivnog SiO_2 – 41%, pa je njegova klasa pucolanske aktivnosti – Klasa 5.

1.2.5. Ispitivanje indeksa aktivnosti biopepela

Indeks aktivnosti je ispitan na uzorcima pripremljenim prema standardu EN 450-1. Rezultati ispitivanja su grafički prikazani na Slika 88.



Slika 88 - Indeks aktivnosti biopepela

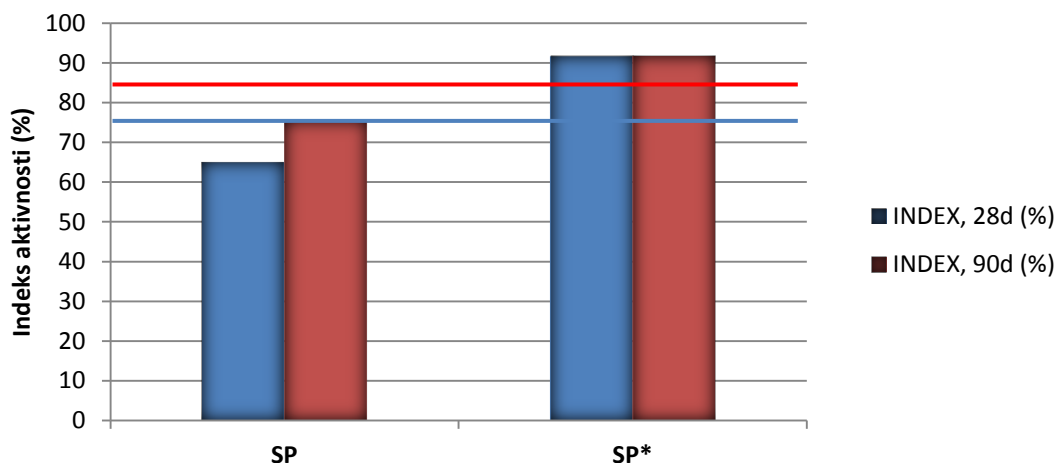
Prema EN 450-1, pri starosti od 28 dana, indeks aktivnosti treba da bude veći od 75%, a pri starosti od 90 dana, veći od 85%.

Pepeo MP zadovoljava oba uslova. Čvrstoća pri pritisku maltera sa ovom vrstom pepela je, pri obe starosti, prekoračila čvrstoću referentnog cementnog maltera (indeks aktivnosti je veći od 100%), što se može pripisati pucolanskoj reakciji biopepela i velikoj finoći materijala.

Pepeo SP je imao indekse aktivnosti od 65% i 75,5%, pri starosti od 28 i 90 dana, respektivno, te nije zadovoljio postavljene kriterijume. Razlog se ovo se može naći u sadržaju reaktivnog SiO_2 , koji je bio dosta manji u odnosu na pepeo MP. U cilju poboljšanja indeksa aktivnosti ove vrste biopepela, sprovedeno je dodatno usitnjavanje materijala u laboratorijskom mlinu. Povećanjem finoće mliva se, kao što je ranije rečeno, povećava reaktivnost pucolanskog materijala, ali se usitnjavanjem razbijaju i postojeće

veze u kristalnoj strukturi materijala, tj podstiče se formiranje amorfnе strukture materijala. Urađeno je nekoliko proba mljevenja, u cilju dobijanja što veće specifične površine materijala, te je nakon 24h mljevenja dobijen materijal koji se odlikuje specifičnom površinom po Blenu od 15.500 cm²/g.

Nakon ovog tretmana, ispitan je indeks aktivnosti novog pepela SP* i rezultati su grafički prikazani na Slika 89. Indeks aktivnosti domljevenog pepela iznosi 91,7% i 91,8%, pri starosti od 28 i 90 dana, respektivno, te su oba uslova za indeks aktivnosti zadovoljena.



Slika 89 - Indeks aktivnosti pepela SP prije i posle dodatnog mljevenja

1.2.6. Ispitivanje vremena vezivanja biopepela

Vrijeme vezivanja cementnih kompozita je važno u procesu hidratacije, jer određuje stepen prirasta čvrstoće kompozita. Početak vremena vezivanja određen je na cementnoj pasti spravljenoj od 25% biopepela i 75% cementa (po masi) u skladu sa standardima EN 196-3 i EN 197-1. Prema ovim standardima, vrijeme koje prođe od spravljanja paste do početka vezivanja biopepela ne smije biti više od dvostruko veće od istog vremena referentne cementne paste spravljene sa 100% cementom (kriterijum 1). Početak vremena vezivanja, kako je navedeno u EN 197-1, ne bi trebalo da bude kraći od 60 minuta - kriterijum 2 (za tip cementa CEM I 42,5R). Rezultati su dati u Tabela 56.

Tabela 56. Vrijeme vezivanja biopepela

	Početak vremena vezivanja (minute)	Kraj vremena vezivanja (minute)	Kriterijum 1	Kriterijum 2
C	120	155	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN
MP	210	320	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN

SP	350	420	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN
----	-----	-----	------------	------------

Obe vrste biopepela ispunjavaju kriterijum 2, a pepeo SP ima više nego dvostruko veće vrijeme početka vezivanja u odnosu na referentnu cementnu pastu. Vrijeme vezivanja biopepela je duže u odnosu na vrijeme vezivanja standardne cementne paste, što je rezultat usporene hidratacije biopepela u odnosu na cement i prolongirane pucolanske reakcije (reakcija pucolana i slobodnog Ca(OH)_2 nastalog u procesu hidratacije cementa). Na vrijeme vezivanja, uticaj ima i finoća mliva, tj. specifična površina materijala. Veća specifična površina uzrokuje veću potražnju čestica za vodom, što dodatno produžava vrijeme vezivanja.

Pepeo SP se karakteriše dužim vremenom vezivanja u odnosu na pepeo MP, što je rezultat prisustva organskih materija (nesagorjelih dijelova slame) u strukturi pepela mješavine pšenične i sojine slame.

1.2.7. Ispitivanje stalnosti zapremine biopepela

Stalnost zapremine se odnosi na svojstvo paste da, nakon vezivanja, zadrži svoju zapreminu, bez destruktivne ekspanzije, koja može biti uzrokovana povećanom količinom slobodnih oksida CaO i MgO . Stalnost zapremine je utvrđena na cementnoj pasti spravljenoj od 30% biopepela i 70% cementa (po masi) u skladu sa standardima EN 196-3 i EN 197-1. Prema ovim standardima, stalnost zapremine, izražena preko ekspanzije paste, ne smije biti veća od 10mm. Kako oba tipa pepela biomase imaju zanemarljivu ekspanziju, do 1mm, kriterijumi su ispunjeni. Rezultati su dati u Tabela 57.

Tabela 57. Stalnost zapremine biopepela

	Ekspanzija (mm)	Kriterijum
C	0	ZADOVOLJEN
MP	0,5	ZADOVOLJEN
SP	1	ispunjen

1.3. Rekapitulacija karakterizacije biopepela kao mineralnog dodatka u skladu sa relevantnim standardima

U nastavku je data rekapitulacija ispitivanja fizičkih i hemijskih svojstava dvije korištene vrste biopepela, spisak relevantnih standarda po kojima je vršeno ispitivanje i ocjena ispunjenosti kriterijuma. Rekapitulacije za pepeo MP je data u

Tabela 58, a za pepeo SP u Tabela 59.

Tabela 58. Rekapitulacija ispitivanja fizičkih i hemijskih svojstava za MP pepeo

	Svojstvo	Rezultat ispitivanja	Kriterijum	Relevantni standard	Ispunjava kriterijum
HEMIJSKA SVOJSTVA	Hemijski sastav Ukupan sadržaj oksida: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	71%	$\geq 70\%$	EN 196-2 EN 450-1	DA
	Gubitak žarenjem	5,18%	A: max 5% B: max 7% C: max 9%	EN 196-2 EN 450-1	KATEGORIJA B
	Sadržaj hlorida	0,060%	$\leq 0,1\%$	EN 196-2 EN 450-1	DA
	Sadržaj sulfata	0,2%	$\leq 3\%$	EN 196-2 EN 450-1	DA
	Sadržaj slobodnog CaO	0,14%	$\leq 1,5\%$	EN451-1 EN 450-1	DA
	Sadržaj reaktivnog SiO_2	67,07%	$\geq 25\%$	EN197-1 EN 450-1	DA
	Ukupan sadržaj alkalija $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$	8,68%	$\leq 5\%$	EN 196-2 EN 450-1	NE
	Sadržaj fosfata	1,72%	$\leq 5\%$	ISO 29581-2 EN 450-1	DA
	Sadržaj rastvorljivih fosfata	13,8mg/kg	$\leq 100\text{mg/kg}$	EN 450-1	DA
FIZIČKA SVOJSTVA	Specifična masa (g/cm^3)	2,38	/	SRPS B.B8.032	/
	Specifična površina (cm^2/g)	9.400	/	SRPS EN 196-6	/
	Finoća	10,5%	$\leq 12\%$ (S) $\leq 40\%$ (P)	EN 933-10 EN 450-1	KATEGORIJA S
	Pucolanska aktivnost	$f_p = 11\text{MPa}$ $f_{zs} = 3,4\text{MPa}$	$f_p \geq 5\text{MPa}$ $f_{zs} \geq 2\text{MPa}$	SRPS B.C1.017-2001 SRPS B.C1.018-2001	KLASA 10
	Indeks aktivnosti	$\text{Al}_{28} = 104\%$ $\text{Al}_{90} = 108\%$	$\text{Al}_{28} \geq 75\%$ $\text{Al}_{90} \geq 85\%$	EN 450-1	DA
	Vreme vezivanja	$t_{pv,b} = 210'$	$t_{pv,b} \leq 2 * t_{pv,c}$	EN 196-3	DA

		$t_{pv,c}=120'$	$t_{pv,b}\leq 60'$	EN 197-1 EN 450-1	
	Stalnost zapremine	0,5mm	$\leq 10\text{mm}$	EN 196-3 EN 197-1 EN 450-1	DA

Tabela 59. Rekapitulacija ispitivanja fizičkih i hemijskih svojstava za SP pepeo

	Svojstvo	Rezultat ispitivanja	Kriterijum	Relevantni standard	Ispunjava kriterijum
HEMIJSKA SVOJSTVA	Hemijski sastav Ukupan sadržaj oksida: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	57,12%	$\geq 70\%$	EN 196-2 EN 450-1	NE
	Gubitak žarenjem	4,85%	A: max 5% B: max 7% C: max 9%	EN 196-2 EN 450-1	KATEGORIJA A
	Sadržaj hlorida	0,025%	$\leq 0,1\%$	EN 196-2 EN 450-1	DA
	Sadržaj sulfata	0,18%	$\leq 3\%$	EN 196-2 EN 450-1	DA
	Sadržaj slobodnog CaO	0,28%	$\leq 1,5\%$	EN451-1 EN 450-1	DA
	Sadržaj reaktivnog SiO_2	40,99%	$\geq 25\%$	EN197-1 EN 450-1	DA
	Ukupan sadržaj alkalija $\text{Na}_2\text{O}+0,658 \text{K}_2\text{O}$	13,37%	$\leq 5\%$	EN 196-2 EN 450-1	NE
	Sadržaj fosfata	3,72%	$\leq 5\%$	ISO 29581-2 EN 450-1	DA
	Sadržaj rastvorljivih fosfata	116mg/kg	$\leq 100\text{mg/kg}$	EN 450-1	NE
FIZIČKA SVOJSTVA	Specifična masa (g/cm^3)	2,37	/	SRPS B.B8.032	/
	Specifična površina(cm^2/g)	15.500	/	SRPS EN 196-6	/
	Finoća	19,2%	$\leq 12\%$ (S) $\leq 40\%$ (P)	EN 933-10 EN 450-1	KATEGORIJA P
	Pucolanska aktivnost	$f_p=9,3\text{MPa}$ $f_{z5}=3,6\text{MPa}$	$f_p\geq 5\text{MPa}$ $f_{z5}\geq 2\text{MPa}$	SRPS B.C1.017-2001	KLASA 5

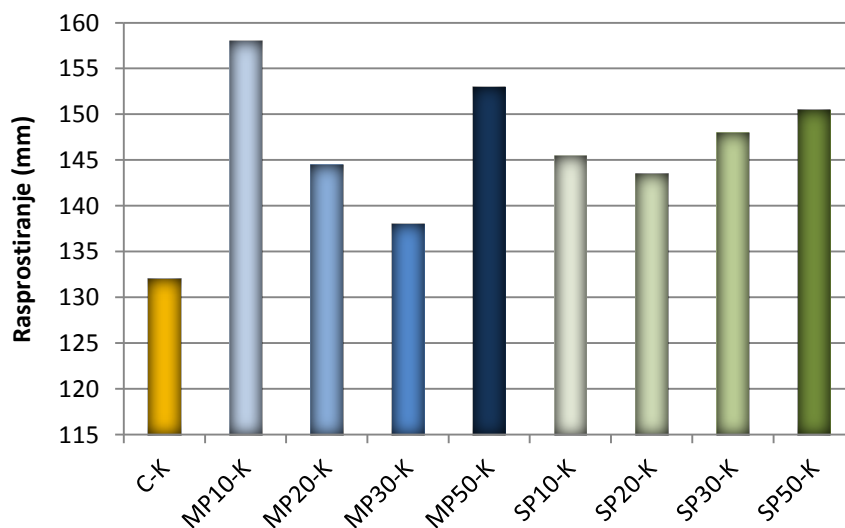
				SRPS B.C1.018-2001	
Indeks aktivnosti	$Al_{28}=92\%$ $Al_{90}=92\%$	$Al_{28}\geq 75\%$ $Al_{90}\geq 85\%$	EN 450-1		DA
Vreme vezivanja	$t_{pv,b}=350'$ $t_{pv,c}=120'$	$t_{pv,b}\leq 2*t_{pv,c}$ $t_{pv,b}\leq 60'$	EN 196-3 EN 197-1 EN 450-1		NE
Stalnost zapremine	1mm	$\leq 10\text{mm}$	EN 196-3 EN 197-1 EN 450-1		DA

2. MALTERI

2.1. Malteri sa standardnim kvarcnim pjeskom

2.1.1. Konzistencija

Rezultati mjerenja konzistencije ispitivanih vrsta maltera dati su u Tabela 29, a rezultati mjerenja konzistencije maltera sa standardnim kvarcnim pjeskom su grafički prikazani na Slika 90.



Slika 90 – Konzistencija maltera sa standardnim kvarcnim pjeskom

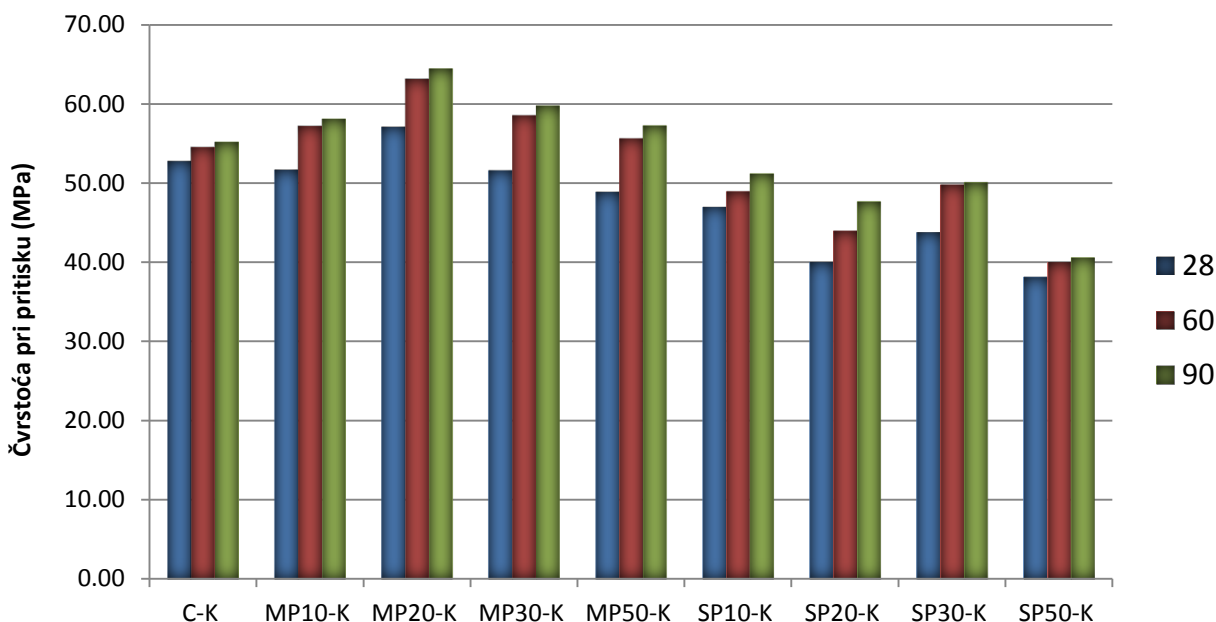
Analizom rezultata prikazanih na Slika 90, može se zaključiti:

- Mjera rasprostiranja maltera sa standardnim kvarcnim pjeskom se kreće u opsegu od 132mm-158mm. Najmanju mjeru rasprostiranja je pokazao referentni cementni malter.

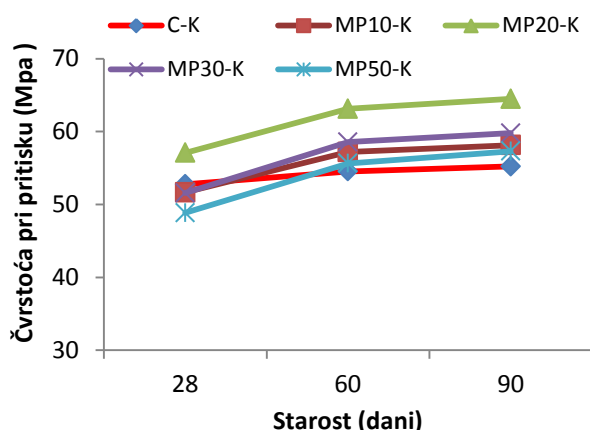
- Supstitucijom cementa pepelom MP, u količini od 10%, povećava se mjera rasprostiranja za 20%, a povećanjem udjela biopepela ova razlika se smanjivala. U cilju očuvanja konzistencije, malteru sa 50% pepela pšenične slame je dodat superplastifikator u količini od 0,2% u odnosu na masu veziva, pa je mjera rasprostiranja ove vrste maltera bila bliska konzistenciji maltera sa 10% biopepela.
- Supstitucijom cementa pepelom SP, sa povećanjem udjela biopepela, raste i mjera rasprostiranja svježeg maltera. Malteru sa 50% pepela je dodat superplastifikator u količini od 0,2% u odnosu na masu veziva u cilju očuvanja konzistencije.

2.1.2. Čvrstoća pri pritisku

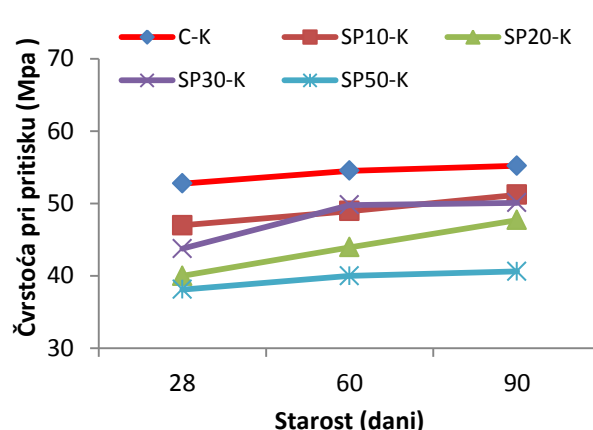
Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku svih vrsta maltera dati su u Tabela 30. Rezultati ispitivanja za maltere sa agregatom 1 su sumarno grafički prikazani na Slika 91, za maltere sa biopepelom MP na Slika 92, a za maltere sa biopepelom SP na Slika 93.



Slika 91 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa standardnim kvarcnim pjeskom



Slika 92 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 1 i biopepelom MP



Slika 93 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 1 i biopepelom SP

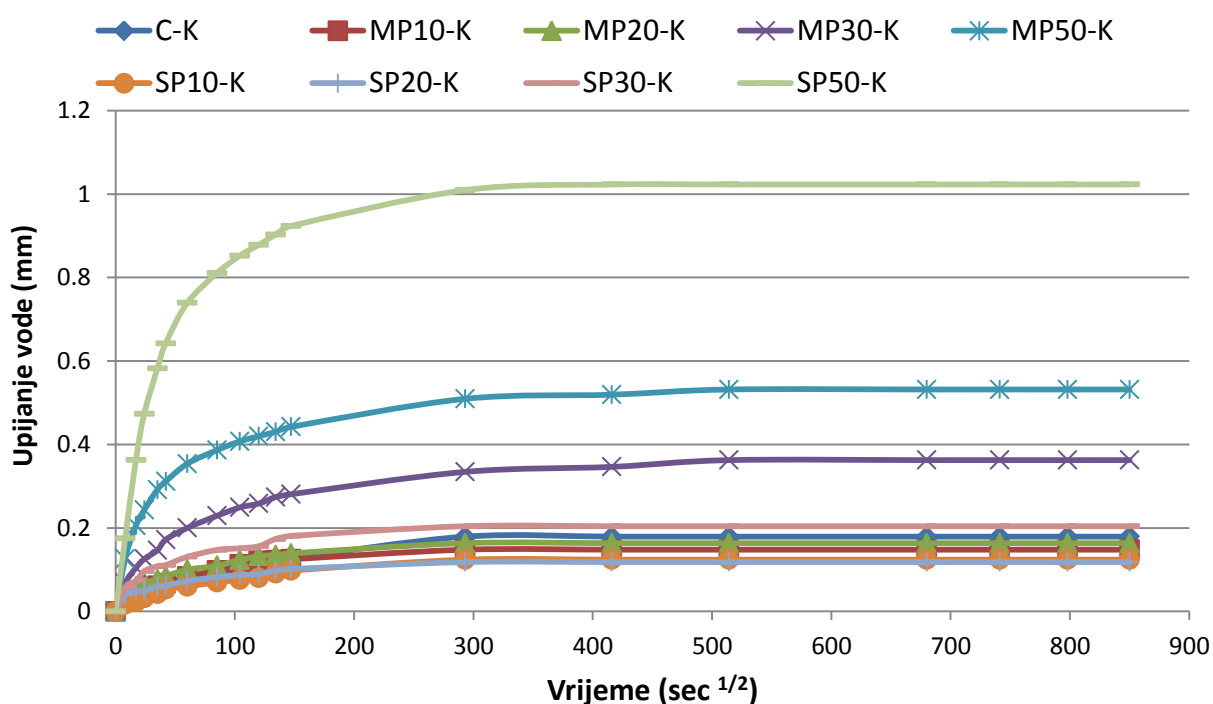
Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

- Referentni cementni malter je do starosti od 28 dana dosegao većinu svoje pritisne čvrstoće, pa razlika u čvrstoćama pri većim starostima nije bila velika.
- Malteri sa pepelom MP su pri starosti od 28 dana imali vrijednosti čvrstoće pri pritisku uporedive sa referentnim malterom. Jedino je malter sa 20% pepela imao nešto višu čvrstoću, što je, pri ovoj starosti, vjerovatno posledica efekta pakovanja čestica u malteru. Sa vremenom, kako je došla do izražaja pucolanska reakcija biopepela, konzumacijom slobodnog Ca(OH)_2 i naknadnim formiranjem C-S-H produkata u mikrostrukturi materijala, struktura maltera je progušnjena, što je rezultovalo povećanjem čvrstoće pri pritisku maltera sa biopepelom. Ovo je naročito primjetno na vrijednostima čvrstoće pri pritisku pri starosti od 60 dana. Nakon ove starosti, čvrstoća raste sa manjim prirastom. Pri starosti od 60 dana, svi malteri sa biopepelom imaju veću čvrstoću pri pritisku od referentnog maltera, a pri starosti od 90 dana malteri MP10, MP20, MP30 i MP50 imaju za 5,3%, 16,8%, 8,3% i 3,8% veću čvrstoću od referentnog maltera, respektivno. Najveću čvrstoću pri pritisku je pokazao malter sa 20% pepela pšenične slame (cca 65MPa, pri starosti od 90 dana), a daljim povećanjem nivoa supstitucije cementa u malteru ovom vrstom biopepela, smanjuje se porast čvrstoće u odnosu na referentni malter.
- Kao posledica slabije pucolanske aktivnosti pepela SP, ovi malteri su imali niže vrijednosti čvrstoće pri pritisku od referentnog maltera, pri svim

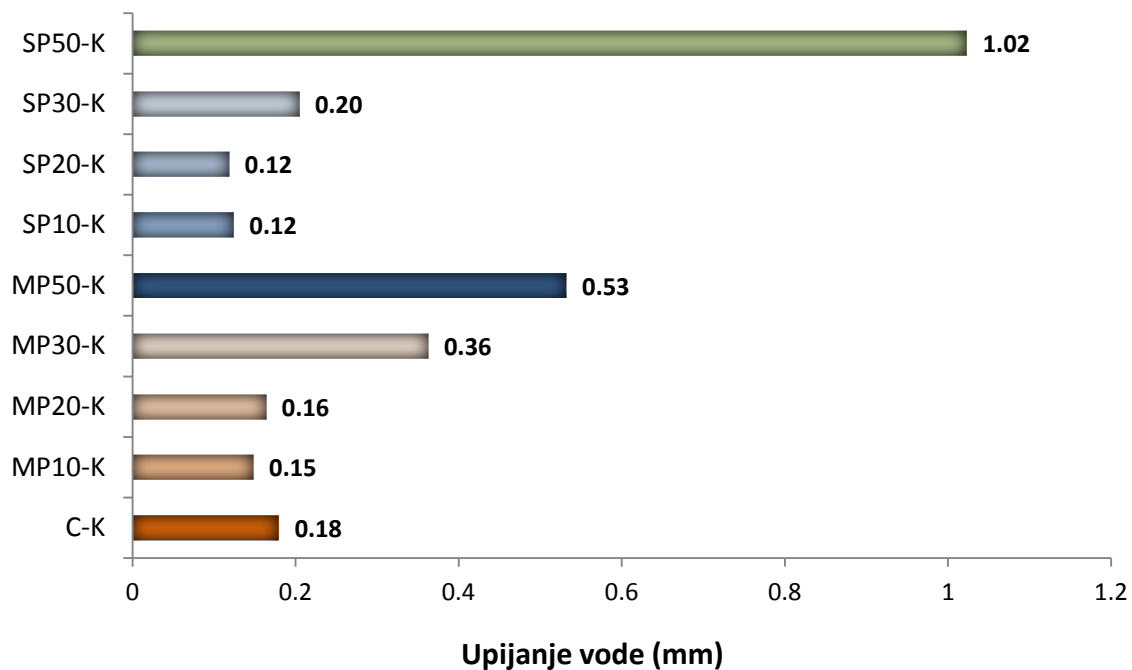
starostima. Ipak, usled pucolanske reakcije biopepela, i ovi malteri se odlukuju većim prirastom čvrstoće tokom vremena u odnosu na referentni malter, sa izuzetkom maltera sa 50% pepela koji do starosti od 90 dana nije pokazao značajan porast čvrstoće. Pri starostima od 28 i 90 dana, malteri SP10, SP20, SP30 i SP50 su imali smanjenje čvrstoće u odnosu na referentni malter za: 11% i 7%, 24% i 14%, 17% i 9%, 28% i 26%, respektivno, što potvrđuje razvoj čvrstoće pri pritisku maltera sa ovom vrstom biopepela, kao pucolanskog materijala. Malteri sa 10% i 30% pepela SP su pri starosti od 90 dana imali čvrstoće pri pritisku veće od 50Mpa, što je uporedivo sa čvrstoćama referentnog maltera.

2.1.3. Kapilarno upijanje vode

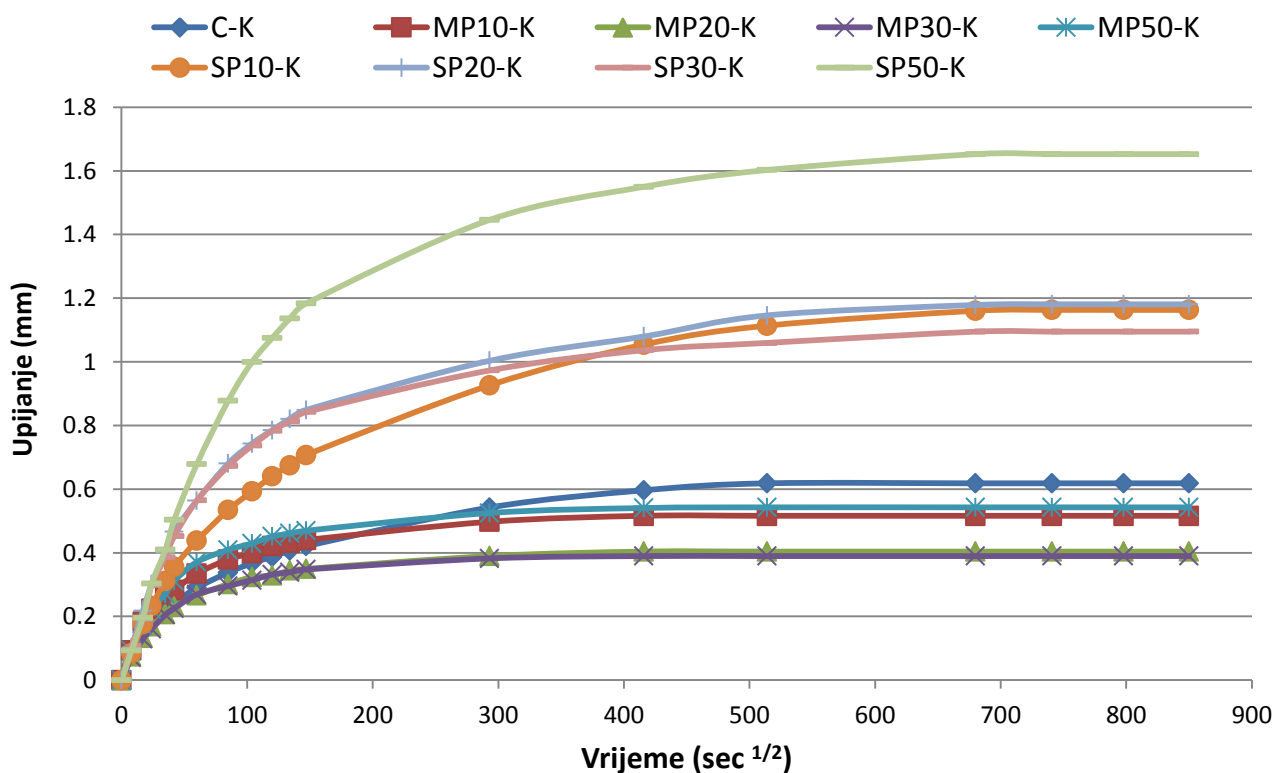
Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera sa standardnim kvarcnim pjeskom (agregat 1) pri starosti od 28 dana prikazani su grafički na Slika 94 – trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 95 – konačne vrijednosti upijanja. Rezultati ispitivanja pri starosti od 90 dana su prikazani na Slika 96 - trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 97 – konačne vrijednosti upijanja.



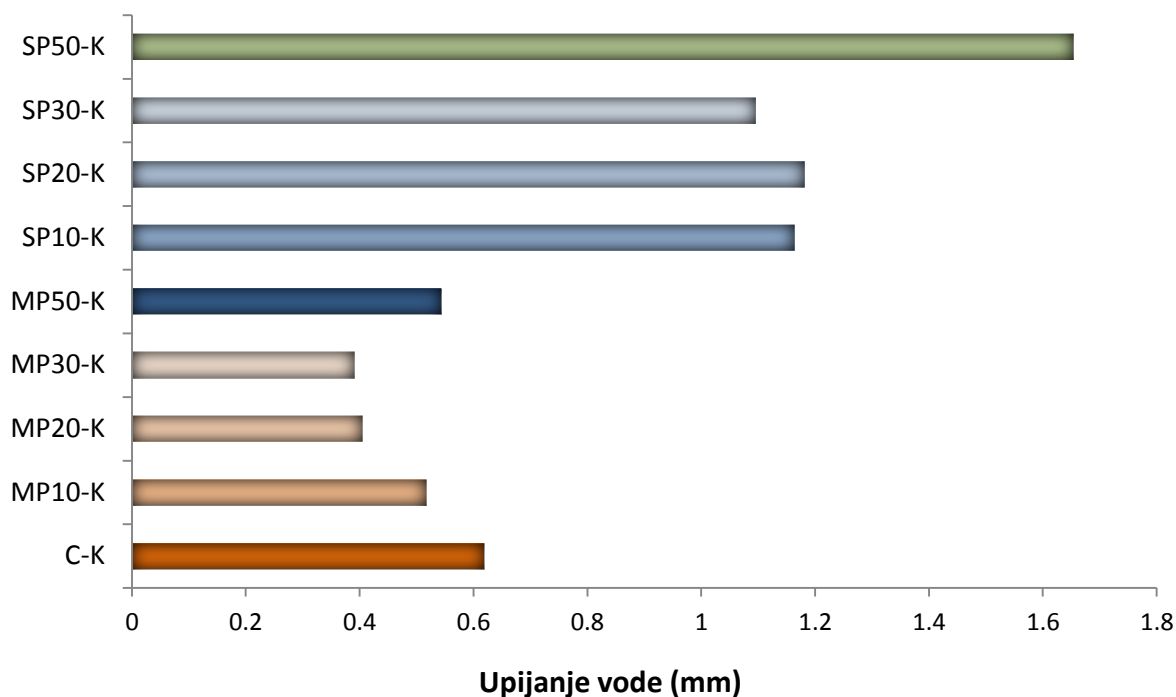
Slika 94 - Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 1, 28 dana



Slika 95 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 1, 28 dana



Slika 96 - Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 1, 90 dana



Slika 97 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 1, 90 dana

Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

- Zamjena dijela cementa biopepelima u količini do 20% imala je pozitivan efekat na upijanje vode maltera, pri starosti od 28 dana. Malteri sa 10 i 20% biopepela se odlikuju najmanjim upijanjem. Sa povećanjem udjela biopepela, preko 20%, raste i vrijednost upijanja. Najveće upijanje je registrovano kod maltera sa 50% pepela MP, te kod maltera sa 50% pepela SP. U ovoj fazi, pretpostavlja se da pucolanska reakcija biopepela nije intenzivirana, a hidratacijom cementa je generisan Ca(OH)_2 , lako rastvorljiv produkt. U odnosu na cementni malter, smanjena je količina formiranih C-S-H produkata, te su i broj i veličina kapilarnih pora povećani.
- Pri starosti od 90 dana, malteri sa pepelom MP su imali manje vrijednosti upijanja vode od referentnog cementnog maltera, pri čemu najmanje upijanje ima malter MP30. Pretpostavlja se da je ovo rezultat pucolanske reakcije biopepela, naknadnog formiranja C-S-H produkata i, posledično, zgušnjavanja strukture maltera. Malteri sa SP pepelom su imali znatno veće upijanje vode u odnosu na referentni malter i grupu maltera sa MP, pri starosti od 90 dana.
- Pri starosti od 28 dana, referentni cementni malter ima u inicijalnom periodu (1-6h) kinetiku upijanja koja se može aproksimirati linearnom funkcijom, pa

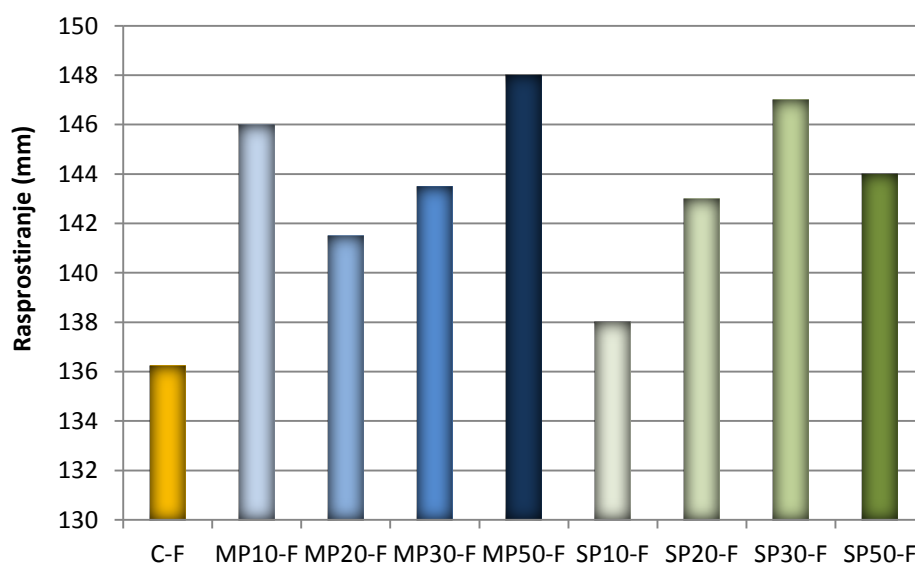
je za ovu vrstu maltera određen koeficijent inicijalnog upijanja. U sekundarnom periodu, faktor korelacije je bio manji od 0,98 - trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se nije mogla uspostaviti jednačina zavisnosti. Malteri sa biopepelom nisu ni u inicijalnom, ni u sekundarnom periodu, imali kinetiku upijanja koja je odgovarala linearnoj zavisnosti, te se koeficijenti upijanja nisu mogli odrediti.

- Pri starosti od 90 dana, kinetika upijanja maltera ove grupe se nije mogla aproksimirati linearnom funkcijom.

2.2. Malteri sa frakcionisanim agregatom riječnog porjekla

2.2.1. Konzistencija

Rezultati mjerenja konzistencije ispitivanih vrsta maltera dati su u Tabela 29, a rezultati mjerenja konzistencije maltera sa frakcionisanim agregatom riječnog porjekla su grafički prikazani na Slika 98.



Slika 98 - Konzistencija maltera sa frakcionisanim agregatom riječnog porjekla

Analizom rezultata prikazanih na Slika 98, može se zaključiti:

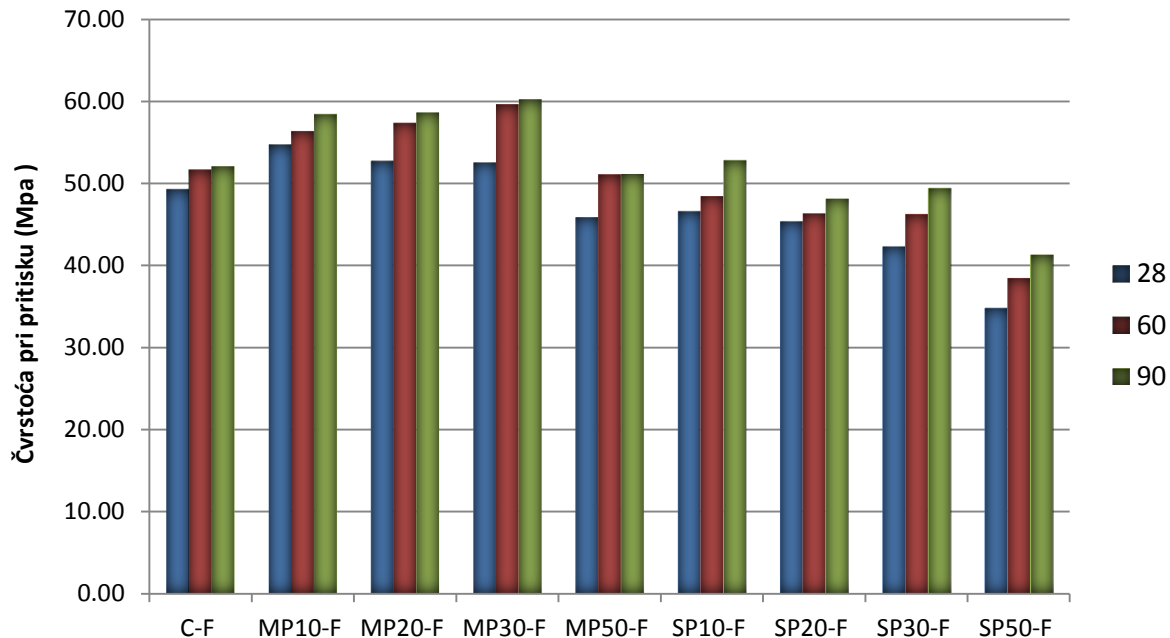
- Mjera rasprostiranja maltera sa frakcionisanim agregatom riječnog porjekla se kreće u opsegu od 136mm-148mm. Najmanju mjeru rasprostiranja je pokazao referentni cementni malter.
- Supstitucijom cementa pepelom MP, sa povećanjem udjela biopepela, raste i mjera rasprostiranja svježeg maltera. U cilju očuvanja konzistencije, malteru sa 50% pepela pšenične slame je dodat superplastifikator u količini od 0,2% u

odnosu na masu veziva, pa se ova vrsta maltera karakteriše najvećom mjerom rasprostiranja.

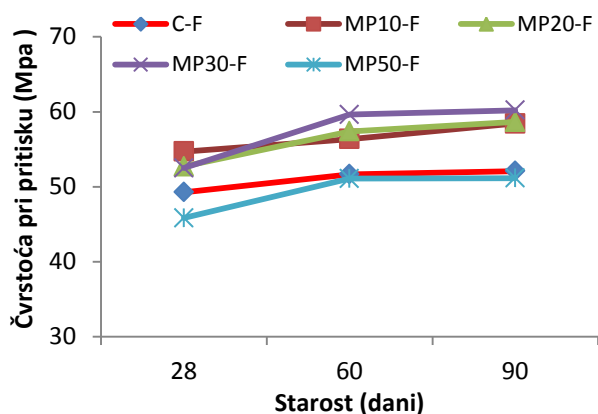
- Supstitucijom cementa pepelom SP, sa povećanjem udjela biopepela, raste i mjera rasprostiranja svježeg maltera, sa izuzetkom maltera sa 50% biopepela, koji odstupa od ovog trenda, uslijed povećanog sadržaja sitnih čestica. Ovoj vrsti maltera je dodat superplastifikator u količini od 0,1% u odnosu na masu veziva u cilju očuvanja konzistencije.
- Kod referentnog maltera je primjećeno da pri dinamičkim potresima ima tendenciju izdvajanja vode. Sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, ovaj efekat se smanjuje, a kod maltera sa 50% biopepela i eliminiše.

2.2.2. Čvrstoća pri pritisku

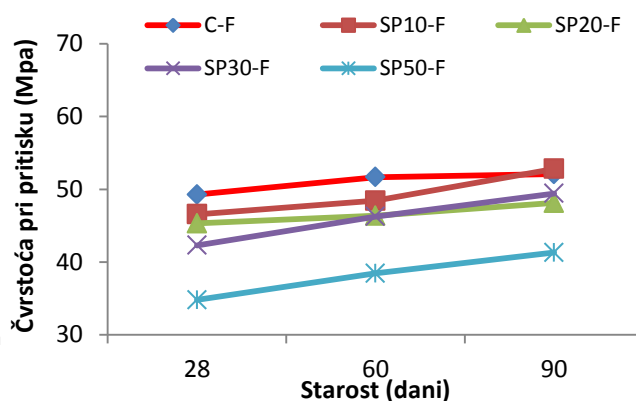
Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku svih vrsta maltera dati su u Tabela 30. Rezultati ispitivanja za maltere sa agregatom 2 su sumarno grafički prikazani na Slika 99, za maltere sa biopepelom MP na Slika 100, a za maltere sa biopepelom SP na Slika 101.



Slika 99 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 2



Slika 100 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 2 i biopepelom MP



Slika 101 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 2 i biopepelom SP

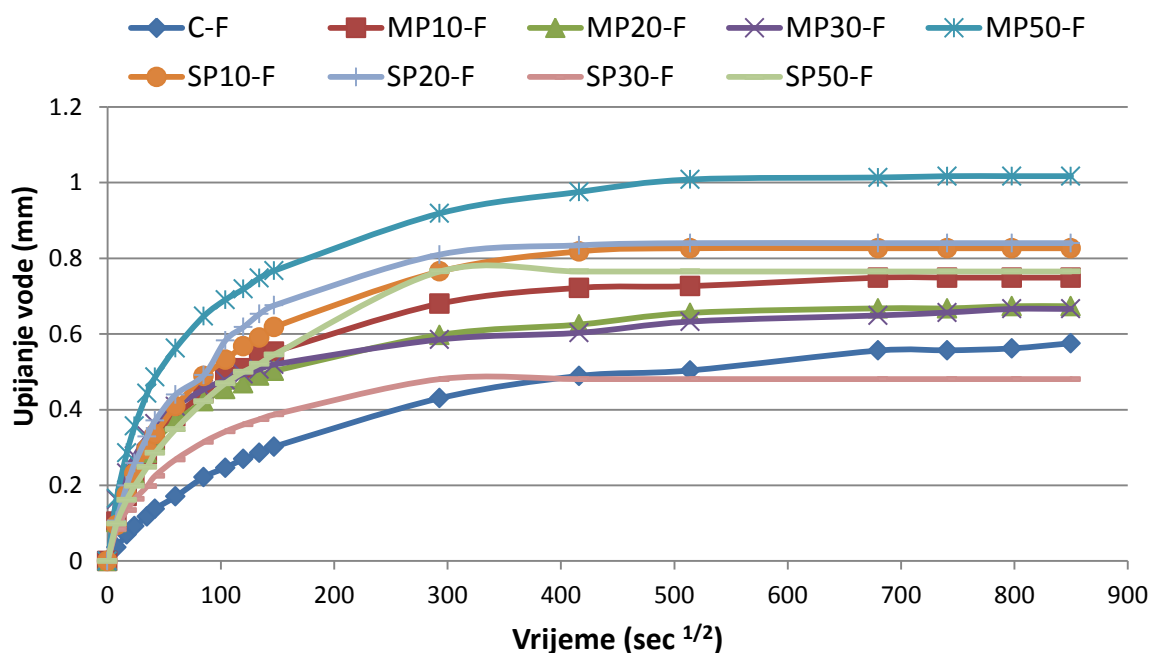
Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

- Malteri sa pepelom MP, u količini do 30% mase cementa, su već pri starosti od 28 dana imali veće čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentni malter. Jedino je malter sa 50% pepela imao nešto nižu čvrstoću u poređenju sa referentnim malterom. Pretpostavlja se da, pri ovoj starosti, pucolanska reakcija biopepela još nije intenzivirana, pa se ovo povećanje čvrstoće može pripisati filer efektu sitnih čestica biopepela koje zapunjavaju i zgušnjavaju strukturu maltera. Pri starosti od 60 dana, malteri MP20, MP30 i MP50 su imali izražen skok čvrstoće, kao rezultat pucolanske reakcije biopepela. Pri starosti od 90 dana malteri MP10, MP20, MP30 imaju za 12%, 13% i 16% veće čvrstoće od referentnog maltera, respektivno, a malter MP50 ima zanemarljivo manju čvrstoću pri pritisku od referentnog maltera. Najveću čvrstoću pri pritisku je pokazao malter sa 30% pepela pšenične slame (cca 60MPa, pri starosti od 90 dana).
- Kao posledica slabije pucolanske aktivnosti pepela SP, ovi malteri su imali niže vrijednosti čvrstoće pri pritisku od referentnog maltera, pri starosti od 28 dana. Sa povećanjem količine biopepela, povećava se i razlika u čvrstoći u odnosu na referentni malter. Tokom vremena, usled pucolanske reakcije biopepela, i ovi malteri se odlikuju većim prirastom čvrstoće u odnosu na referentni malter, naročito malter SP10, koji je pri starosti od 90 dana imao veću čvrstoću pri pritisku. Pri starostima od 28 i 90 dana, malteri SP30 i SP50 su imali smanjenje čvrstoće u odnosu na referentni malter za: 8% i 7,6%, 14%

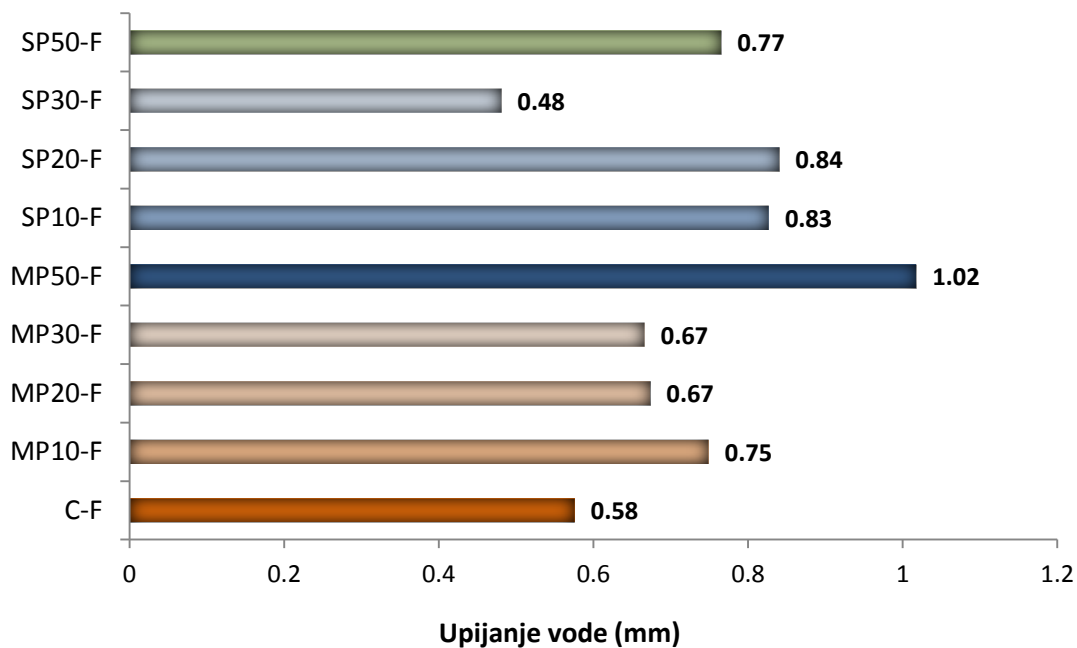
i 5%, 29% i 21%, respektivno, što potvrđuje razvoj čvrstoće pri pritisku maltera sa ovom vrstom biopepela, kao pucolanskog materijala.

2.2.3. Kapilarno upijanje vode

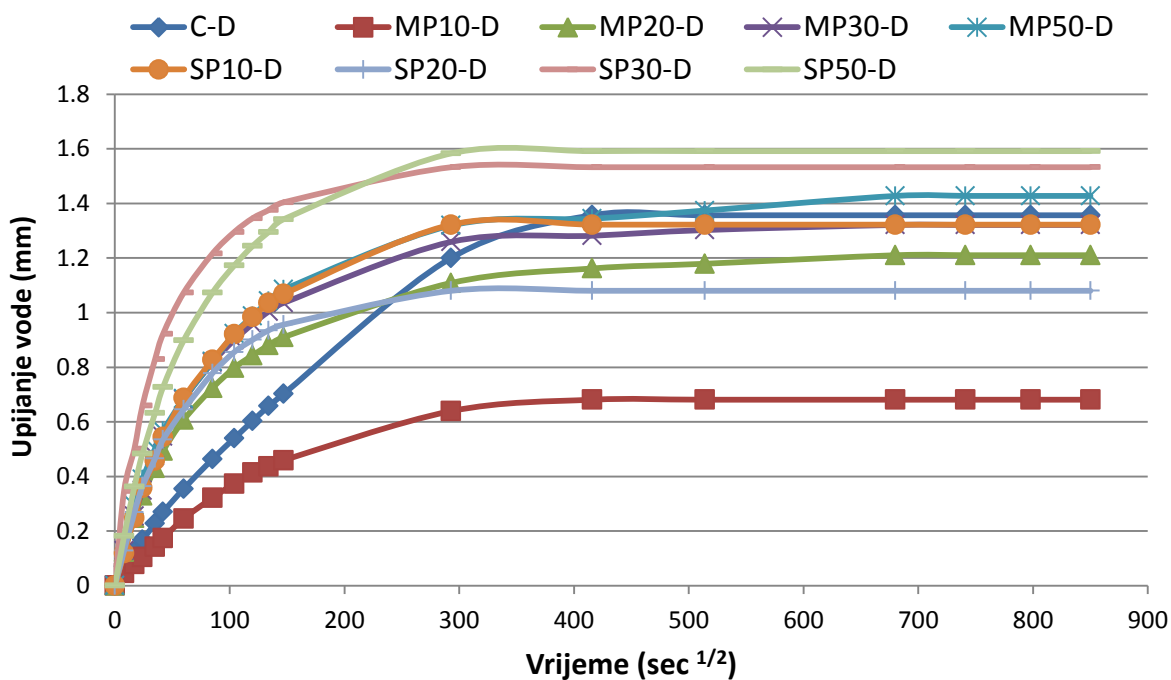
Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera sa frakcionisanim riječnim agregatom (agregat 2) pri starosti od 28 dana prikazani su grafički na Slika 102 – trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 103 – konačne vrijednosti upijanja. Rezultati ispitivanja pri starosti od 90 dana su prikazani na Slika 104 - trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 105 – konačne vrijednosti upijanja.



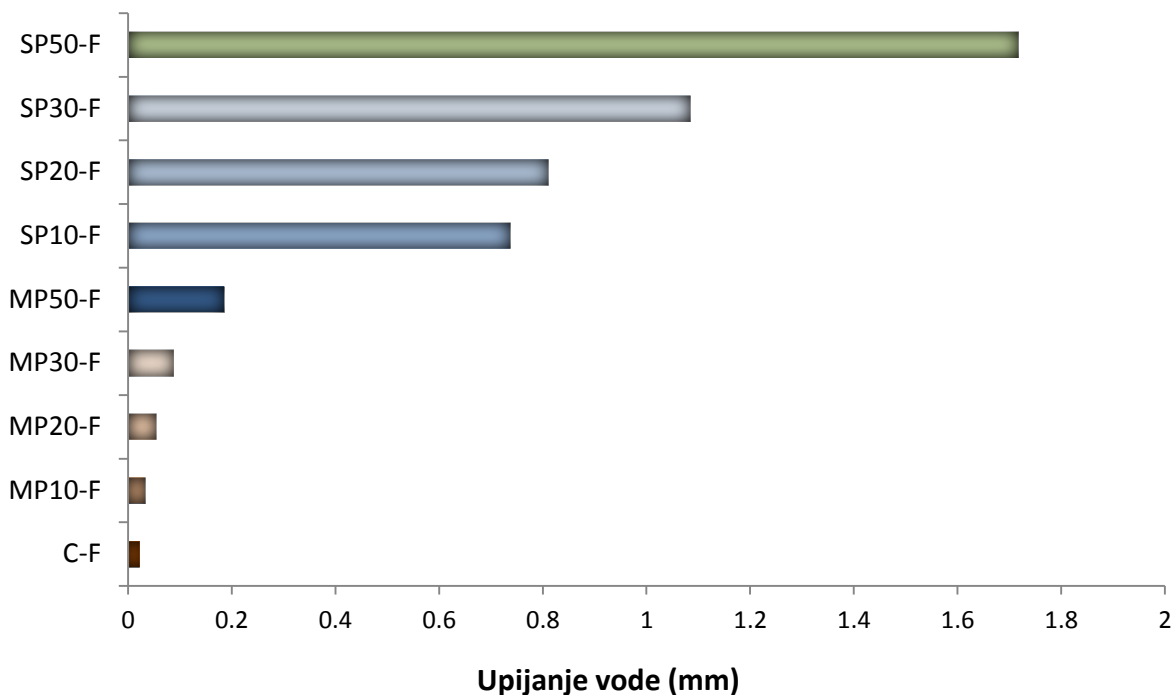
Slika 102 – Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 2, 28 dana



Slika 103 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 2, 28 dana



Slika 104 – Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 2, 90 dana



Slika 105 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 2, 90 dana

Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

- Pri starosti od 28 dana, sa povećanjem udjela pepela MP, upijanje vode se povećava, tako da se malter MP50 odlikuje najvećim upijanjem. U slučaju maltera sa pepelom SP, vrijednosti upijanja su veće od vrijednosti referentnog maltera, sa izuzetkom maltera SP30, koji je imao najmanje upijanje. U ovoj fazi, pretpostavlja se da pucolanska reakcija biopepela nije intenzivirana, pa se malteri sa biopepelom karakterišu većim sadržajem kapilarnih pora u strukturi, što dovodi do većeg upijanja vode.
- Pri starosti od 90 dana, trend povećanja upijanja sa povećanjem sadržaja pepela MP je isti, ali su vrijednosti dosta manje, što je rezultat pucolanske reakcije biopepela, naknadnog formiranja C-S-H produkata i, posledično, zgušnjavanja strukture maltera. Malteri sa SP pepelom su imali znatno veće upijanje vode u odnosu na referentni malter i grupu maltera sa MP, a vrijednost upijanja raste sa povećanjem količine biopepela.
- Pri starosti od 28 dana, referentni cementni malter ima kinetiku upijanja koja se može aproksimirati linearnom funkcijom, pa su za ovu vrstu maltera određeni koeficijenti inicijalnog i sekundarnog upijanja. Kinetika upijanja maltera sa 30% pepela pšenične slame prati linearnu zavisnost u

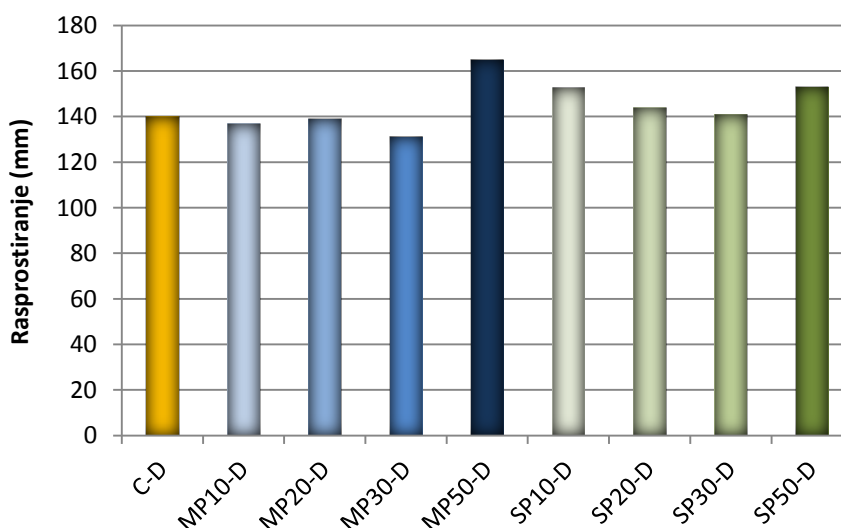
sekundarnom periodu, pa je za ovu vrstu maltera definisan koeficijent sekundarnog upijanja. Kod ostalih vrsta maltera, faktor korelacije je bio manji od 0,98 - trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se nije mogla uspostaviti jednačina zavisnosti ni u jednom vremenskom intervalu.

- Pri starosti od 90 dana, kinetika upijanja maltera sa 10-30% pepela SP prati linearnu zavisnost u inicijalnom periodu, pa je za ove vrste maltera određen koeficijent inicijalnog upijanja.

2.3. Malteri sa sitnozrnim riječnim agregatom za malterisanje

2.3.1. Konzistencija

Rezultati mjerenja konzistencije ispitivanih vrsta maltera dati su u Tabela 29, a rezultati mjerenja konzistencije maltera sa sitnozrnim riječnim agregatom za malterisanje su grafički prikazani na Slika 106.



Slika 106 – Konzistencija maltera sa sitnozrnim riječnim agregatom za malterisanje

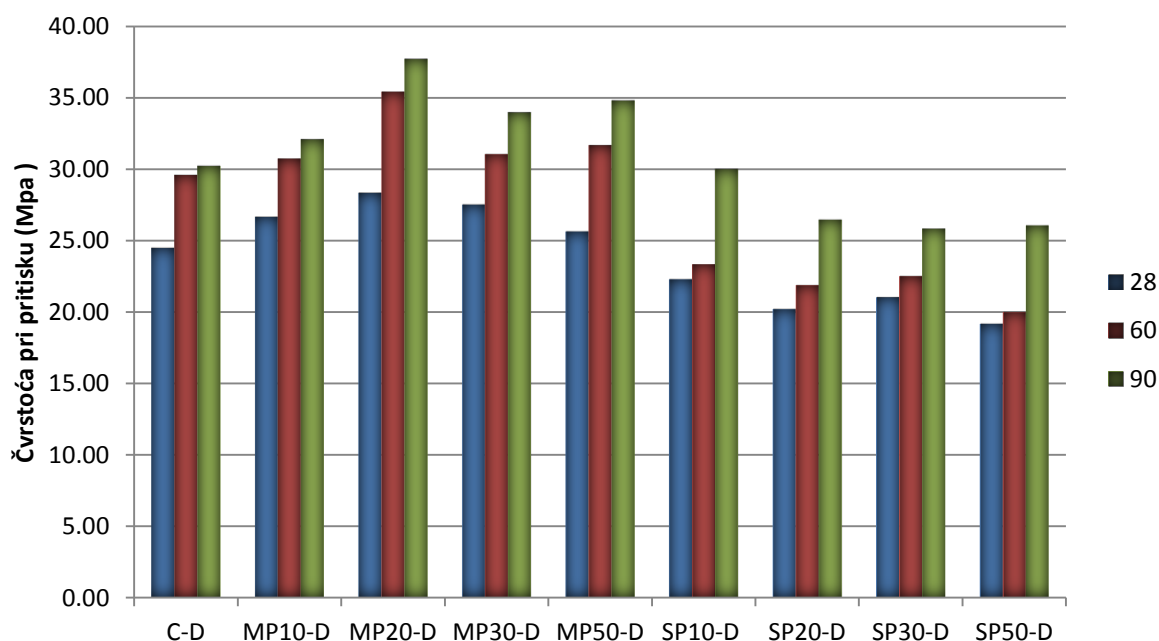
Analizom rezultata prikazanih na Slika 106, može se zaključiti:

- Mjera rasprostiranja maltera sa ovom vrstom agregata se kreće u opsegu od 130mm-162mm.
- Supstitucija cementa pepelom MP, u količini do 30% i pepelom SP, u količini do 50%, nije imala veliki uticaj na konzistenciju maltera. U cilju očuvanja konzistencije, malteru sa 50% pepela pšenične slame je dodat superplastifikator u količini od 0,2% u odnosu na masu veziva, pa je ovaj malter imao najveću mjeru rasprostiranja a.

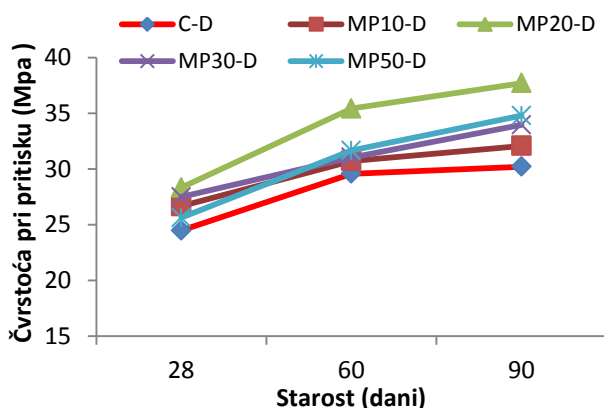
- Kod referentnog maltera je primjećeno da pri dinamičkim potresima ima tendenciju izdvajanja vode. Sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, ovaj efekat se smanjuje, a kod maltera sa 50% biopepela i eliminiše.
- Malteri sa ovom vrstom agregata u mirovanju djeluju djelimično suvo, gusto i stabilno, ali pri potresima na vibro-stolu i pri ugrađivanju malter imaju tendenciju izdvajanja vode, sa izuzetkom maltera sa većim sadržajem biopepela, a naročito malteri sa 50% biopepela, koji djeluju stabilno.

2.3.2. Čvrstoća pri pritisku

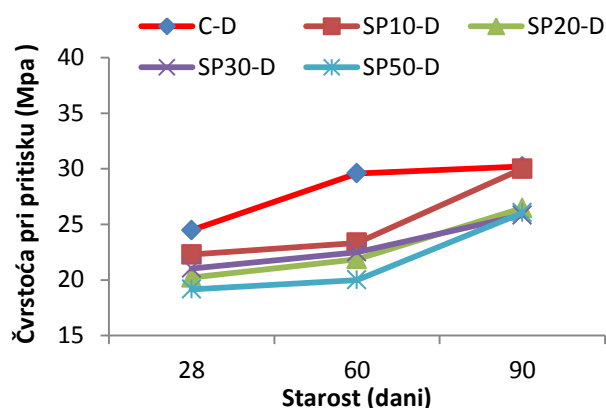
Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku svih vrsta maltera dati su u Tabela 30. Rezultati ispitivanja za maltere sa agregatom 1 su sumarno grafički prikazani na Slika 107, za maltere sa biopepelom MP na Slika 108, a za maltere sa biopepelom SP na Slika 109.



Slika 107 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa sitnozrnim riječnim agregatom za malterisanje



Slika 108 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 3 i biopepelom MP



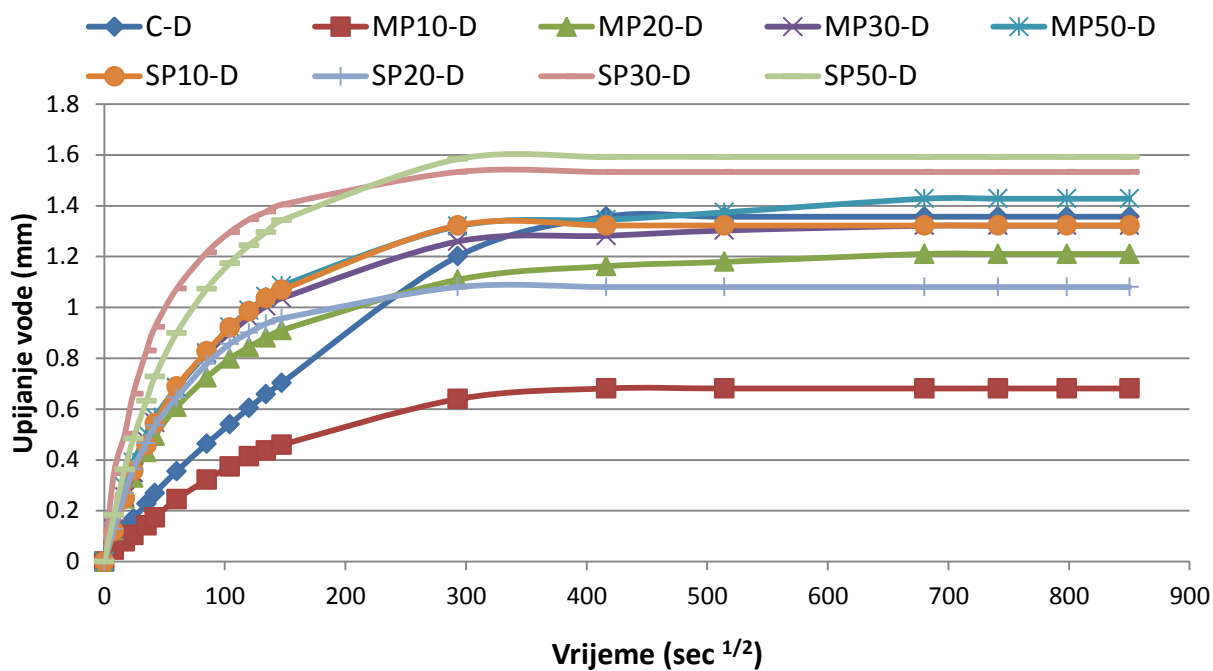
Slika 109 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa agregatom 3 i biopepelom SP

Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

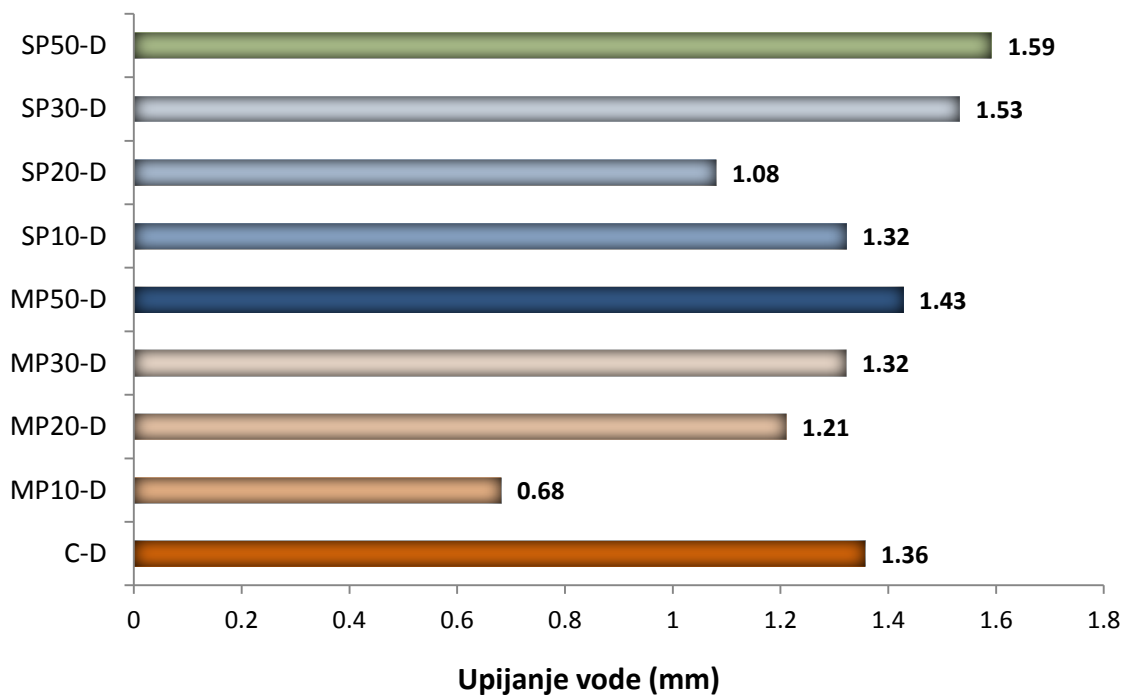
- Supstitucija dijela cementa pepelom MP, pri primjeni agregata 3, nije imala značajan efekat na čvrstoću pri pritisku maltera pri starosti od 28 dana. Sve čvrstoće su u opsegu od 24 do 28MPa. Može se primjetiti da sve vrste maltera imaju izražen skok čvrstoće pri pritisku nakon 28 dana, a naročito malteri sa 20-50% biopepela, što je posledica pucolanske aktivnosti biopepela. Malteri sa ovom vrstom biopepela imaju veće čvrstoće od referentnog maltera pri svim starostima, pri čemu se ova razlika povećava sa vremenom. Pri starosti od 90 dana, malteri MP10, MP20, MP30 i MP50 su imali za 6%, 25%, 12% i 15% veće čvrstoće od referentnog maltera.
- Sa povećanjem udjela pepela SP, čvrstoća maltera sa smanjuje, ali ne u značajnom procentu, pri svim starostima. Sve vrste maltera su imale značajan skok čvrstoće pri pritisku posle 60 dana. Pri starosti od 90 dana, referentni malter i malter sa 10% pepela SP imaju bliske čvrstoće, dok ostale vrste maltera imaju za cca 13% manju čvrstoću pri pritisku od referentnog maltera.

2.3.3. Kapilarno upijanje vode

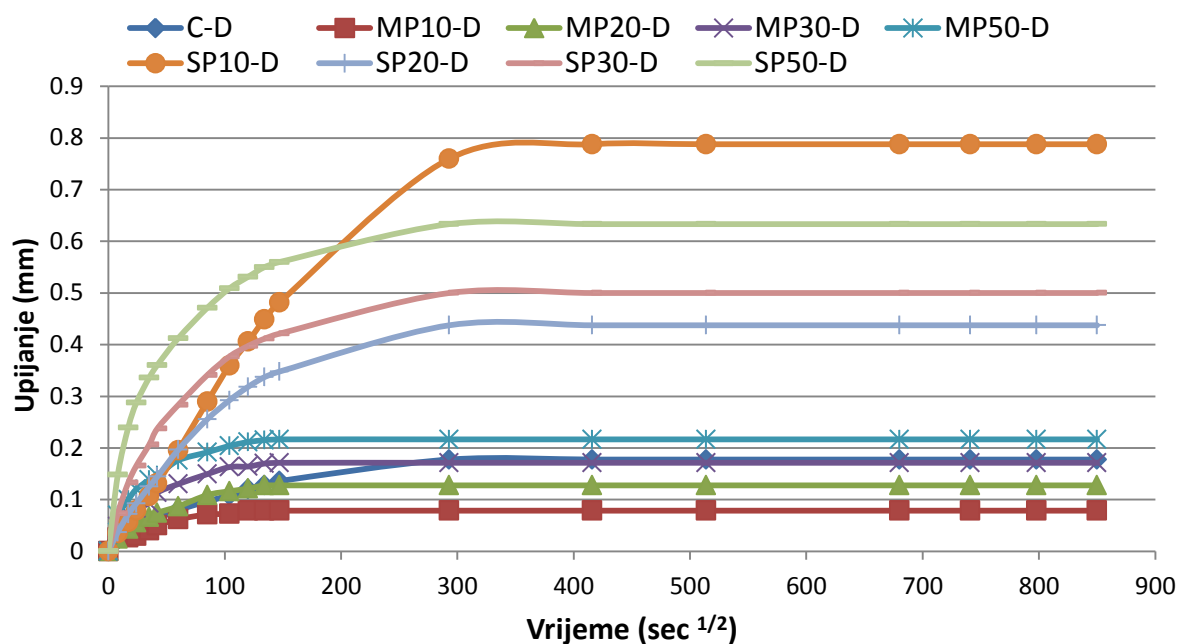
Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera sa sa sitnozrnim pjeskom za malterisanje (agregat 3) pri starosti od 28 dana prikazani su grafički na Slika 110 – trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 111 – konačne vrijednosti upijanja. Rezultati ispitivanja pri starosti od 90 dana su prikazani na Slika 112 - trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 113 – konačne vrijednosti upijanja.



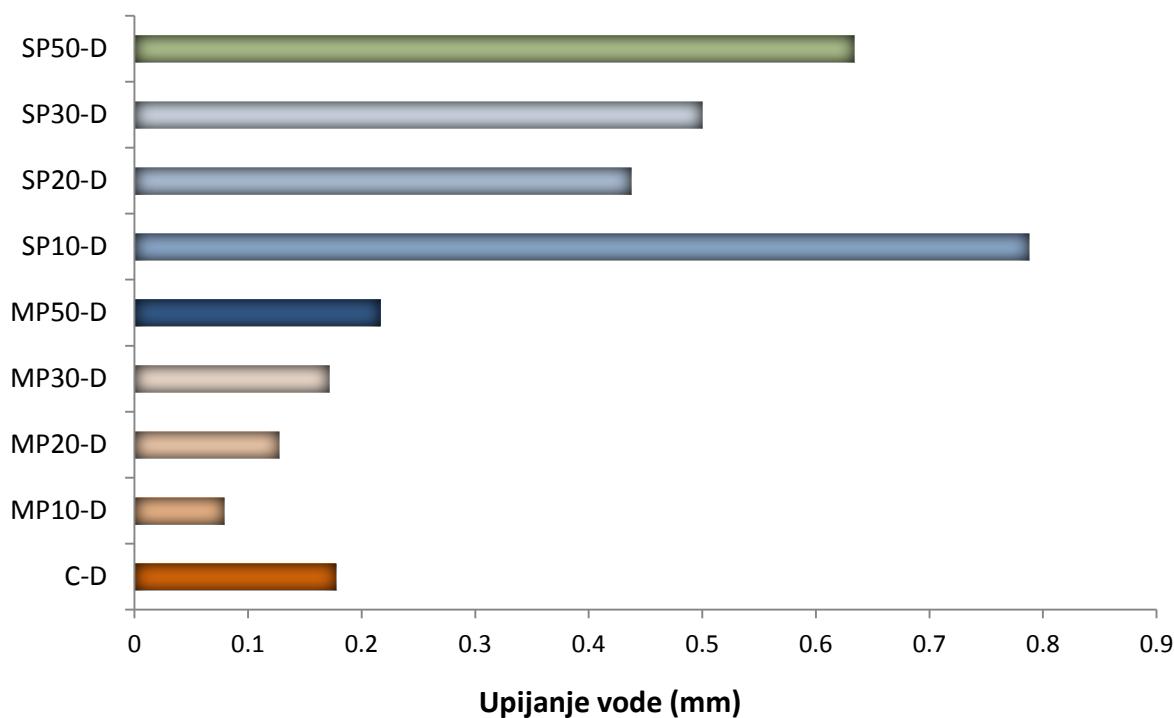
Slika 110 – Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 3, 28 dana



Slika 111 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 3, 28 dana



Slika 112 – Kapilarno upijanje vode maltera sa agregatom 3, 90 dana



Slika 113 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa agregatom 3, 90 dana

Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

- Pri starosti od 28 dana, vrsta i količina biopepela, pri primjeni ove vrste agregata, nisu imali značajan uticaj na kapilarno upijanje vode maltera.

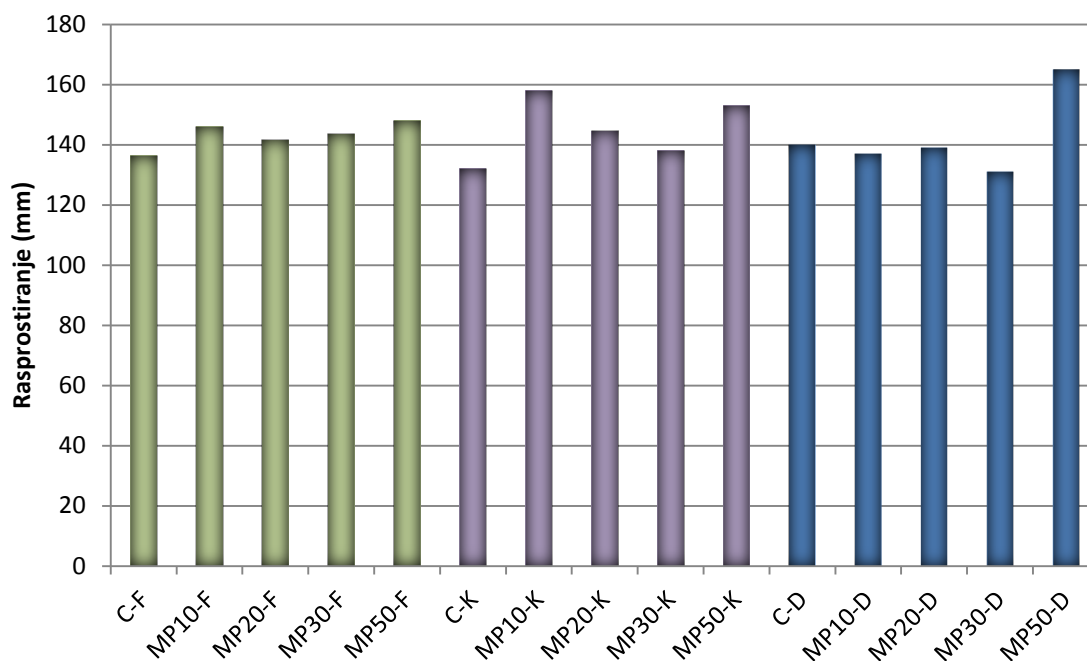
Malteri sa manjom količinom pepela, do 20%, su imali manje upijanje vode od referentnog maltera, a sa 30-50% neznatno veće upijanje.

- Pri starosti od 90 dana, kada su i hidratacija cementa i pucolanska aktivnost biopepela došli do izražaja, vrijednosti upijanja kod svih vrsta maltera ove grupe su osjetno manje. Malteri sa pepelom MP, u količini do 50% imaju manje upijanje od referentnog maltera, a malter MP50 ima upijanje blisko referentnom malteru. Malteri sa SP pepelom imaju veće vrijednosti upijanja, pri čemu se malter SP10 odlikuje najvećim upijanjem.
- Pri starosti od 28 dana, referentni cementni malter i malteri sa 10% biopepela imaju, u inicijalnom periodu, kinetiku upijanja koja se može aproksimirati linearnom funkcijom, pa je za ove vrste maltera određen koeficijent inicijalnog upijanja. Kod ostalih vrsta maltera, faktor korelacije je bio manji od 0,98 - trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se nije mogla uspostaviti jednačina zavisnosti ni u jednom vremenskom intervalu.
- Pri starosti od 90 dana, kinetika upijanja maltera ove grupe se nije mogla aproksimirati linearnom funkcijom.

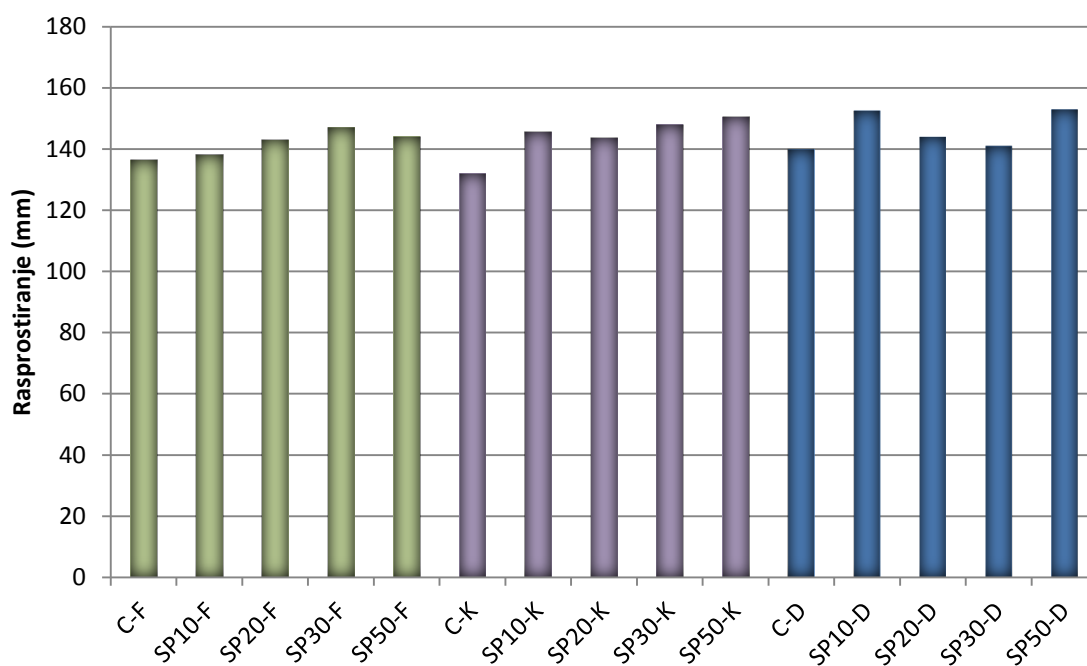
2.4. Komparativna analiza

2.4.1. Konzistencija

Rezultati mjerenja konzistencije maltera sa pepelom MP su grafički prikazani na Slika 114, a sa pepelom SP na Slika 115.



Slika 114 - Konzistencija maltera sa pepelom MP



Slika 115 - Konzistencija maltera sa pepelom SP

Analizom rezultata prikazanih na Slika 106, može se zaključiti:

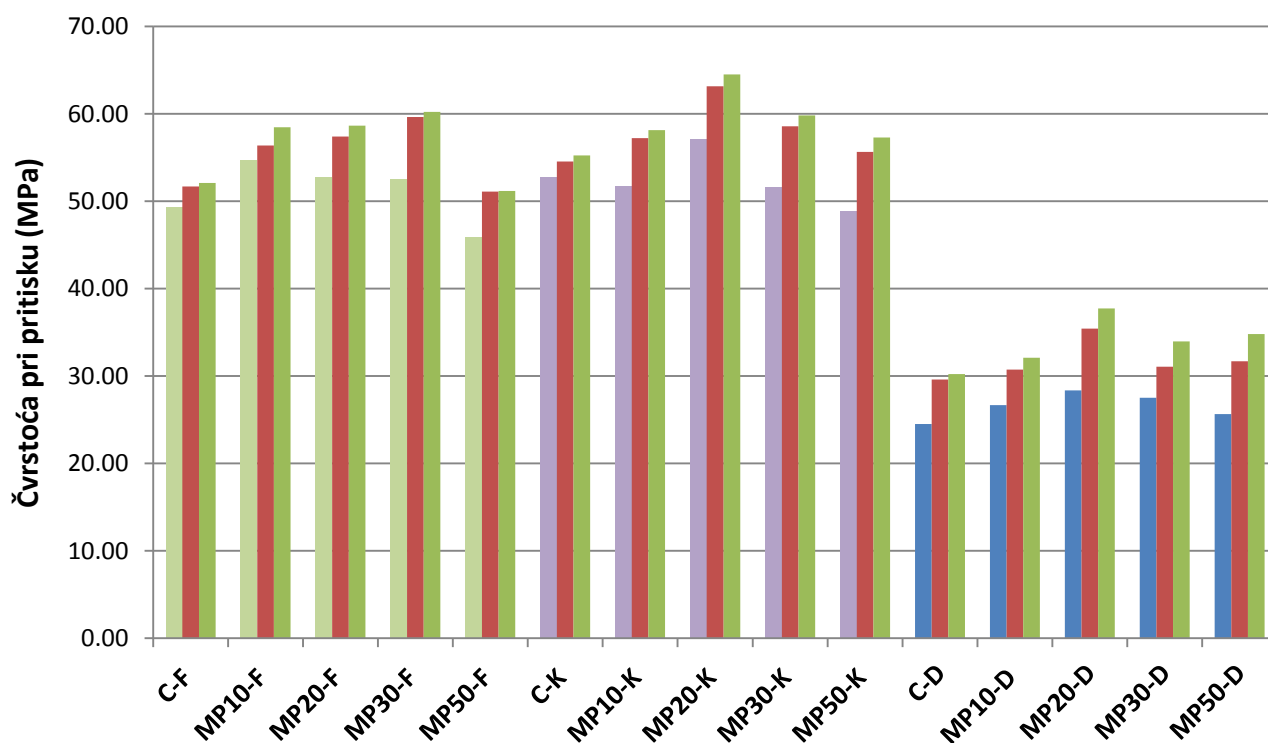
- Mjera rasprostiranja maltera se kreće u opsegu od 130mm-162mm,
- U slučaju maltera sa agregatima 1 i 2, sa povećanjem procenta zamjene cementa biopepelom, povećava se i mjera rasprostiranja, do procenta

zamjene od 50%, kada je upotrebljen superplastifikator za očuvanje konzistencije.

- Vrsta i količina biopepela, pri primjeni agregata 3, nema veliki uticaj na konzistenciju maltera.
- Pri primjeni agregata 2, a naročito agregata 3, registrovano je izdvajanje vode maltera pri dinamičkim potresima (ugrađivanju i rasprostiranju) kod referentnog cementnog maltera. Sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, ovaj efekat se smanjuje, a kod maltera sa 50% biopepela i eliminiše, pa se može zaključiti da biopepeo, usled velike finoće mliva, ima dobru sposobnost zadržavanja vode.

2.4.2. Čvrstoća pri pritisku

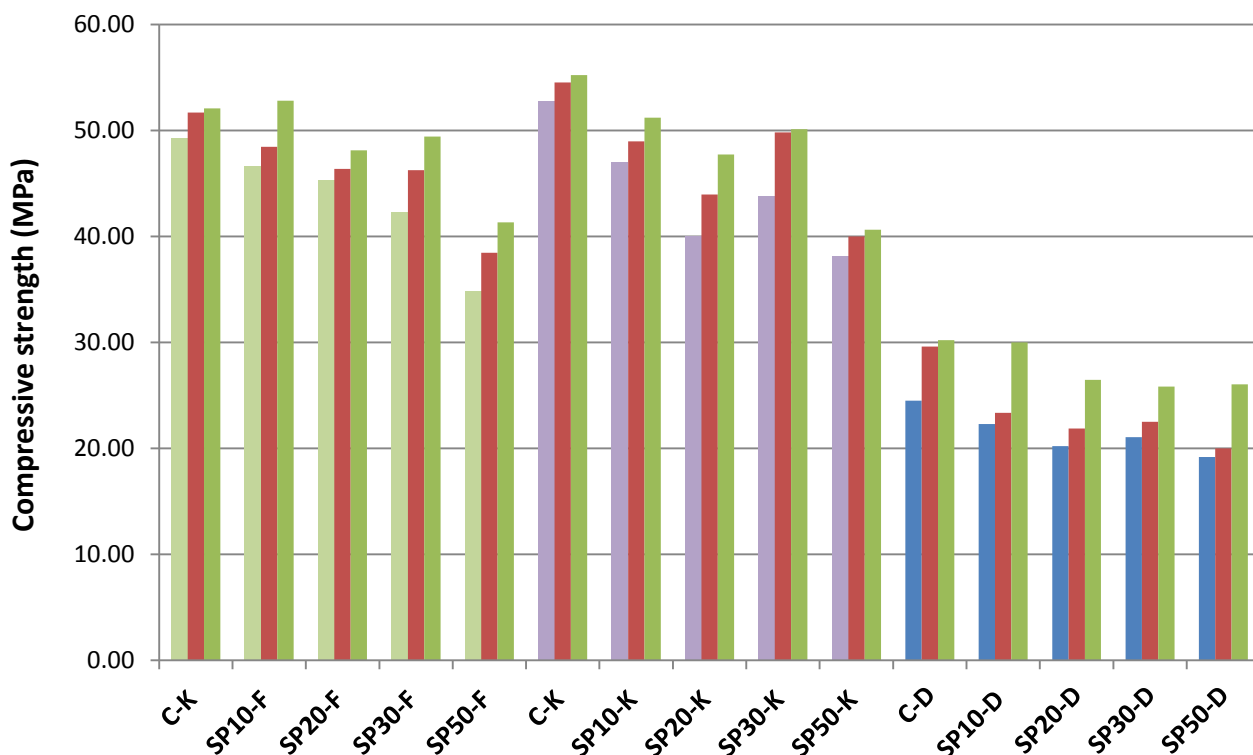
Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku sa maltera sa pepelom MP i različitim vrstama agregata su grafički prikazani na Slika 116, a sa pepelom SP na Slika 117.



Slika 116 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa pepelom MP

Analizom rezultata prikazanih na Slika 116, može se zaključiti:

- Najveće čvrstoće pri pritisku je pokazala grupa maltera spravljena sa standardnim kvarcnim pjeskom. Pri starosti od 28 dana, malteri sa agregatima 1 i 2, spravljani sa pepelom MP u količini do 30% mase cementa su imali uporedive, pa čak i veće čvrstoće od referentnog maltera, što se može objasniti velikom finoćom mliva pepela koja dovodi do popunjavanja i zgušnjavanja strukture maltera – filer efekat.
- Pri većim starostima, uz filer efekat, dolazi do izražaja i pucolanska reakcija biopepela. U pucolanskoj reakciji, biopepeo reaguje sa slobodnim Ca(OH)_2 , nastalim pri hidrataciji cementa, pri čemu nastaju novi C-S-H produkti. Ovaj dvojni efekat: filer efekat i pucolanska aktivnost vodi ka daljem zgušnjavanju strukture maltera i povećanju čvrstoće maltera sa biopepelom.
- Pri starosti od 60 i više dana, malteri sa agregatom 2 sa 10%, 20% i 30%, a pri primjeni agregata 1 i malteri sa 50% biopepela su prekoračili čvrstoće referentnog maltera.
- Usled povećanog vodovezivnog faktora kod maltera spravljenih sa agregatom 3 i, posledično, povećanog sadržaja kapilarnih pora u strukturi materijala, čvrstoća pri pritisku maltera ove grupe je smanjena za cca 50% u odnosu na čvrstoće maltera sa agregatima 1 i 2. Uticaj količine biopepela na čvrstoću je bio manje značajan kod ove grupe maltera, naročito pri manjoj starosti, tako da su vrijednosti čvrstoće pri pritisku referentnog cementnog maltera i maltera sa 50% biopepela bile bliske.



Slika 117 - Čvrstoća pri pritisku maltera sa pepelom SP

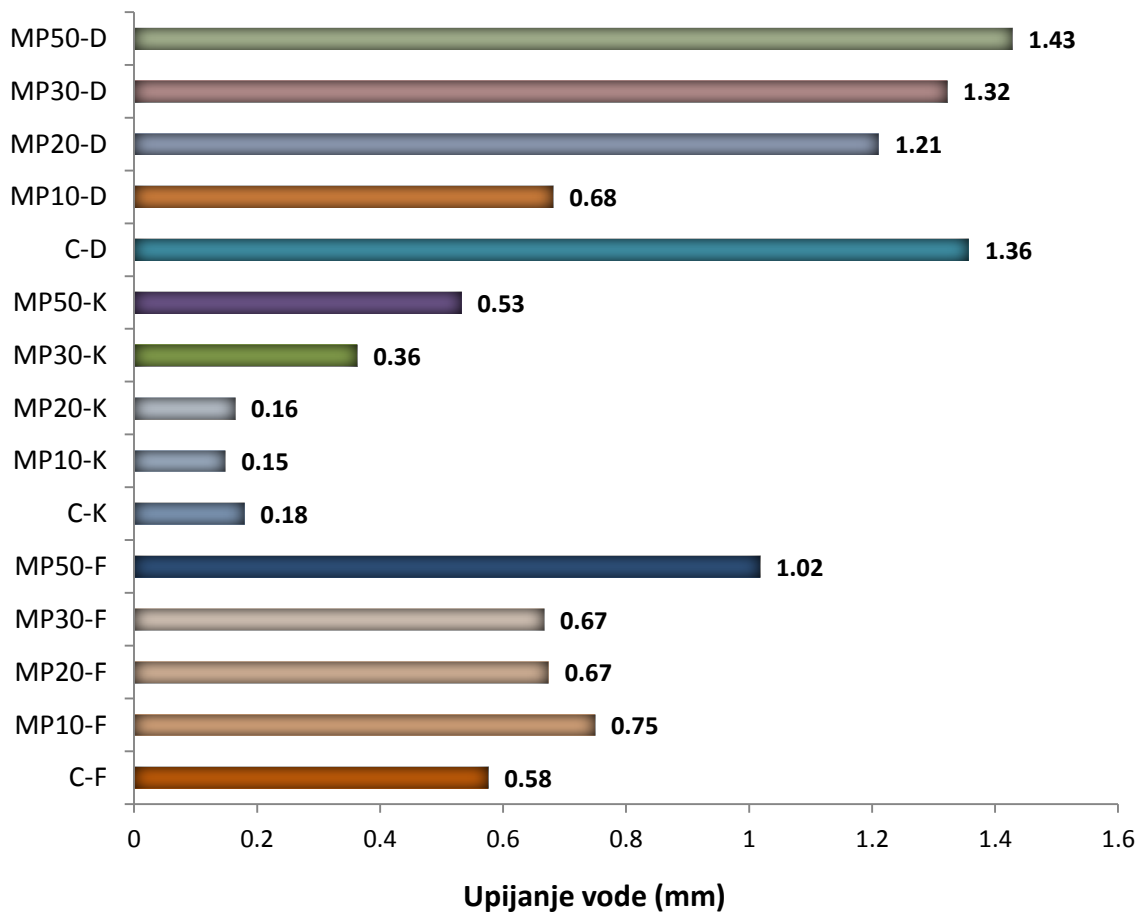
Analizom rezultata prikazanih na Slika 116, može se zaključiti:

- Najveće čvrstoće pri pritisku je pokazala grupa maltera spravljena sa standardnim kvarcnim pjeskom.
- Pri primjeni agregata 1 i 2, sa povećanjem udjela biopepela, smanjuje se čvrstoća maltera. Pri većim starostima, kao rezultat pucolanske aktivnosti biopepela, razlika u čvrstoćama se smanjuje, tako da malteri sa do 30% biopepela imaju čvrstoće uporedive sa čvrstoćama referentnog cementnog maltera.

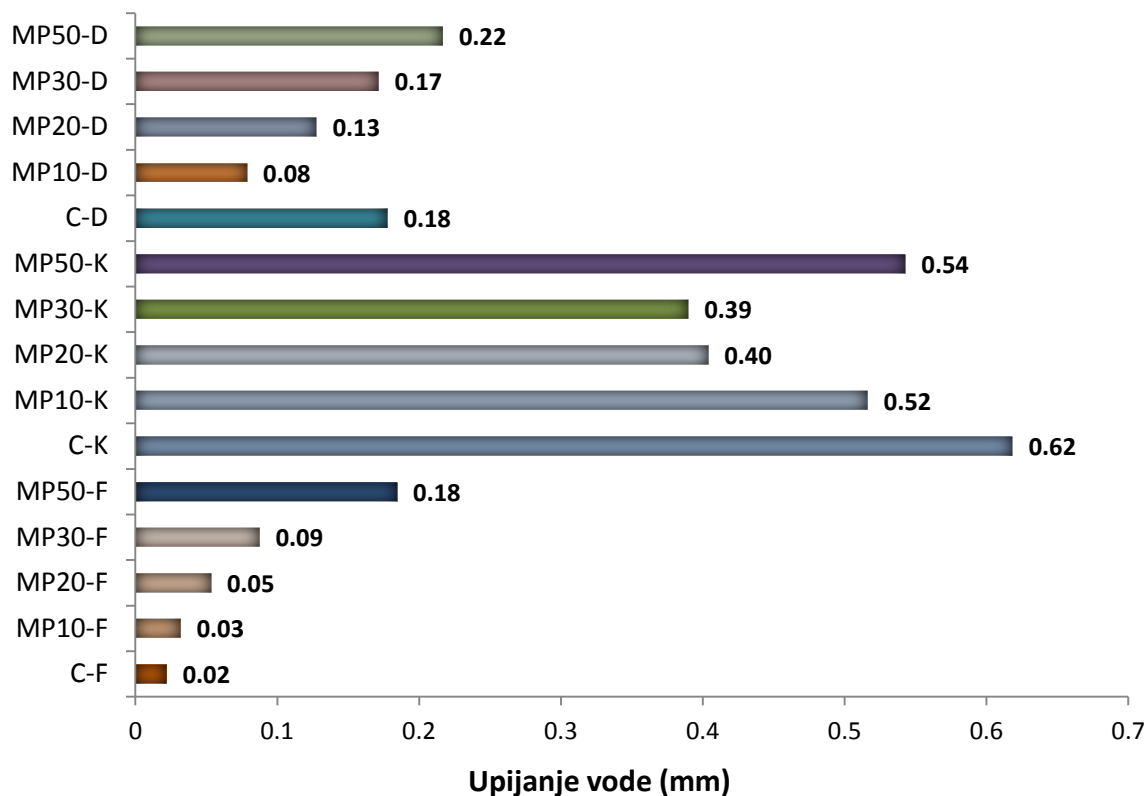
Usled povećanog vodovezivnog faktora kod maltera spravljenih sa agregatom 3 i, posledično, povećanog sadržaja kapilarnih pora u strukturi materijala, čvrstoća pri pritisku ove vrste maltera je smanjena za cca 50% u odnosu na čvrstoće maltera sa agregatima 1 i 2. Uticaj količine biopepela na čvrstoću je bio manje značajan kod ove grupe maltera, tako da su vrijednosti čvrstoće pri pritisku referentnog cementnog maltera i maltera sa čak 50% biopepela bile uporedive.

2.4.3. Kapilarno upijanje vode

Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom MP, pri starosti od 28 dana, prikazane su grafički na Slika 118, a pri starosti od 90 dana na Slika 119. Za maltere sa pepelom SP, rezultati su prikazani grafički na Slika 120 – za starosti od 28 dana i na Slika 121 – za starost maltera od 90 dana.



Slika 118 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom MP, 28 dana

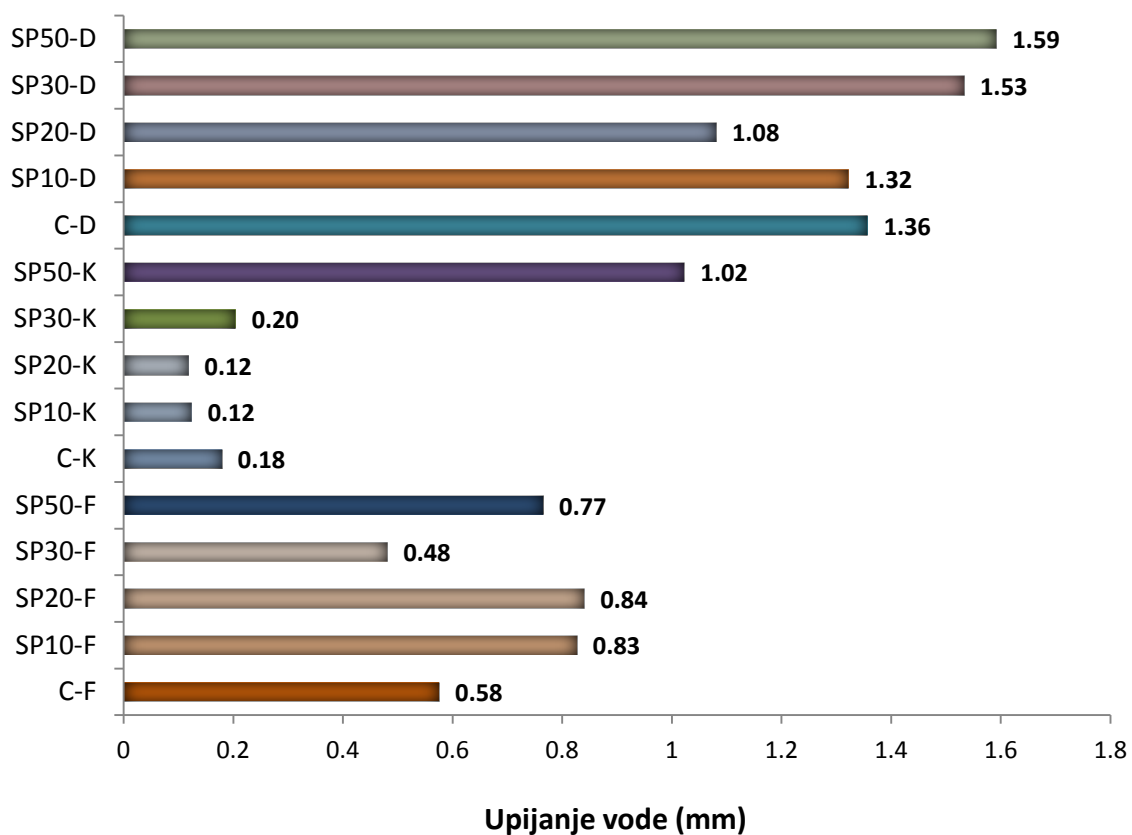


Slika 119 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom MP, 90 dana

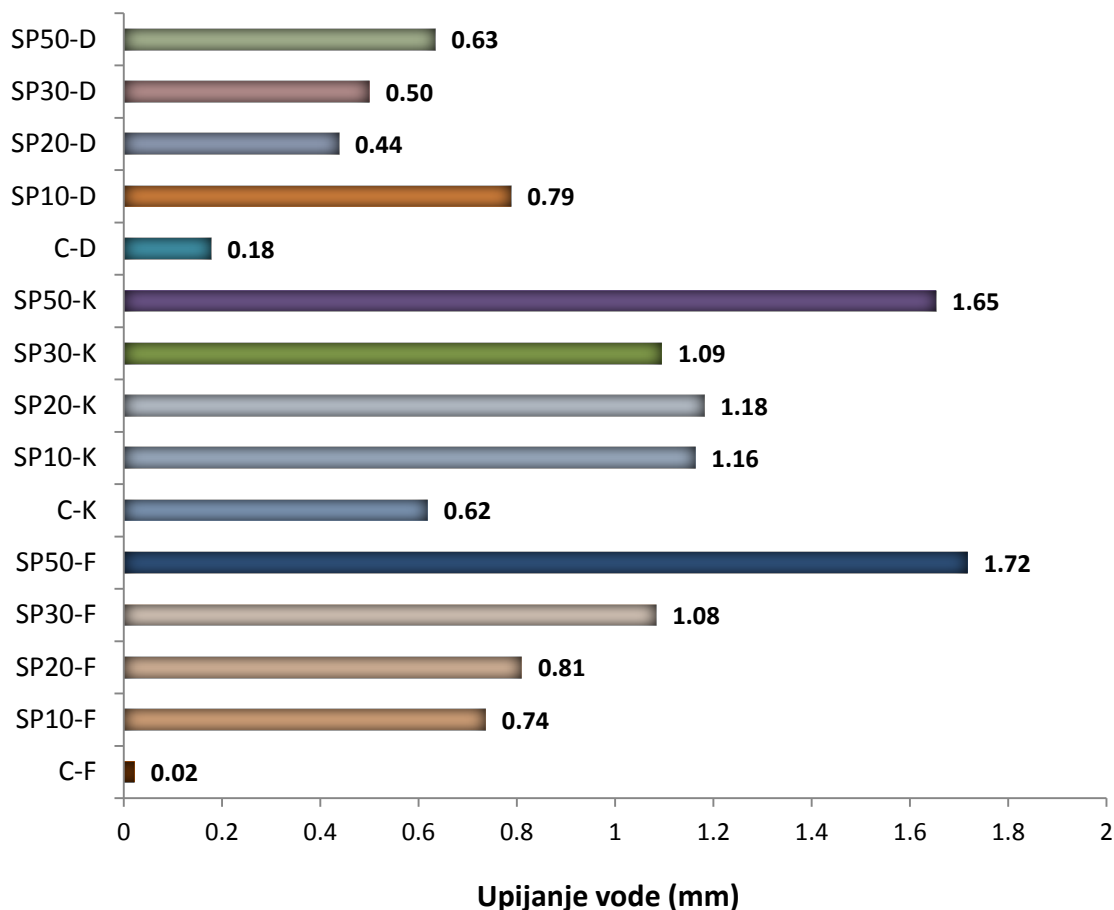
Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

- Pri starosti od 28 dana, najveće vrijednosti upijanja imaju malteri sa agregatom 3 (pjesak za malterisanje), a najmanje sa agregatom 1 (standardni kvarcni pjesak).
- Sa povećanjem udjela biopepela, rastu i vrijednosti upijanja vode, sa izuzetkom maltera MP10-D koji se u okviru svoje grupe odlikuje najmanjim upijanjem. Pri ovoj starosti, hidratacija biopepela još nije intenzivirana, pa se malteri sa većim količinama pepela, naročito 50%, ističu sa najvećim trendom upijanja.
- Pri starosti od 90 dana, uočava se smanjenje upijanja vode kod maltera sa agregatima 2 i 3, dok malteri sa agregatom 1, iz nepoznatih razloga, imaju nešto više vrijednosti u odnosu na vrijednosti upijanja istih maltera pri starosti od 28 dana. Kod maltera spravljenih sa agregatima 1 i 3, malteri sa do 30% pepela imaju čak manje vrijednosti upijanja vode u odnosu na referentne cementne maltere, kao rezultat filer efekta i pospješene pucolanske reakcije.

Sa povećanjem količine biopepela, pri primjeni agregata 2, i pri ovoj starosti rastu vrijednosti upijanja maltera.



Slika 120 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom SP, 28 dana



Slika 121 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom SP, 90 dana

Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

- Pri starosti od 28 dana, najveće vrijednosti upijanja imaju malteri sa agregatom 3 (pjesak za malterisanje), a najmanje sa agregatom 1 (standardni kvarcni pjesak).
- Kod svih grupa maltera, zamjena cementa sa do 20% pepela nema veliki uticaj na kapilarno upijanje vode; ovi malteri čak imaju nešto niže vrijednosti upijanja od referentnog maltera, što je vjerovatno rezultat filer efekta sitnih čestica biopepela. Pri povećanju nivoa supstitucije cementa, rastu i vrijednosti upijanja. Ovo je rezultat usporene hidratacije biopepela u odnosu na cement, pri ovoj starosti materijala.
- Pri starosti od 90 dana, uočava se smanjenje upijanja vode kod maltera sa agregatima 2 i 3, dok malteri sa agregatom 1, iz nepoznatih razloga, imaju nešto više vrijednosti u odnosu na vrijednosti upijanja istih maltera pri starosti od 28 dana. I pri ovoj starosti je očuvan trend povećanja upijanja sa

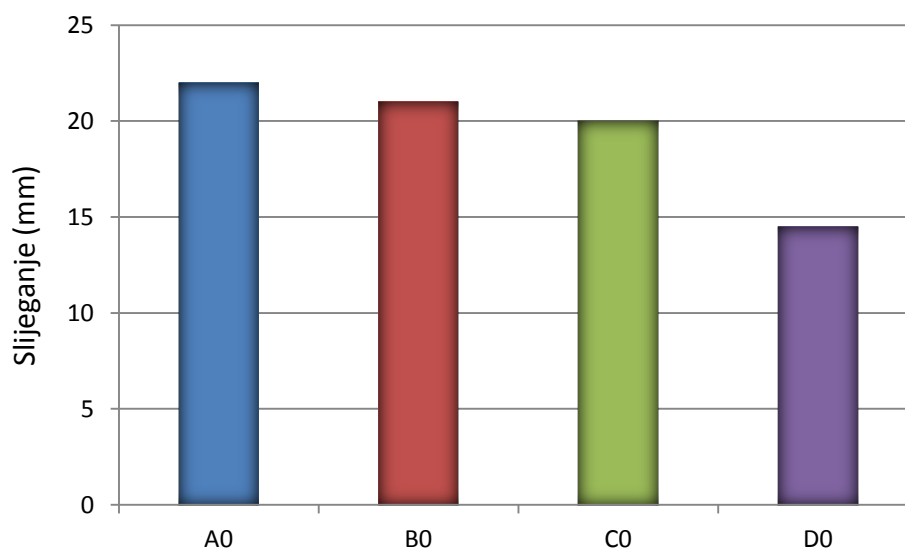
povećanom količinom biopepela, s tim da svi malteri sa agregatom 3 imaju bliske vrijednosti upijanja u okviru grupe.

3. BETONI

3.1. Betoni sa riječnim agregatom

3.1.1. Konzistencija

Rezultati mjerenja konzistencije ispitivanih vrsta betona dati su u Tabela 33, a rezultati mjerenja konzistencije betona sa riječnim agregatom su grafički prikazani na **Error! Reference source not found.** Svi betoni su spravljeni sa istim vodovezivnim faktorom – 0,45, a korišćena je ista količina superplastifikatora – 0,6% mase veziva.



Slika 122 – Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode maltera sa pepelom SP, 90 dana

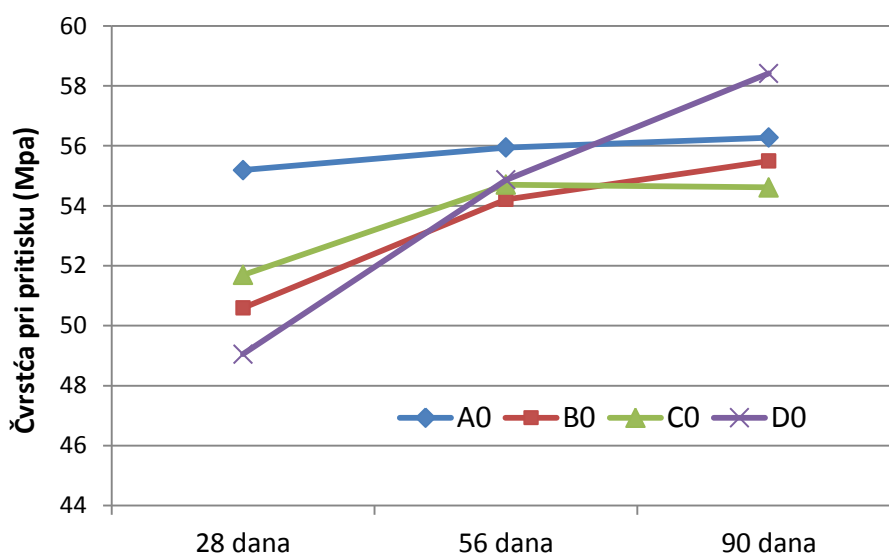
Analizom rezultata dobijenih ispitivanjem konzistencije betona ove grupe, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Svi betoni imaju slijeganje veće od 10cm, te se odlikuju tečnom konzistencijom.
- Sa povećanjem udjela biopepela, slijeganje se smanjuje, odnosno beton postaje krući. Ovo se može objasniti većom specifičnom površinom, odnosno finoćom mliva čestica biopepela, koje imaju dobru sposobnost zadržavanja vode, što vodi ka manjem slijeganju betona.
- Najveća promjena u veličini slijeganja, u odnosu na referentni cementni beton, registrovana je na betonu sa 50% pepela, gdje je slijeganje smanjeno za 35%.

- Svi betonske mješavine su izgledale kohezivno, povezano; pri ispitivanju mjere slijeganja nije dolazilo do segregacije i betoni su se lako ugradili u kalupe.

3.1.2. Čvrstoća pri pritisku

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku svih vrsta betona dati su u Tabela 34. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona spravljenih sa riječnim agregatom su grafički prikazani na Slika 123.



Slika 123 - Čvrstoća pri pritisku betona sa riječnim agergatom

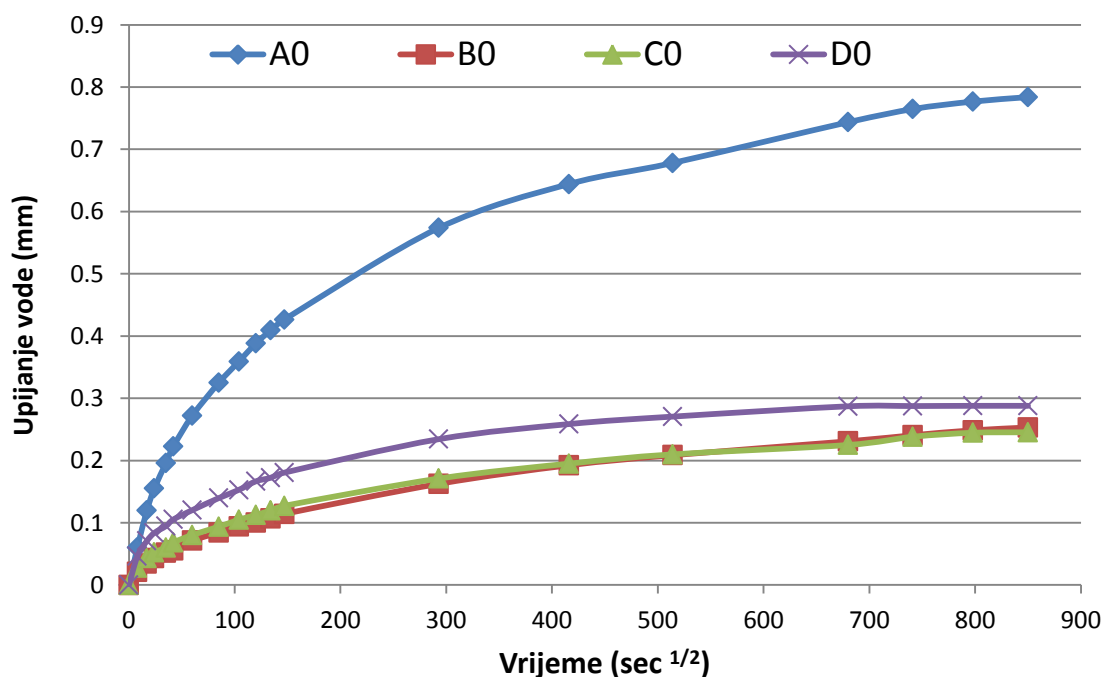
Analizom rezultata prikazanih na Slika 123, može se zaključiti sledeće:

- Referentni cementni malter je pri starosti od 28 dana dosegao većinu svoje pritisne čvrstoće, pa razlika u čvrstoćama pri većim starostima nije bila velika. Pri ovoj starosti, sa porastom nivoa supstitucije cementa biopepelom, čvrstoća betona se smanjuje. Betoni sa 10%, 20% i 50% su imali za 8%, 6% i 11% manju čvrstoću pri pritisku od referentnog betona. Pad čvrstoće nije značajan, što je vjerovatno posledica i filer efekta sitnih čestica biopepela, koje zapunjavaju strukturu betona.
- Pad čvrstoće betona sa biopepelom je rezultat usporene hidratacije biopepela kao pucolanskog materijala. S druge strane, do 28 dana starosti, hidratacija cementa je doprinjela da referentni cementni beton ima 98% svoje čvrstoće pri pritisku, u odnosu na čvrstoću izmerenu pri starosti od 90 dana.

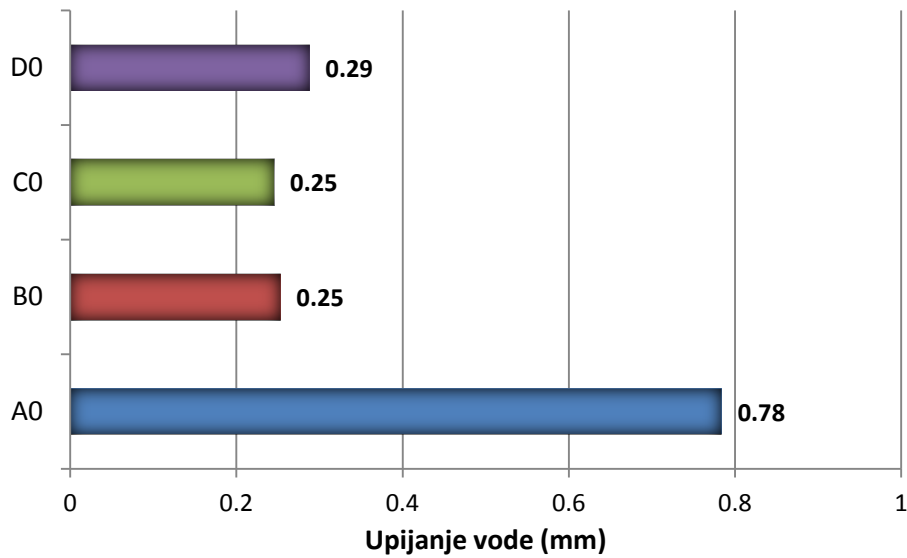
- Kao jedan od produkata hidratacije cementa, oslobađa se velika količina $\text{Ca}(\text{OH})_2$. U pucolanskoj reakciji, ovaj produkt reaguje sa biopepelom, pri čemu nastaju nova C-S-H jedinjenja koja popunjavaju strukturu betona. Kao rezultat ove reakcije, svi betoni sa biopepelom se karakterišu značajnim prirastom čvrstoće kroz vrijeme.
- Najveći skok čvrstoće pri pritisku registrovan je kod betona sa najvećom količinom biopepela – 50%. Pri starosti od 90 dana, porast čvrstoće u odnosu na 28-dnevnu čvrstoću je bio 16%.
- Pri starosti od 90 dana, razlika u čvrstoćama betona sa 10% i 20% biopepela u odnosu na referentni beton je smanjena sa 8% na 1% i sa 6% na 3%, respektivno. Beton sa 50% biopepela je, pri ovoj starosti, prekoračio čvrstoću referentnog maltera, sa razlikom od 4%.

3.1.3. Kapilarno upijanje vode

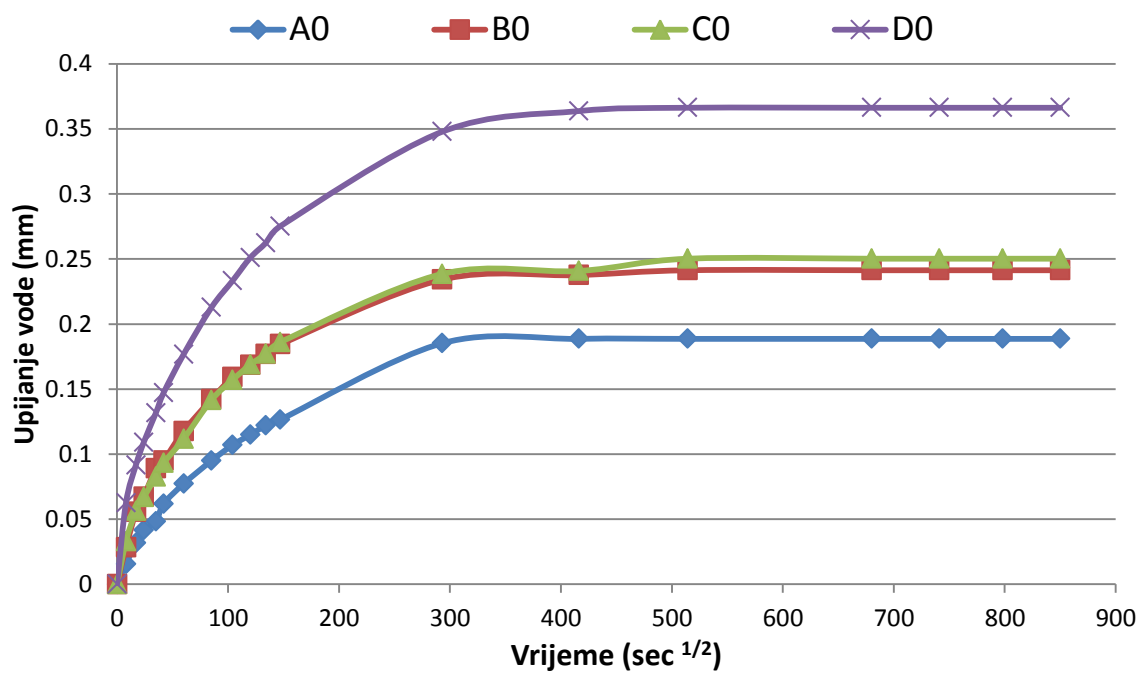
Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode betona sa prirodnim agregatom, pri starosti od 28 dana, prikazani su grafički na Slika 124 – kinetika upijanja vode tokom vremena i na Slika 125 – konačne vrijednosti upijanja. Rezultati ispitivanja pri starosti od 90 dana su prikazani na Slika 126 - trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 127 – konačne vrijednosti upijanja.



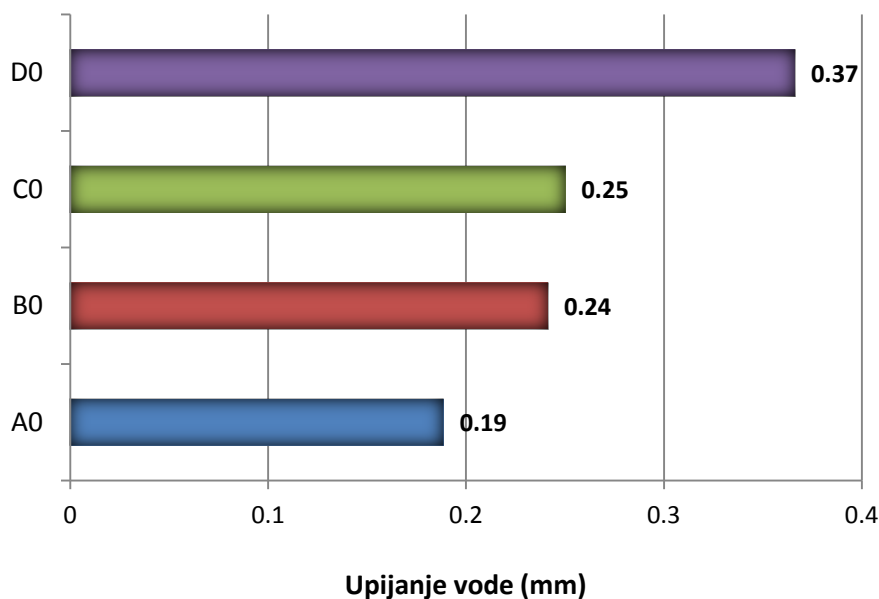
Slika 124 - Kapilarno upijanje vode betona sa prirodnim agregatom, 28 dana



Slika 125 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa prirodnim agregatom, 28 dana



Slika 126 - Kapilarno upijanje vode betona sa prirodnim agregatom, 90 dana



Slika 127 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa prirodnim agregatom, 90 dana

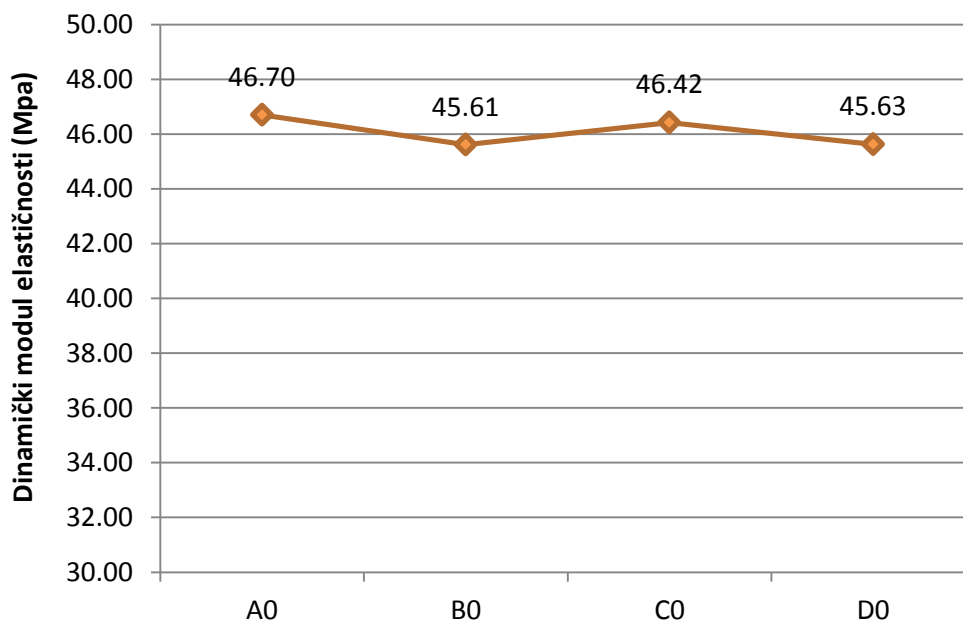
Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

- Pri starosti od 28 dana, zamjena dijela cementa biopepelom imala je pozitivan efekat na kapilarno upijanje vode betona, pri svim nivoima supstitucije. Malteri sa 10 i 20% biopepela se odlikuju najmanjim upijanjem. Sa povećanjem udjela biopepela, preko 20%, vrijednost upijanja raste u neznatnom procentu. Najveće upijanje je registrovano kod referentnog cementnog betona. Pretpostavlja se da je ovaj rezultat posledica filer efekta sitnih čestica biopepela koji zapunjavaju strukturu betona.
- Konačne vrijednosti upijanja betona sa 10%, 20% i 50% biopepela su, pri ovoj starosti, bile manje za 68%, 69% i 63% od referentnog cementnog betona, respektivno.
- Pri starosti od 90 dana, referentni beton se odlikuje najmanjim koeficijentom upijanja, i u inicijalnom i sekundarnom periodu. Sa povećanjem udjela biopepela, povećava se i koeficijent kapilarnog upijanja. Beton sa 50% biopepela je imao najveće upijanje.
- Konačne vrijednosti upijanja vode betona sa 10%, 20% i 50% biopepela su, u odnosu na referentni cementni beton, povećane za 28%, 33% i 94%, respektivno.

- Pri starosti od 28 dana, beton sa 10% biopepela ima kinetiku upijanja koja se može aproksimirati linearnom funkcijom, pa su za ovu vrstu betona određeni koeficijenti inicijalnog i sekundarnog upijanja. Referentni cementni beton i beton sa 20% biopepela su u sekundarnom vremenskom intervalu (1-8 dana) imali trend upijanja koji pokazuje linearnu zavisnost, te su za ove vrste betona određeni koeficijenti sekundarnog upijanja. U preostalim slučajevima, faktor korelacije je bio manji od 0,98 - trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se nije mogla uspostaviti jednačina zavisnosti.
- Pri starosti od 90 dana, referentni cementni beton i beton sa 20% biopepela su u inicijalnom vremenskom intervalu imali trend upijanja koji pokazuje linearnu zavisnost, te su za ove vrste betona određeni koeficijenti inicijalnog upijanja.

3.1.4. Dinamički modul elastičnosti

Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti svih vrsta betona dati su u Tabela 35. Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona sa prirodnim agregatom prikazane su grafički na Slika 128.



Slika 128 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona sa prirodnim agregatom

Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

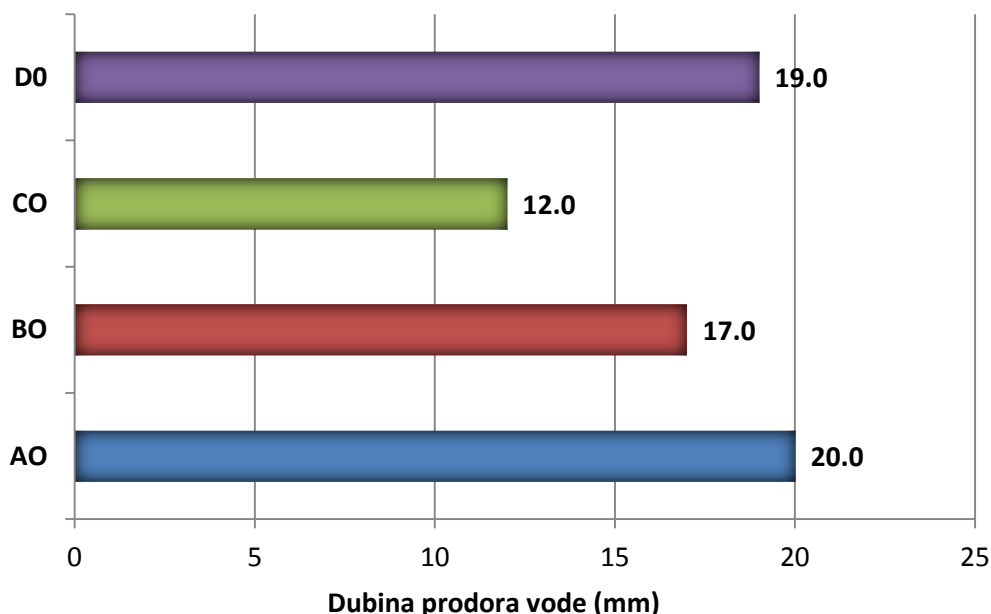
- Na modul elastičnosti betona utiču moduli elastičnosti njegovih komponenti kao i njihov zapreminski udio. Za spravljanje betona ove grupe, korištena je

ista vrsta agregata – prirodni agregat, a agregat, kao nosilac mehaničkih svojstava betona, ima dominantan uticaj na vrijednost modula elastičnosti.

- Betoni ove grupe imaju bliske module elastičnosti, tako da je uticaj vrste primjenjenog veziva zanemarljiv, čak i pri supstituciji cementa sa 50% biopepela.
- Betoni sa 10%, 20% i 50% biopepela su, u odnosu na referentni cementni beton imali za 2,3%, 0,6% i 2,3% manje module elastičnosti, respektivno.

3.1.5. Upijanje vodom pod pritiskom (vodonepropustljivost)

Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti svih vrsta betona dati su u Tabela 36. Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa prirodnim agregatom prikazane su grafički na Slika 129.



Slika 129 - Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa prirodnim agregatom

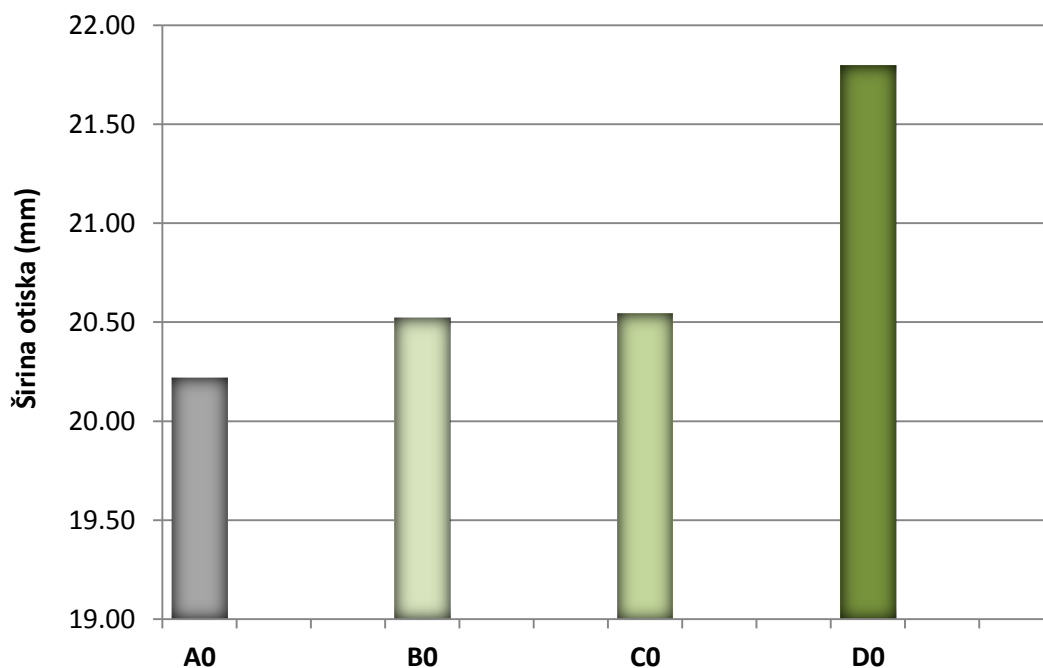
Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Supstitucija dijela cementa biopepelom je, pri primjeni prirodnog agregata, imala pozitivan efekat na upijanje vodom pod pritiskom. Sve vrste betona sa biopepelom su imale manju dubinu prodora vode od referentnog cementnog betona.
- Dubina prodora vode se smanjuje do procenta zamjene cementa od 20%, tako da ovaj beton ima najmanju dubinu prodora vode (12mm).

- Smanjenje dubine prodora vode betona sa biopepelom, u odnosu na referentni cementni beton, može se pripisati filer efektu sitnih čestica biopepela, ali pri starosti od 60 dana, kada je izvršeno ispitivanje, i pucolanskoj reakciji biopepela.
- Sve vrste betona ove grupe imaju maksimalnu dubinu prodora vode do 20mm, pa je klasa vodonepropustljivosti istih V-III, prema standardu SRPS EN 206-1/1.

3.1.6. Otpornost na habanje

Rezultati ispitivanja otpornosti betona na habanje, metodom širokog točka, svih vrsta betona dati su u Tabela 39. Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa prirodnim agregatom prikazane su grafički na Slika 129.



Slika 130 - Vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti na habanje betona sa prirodnim agregatom

Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

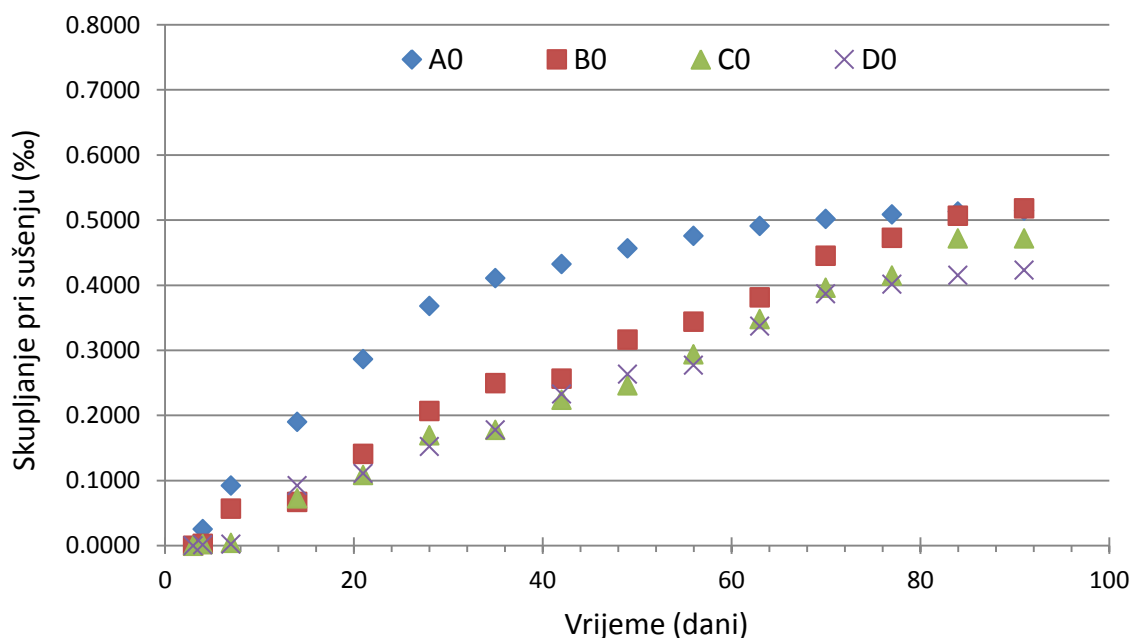
- Svi betoni ove grupe imaju širinu otiska u rasponu 20-23mm, što ih klasifikuje u II klasu otpornosti betona na habanje.
- Sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, povećava se i širina otiska. Pri supstituciji cementa do 20%, razlika u širini otiska je zanemarljiva.

Betoni sa 10%, 20% i 50% biopepela su imali za 1,5%, 1,6% i 7,8% veću širinu otiska od referentnog cementnog maltera, respektivno.

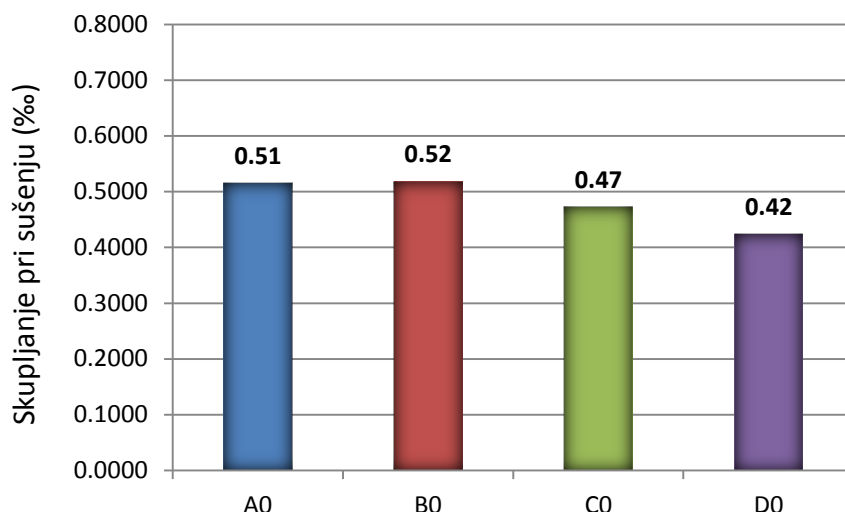
- Na otpornost betona na habanje dominantan uticaj imaju: čvrstoća pri pritisku betona, svojstva agregata i završna obrada. Slabija otpornost na habanje betona sa biopepelom može se objasniti smanjenjem apsolutne zapremine agregata pri povećanju sadržaja biopepela, a vezivna matrica ima, generalno, manju otpornost na habanje, u odnosu na agregat.

3.1.7. Skupljanje pri sušenju

Rezultati ispitivanja skupljanja pri sušenju svih vrsta betona dati su u Tabela 40. Skupljanje pri sušenju betona sa riječnim agregatom prikazano je grafički na , a konačne vrijednosti skupljanja nakon 3 mjeseca ispitivanja na .



Slika 131 - Skupljanje pri sušenju betona sa riječnim agregatom



Slika 132 - Konačne vrijednosti skupljanja pri sušenju betona sa riječnim agregatom nakon 3 mjeseca ispitivanja

Analizom rezultata na prikazanim dijagramima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

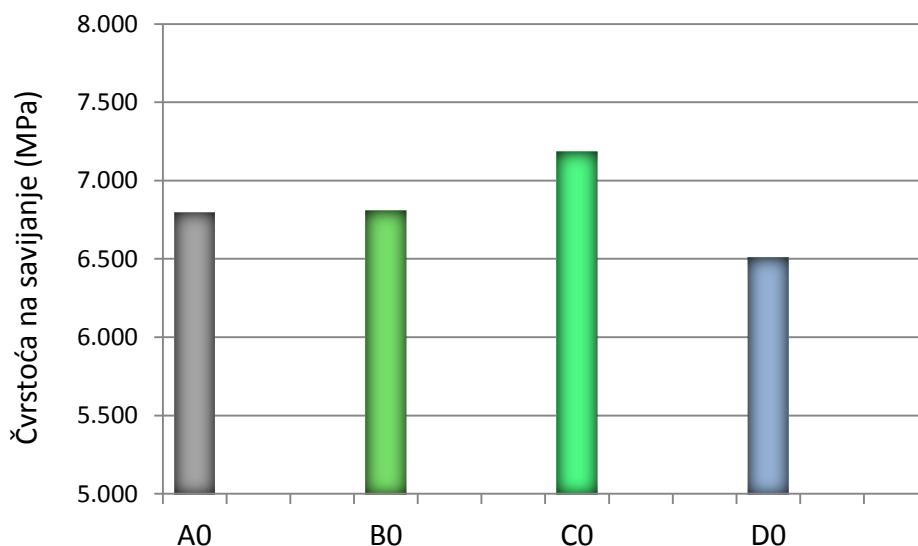
- U početnom periodu, referentni cementni beton se odlikuje najvećim prirastom skupljanja pri sušenju, naročito prvih 28 dana. Nakon cca 50 dana, vrijednosti skupljanja se ne mijenjaju značajno i asimptotski teže nekoj konačnoj vrijednosti.
- Betoni sa biopepelom, bez obzira na nivo supstitucije cementa biopepelom, imaju ujednačen trend skupljanja pri sušenju do cca 70 dana. Nakon ove starosti, vrijednosti konvergiraju ka konačnoj vrijednosti.
- Analizom konačnih vrijednosti skupljanja pri sušenju betona sa riječnim agregatom, može se zaključiti da supstitucija cementa biopepelom nema veliki uticaj na vrijednosti skupljanja. Štaviše, sa većim nivoom supstitucije, skupljanje pri sušenju se smanjuje. Beton sa 50% biopepela se odlikuje najmanjim vrijednostima skupljanja pri sušenju.
- Poznato je da je glavni faktor za skupljanje betona voda prisutna u strukturi. Sa povećanjem sadržaja sitnih čestica biopepela (koje imaju veliku moć zadržavanja vode) u strukturi betona, smanjuje se sadržaj slobodne vode u pornoj strukturi, što se pozitivno odražava na skupljanje betona pri sušenju. Supstitucijom cementa sa biopepelom, usporava se i prolongira proces hidratacije, pa se smanjuje i autogeno skupljanje betona uzrokovano

hidratacijom, što može uticati na smanjenje skupljanje pri sušenju betona sa biopepelom u inicijalnom periodu, do 28 dana.

- Takođe, istraživači u nekim studijama su došli do zaključaka da se supstitucija cementa pucolanskim materijalima pozitivno odražava na skupljanje pri sušenju, kao rezultat redukovano sadržaja cementne paste i manjeg sadržaja hidratirane paste [83] (uzrokovano sporijom pucolanskom reakcijom).
- Tokom vremena, kako raste broj produkata hidratacije cementa, naročito Ca(OH)_2 , te se povećava autogeno skupljanje pri sušenju betona sa biopepelom. Ovim se može objasniti veći prirast skupljanja pri sušenju betona sa biopepelom u kasnijem periodu, u odnosu na skupljanje referentnog cementnog betona. Rezultati su u saglasnosti sa zaključcima sličnih studija [83], [85].

3.1.8. Čvrstoća na savijanje

Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje svih vrsta betona dati su u Tabela 41. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje betona sa riječnim agregatom prikazani su grafički na Slika 133.



Slika 133 - Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim agregatom

Analizom rezultata na prikazanim dijagramima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

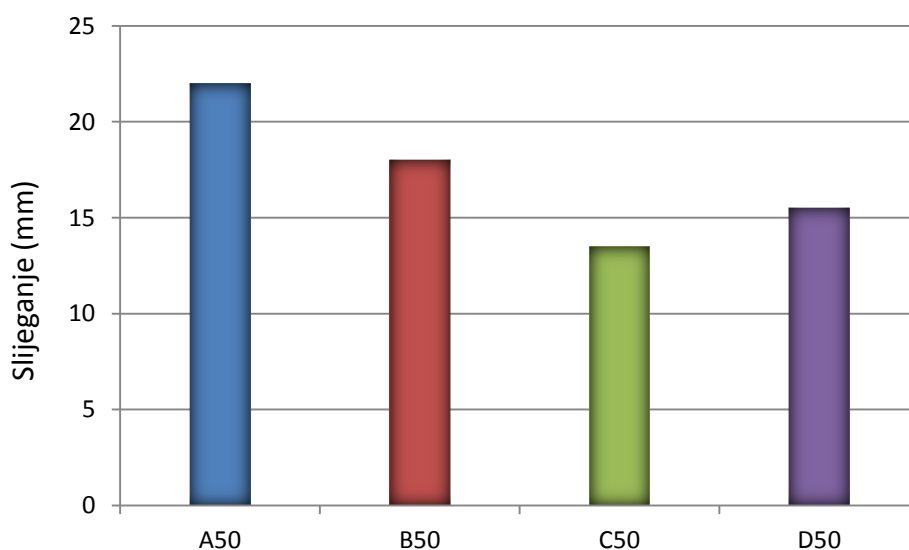
- Supstitucija dijela cementa biopepelom nije imala značajan uticaj na vrijednosti čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka. Čvrstoće na savijanje se kreću u intervalu od 6,5 do 7,2MPa.

- Sa povećanjem udjela biopepela, do 20%, povećava se i savojna čvrstoća betona, tako da se beton B0 odlikuje najvećom čvrstoćom. Dalje povećanje nivoa supstitucije cementa biopepelom rezultovalo je smanjenjem čvrstoće u odnosu na čvrstoću referentnog cementnog betona.
- Betoni sa 10% i 20% biopepela su imali za 0,22% i 5,74% veću čvrstoću, a beton sa 50% biopepela za 4,19% manju čvrstoću od referentnog betona.

3.2. Betoni sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona kao krupnim agregatom

3.2.1. Konzistencija

Rezultati mjerenja konzistencije ispitivanih vrsta betona dati su u Tabela 33, a rezultati mjerenja konzistencije betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, su grafički prikazani na Slika 134. Svi betoni su spravljeni sa istim vodovezivnim faktorom – 0,45. Za spravljanje referentnog betona i betona sa 50% biopepela korišćena je količina superplastifikatora od 0,6% mase veziva, a za betone sa 10% i 20%, ista je smanjena na 0,5%.



Slika 134 - Konzistencija betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona

Analizom rezultata dobijenih ispitivanjem konzistencije betona ove grupe, mogu se izvesti sledeći zaključci:

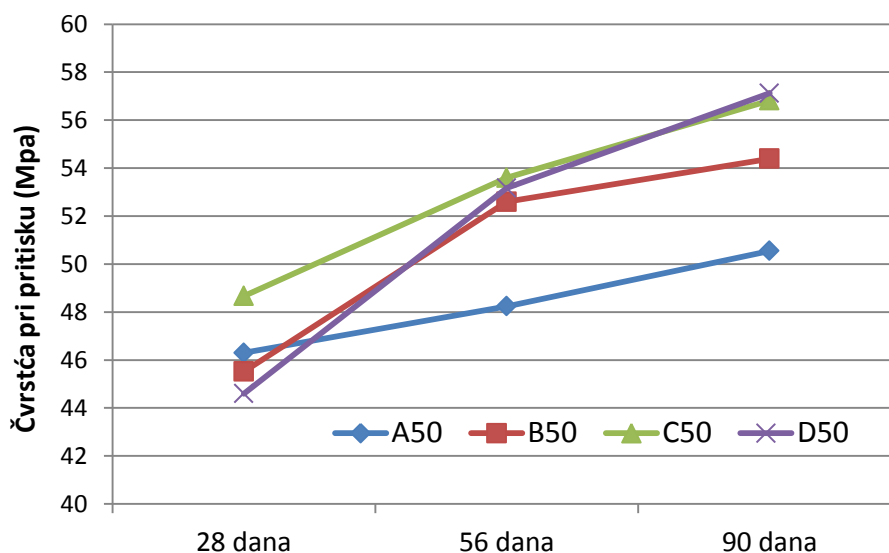
- Svi betoni imaju slijeganje veće od 10cm, te se odlikuju tečnom konzistencijom.
- Sa povećanjem udjela biopepela, slijeganje se smanjuje, odnosno beton postaje krući. Ovo se može objasniti većom specifičnom površinom, odnosno

finoćom mliva čestica biopepela, koje imaju dobru sposobnost zadržavanja vode, što vodi ka manjem slijeganju betona. Od ovog trenda odstupio je beton sa 50% biopepela, iz razloga što je kod njega upotrebljena veća količina superplastifikatora.

- Svi betonske mješavine su izgledale kohezivno, povezano; pri ispitivanju mjere slijeganja nije dolazilo do segregacije i betoni su se lako ugradili u kalupe.

3.2.2. Čvrstoća pri pritisku

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku svih vrsta betona dati su u Tabela 34. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona spravljenih sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, su grafički prikazani na Slika 135.



Slika 135 - Čvrstoća pri pritisku betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom

Analizom rezultata prikazanih na Slika 135, može se zaključiti sledeće:

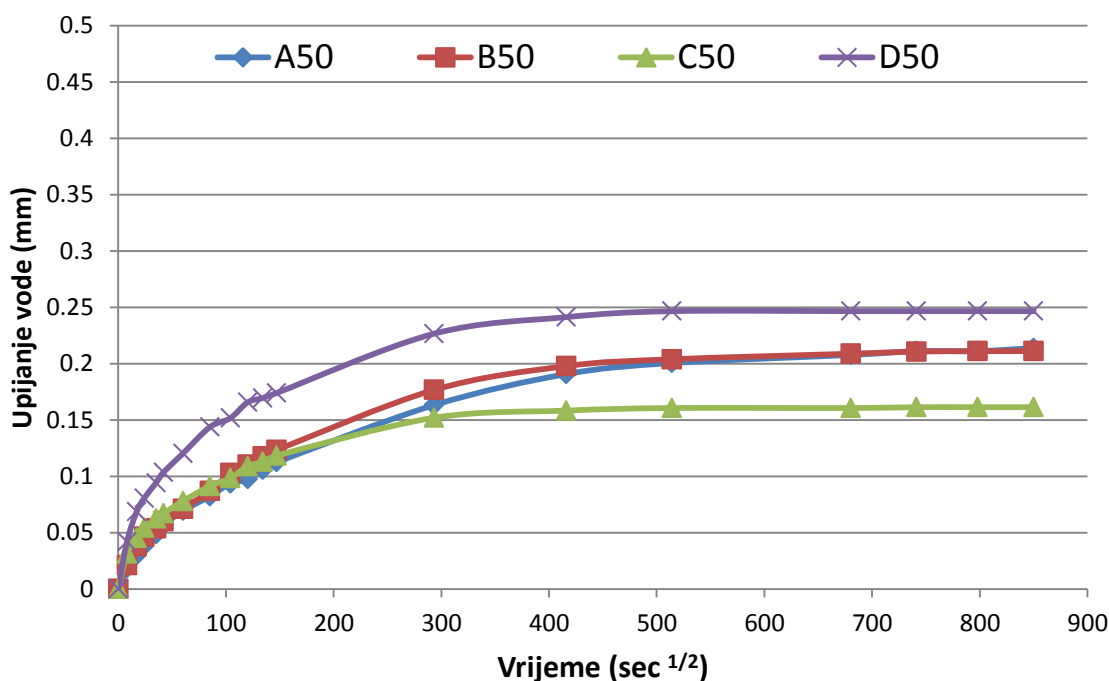
- Pri starosti od 28 dana, supstitucija dijela cementa sa do 20% biopepela nije imala veliki uticaj na čvrstoću betona pri pritisku. Štaviše, betoni sa 10% i 20% biopepela su imali nešto veće čvrstoće od referentnog cementnog betona (2% i 5%, repsektivno), što je rezultat filer efekta sitnih čestica biopepela. Beton sa 50% je imao za 4% nižu čvrstoću pri pritisku od referentnog betona.
- Razvoj čvrstoće pri pritisku, sa vremenom, je opet uočljiv kod betona sa biopepelom, kao posledica pucolanske reakcije biopepela i naknadnog

formiranja C-S-H produkata u mikrostrukturi očvrslog betona. Već pri starosti od 60 dana, svi betoni sa biopepelom su prekoračili čvrstoću pri pritisku referentnog betona (za cca 10%). Ova razlika se, pri starosti od 90 dana, povećava kod betona sa većom količinom biopepela: 20% i 50%.

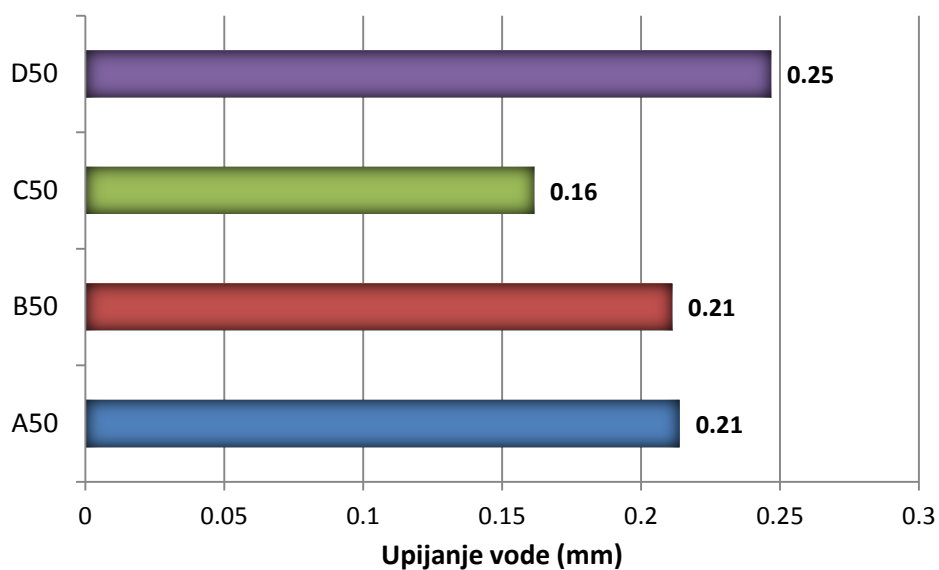
- Najveći skok čvrstoće pri pritisku, i kod ove grupe betona, registrovan je kod betona sa najvećom količinom biopepela – 50%. Pri starosti od 90 dana, porast čvrstoće u odnosu na 28-dnevnu čvrstoću je bio cca 30%.
- Pri starosti od 90 dana, betoni sa 10%, 20% i 50% biopepela imaju veću čvrstoću od referentnog betona za 8%, 12% i 13%, respektivno. Beton sa 50% biopepela ima najveću čvrstoću – 57MPa.

3.2.3. Kapilarno upijanje vode

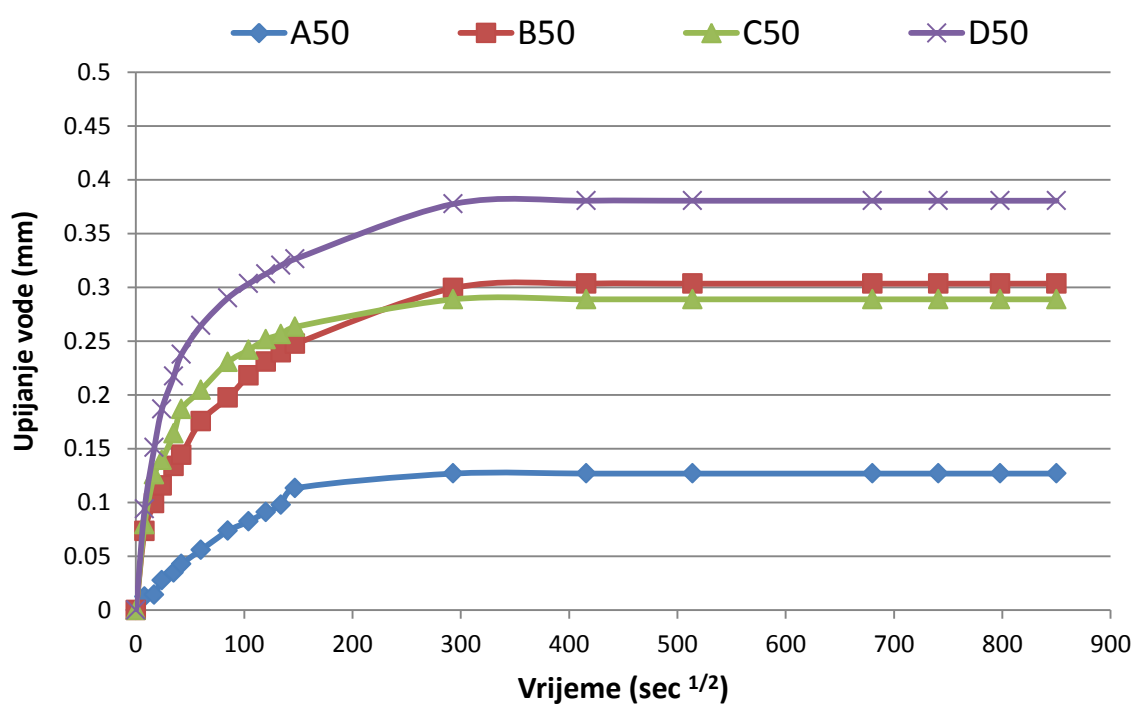
Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, pri starosti od 28 dana, prikazani su grafički na Slika 136 – trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 137 – konačne vrijednosti upijanja. Rezultati ispitivanja pri starosti od 90 dana su prikazani na Slika 138 - trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 139– konačne vrijednosti upijanja.



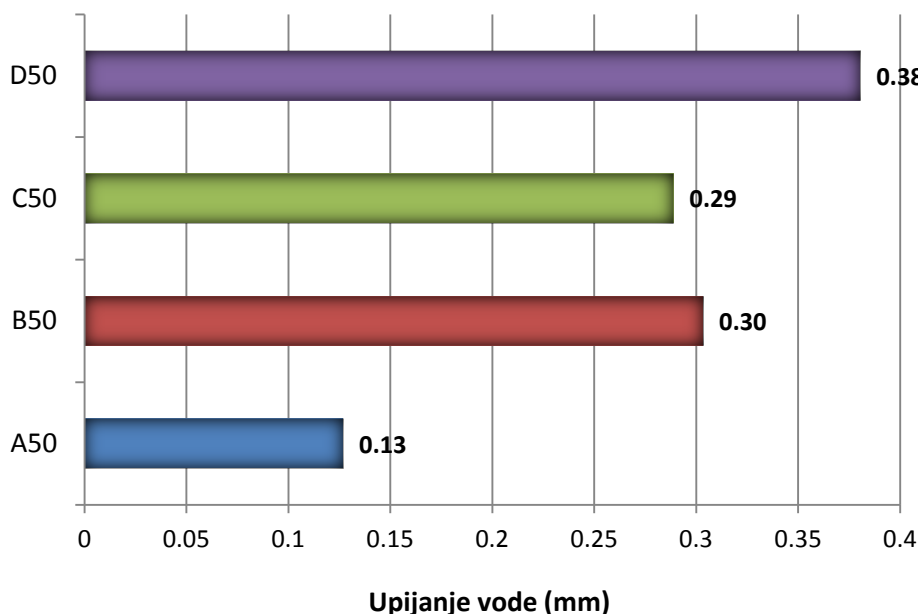
Slika 136 - Kapilarno upijanje vode betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, 28 dana



Slika 137 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, 28 dana



Slika 138 - Kapilarno upijanje vode betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, 90 dana



Slika 139 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, 90 dana

Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

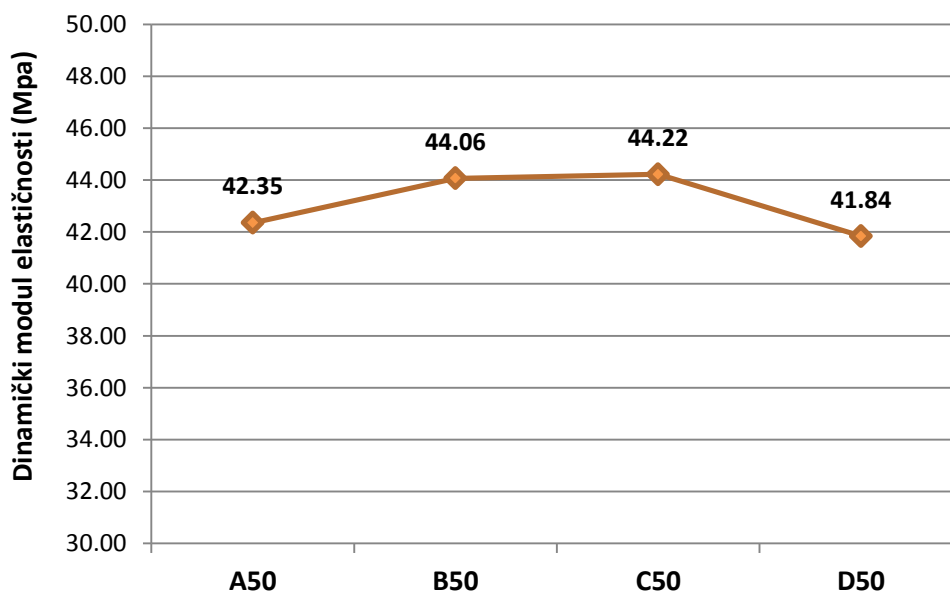
- Pri starosti od 28 dana, zamjena dijela cementa biopepelom nije imala značajan uticaj na kinetiku kapilarnog upijanja vode betona, naročito pri manjim nivoima supstitucije. Beton sa 20% biopepela se odlikuje najmanjim upijanjem, i u inicijalnom i u sekundarnom periodu. Pretpostavlja se da je ovaj rezultat posledica filter efekta sitnih čestica biopepela koji zapunjavaju strukturu betona. Sa povećanjem udjela biopepela, preko 20%, vrijednost upijanja raste u malom procentu. Najveće upijanje je registrovano kod betona sa 50% biopepela.
- Konačna vrijednost upijanja betona sa 20% biopepela je, pri ovoj starosti, bila manja za 25% od upijanja referentnog cementnog betona, upijanje betona sa 50% biopepela veće za 15%, a beton sa 10% biopepela ima upijanje vode blisko referentnom betonu.
- Pri starosti od 90 dana, referentni beton se odlikuje najmanjim koeficijentom upijanja, i u inicijalnom i sekundarnom periodu. Sa povećanjem udjela biopepela, povećava se i koeficijent kapilarnog upijanja. U sekundarnom intervalu mjerenja upijanja (1-8 dana), beton sa 20% biopepela je imao neznatno manji koeficijent kapilarnog upijanja vode od betona sa 10%

biopepela, što je vjerovatno posledica efekta pakovanja čestica biopepela. Beton sa 50% biopepela je imao najveće upijanje u oba intervala mjerenja.

- Pri starosti od 28 dana, referentni beton i betoni sa 10% i 20% biopepela u inicijalnom periodu (1-6h) imaju kinetiku upijanja koja se može aproksimirati linearnom funkcijom, pa su za ove vrste betona određeni koeficijenti inicijalnog upijanja. U sekundarnom periodu, faktor korelacije je bio manji od 0,98 - trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se nije mogla uspostaviti jednačina zavisnosti. Beton sa 50% biopepela nije ni u inicijalnom, ni u sekundarnom periodu, imao kinetiku upijanja koja je odgovarala linearnoj zavisnosti, te se koeficijenti upijanja nisu mogli odrediti.
- Pri starosti od 90 dana, referentni cementni beton ima u inicijalnom vremenskom intervalu trend upijanja koji pokazuje linearnu zavisnost, pa je za ovu vrstu betona određen koeficijent inicijalnog upijanja.

3.2.4. Dinamički modul elastičnosti

Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti svih vrsta betona dati su u Tabela 35. Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, prikazane su grafički na Slika 140.



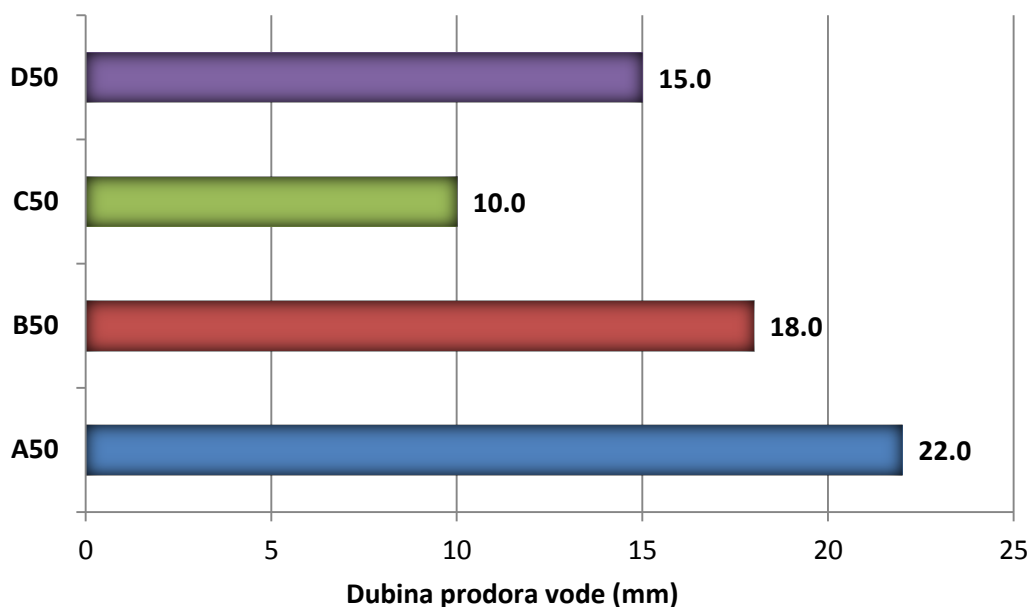
Slika 140 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom

Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Uticaj vrste primjenjenog veziva je, i kod ove grupe betona, bio zanemarljiv, čak i pri supstituciji cementa sa 50% biopepela.
- Betoni sa 10%, 20% su, u odnosu na referentni cementni beton imali neznatno veće dinamičke module elastičnosti, i to za 4% i 4,4%, respektivno. Beton sa 50% biopepela je imao za 1,2% manji dinamički modul elastičnosti od referentnog betona.

3.2.5. Upijanje vodom pod pritiskom (vodonepropustljivost)

Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti svih vrsta betona dati su u Tabela 36. Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, prikazane su grafički na Slika 141.



Slika 141 - Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom

Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

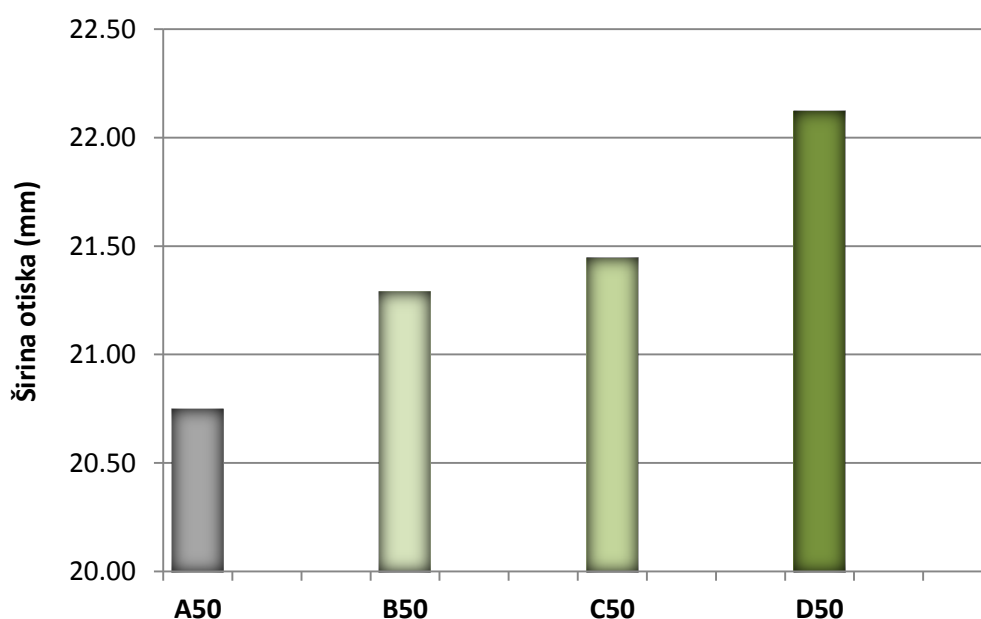
- Supstitucija dijela cementa biopepelom je, pri primjeni ove vrste krupnog agregata, imala pozitivan efekat na upijanje vodom pod pritiskom. Sve vrste betona sa biopepelom su imale manju dubinu prodora vode od referentnog cementnog betona.
- Dubina prodora vode se smanjuje do procenta zamjene cementa od 20%, tako da ovaj beton ima najmanju dubinu prodora vode (10mm). Betoni sa 10%,

20% i 50% biopepela su imali, u odnosu na referentni cementni beton, za 18%, 54% i 32% manju dubinu prodora vode, respektivno.

- Smanjenje dubine prodora vode betona sa biopepelom, u odnosu na referentni cementni beton, može se pripisati filer efektu sitnih čestica biopepela, ali pri starosti od 60 dana, kada je izvršeno ispitivanje, i pucolanskoj reakciji biopepela.
- Na osnovu najvećeg dozvoljenog prodora vode i najvećeg dozvoljenog odstupanja, prema standardu SRPS EN 206-1/1, referentni beton ima klasu V-II otpornosti prema prodoru vode, a betoni sa biopepelom najveću klasu vodonepropustljivosti V-III.

3.2.6. Otpornost na habanje

Rezultati ispitivanja otpornosti betona na habanje, metodom širokog točka, svih vrsta betona dati su u Tabela 39. Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, prikazane su grafički na Slika 129.



Slika 142 - Vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti na habanje betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom

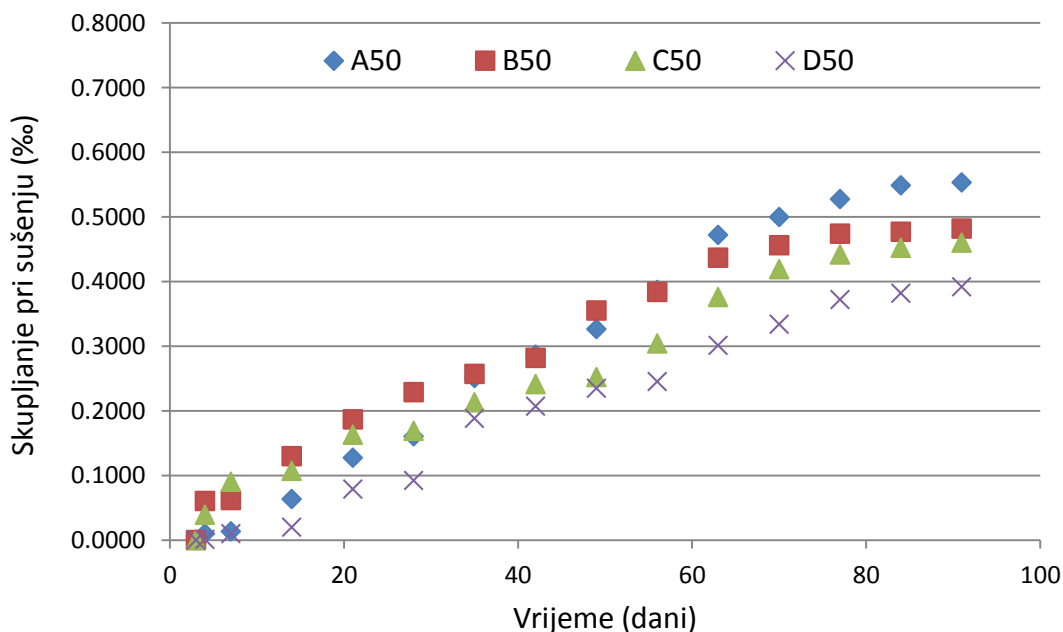
Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Svi betoni ove grupe imaju širinu otiska u rasponu 20-23mm, što ih klasifikuje u II klasu otpornosti betona na habanje.

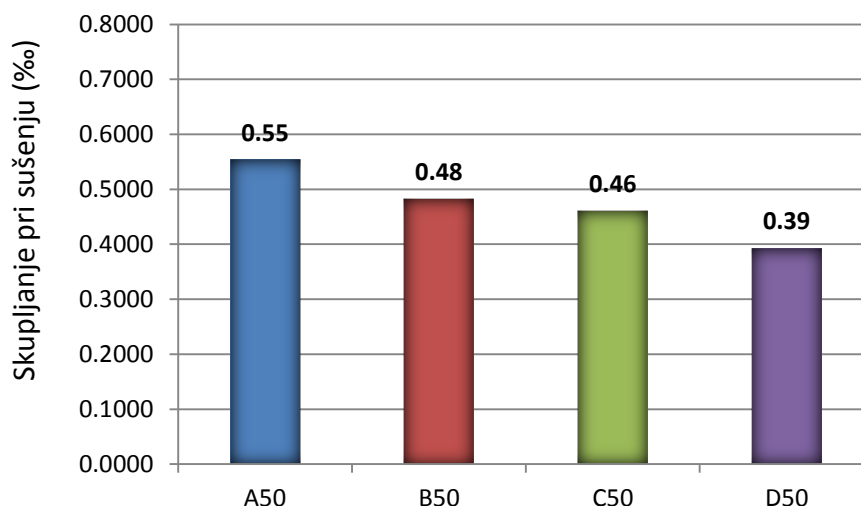
- Sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, povećava se i širina otiska. Pri supstituciji cementa do 20%, razlika u širini otiska je zanemarljiva. Betoni sa 10%, 20% i 50% biopepela su imali za 2,6%, 3,4% i 6,6% veću širinu otiska od referentnog cementnog maltera, respektivno.
- Slabija otpornost na habanje betona sa biopepelom može se objasniti smanjenjem apsolutne zapremine agregata pri povećanju sadržaja biopepela, a vezivna matrica ima, generalno, manju otpornost na habanje, u odnosu na agregat.

3.2.7. Skupljanje pri sušenju

Rezultati ispitivanja skupljanja pri sušenju svih vrsta betona dati su u Tabela 40. Skupljanje pri sušenju betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, prikazano je grafički na , a konačne vrijednosti skupljanja nakon 3 mjeseca ispitivanja na .



Slika 143 - Skupljanje pri sušenju betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom



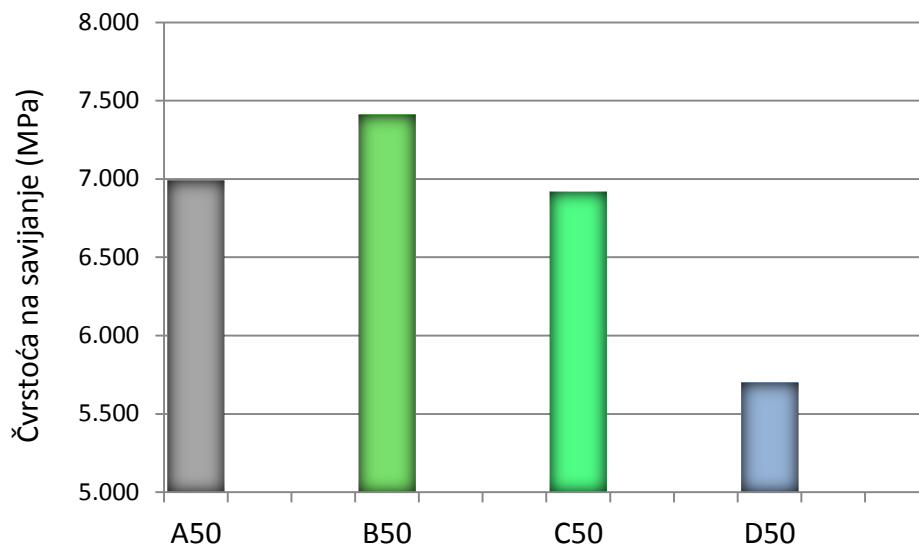
Slika 144 - Konačne vrijednosti skupljanja pri sušenju betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, nakon 3 mjeseca ispitivanja

Analizom rezultata na prikazanim dijagramima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Svi betoni ove grupe se odlikuju ujednačenim trendom prirasta skupljanja pri sušenju. Nakon cca 70 dana, vrijednosti skupljanja se ne mijenjaju značajno i asimptotski teže nekoj konačnoj vrijednosti.
- Analizom konačnih vrijednosti skupljanja pri sušenju betona sa riječnim agregatom, može se zaključiti da supstitucija cementa biopepelom nema veliki uticaj na vrijednosti skupljanja. Sa većim nivoom supstitucije, skupljanje pri sušenju se smanjuje. Beton sa 50% biopepela se odlikuje najmanjim vrijednostima skupljanja pri sušenju. Ova vrsta betona, je pri starosti od 90 dana imala za cca 30% manje skupljanje pri sušenju od referentnog cementnog betona.
- Pretpostavlja se da je pozitivan efekat primjene biopepela na skupljanje pri sušenju betona rezultat velike specifične površine biopepela, dobre moći zadržavanja vode biopepela i usporene hidratacije vezivne matrice.

3.2.8. Čvrstoća na savijanje

Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje svih vrsta betona dati su u Tabela 41. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom, prikazani su grafički na Slika 133.



Slika 145 - Čvrstoća na savijanje betona sa kombinacijom riječnog i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom

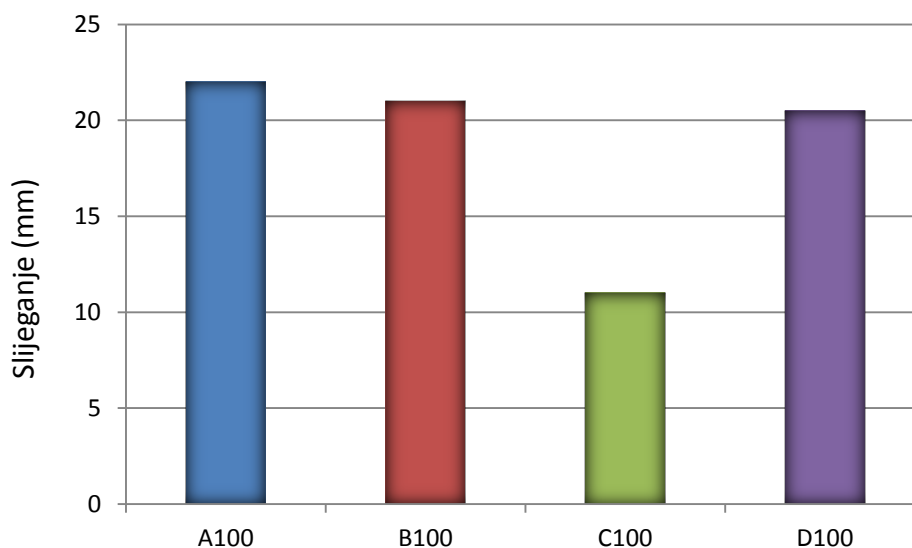
Analizom rezultata na prikazanim dijagramima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Supstitucija dijela cementa biopepelom, do nivoa supstitucije od 20%, nije imala značajan uticaj na vrijednosti čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka.
- Beton sa 10% biopepela se odlikuje najvećom savojnom čvrstoćom, a beton sa 50% biopepela najmanjom.
- Betoni sa 10% i 20% biopepela su imali za 6,01% i 1,07% veću čvrstoću, a beton sa 50% biopepela za 18,45% manju čvrstoću od referentnog betona.

3.3. Betoni sa agregatom od starog betona kao krupnim agregatom

3.3.1. Konzistencija

Rezultati mjerenja konzistencije ispitivanih vrsta betona dati su u Tabela 33, a rezultati mjerenja konzistencije betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, su grafički prikazani na Slika 146. Svi betoni su spravljeni sa istim vodovezivnim faktorom – 0,45. Za spravljanje referentnog betona i betona sa 50% biopepela korišćena je količina superplastifikatora od 0,4% mase veziva, a za betone sa 10% i 20%, ista je povećana na 0,5%. Količina superplastifikatora je smanjena, budući da je krupni agregat od starog betona, zbog velikog upijanja, prije spravljanja betona, površinski kvašen vodom.



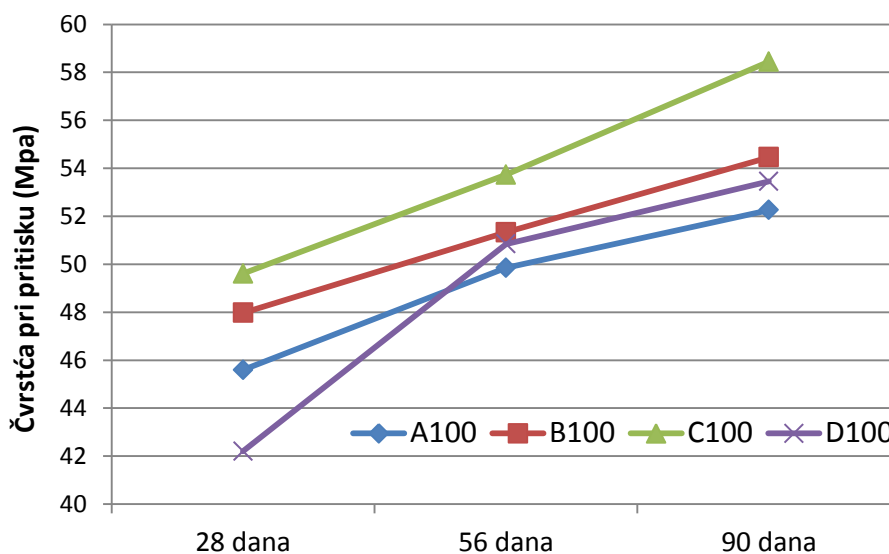
Slika 146 - Konzistencija betona sa agregatom od starog betona kao krupnim agregatom

Analizom rezultata dobijenih ispitivanjem konzistencije betona ove grupe, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Svi betoni imaju slijeganje veće od 10cm, te se odlikuju tečnom konzistencijom.
- Sa povećanjem udjela biopepela, slijeganje se smanjuje, odnosno beton postaje krući. Ovo se može objasniti većom specifičnom površinom, odnosno finoćom mliva čestica biopepela, koje imaju dobru sposobnost zadržavanja vode, što vodi ka manjem slijeganju betona. Od ovog trenda odstupio je beton sa 50% biopepela, iz razloga što je kod njega upotrebljena veća količina superplastifikatora.
- Svi betonske mješavine su izgledale kohezivno, povezano; pri ispitivanju mjere slijeganja nije dolazilo do segregacije i betoni su se lako ugradili u kalupe.

3.3.2. Čvrstoća pri pritisku

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku svih vrsta betona dati su u Tabela 34. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona spravljenih sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, su grafički prikazani na Slika 123.



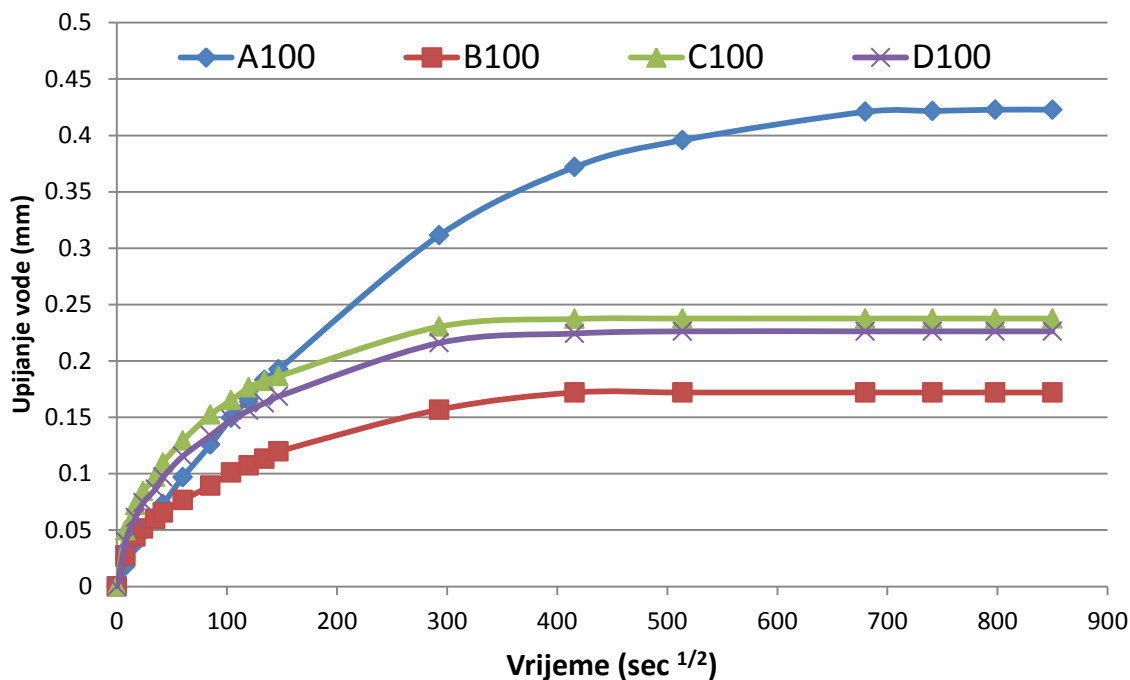
Slika 147 - Čvrstoća pri pritisku betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom

Analizom rezultata prikazanih na Slika 123, može se zaključiti sledeće:

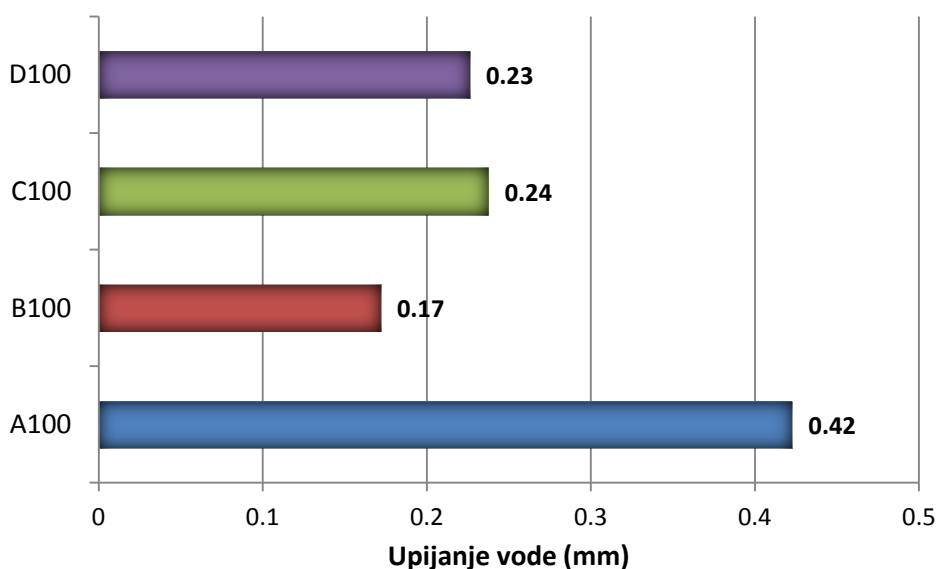
- Pri starosti od 28 dana, supstitucija dijela cementa biopepelom u količini do 20% imala je zanemarljiv uticaj na čvrstoću pri pritisku betona. Štaviše, ovi betoni imaju veću čvrstoću, koja se, pri ovoj starosti, kada pucolanska reakcija biopepela nije došla do izražaja, može pripisati efektu pakovanja sitnih čestica biopepela. Betoni sa 10% i 20% biopepela su imali za 5% i 9% veću čvrstoću pri pritisku, a beton sa 50% biopepela za 7,5% manju čvrstoću od referentnog betona.
- Sa razvojem pucolanske reakcije, tokom vremena je došlo do porasta čvrstoće pri pritisku betona sa biopepelom. Pri starosti od 60 dana, svi betoni su imali veće vrijednosti čvrstoće od referentnog betona.
- Najveći skok čvrstoće pri pritisku registrovan je kod betona sa većom količinom biopepela – 20% i 50%. Pri starosti od 90 dana, porast čvrstoće u odnosu na 28-dnevnu čvrstoću je bio 15% i 21%, respektivno.
- Pri starosti od 90 dana, betoni sa 10%, 20% i 50% biopepela imaju veću čvrstoću od referentnog betona za 4%, 11% i 2%, respektivno. Beton sa 20% biopepela ima najveću čvrstoću – 58MPa.

3.3.3. Kapilarno upijanje vode

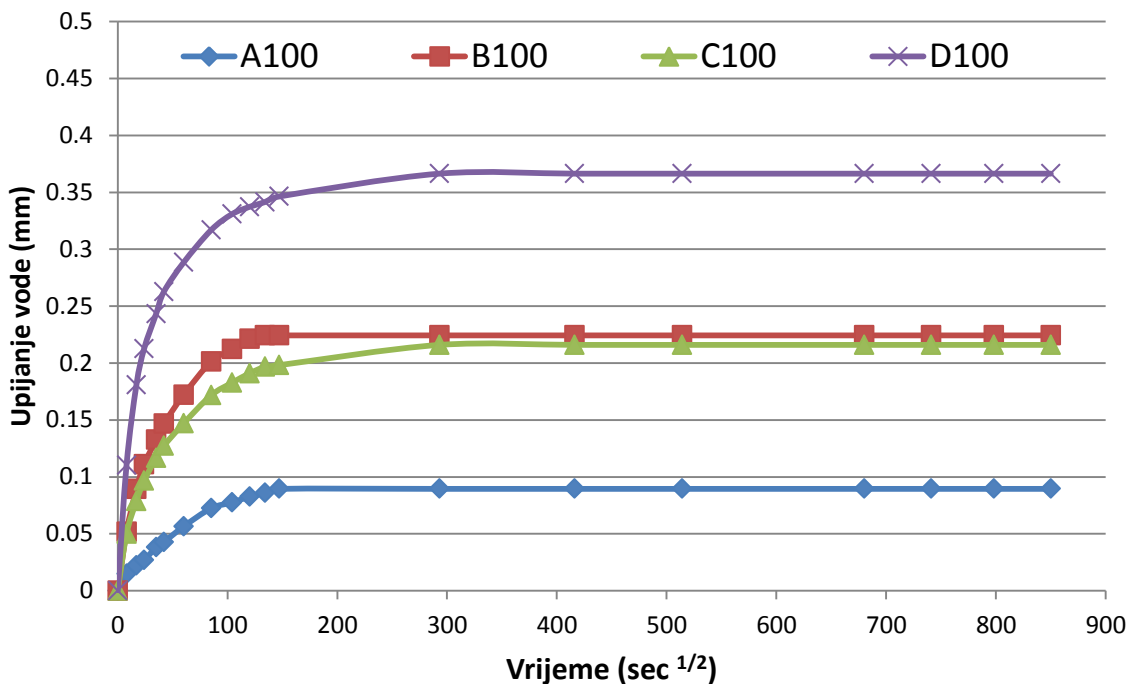
Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, pri starosti od 28 dana, prikazani su grafički na Slika 148 – trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 149 – konačne vrijednosti upijanja. Rezultati ispitivanja pri starosti od 90 dana su prikazani na Slika 150 - trend upijanja vode tokom vremena i na Slika 151 – konačne vrijednosti upijanja.



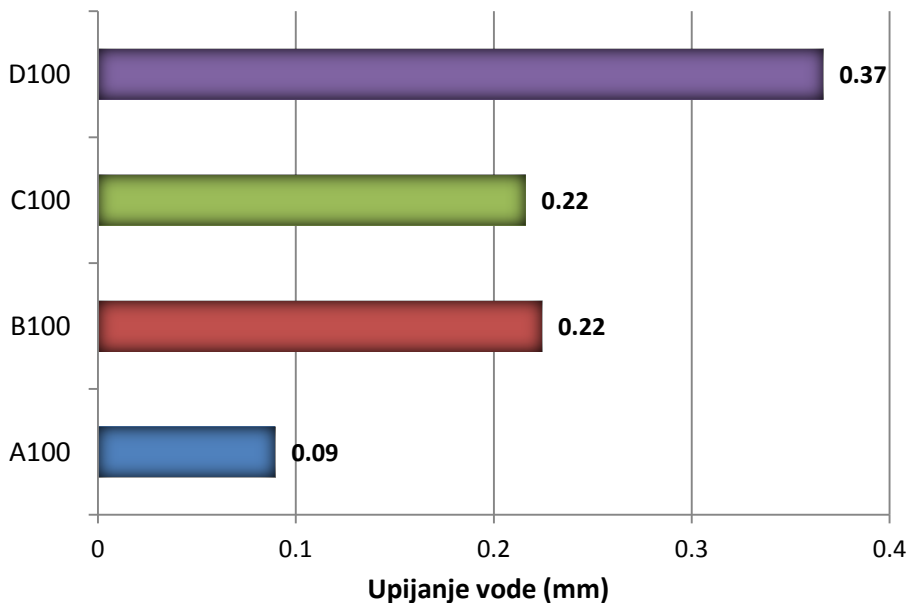
Slika 148 - Kapilarno upijanje vode betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, 28 dana



Slika 149 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, 28 dana



Slika 150 - Kapilarno upijanje vode betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, 90 dana



Slika 151 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, 90 dana

Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

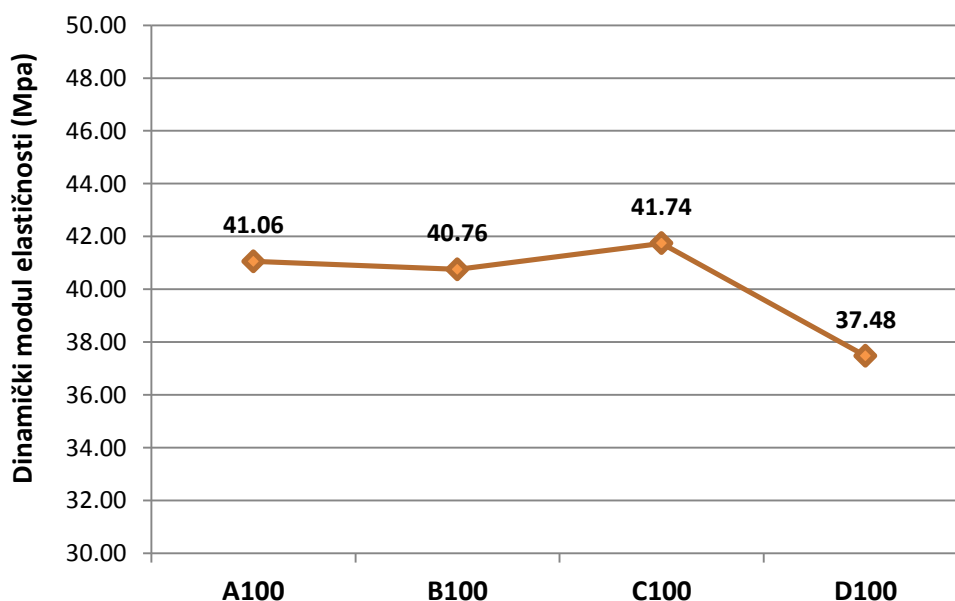
- Pri starosti od 28 dana, zamjena dijela cementa biopepelom imala je pozitivan efekat na kapilarno upijanje vode betona, pri svim nivoima supstitucije. Najveće upijanje je registrovano kod referentnog cementnog betona.

Pretpostavlja se da je ovaj rezultat posledica filer efekta sitnih čestica biopepela koji zapunjavaju strukturu betona.

- Konačne vrijednosti upijanja betona sa 10%, 20% i 50% biopepela su, pri ovoj starosti, bile manje za 59%, 44% i 46% od referentnog cementnog betona, respektivno.
- Pri starosti od 90 dana, referentni beton se odlikuje najmanjim koeficijentom upijanja, i u inicijalnom i sekundarnom periodu. Sa povećanjem udjela biopepela, povećava se i koeficijent kapilarnog upijanja. Beton sa 50% biopepela je imao najveće upijanje u oba intervala mjerenja.
- Referentni beton, pri starostima 28 i 90 dana, u inicijalnom periodu (1-6h) ima kinetiku upijanja koja se može aproksimirati linearnom funkcijom, pa je za ovu vrstu betona određen koeficijent inicijalnog upijanja. U sekundarnom periodu, faktor korelacije je bio manji od 0,98 - trend upijanja ne pokazuje linearnu zavisnost, pa se nije mogla uspostaviti jednačina zavisnosti. Betoni sa biopepelom nisu ni u inicijalnom, ni u sekundarnom periodu, imali kinetiku upijanja koja je odgovarala linearnoj zavisnosti, te se koeficijenti upijanja nisu mogli odrediti.

3.3.4. Dinamički modul elastičnosti

Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti svih vrsta betona dati su u Tabela 35. Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, prikazane su grafički na Slika 152.



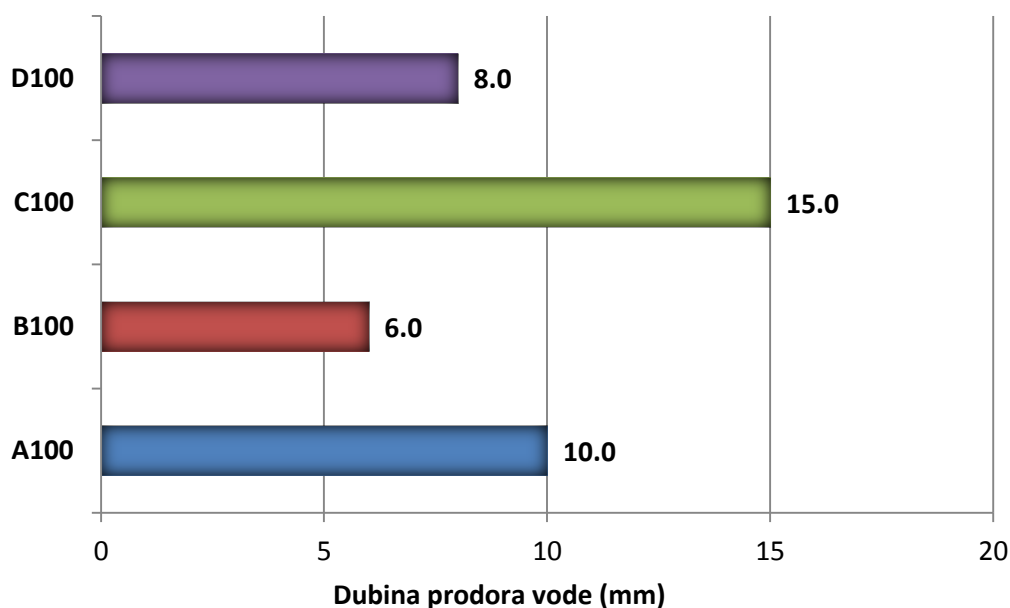
Slika 152 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom

Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Uticaj vrste primjenjenog veziva na dinamički modul elastičnosti betona ove grupe je, pri nivou supstitucije cementa do 20%, bio zanemarljiv. Betoni imaju vrlo bliske module
- Beton sa 50% biopepela je, u odnosu na referentni cementni beton imao za 8,7% manji dinamički modul elastičnosti.

3.3.5. Upijanje vodom pod pritiskom (vodonepropustljivost)

Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti svih vrsta betona dati su u Tabela 36. Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, prikazane su grafički na Slika 153.



Slika 153 - Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom,

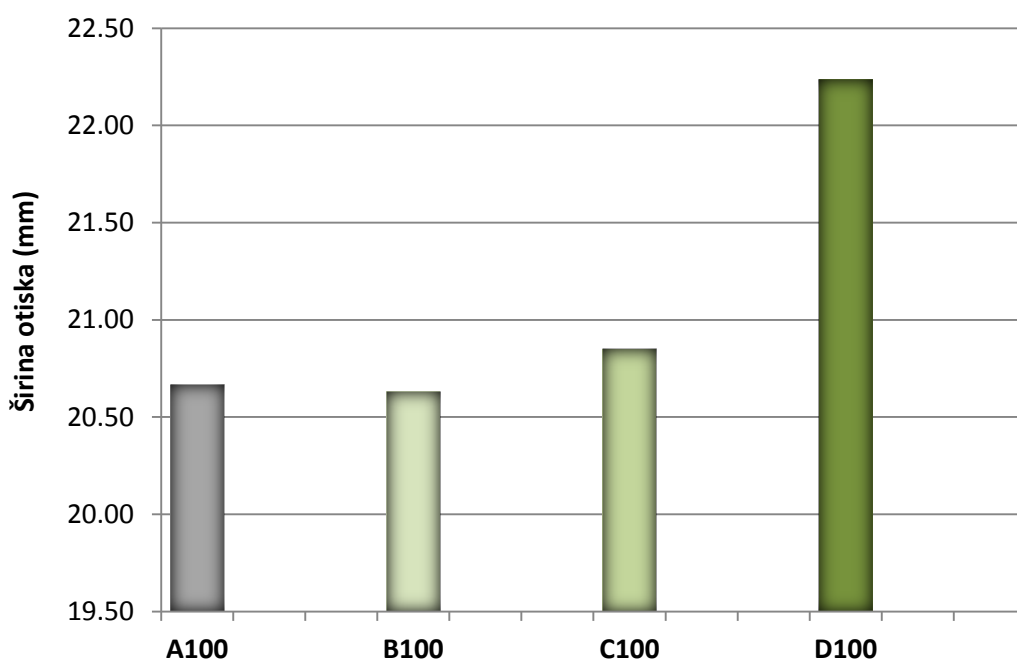
Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Sve vrste betona ove grupe imaju maksimalnu dubinu prodora vode manju od 20mm, pa imaju optimalnu klasu vodonepropustljivosti V-III, prema standardu SRPS EN 206-1/1.

- Beton sa 20% biopepela je imao najveću dubinu prodora vode pod pritiskom, za 33% veću u odnosu na referentni cementni beton. Betoni sa 10% i 50% biopepela su imali manju dubinu prodora vode.

3.3.6. Otpornost na habanje

Rezultati ispitivanja otpornosti betona na habanje, metodom širokog točka, svih vrsta betona dati su u Tabela 39. Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa agregatom od starog betona prikazane su grafički na Slika 129.



Slika 154 - Vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti na habanje betona sa agregatom od starog betona

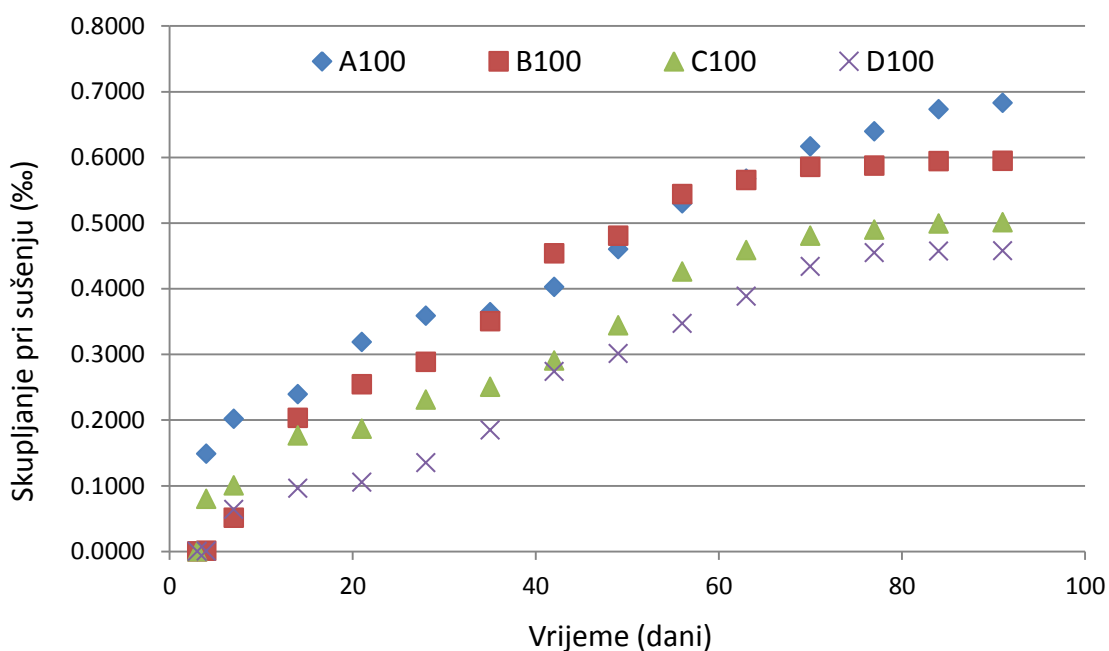
Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Svi betoni ove grupe imaju širinu otiska u rasponu 20-23mm, što ih klasifikuje u II klasu otpornosti betona na habanje.
- Sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, povećava se i širina otiska. Pri supstituciji cementa do 20%, razlika u širini otiska je zanemarljiva. Beton sa 50% biopepela je imao za 7,6% veću širinu otiska od referentnog cementnog maltera.
- Slabija otpornost na habanje betona sa biopepelom može se objasniti smanjenjem apsolutne zapremine agregata pri povećanju sadržaja biopepela,

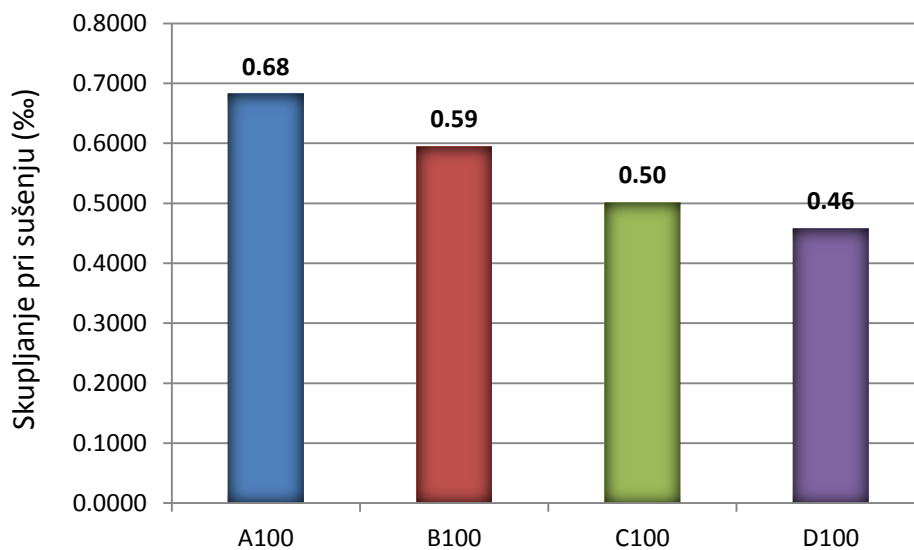
a vezivna matrica ima, generalno, manju otpornost na habanje, u odnosu na agregat.

3.3.7. Skupljanje pri sušenju

Rezultati ispitivanja skupljanja pri sušenju svih vrsta betona dati su u Tabela 40. Skupljanje pri sušenju betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, prikazano je grafički na , a konačne vrijednosti skupljanja nakon 3 mjeseca ispitivanja na .



Slika 155 - Skupljanje pri sušenju betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom



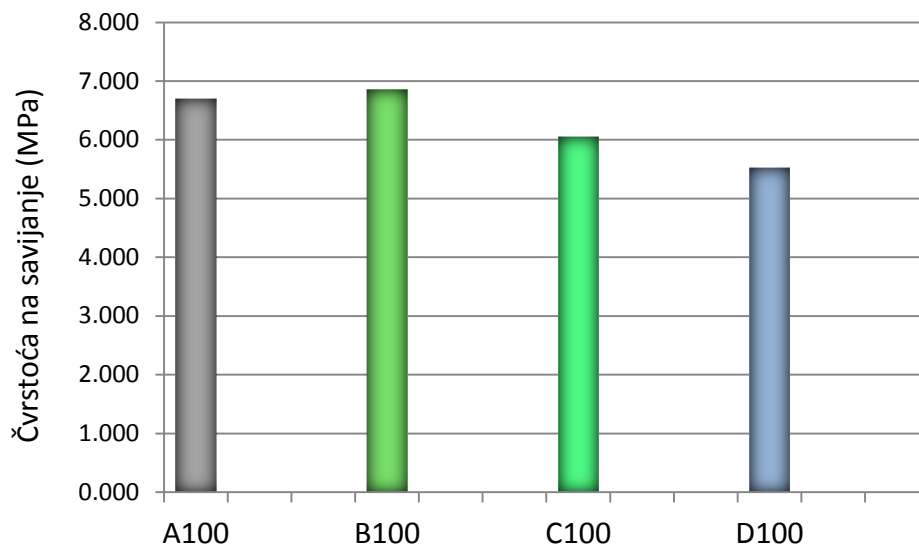
Slika 156 - Konačne vrijednosti skupljanja pri sušenju betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, nakon 3 mjeseca ispitivanja

Analizom rezultata na prikazanim dijagramima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Referentni cementni beton se odlikuje ujednačenim prirastom skupljanja pri sušenju. Nakon cca 82 dana, vrijednosti skupljanja se ne mijenjaju značajno i asimptotski teže nekoj konačnoj vrijednosti.
- Betoni sa 10% i 20% biopepela, u početnom periodu, do cca 60 dana, prate trend skupljanja pri sušenju referentnog cementnog betona. Nakon ove starosti, vrijednosti konvergiraju ka konačnoj vrijednosti. Može se pretpostaviti da je ovo smanjenje rezultat naknadnog formiranja C-S-H produkata pucolanske reakcije, zgušnjavanja strukture betona i smanjenja količina slobodne vode.
- U početnom periodu, do starosti od 28 dana, beton sa 50% biopepela se odlikuje niskim trendom prirasta skupljanja pri sušenju. Pretpostavlja se da je ovo rezultat filter efekta čestica biopepela, koje imaju veliku specifičnu površinu, veliku moć zadržavanja vode, te smanjuju količinu slobodne vode u strukturi betona. Sa smanjenim sadržajem vode, smanjuje se i skupljanje betona. Sa progresom hidratacije cementa i formiranjem produkata (naročito $\text{Ca}(\text{OH})_2$), povećava se i trend skupljanja pri sušenju.
- Analizom konačnih vrijednosti skupljanja pri sušenju betona sa riječnim agregatom, može se zaključiti da supstitucija cementa biopepelom ima pozitivan uticaj na vrijednosti skupljanja. Sa povećanjem nivoa supstitucije, skupljanje pri sušenju se smanjuje. Betoni sa 10%, 20% i 50% biopepela imaju, pri starosti od 90 dana, za 13%, 26% i 32% manje skupljanje pri sušenju od skupljanja referentnog cementnog betona.

3.3.8. Čvrstoća na savijanje

Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje svih vrsta betona dati su u Tabela 41. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, prikazani su grafički na Slika 133.



Slika 157 - Čvrstoća na savijanje betona sa agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom

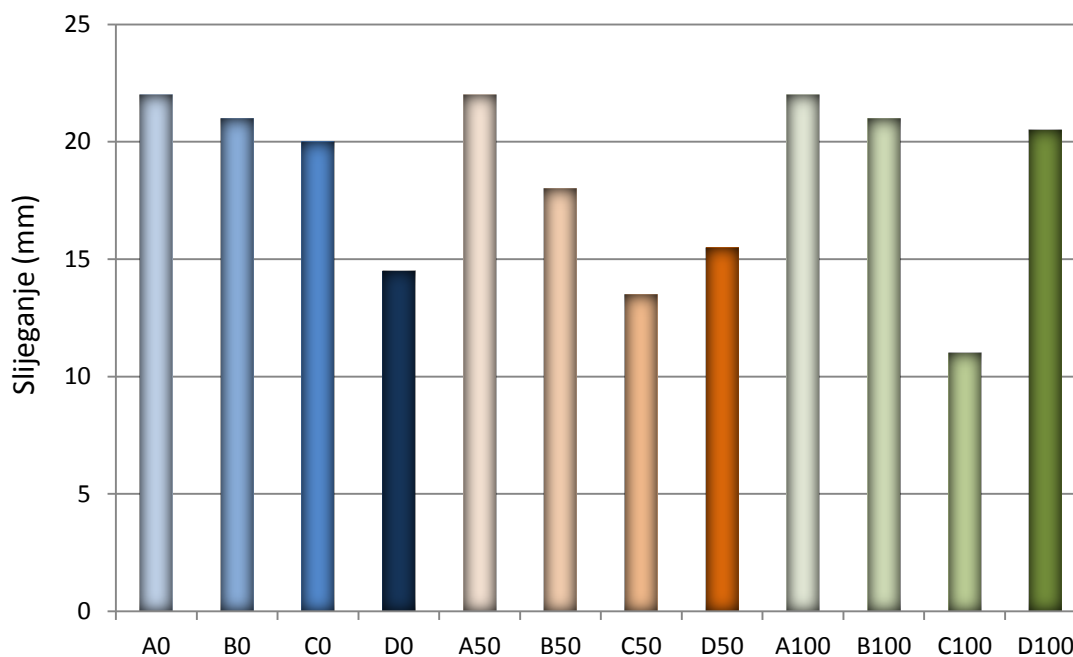
Analizom rezultata na prikazanim dijagramima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Supstitucija dijela cementa biopepelom nije imala značajan uticaj na vrijednosti čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka. Čvrstoće na savijanje se kreću u intervalu od 5,5 do 6,7MPa.
- Supstitucija cementa sa 10% biopepela je imala pozitivan uticaj na čvrstoću na savijanje betona, tako da se beton B0 odlikuje najvećom čvrstoćom. Dalje povećanje nivoa supstitucije cementa biopepelom rezultovalo je smanjenjem čvrstoće u odnosu na čvrstoću referentnog cementnog betona.
- Beton sa 10% biopepela je imao za 2,47% veću čvrstoću, a betoni sa 20% i 50% biopepela za 9,64% i 17,49% manju čvrstoću na savijanje od referentnog betona, respektivno.

3.4. Komparativna analiza

3.4.1. Konzistencija

Rezultati mjerenja konzistencije svih ispitivanih vrsta betona dati su u Tabela 33, a grafički prikazani na Slika 158Error! Reference source not found..



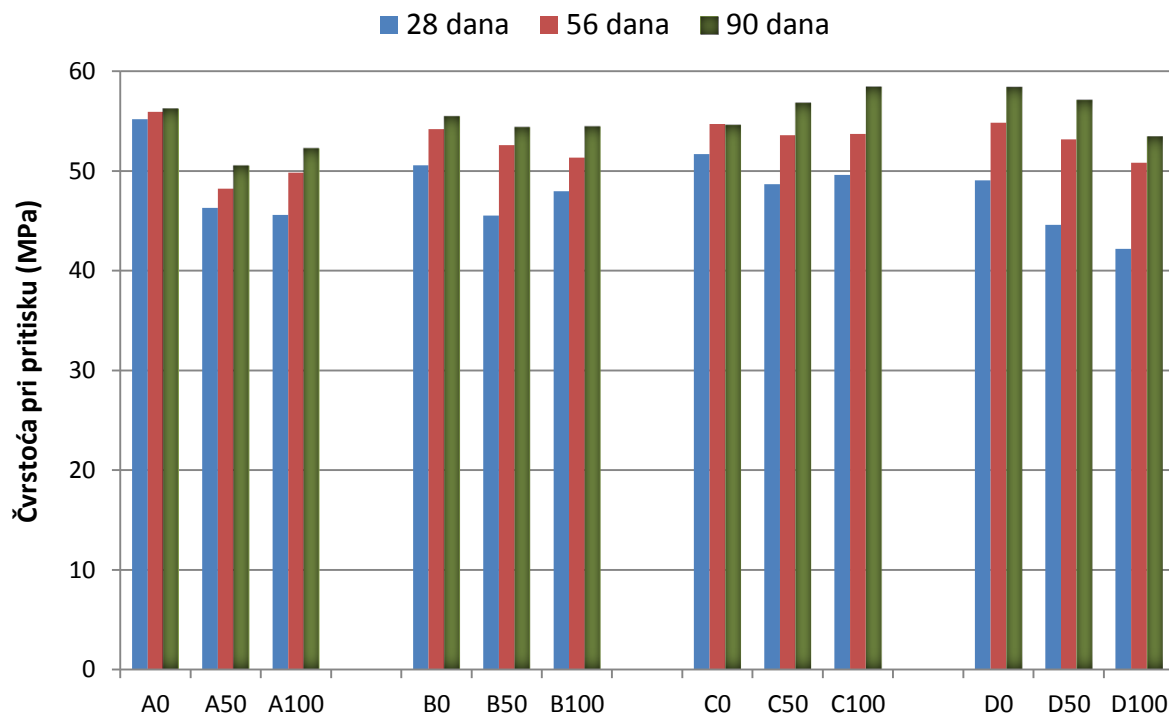
Slika 158 - Konzistencija ispitivanih vrsta betona

Analizom rezultata dobijenih ispitivanjem konzistencije betona ove grupe, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Svi betoni imaju slijeganje veće od 10cm, te se odlikuju tečnom konzistencijom.
- Budući da je agregat od starog betona, prije spravljanja betonskih mješavina, površinski kvašen vodom, vrsta krupnog agregata nije imala veliki uticaj na konzistenciju betona.
- Dominantan uticaj na konzistenciju je imala količina biopepela. Najveće slijeganje je registrovano kod betona sa cementom kao jedinim vezivom. Sa povećanjem udjela biopepela, slijeganje se smanjuje, odnosno beton postaje krući. Ovo se može objasniti većom specifičnom površinom, odnosno finoćom mliva čestica biopepela, koje imaju dobru sposobnost zadržavanja vode, što vodi ka manjem slijeganju betona. Od ovog trenda odstupili su betoni sa 50% biopepela, pri primjeni agregata od starog betona, jer je kod ovih vrsta betona povećana količina superplastifikatora.
- Svi betonske mješavine su izgledale kohezivno, povezano; pri ispitivanju mjere slijeganja nije dolazilo do segregacije i betoni su se lako ugradili u kalupe.

3.4.2. Čvrstoća pri pritisku

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku svih vrsta betona dati su u Tabela 34. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona, sortirani po vrsti agregata, su grafički prikazani na Slika 123.



Slika 159 - Čvrstoća pri pritisku betona sa riječnim agergatom

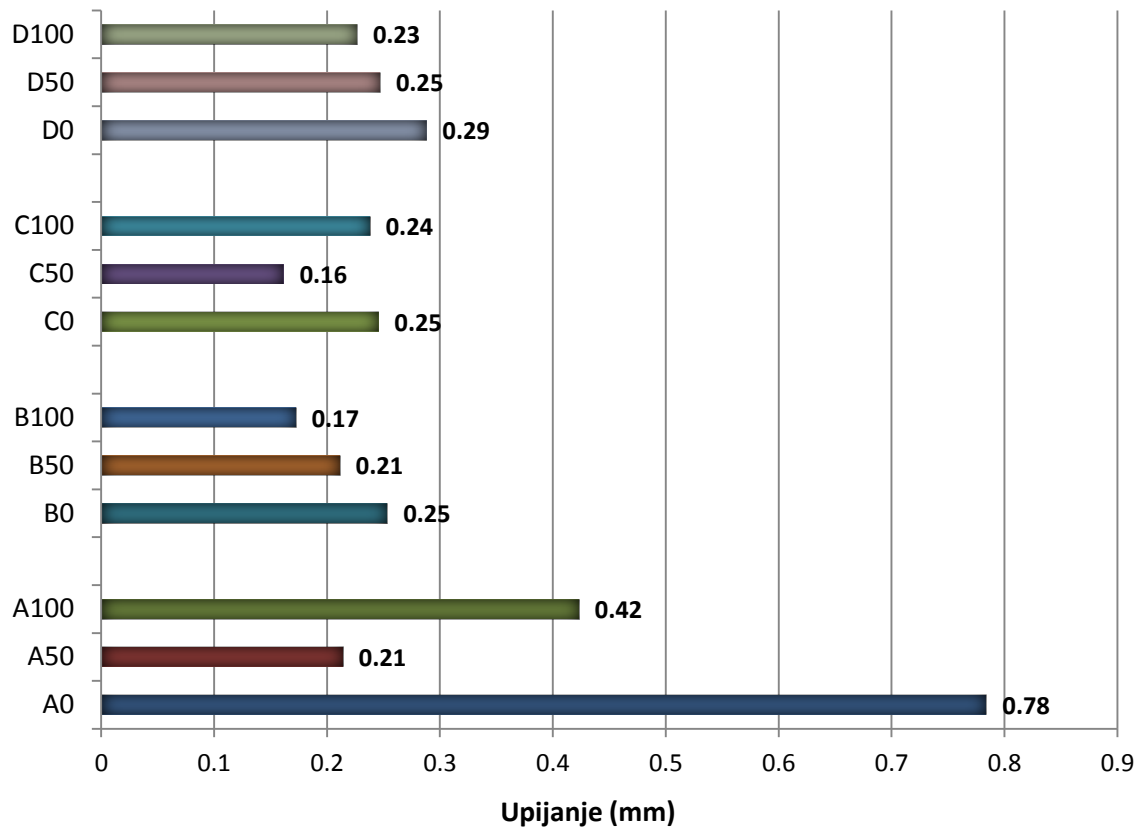
Analizom rezultata prikazanih na Slika 159, može se zaključiti sledeće:

- Supstitucija prirodnog agregata agregatom od starog betona je uglavnom, pri svim starostima, uticala na smanjenje čvrstoće pri pritisku betona. Redukcija čvrstoće je, pri starosti od 28 dan, bila najviše izražena kod referentnog cementnog betona. Kod ove grupe betona (sa cementom kao jedinim vezivom) su betoni sa prirodnim agregatom imali najveće čvrstoće pri pritisku, pri svim starostima. Pri starosti od 60 dana, betoni sa 100% agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, su prekoračile čvrstoće betona sa kombinacijom krupnih agregata.
- Kod grupe betona, u kojima je 10% cementa zamjenjeno sa biopepelom, uticaj vrste agregata je bio manje značajan. Najveće smanjenje čvrstoće pri pritisku je registrovano pri starosti od 28 dana – 10%. Pri većim starostima, ova razlika se smanjuje. Pri starosti od 90 dana, čvrstoće betona sa različitim vrstama agregata su se izjednačile. Pretpostavlja se da biopepeo povoljno utiče na vezu između agregata od starog betona i cementa.

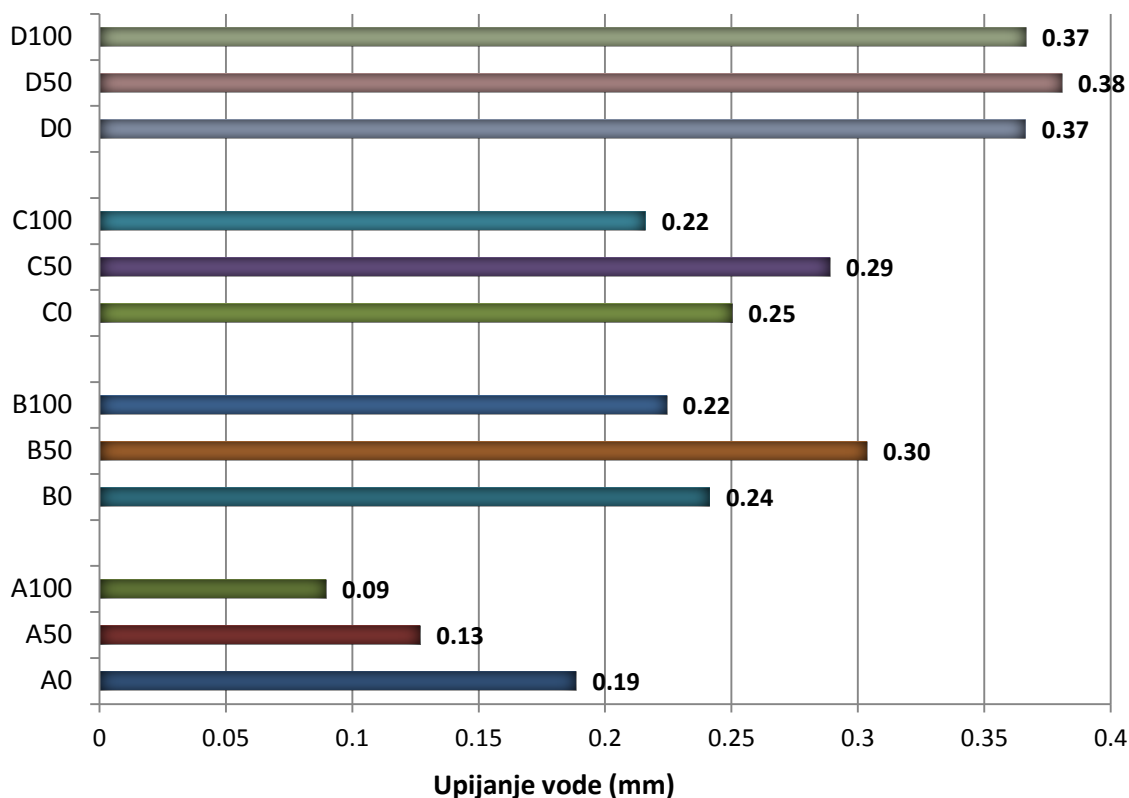
- Kod betona sa 20% biopepela, već pri starosti od 60 dana, čvrstoće betona sa različitim vrstama agregata su se izjednačile. Pri starosti od 90 dana, sa povećanjem nivoa supstitucije prirodnog agregata agregatom od starog betona, čvrstoća betona pri pritisku se povećava, tako da beton sa 100% agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom, ima najveću čvrstoću pri pritisku. Ovo je, pretpostavlja se, posledica povoljnog efekta biopepela koji kreira dobru vezu između cementne matrice starog betona, starog agregata i cementa.
- Kod grupe Eko-betona: betoni sa 50% biopepela i 100% agregata od starog betona, kao krupnog punioca, najveći pad čvrstoće pri pritisku je, supstitucijom prirodnog agregata agregatom od starog betona, ponovo, registrovan pri starosti od 28 dana. Pri ovoj starosti, zamjena prirodnog agregata agregatom od starog betona, u količinama od 50% i 100%, uticala je na redukciju čvrstoće pri pritisku 10% i 14%, respektivno. Sa vremenom, ovaj pad čvrstoće se smanjuje. Pri starosti od 90 dana, najveću čvrstoću je, i dalje, imao beton sa prirodnim agregatom, ali pad čvrstoće supstitucijom ovog agregata agregatom od starog betona, nije bio značajan. Svi betoni su, pri ovoj starosti, prekoračili čvrstoću od 50MPa.
- Pri starosti od 60 dana, svi betoni sa biopepelom, bez obzira na vrstu primjenjenog agregata, su imali čvrstoću pri pritisku veću od 50MPa. Cementni betoni sa 50% i 100% agregata od starog betona, kao krupnog agregata, su prekoračili ovaj prag, tek pri starosti od 90 dana. Ovo se može objasniti trostrukim efektom biopepela:
 - sitne čestice biopepela imaju, usled velike finoće mliva, filer efekat – efekat pakovanja u strukturi betona; zapunjavaju i progušćuju strukturu betona, što se pozitivno odražava na čvrstoće pri pritisku betona pri svim starostima, a naročito pri starosti od 28 dana,
 - sa vremenom, uz filer efekat, dolazi do izražaja i pucolanska reakcija biopepela; kao rezultat reakcije, formiraju se novi C-S-H produkti koji dalje popunjavaju strukturu betona i, posledično, povećavaju čvrstoću betona pri pritisku,
 - biopepeo kreira dobru vezu između cementne matrice starog betona, starog agregata i cementa.

3.4.3. Kapilarno upijanje vode

Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode svih ispitivanih vrsta betona prikazani su grafički na **Error! Reference source not found.** – konačne vrijednosti upijanja pri starosti od 28 dana i na Slika 161, pri starosti od 90 dana.



--Slika 160 - Kapilarno upijanje vode betona, 28 dana



Slika 161 - Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja vode betona, 90 dana

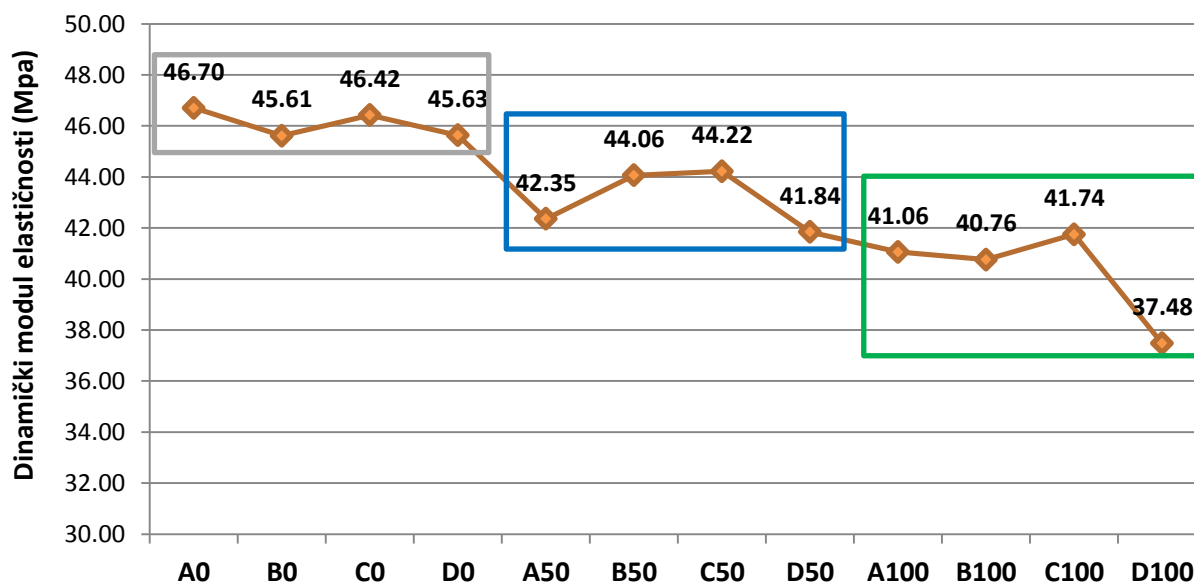
Analizom prikazanih dijagrama, može se zaključiti sledeće:

- Pri starosti od 28 dana, najveće vrijednosti upijanja imaju betoni sa cementom, kao jedinim vezivom, naročito pri upotrebi 100% prirodnog agregata ili 100% agregata od starog betona, kao krupnog agregata.
- Supstitucija prirodnog agregata agregatom od starog betona je imala značajan uticaj na vrijednosti upijanja. Sa povećanjem nivoa supstitucije, vrijednost kapilarnog upijanja vode se, uglavnom, smanjuje. Od ovog trenda odstupa kapilarno upijanje referentnog betona i betona sa 20% biopepela, gdje je najmanje upijanje registrovano pri upotrebi kombinacije riječnog i agregata od starog betona, kao krupnog agregata.
- Pri starosti od 90 dana, referentni cementni betoni imaju najmanje upijanje, bez obzira na vrstu upotrebljenog krupnog agregata. Kod ove grupe betona, sa povećanjem nivoa supstitucije prirodnog agregata agregatom od starog betona, smanjuje se i vrijednost kapilarnog upijanja vode i to za: 32% i 52%, pri supstituciji od 50% i 100%, respektivno.

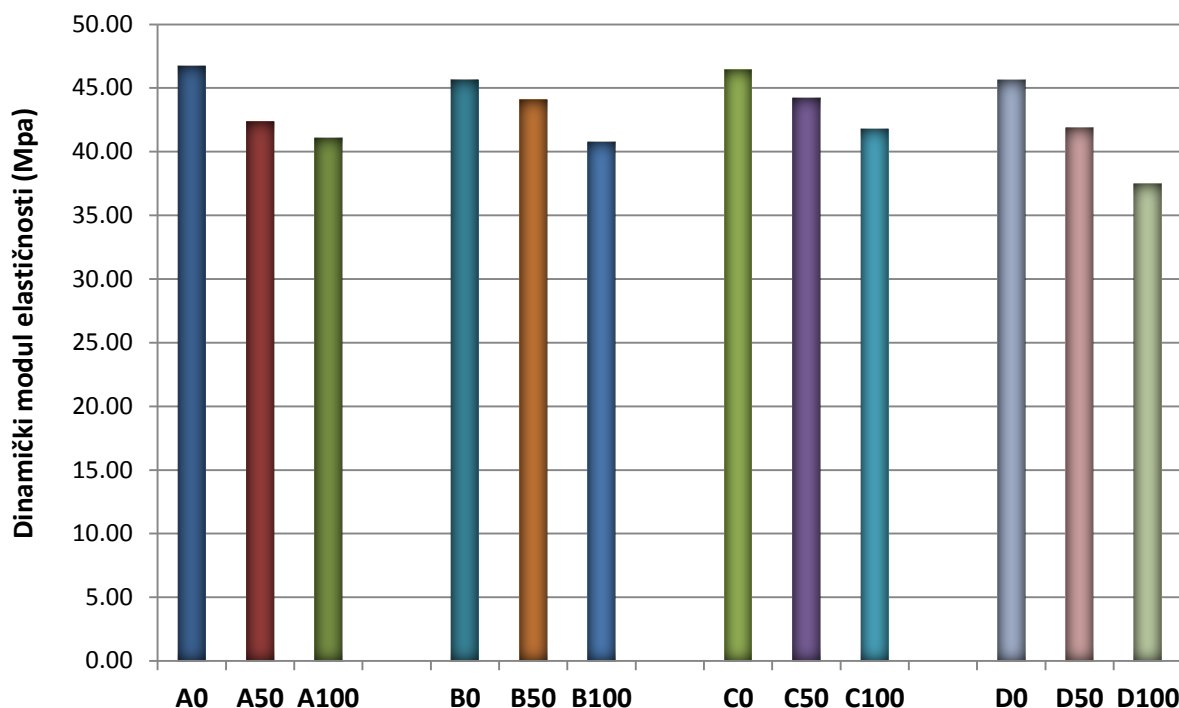
- Sa povećanjem količine biopepela, pri ovoj starosti, povećava se vrijednost koeficijenta kapilarnog upijanja.
- U slučaju betona sa 10% i 20% biopepela, najmanja vrijednost upijanja je registrovana pri upotrebi kombinacije riječnog i agregata od starog betona, kao krupnog agregata.
- Vrsta upotrebljenog krupnog agregata nije imala uticaj na upijanje vode Eko betona (beton sa 50% biopepela i 100% agregata od starog betona kao krupnog agregata). Konačne vrijednosti upijanja su za betone ove grupe bile izjednačene.

3.4.4. Dinamički modul elastičnosti

Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti svih ispitivanih vrsta betona prikazane su grafički na Slika 162, a u cilju sagledavanja uticaja vrste agregata za svaku grupu betona i na Slika 163.



Slika 162 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti svih ispitivanih vrsta betona



Slika 163 - Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti betona, po vrstama agregata

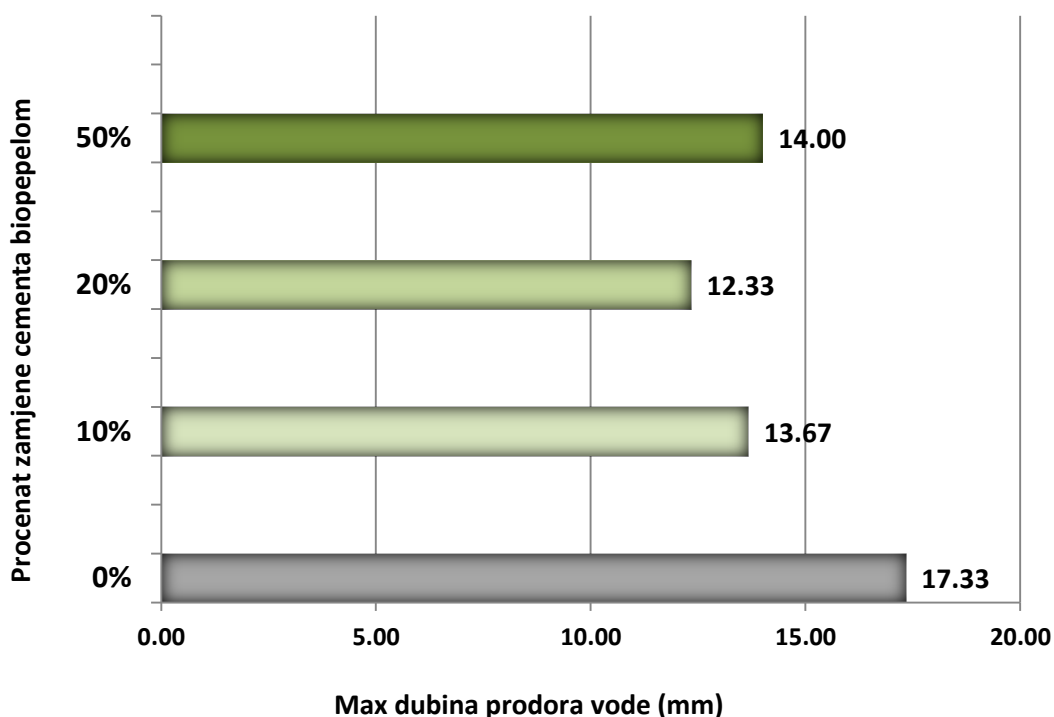
Analizom rezultata prikazanih na dijagramima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Na modul elastičnosti betona utiču moduli elastičnosti njegovih komponenti kao i njihov zapreminski udio. Dominantan uticaj na modul elastičnosti ima vrsta primjenjenog agregata.
- Sa dijagrama prikazanog na Slika 162, primjećuje se da su moduli elastičnosti betona, u okviru grupe sa istom vrstom agregata, bliski i uporedivi.
- Sa povećanjem procenta zamjene prirodnog agregata agregatom od starog betona, vrijednosti dinamičkih modula elastičnosti se smanjuju. Pad čvrstoće svih grupa betona je, bez obzira na nivo supstitucije cementa biopepelom, blizak, što se uočava na Slika 163.
- Kod cementnih betona, supstitucija prirodnog agregata sa 50% i 100% agregata od starog betona, kao krupnog agregata uticala je na smanjenje dinamičkog modula elastičnosti betona za 9,3% i 12,1%, respektivno. Kod betona sa 50% biopepela, smanjenja su bila 8,3% i 17,9%.
- Smanjenje modula elastičnosti betona sa većom količinom agregata od starog betona je posledica lošijih mehaničkih karakteristika starog betona, koji se sastoji od zrna agregata i cementne matrice. Primjenom starog betona kao agregata, ukupni zapreminski udio agregata kod betona se smanjuje, što

rezultuje manjom brzinom ultrazvučnog impulsa, odnosno manjim dinamičkim modulom elastičnosti.

3.4.5. Upijanje vodom pod pritiskom (vodonepropustljivost)

Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti svih vrsta betona dati su u Tabela 36. Uticaj nivoa supstitucije cementa biopepelom na upijanje vodom pod pritiskom betona prikazan je grafički na , gdje su prikazane srednje vrijednosti upijanja vode za betone sa različitim vrstama krupnog agregata.

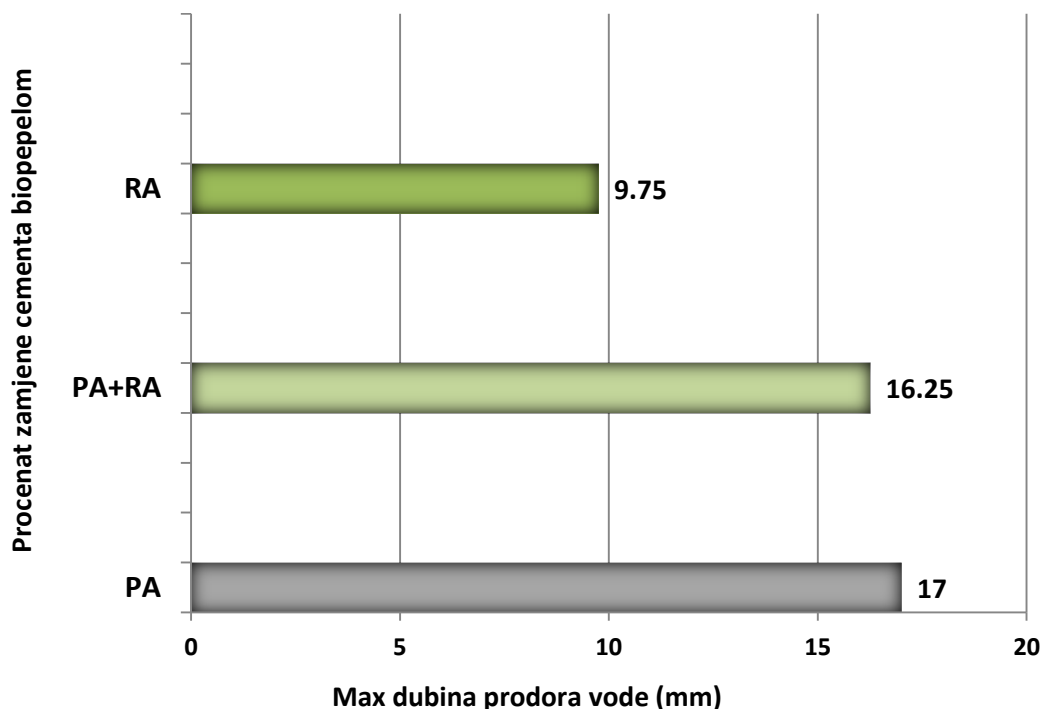


Slika 164 - Uticaj nivoa supstitucije cementa biopepelom na upijanje vodom pod pritiskom betona

Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Supstitucija dijela cementa biopepelom je ima pozitivan efekat na upijanje vodom pod pritiskom. Sve vrste betona sa biopepelom su imale manju dubinu prodora vode od referentnog cementnog betona.
- Betoni sa biopepelom imaju bliske vrijednosti dubine prodora vode, a najmanja dubina je izmjerena kod betona sa 20% biopepela.
- Smanjenje dubine prodora vode betona sa biopepelom, u odnosu na referentni cementni beton, može se pripisati filer efektu sitnih čestica

biopepela, ali pri starosti od 60 dana, kada je izvršeno ispitivanje, i pucolanskoj reakciji biopepela.



Slika 165 - Uticaj vrste krupnog agregata na upijanje vodom pod pritiskom betona (PA-prirodni agregat; PA+RA – kombinacija prirodnog agregata i agregata od starog betona, kao krupnog agregata; RA – agregat od starog betona)

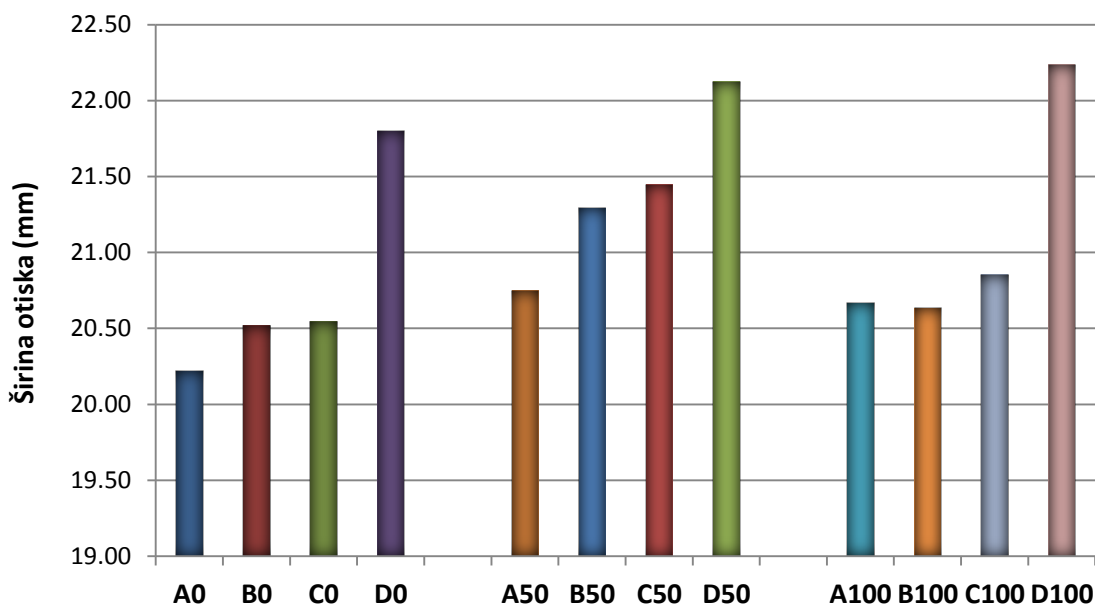
Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Beton sa prirodnim agregatom i beton sa kombinacijom prirodnog agregata i agregata od starog betona, kao krupnim agregatom imaju bliske srednje vrijednosti upijanja vode. Beton sa kombinacijom krupnih agregata je imao neznatno manju dubinu prodora vode.
- Supstitucija krupnog prirodnog agregata agregatom od starog betona ima značajan uticaj na dubinu prodora vode pri nivou susptitucije 100%.
- Beton sa 100% krupnog agregata od starog betona je imao za cca 45% manju dubinu prodora vode od betona sa krupnim prirodnim agregatom. Ovo je rezultat veće apsorpcione moći recikliranog betona, koji se sastoji od zrna agregata i vezivne matrice, u odnosu na prirodni agregat. Supstitucijom prirodnog agregata agregatom od starog betona, smanjuje se ukupan zapreminski sadržaj agregata, a povećava se zapremina vezivne komponente, koja se odlikuje većim sadržajem kapilarnih pora i, posledično, većim

upijanjem vode. Kao rezultat, betoni sa agregatom od starog betona imaju veći kapacitet upijanja vode, što uzrokuje sporiji prodor vode u dubinu betona.

3.4.6. Otpornost na habanje

Rezultati ispitivanja otpornosti betona na habanje, metodom širokog točka, svih vrsta betona dati su u Tabela 39. Vrijednosti upijanja vodom pod pritiskom betona sa prirodnim agregatom prikazane su grafički na Slika 129.



Slika 166 - Vrijednosti širine otiska, pri ispitivanju otpornosti na habanje betona sa prirodnim agregatom

Analizom rezultata na dijagramu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

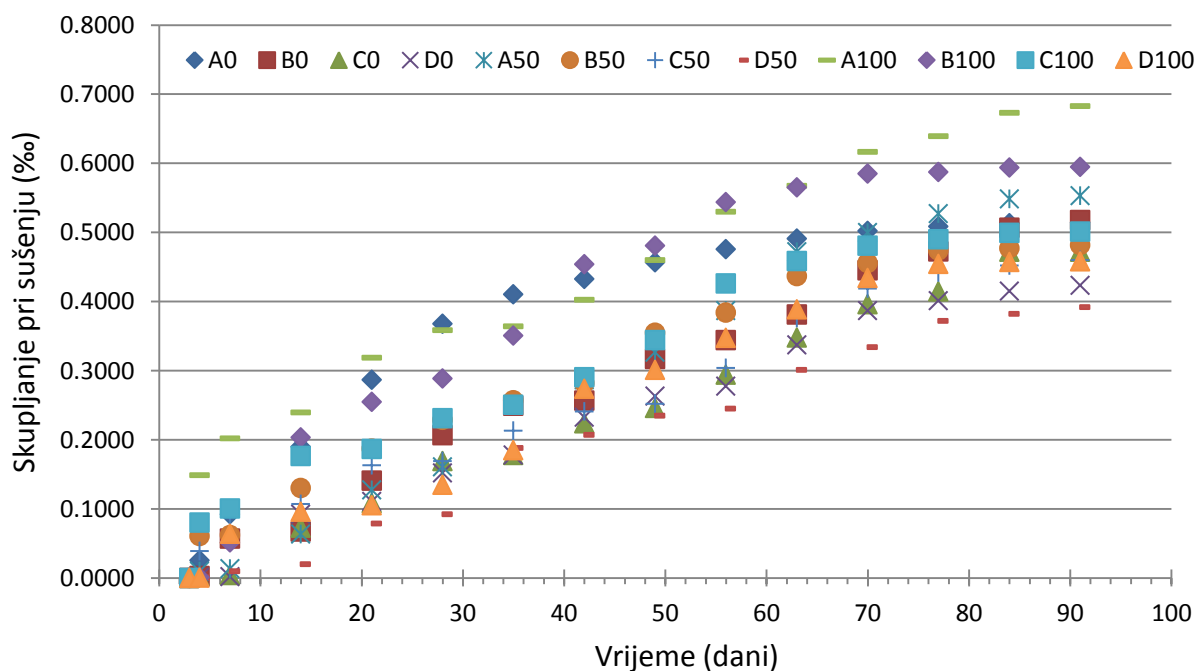
- Svi betoni imaju širinu otiska u rasponu 20-23mm, što ih klasifikuje u II klasu otpornosti betona na habanje.
- Sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, povećava se i širina otiska. Pri supstituciji cementa do 20%, razlika u širini otiska je zanemarljiva, naročito kod betona sa jednom vrstom krupnog agregata.
- Slabija otpornost na habanje betona sa biopepelom može se objasniti smanjenjem apsolutne zapremine agregata pri povećanju sadržaja biopepela, a vezivna matrica ima, generalno, manju otpornost na habanje, u odnosu na agregat.
- Na otpornost betona na habanje, značajan uticaj ima vrsta agregata. Najmanju širinu otiska, odnosno najveću otpornost na habanje, pokazali su betoni

spravljeni sa prirodnim agregatom. Ovo je rezultat boljih mehaničkih svojstava prirodnog agregata, u odnosu na agregat od starog betona. Agregat od starog betona se sastoji od zrna agregata i vezivne komponente koja, generalno, ima malu otpornost na abrazivno dejstvo

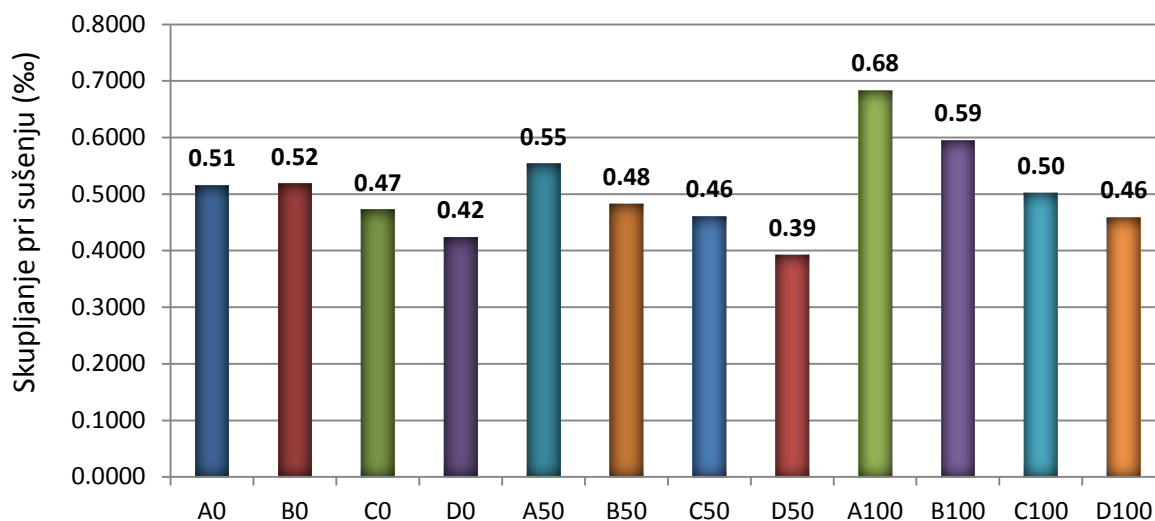
- Kod betona sa do 20% biopepela, najveća širina otiska je registrovana kod betona sa kombinacijom prirodnog agregata i agregata od starog betona.
- Pri supstituciji 50% cementa sa biopepelom, uticaj vrste agregata je zanemarljiv. Kod ovih betona, sa povećanjem supstitucije prirodnog agregata agregatom od starog betona 50% i 100%, širina otiska je povećana za 1,5% i 2%, respektivno. Pretpostavlja se da primjena biopepela uslovljava bolju vezu između zrna agregata i vezivne matrice, što se povoljno odražava na otpornost na habanje betona sa agregatom od starog betona.

3.4.7. Skupljanje pri sušenju

Skupljanje pri sušenju svih vrsta betona prikazano je grafički na , a konačne vrijednosti skupljanja nakon 3 mjeseca ispitivanja na .



Slika 167 - Skupljanje pri sušenju betona



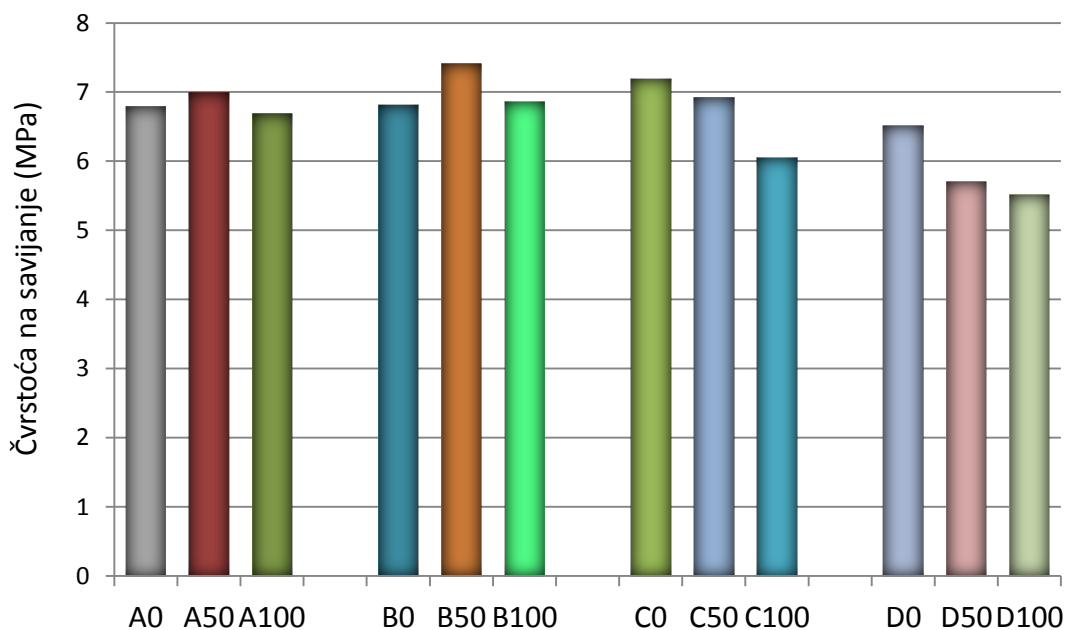
Slika 168 - Konačne vrijednosti skupljanja pri sušenju betona, nakon 3 mjeseca ispitivanja

Analizom rezultata na prikazanim dijagramima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Vrsta krupnog agregata ima dominantan uticaj na skupljanje pri sušenju betona. Sa povećanjem udjela krupnog agregata, povećava se i skupljanje pri sušenju betona. Ovo je naročito primjetno kod referentnog cementnog betona. Kod betona sa biopepelom, supstitucija prirodnog agregata sa 50% agregata od krupnog betona nije imala veliki uticaj na skupljanje pri sušenju betona. Kod svih vrsta, bez obzira na nivo supstitucije cementa biopepelom, betoni sa 100% krupnog agregata od starog betona imaju najveće skupljanje pri sušenju.
- Jedan od uzroka za povećanje skupljanja pri sušenju betona sa agregatom od starog betona je povećana količina vode. Pri spravljanju betona sa agregatom od starog betona, korištena je veća količina vode (voda za prethodno kvašenje agregata). Sa povećanjem vodovezivnog faktora, rastu i poroznost, broj kapilarnih pora i veličina pora i ubrzavaju gubitak vlage, smanjuju njen sadržaj i povećavaju skupljanje pri sušenju betona.
- Sa povećanjem udjela agregata od starog betona, raste i sadržaj cementne paste u ukupnoj zapremini betona. Budući da agregat od starog betona obično ima slabije mehaničke karakteristike od prirodnog agregata, on pruža manji otpor skupljanju betona pri sušenju. Do sličnih zaključaka su došli i drugi autori [86].

3.4.8. Čvrstoća na savijanje

Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje svih vrsta betona dati su u Tabela 41. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje betona sa riječnim agregatom prikazani su grafički na Slika 133.



Slika 169 - Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim agregatom

Analizom rezultata na prikazanim dijagramima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Vrsta krupnog agregata nema značajan uticaj na čvrstoću na savijanje betona, naročito u slučaju referentnih cementnih betona i betona sa 10% biopepela. Kod ovih grupa betona, najveća vrijednost čvrstoće pri savijanju je registrovana pri primjeni kombinacije prirodnog agregata i agregata od starog betona. Čvrstoće na savijanje betona sa 100% prirodnog agregata i 100% agregata od starog betona, kao krupnog agregata, su izjednačene.
- Kod betona sa 20% biopepela, sa povećanjem supstitucije krupnog prirodnog agregata sa agregatom od starog betona, čvrstoća na savijanje se smanjuje. Veći pad čvrstoće je registrovan pri nivou supstitucije od 100% (15,86%).
- Pri nivou supstitucije cementa sa 50% biopepela, sa povećanjem supstitucije krupnog prirodnog agregata sa agregatom od starog betona, čvrstoća na savijanje se smanjuje. Veći pad čvrstoće je registrovan pri nivou supstitucije od 50% (12,44%), nakon čega je daljim povećanjem udjela agregata od starog betona čvrstoća smanjena za 3,16% u odnosu na čvrstoću betona D50.

VII EKOLOŠKI ASPEKTI
PRIMJENE BIOPEPELA
KAO MINERALNOG
DODATKA

1. ASPEKTI EKOLOŠKE OCJENE BIOPEPELA KAO MINERALNOG DODATKA

Analiza ekološkog doprinosa primjene biopepela, kao mineralnog dodatka i zamjene za dio cementa u očvrslim cementnim kompozitima: malterima i betonima, je urađena sa sledećih aspekata:

- I. Očuvanje prirodnih resursa koji se koriste za proizvodnju cementa:
 - krečnjak,
 - glina;
- II. Održivo upravljanje otpadom;
- III. Redukcija emisije CO₂;
- IV. Koncentracija teških metala u vezivnoj komponenti;
- V. Izluživanje teških metala iz očvrslih cementnih kompozita:
 - malteri,
 - betoni.

1.1. Očuvanje prirodnih resursa

Prirodni resursi predstavljaju potencijal sa rezervama prirodnih dobara i prirodnih uslova koji čovjeku mogu biti od koristi, kao što su mineralne sirovine, voda, zemljište sa vegetacijom i prirodni uslovi. Njihovo korišćenje, privredna primjena i ekonomska valorizacija treba da budu planski usmjereni i namjenski kontrolisani. Bez obzira na vrstu, strukturu i pojedinačne količine, oni su osnov za predstojeći privredni i ekonomski razvoj Srbije. U cilju zadovoljenja principa održivog razvoja, treba da postoji dio koji mora ostati izvan ekonomskih i privrednih tokova i koji treba da bude sačuvan za sadašnje i buduće generacije. To posebno važi za neobnovljive prirodne resurse.

Održivo korišćenje i upravljanje prirodnim resursima (obnovljivim i neobnovljivim) zahtjeva primjenu sledećih ključnih razvojnih načela [87]:

- 1) Korišćenje obnovljivih resursa ne smije da pređe stopu njihovog obnavljanja/regeneracije;
- 2) Korišćenje neobnovljivih resursa ne smije da pređe stopu po kojoj se razvijaju zamjene za te resurse (korišćenje treba da se ograniči na stepen na kojem se mogu zamjeniti fizički ili funkcionalno ekvivalentnim obnovljivim resursima, ili na kojem se potrošnja može kompenzovati povećanjem produktivnosti obnovljivih ili neobnovljivih resursa).

Osnovne sirovine za proizvodnju portland-cementa su:

- portland-cementni klinker i
- gips.

Za proizvodnju jedne tone portland-cementnog klinkera, potrebno je 1,5 tona sirovina. Veliki dio mase se izgubi tokom procesa sagorjevanja, usled kalcinacije i oslobađanja CO₂ ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$).

Krečnjak predstavlja sirovinsku komponentu sa dominantnim učešćem. Naime, tri četvrtine (75%) sirovinske smješe po pravilu čini krečnjak, a učešće glina i korektivnih sirovina iznosi preostalih 25%. Količina krečnjaka u karbonatnim stenama može varirati u vrlo širokim granicama. Retko se nalaze karbonatne stijene sa cca 76 -77% krečnjaka i odnosom krečnjak : glina $\approx 3 : 1$, što se smatra optimalnim odnosom sirovina.

Primjena krečnjačkih laporaca za proizvodnju sirovinske smješe se sve više smanjuje i prelazi se na varijantu krečnjak - glina zbog lakše korekcije hemijskog sastava smješe.

Glina predstavlja sledeću po važnosti sirovinsku komponentu. Glina po svom hemijskom sastavu predstavlja hidratizane alumo-silikate, koji se pretežno sastoje od oksida silicijuma i aluminijuma, i nešto manje oksida gvožđa. Ovi oksidi su neophodni za obrazovanje novih jedinjenja - minerala cementnog klinkera. Za proizvodnju cementnog klinkera pretežno se upotrebljavaju gline mlađih geoloških formacija, ilitskog ili kaolinskog tipa, rjeđe monmorionitskog tipa [88].

Supstitucijom dijela cementa biopepelom nastalim sagorjevanjem žetvenih ostataka, kao raspoloživim otpadnim materijalom, smanjio bi se trend enormne potrošnje ovih prirodnih resursa. U cilju kvantifikacije uštede i očuvanja prirodnih resursa, urađena je analiza toka materijala (engl. Material flow analyses - MFA). Primjenljivost MFA se ogleda u njenom kapacitetu za generisanje sveobuhvatne slike čitavih sistema. Njena najveća prednost je mogućnost smanjenja kompleksnosti veoma složenih sistema, do njihovih najvažnijih procesa, dobara i tokova supstanci. Metoda se može primjeniti na veliki broj problema. Može se koristiti za rano prepoznavanje nedostataka resursa ili zagađenje životne sredine uzrokovanih ljudskim aktivnostima.

Za modelovanje toka materijala i zaliha korišćen je softver STAN [89]. Ovaj softver omogućava balansiranje, usaglašavanje i vizualizaciju materijalnih sistema na nivou dobara i supstanci uzevši u obzir nesigurnosti podataka.

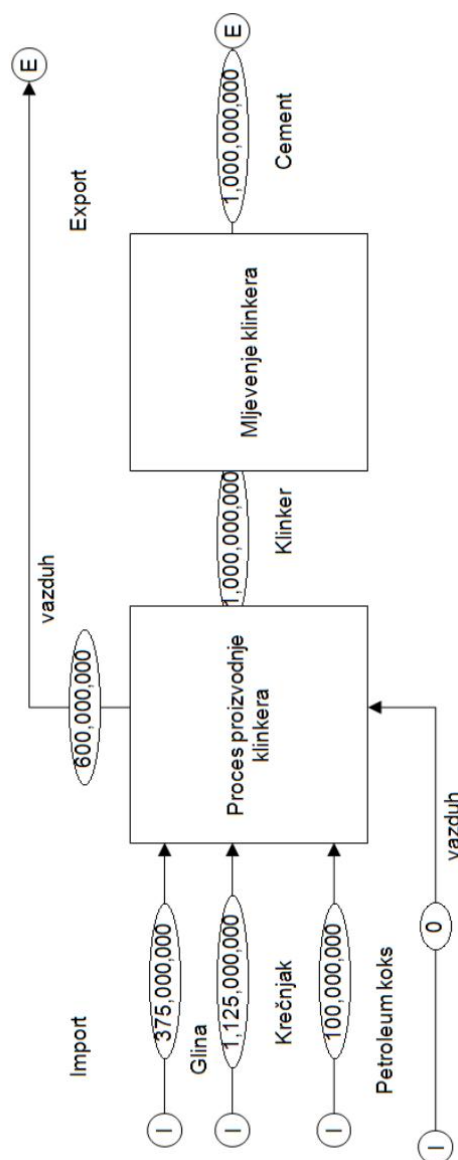
U analizi toka materijala, korišteni su sledeći podaci:

- uzeta je u proračun prosječna godišnja proizvodnja cementa u LaFarge fabrici cementa u Beočinu, od 1 miliona tona cementa,
- analizirani vremenski period je 1 godina dana,
- potrebne količine materijala za proizvodnju 1 tone klinkera su: 375kg gline i 1125kg krečnjaka,
- kao energent za sagorjevanje klinkera koristi se Petroleum koks (LaFarge fabrika cementa u Beočinu), čija je potrošnja ekvivalentna 100kg/tona klinkera [90],

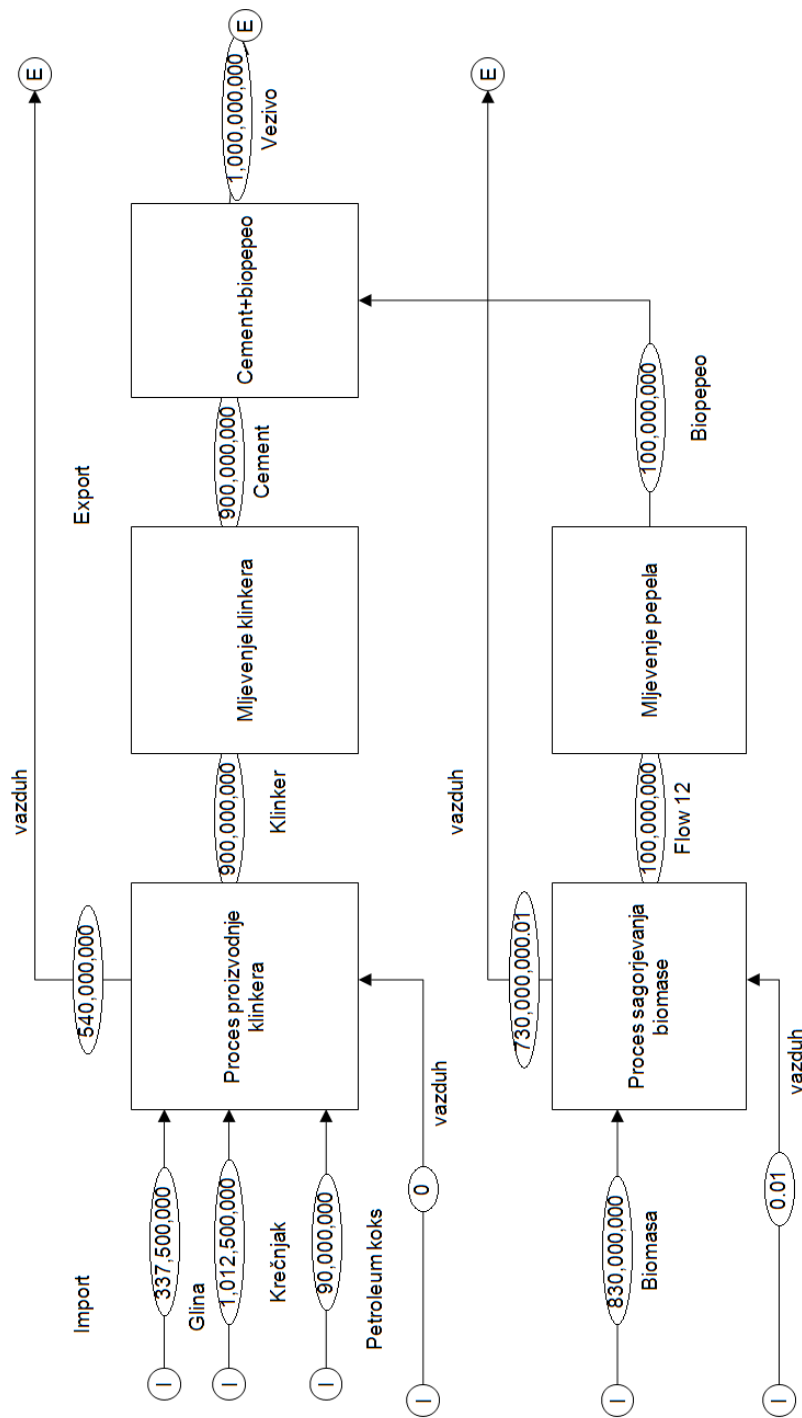
- pri sagorjevanju žetvenih ostataka (pšenične slame), generiše se 8% biopepela [90].

U softveru Stan, razvijena su 4 modela, odnosno scenarija:

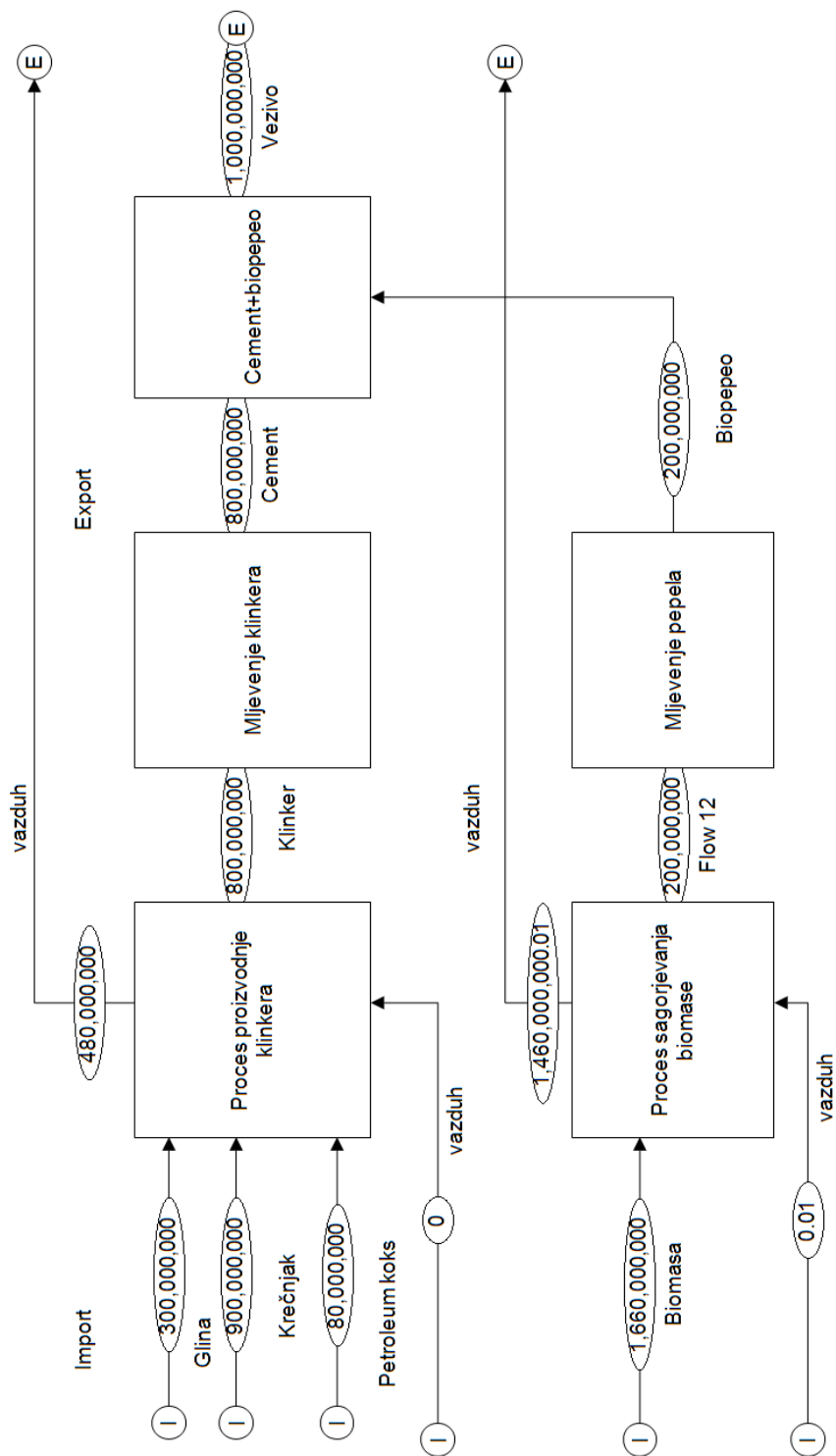
- Status Quo – referentni model, u kojem se sagledavaju utrošene količine materijala za proizvodnju cementa - Slika 170,
- Model 10% - model u kojem se 10% cementa mijenja sa pepelom nastalim sagorjevanjem biomase - Slika 171,
- Model 20% - model u kojem se 20% cementa mijenja sa pepelom nastalim sagorjevanjem biomase - Slika 172,
- Model 50% - model u kojem se 50% cementa mijenja sa pepelom nastalim sagorjevanjem biomase - Slika 173.



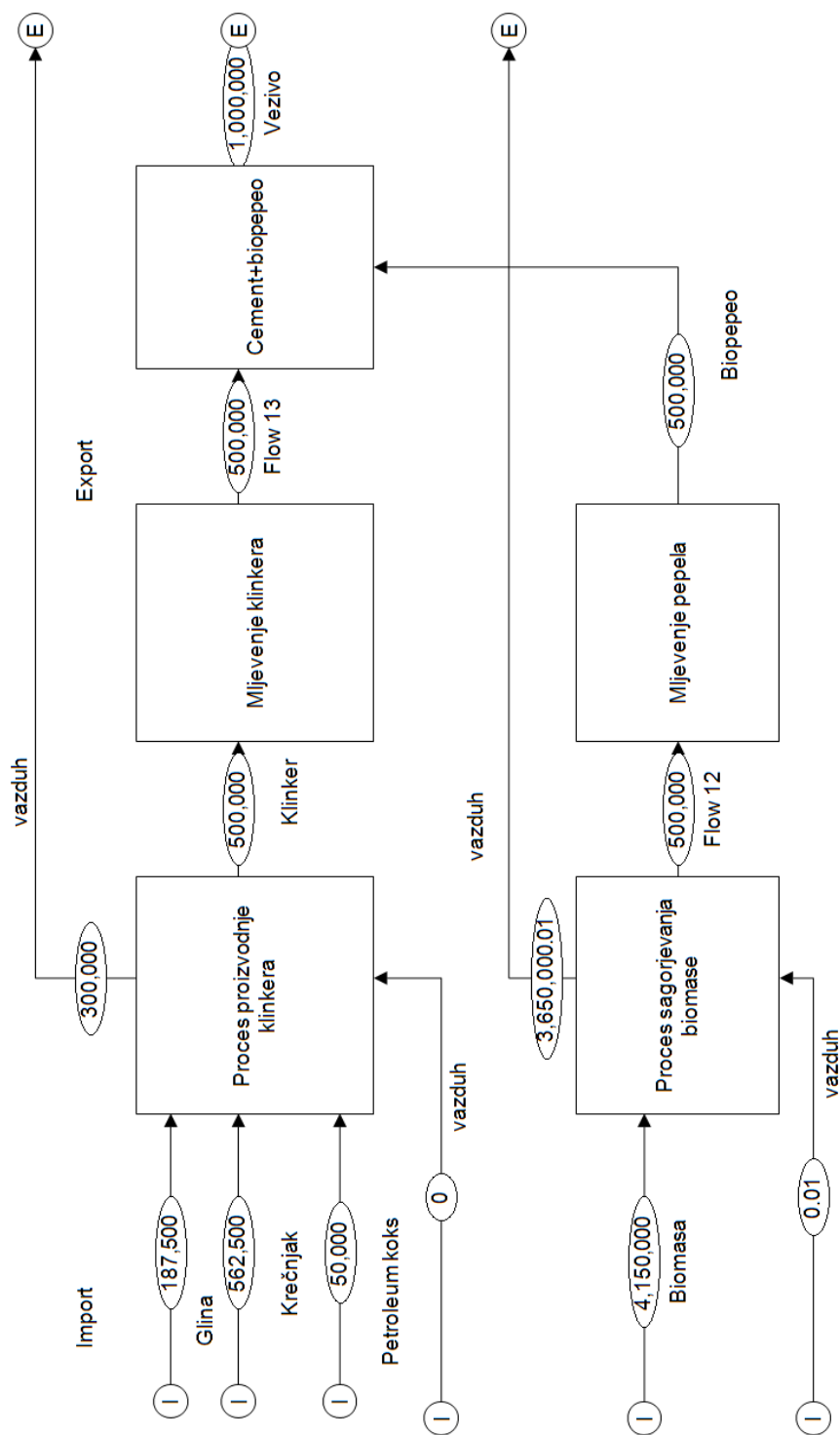
Slika 170 – Analiza toka materijala u proizvodnji cementa (Status Quo)



Slika 171 - Analiza toka materijala u proizvodnji cementa (Model 10%)



Slika 172 - Analiza toka materijala u proizvodnji cementa (Model 20%)

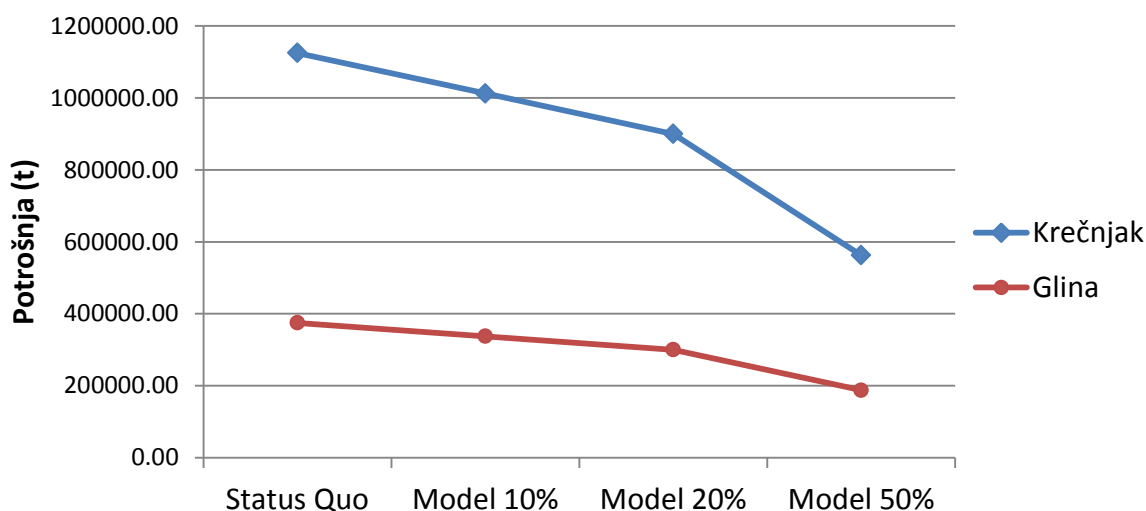


Slika 173 - Analiza toka materijala u proizvodnji cementa (Model 50%)

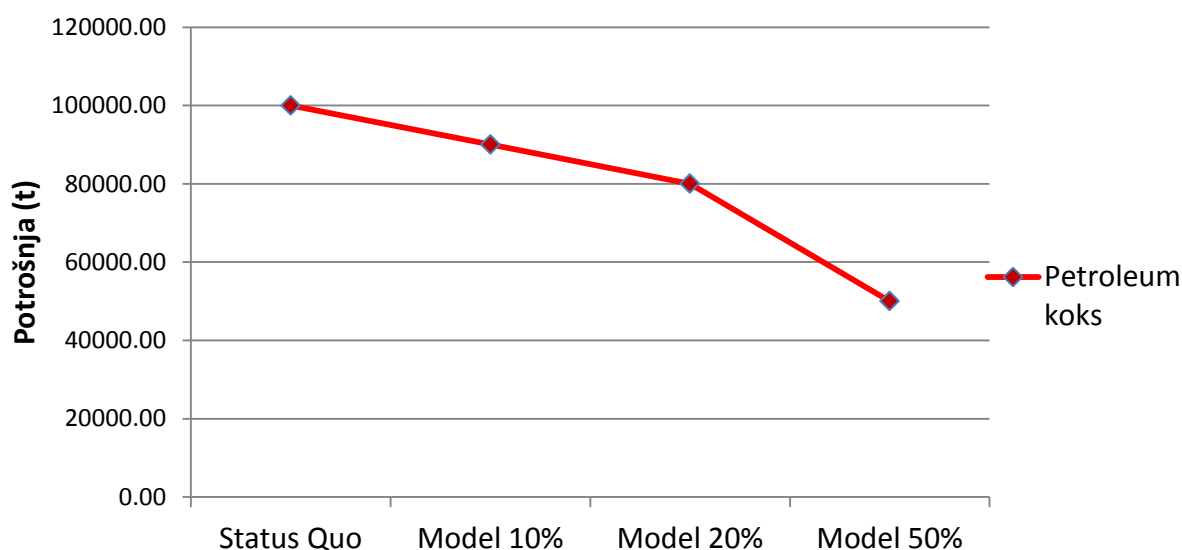
Rekapitulacija rezultata prikazanih na prethodnim modelima, predstavljena je grafički na Slika 174 – smanjenje potrošnje krečnjaka i gline u proizvodnji cementa i na Slika 175– smanjenje potrošnje petroleum koks, na nivou godišnje proizvodnosti fabrike cementa La Farge u Beočinu.

Petroleum koks, kao derivat nafte, je jedan od neobnovljivih prirodnih resursa. U procesu proizvodnje cementa (pečenja klinkera) potroši se velika količina goriva i, istovremeno, emituje velika količina gasova staklene bašte. Supstitucijom cementa biopepelom, smanjuje se proizvodnja cementa, pa i potrošnja ove vrste goriva (neobnovljivog izvora energije).

Energija utrošena na proces proizvodnje biopepela se smatra nultom, budući da se u procesu sagorjevanja biomase stvara energije, koja se dalje koristi za proizvođačke procese [92].



Slika 174 - Smanjenje potrošnje krečnjaka i gline u proizvodnji cementa, supstitucijom dijela cementa biopepelom, na nivou godišnje proizvodnosti fabrike La Farge



Slika 175 - Smanjenje potrošnje petroleuma koksa u proizvodnji cementa, supstitucijom dijela cementa biopepelom, na nivou godišnje proizvodnosti fabrike La Farge

1.2. Upravljanje otpadom

Primarni ciljevi upravljanja otpadom su zaštita ljudi i životne sredine, očuvanje prirodnih (a naročito neobnovljivih) resursa i smanjenje dugoročnog rizika usled deponovanja otpada. Upravljanje otpadom predstavlja jedno od sredstava za sistematsku i efikasnu kontrolu tokova materijala, porjeklom iz industrije, poljoprivrede, građane sredine, u životnu sredinu. Trend rasta svjetske populacije praćen je ubrzanom industrijalizacijom i, posledično, povećanom potrebom za energijom i resursima. Sa povećanjem potrošnje resursa i građenja, rastu i količine nusprodukata i otpada, za koje treba uspostaviti adekvatan sistem upravljanja.

Tokom 2017. godine svi sektori ekonomskih djelatnosti u Republici Srbiji stvorili su 48,9 miliona tona otpada, što je za 3,3% više nego u prethodnoj godini. Udio neopasnog otpada iznosi 64,7% a opasnog 35,3%. Stvorene količine otpada bilježe pad u većini sektora ekonomskih djelatnosti. Stvorene količine otpada, posmatrano po sektorima i u odnosu na prethodnu godinu, u 2017. godini zabilježile su sledeća kretanja:

- Poljoprivreda – pad od 6,3%,
- Rudarstvo – pad od 0,8%,
- Prerađivačka industrija – rast od 28,3%,
- Snabdjevanje električnom energijom, gasom i parom – rast od 27,1%,
- Snabdjevanje vodom i upravljanje otpadnim vodama – pad od 12%,
- Građevinarstvo – pad od 4,3%, i sektori uslužnih djelatnosti – pad od 15,6% [92].

U 2017. godini ukupno je tretirano 48,3 miliona tona otpada. Od ukupno tretirane količine otpada odloženo je 46,5 miliona tona (96,2%). Ponovno iskorišćene količine otpada u 2017. godini bilježi rast u odnosu na prethodnu godinu, koji je uglavnom nastao zbog povećanog recikliranja metalnog otpada. Količina recikliranog otpada korišćenog kao gorivo za proizvodnju energije veća je za 14,7% nego prethodne godine.

Poljoprivredni otpad, biopepeo nastao sagorjevanjem biomase, odlaže se dijelom na neuređene deponije u krugu farmi, kompanija, postrojenja koje sagorjevaju žetvene ostatke, a dijelom se transportuje na regionalne deponije i miješa sa ostalim vrstama otpada. Dio otpada se i uništava u oblasti, odnosno regionu u kojem je i nastao. Stoga je teško procijeniti tačne količine ove vrste otpada, porjeklom iz post-potrošačke poljoprivredne proizvodnje.

Analizom prikupljenih podataka, dobijenih ispitivanjem rada kompanija koje sagorjevaju žetvene ostatke i generišu biopepeo, kao otpadni materijal, procijenjena je količina od 5.000 tona biopepela na godišnjem nivou. Imajući u vidu potencijal primjene, od izuzetne je važnosti uspostaviti sistem održivog upravljanja ove vrste otpada,

njegovog vraćanja u proces reciklaže i tretiranja kao vrijedne sirovine u građevinskim proizvodima.

1.3. Redukcija emisije CO₂

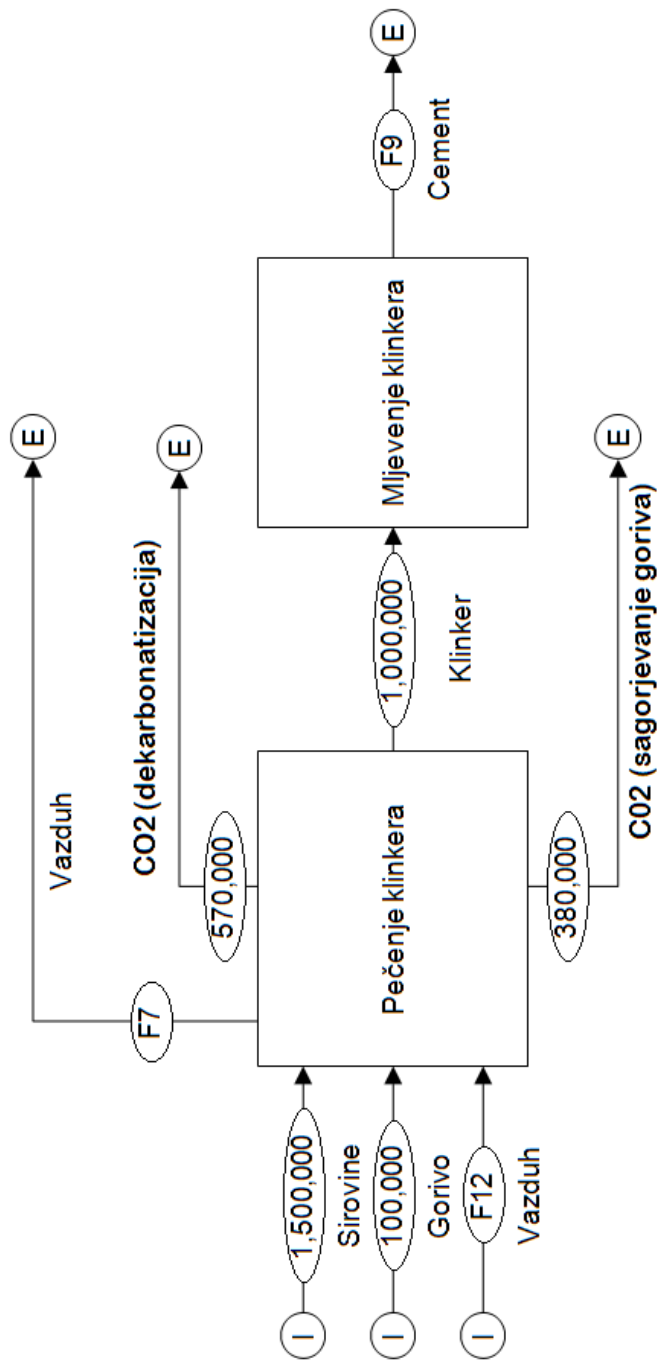
Evropska cementna industrija posvećena je cilju da osigura da društvo ima dovoljno cementa da zadovolji svoje potrebe, i da istovremeno smanji potražnju za gorivom i sirovinama i posledičnim emisijama. Korišćenje otpadnih materijala u cementnoj industriji, koje se naziva i koprocesuiranje, doprinosi postizanju ovih ciljeva. Koprocesuiranje je korišćenje otpada kao sirovine i kao izvora energije u industrijskim procesima umjesto prirodnih mineralnih resursa (reciklaža materijala) i fosilnih goriva kao što su ugalj, nafta ili gas (iskorišćenje energije). Koprocesuiranje otpada u cementnoj industriji obezbjeđuje najveću moguću zamjenu neobnovljivih materijala.

Prema literaturnim podacima, prosječna emisija CO₂ pri proizvodnji 1 tone klinkera je 950kg [94], zavisno od vrste peći i primjenjenog goriva za sagorjevanje. Emisija CO₂, iz procesa proizvodnje cementa, se generiše preko dva mehanizma. Značajne količine gasa se emituju tokom procesa kalcinacije krečnjaka ili nekog drugog karbonatnog materijala (cca 60%). Drugi izvor emisije potiče od sagorjevanja goriva, uglavnom uglja i naftnih derivata (cca 40%).

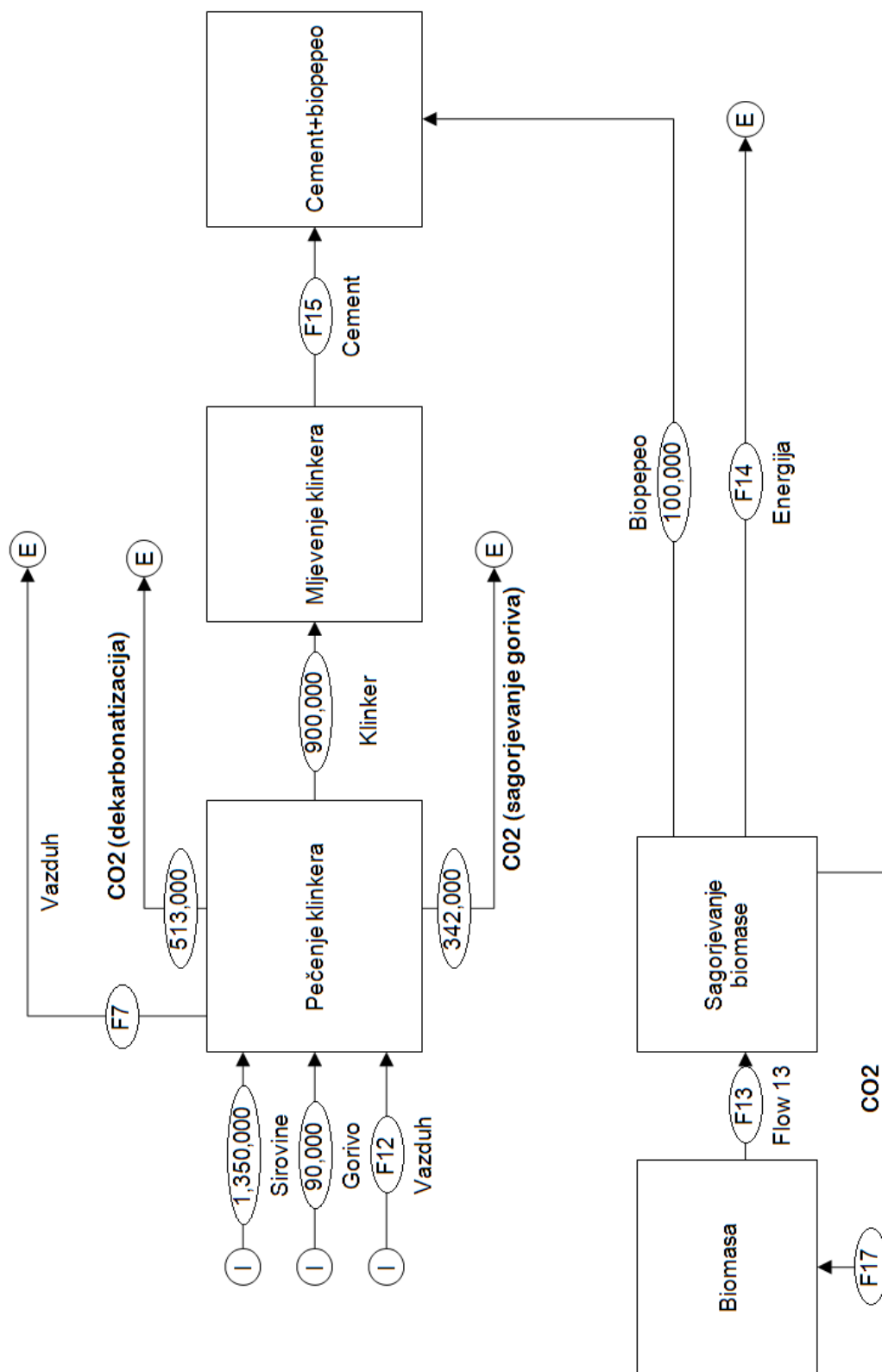
Supstitucijom dijela cementa biopepelom, nastalim sagorjevanjem žetvenih ostataka, kao CO₂ neutralnim izvorom, smanjuje količinu proizvedenog klinkera, utrošenu energiju u procesu proizvodnje i količinu emitovanog CO₂. U procesu proizvodnje biopepela, smatra se da je nulta emisija gasova, jer je količina emitovanog CO₂, pri sagorjevanju biomase, manja ili jednaka od količine CO₂ koju biljka apsorbuje tokom svog rasta.

U softveru Stan, razvijena su 4 modela, odnosno scenarija:

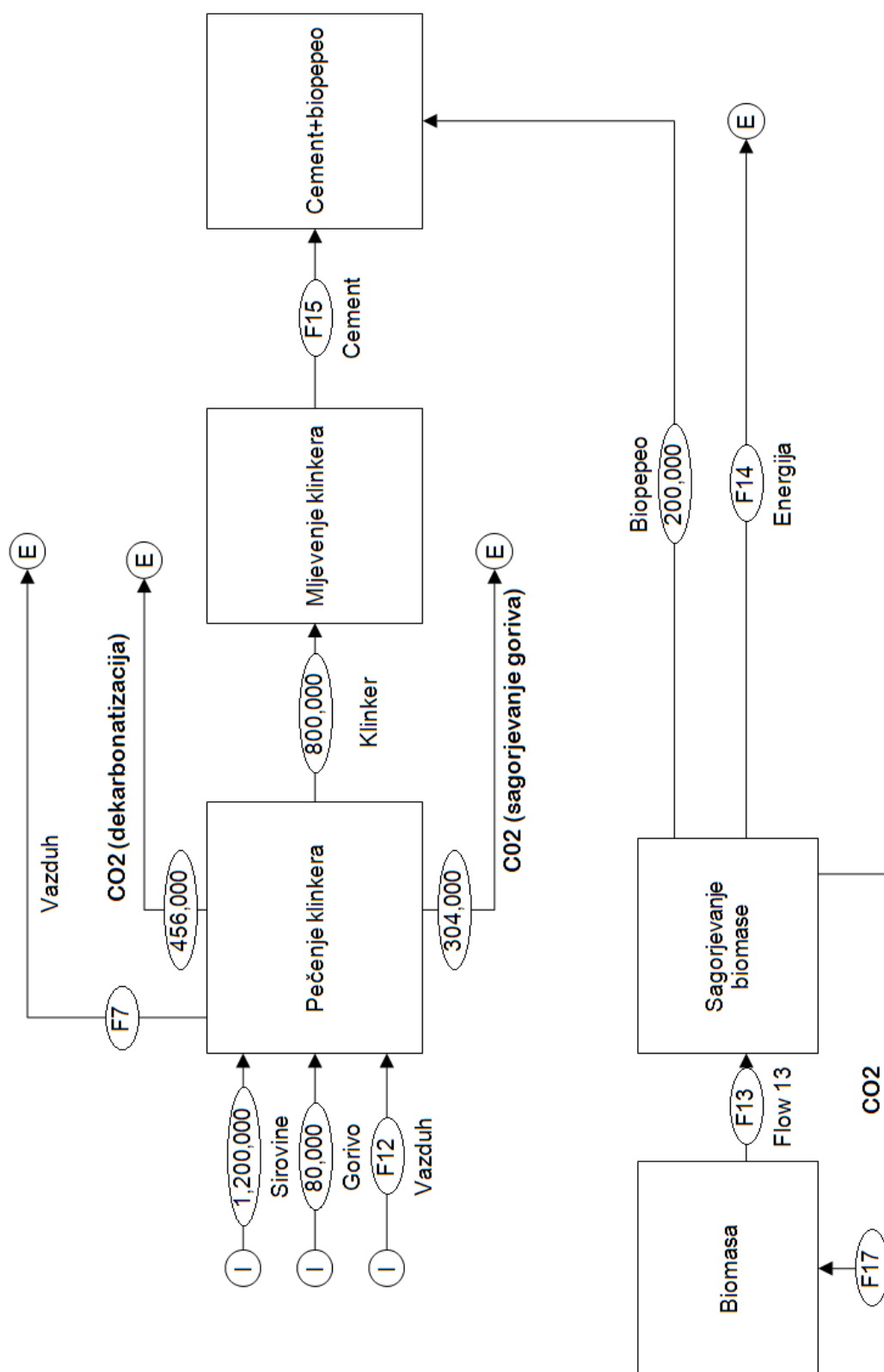
- Status Quo – referentni model, u kojem se sagledava emisija CO₂ pri proizvodnji miliona tona cementa (godišnja proizvodnost La Farge) - Slika 176,
- Model 10% - model u kojem se sagledava emisija CO₂ pri proizvodnji 900.000 tona cementa (10% cementa zamjenjeno sa biopepelom) - Slika 177,
- Model 20% - model u kojem se sagledava emisija CO₂ pri proizvodnji 800.000 tona cementa (20% cementa zamjenjeno sa biopepelom) - Slika 178,
- Model 50% - model u kojem se sagledava emisija CO₂ pri proizvodnji 500.000 tona cementa (50% cementa zamjenjeno sa biopepelom) - Slika 179.



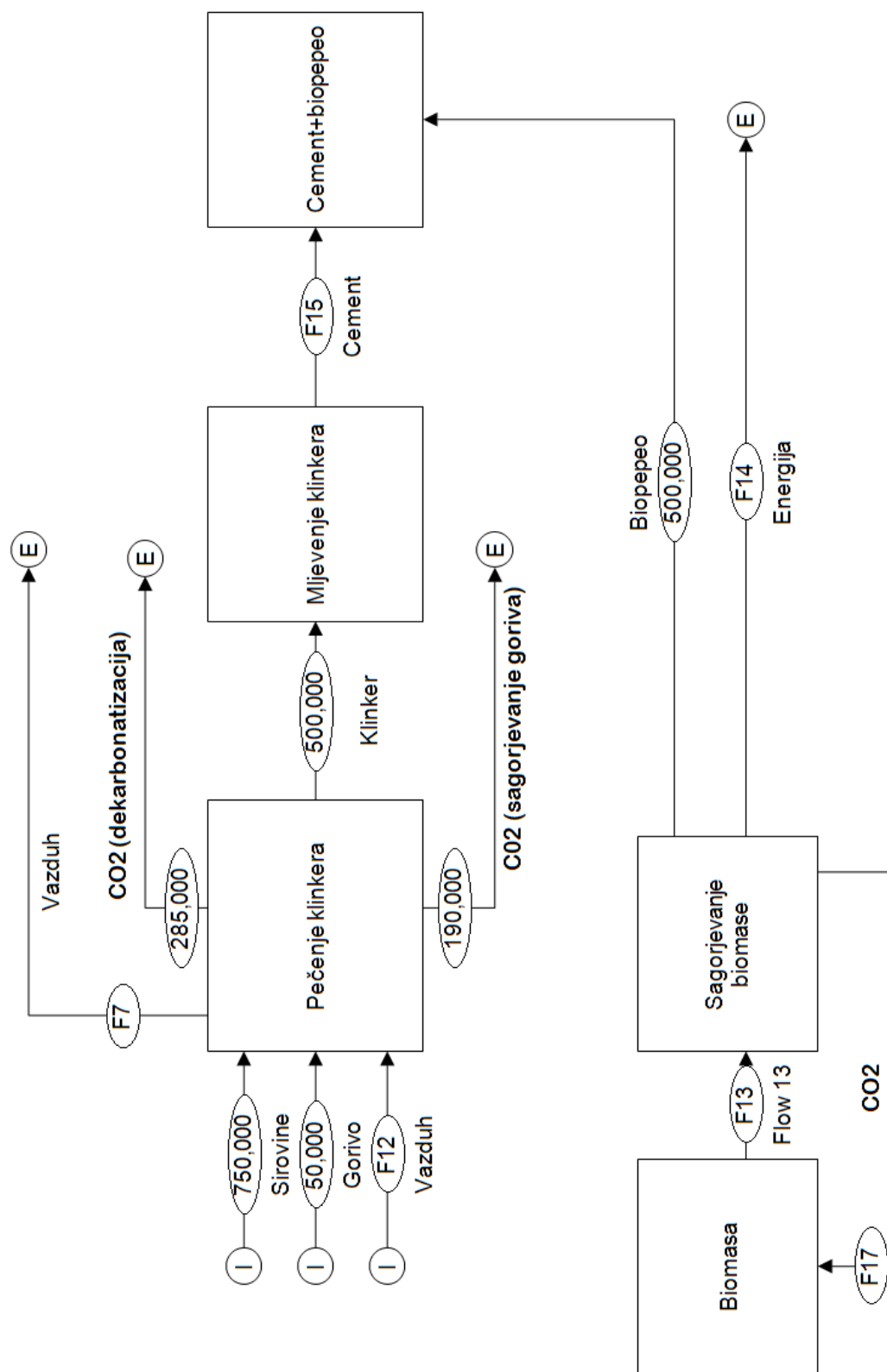
Slika 176 - Emisija CO2 pri proizvodnji miliona tona cementa (Model Status Quo)



Slika 177 - Emisija CO₂ pri proizvodnji 900.000 tona cementa (Model 10%)

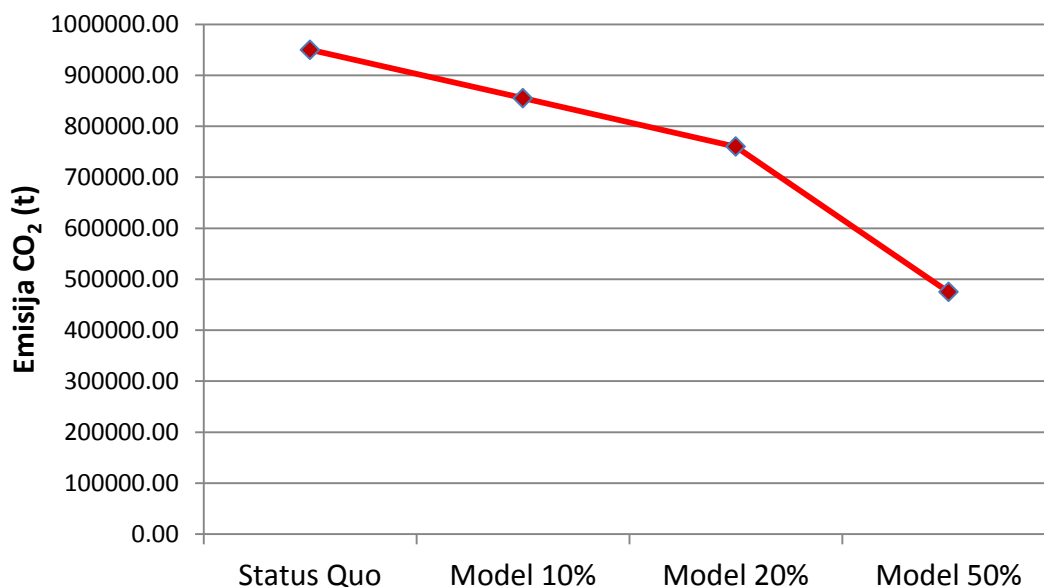


Slika 178 - Emisija CO₂ pri proizvodnji 800.000 tona cementa ((Model 20%)



Slika 179 - Emisija CO₂ pri proizvodnji 500.000 tona cementa (Model 50%)

Rekapitulacija rezultata prikazanih na prethodnim modelima, predstavljena je grafički na Slika 180 – smanjenje emisije CO₂ u proizvodnji veziva (cementa i biopepela), pri nivoima supstitucije 10%, 20% i 50%, na nivou godišnje proizvodnosti fabrike cementa La Farge u Beočinu.



Slika 180 - Smanjenje emisije CO₂ u proizvodnji veziva (cementa i biopepela), pri nivoima supstitucije cementa biopepelom 10%, 20% i 50%, na nivou godišnje proizvodnosti fabrike cementa La Farge u Beočinu

1.4. Koncentracija teških metala u vezivnoj komponenti

Koncentracija teških metala u vezivnoj komponenti, na 4 izabrana modela, određena je u softveru Stan, pomoću analize toka supstanci (engl. Substance flow analyses – SFA). Za analizu su izabrane 4 supstance indikatora, koje su najopasnije, sa aspekta dejstva na ljude i životnu sredinu: hrom, arsen, olovo i kadmijum.

1.4.1. Hrom

Hrom je bitan mineral u tragovima, i dobro je poznat po svojoj funkciji u održavanju normalne količine glukoze u krvi, odnosno svoje dobre funkcije na insulinsku osjetljivost. Hrom takođe utiče na metabolizam ugljenih hidrata, masti i proteina. Hrom ima mnogo korisnih primena, kao pigment, antikorozivni agens, za pripremu rastvora za oplatu metala. Površina metala se oblaže kako bi se popravile antikorozivne osobine, dimenzije i vek trajanja proizvoda. Hrom se u prirodi može naći u tri forme: kao metalni, trovalentni i heksavalentni. Cr(0) ili metalni hrom je čvrsta supstanca sive boje, čija je tačka topljenja visoka. Koristi se prilikom pravljenja čelika i drugih legura. Ova forma se ne može naći u prirodi, već se dobija iz ruda. Trovalentni hrom ili Cr(III) se u prirodi može naći u stijenama, zemljištu, biljkama, životinjama i u vulkanskoj lavi. Ulazi u sastav mnogih premaza koji se u industriji koriste za zaštitu unutrašnjosti industrijskih peći.

Heksavalentni hrom ili Cr(VI) se dobija u industriji kada se Cr(III) zagrijava u prisustvu mineralnih baza na atmosferskom kiseoniku (na primer, tokom završne obrade metala). Potvrđeno je da ova forma hroma ima potencijalno štetan efekat na ljude i životnu sredinu. Zbog toga je važno da se količina heksavalentnog hroma kontroliše. Heksavalentni hrom je ljudski karcinogen, ako se unese u telo udisanjem. Radnici mnogih različitih zanimanja su izloženi heksavalentnom hromu. Poznato je da se problematična izlaganja javljaju među radnicima koji rukuju proizvodima sa hromnim sadržajem, kao i među variocima, i ljudima koji vrše brušenje i lemljenje nerđajućeg čelika. U Evropskoj uniji, upotreba heksavalentnog hroma na elektronskoj opremi je u znatnoj mjeri zabranjena Direktivom o restrikciji hazardnih supstanci [95].

Cement nije uvršten u liste kancerogenih supstanci Međunarodne agencije za istraživanje raka - IARC ili američkog nacionalnog toksikološkog programa - NTP; ali sadrži u tragovima heksavalentni hrom koje IARC i NTP klasifikuju kao poznate uzročnike kancera kod ljudi.

U skladu sa Pravilnikom o ograničenjima i zabranama proizvodnje, stavljanja u promet i korišćenja hemikalija, [96] se ograničava sadržaj Cr(VI). Zabranjeno je korišćenje ili stavljanje u promet cementa i smješa koje ga sadrže ako nakon hidratacije (kvašenja) sadrže više od 2 mg/kg (0,0002%) rastvornog hroma (VI) obračunatog na ukupnu masu suvog cementa.

Ukupan sadržaj hroma se, prema Evropskoj direktivi za otpad na deponijama - 1999/31/EC [97], ograničava na:

- 0,5 mg/kg - za inertne materijale,
- 10 mg/kg - za nehazardne materijale,
- 70 mg/kg - za hazardne materijale.

Prema Pravilniku o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje i metodama njihovog ispitivanja [98], količina istog se ograničava na 100mg/kg zemlje i 0,5 mg/litri vode.

Glavni izvor hroma u portland cementu su polazne sirovine: krečnjak i glina (cca 70% u odnosu na ostale izvore), a zatim sekundarne sirovine (koje potiču iz industrije gvožđa i čelika), te alternativna goriva (gume) [99]. Prosječne kocentracije ukupnog hroma u polaznim sirovinama i gorivu su date u Tabela 60.

Testovi urađeni na američkom cementu su pokazali koncentracije ukupnog hroma u rasponu 5–124 ppm (mg/kg), dok evropski cementi sadrže 32–176 ppm [100].

Tabela 60. Sadržaj ukupnog hroma u polaznim sirovinama i gorivu [100]

	Krečnjak	Glina	Prašina cementnih peći	Petroleum koks
Cr (mg/kg)	1,5	14	5,6	2

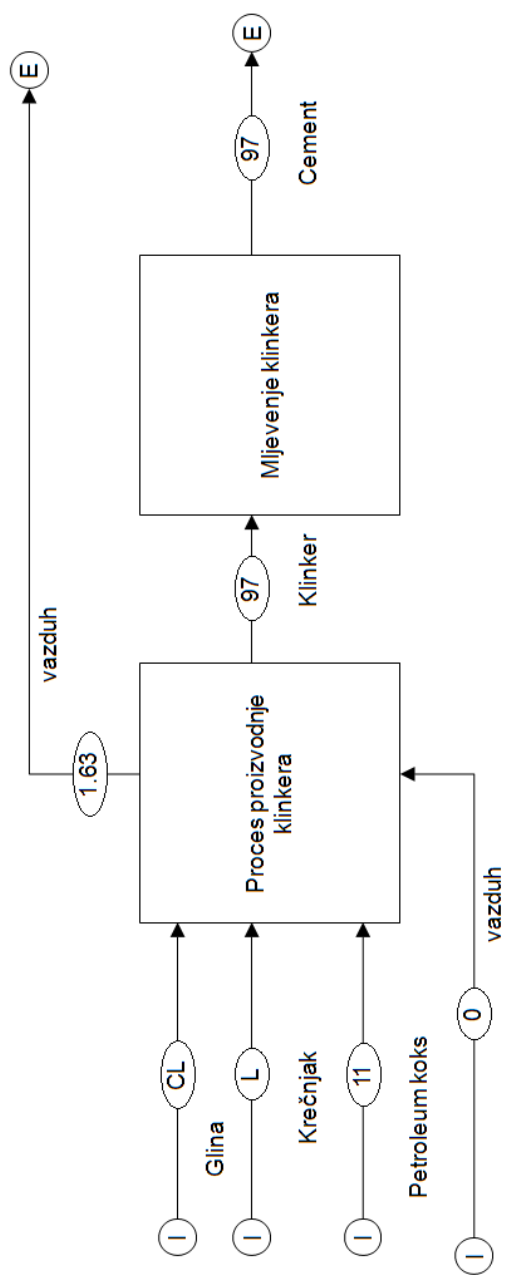
Ispitivanje sadržaja ukupnog hroma u cementu (CEM I 42,5, La Farge) i biopepelu (pepeo pšenične slame, Mitrosrem) urađeno je u Institutu IMS u Beogradu i rezultati su dati u Tabela 61.

Tabela 61. Sadržaj ukupnog hroma u cementu i biopepelu

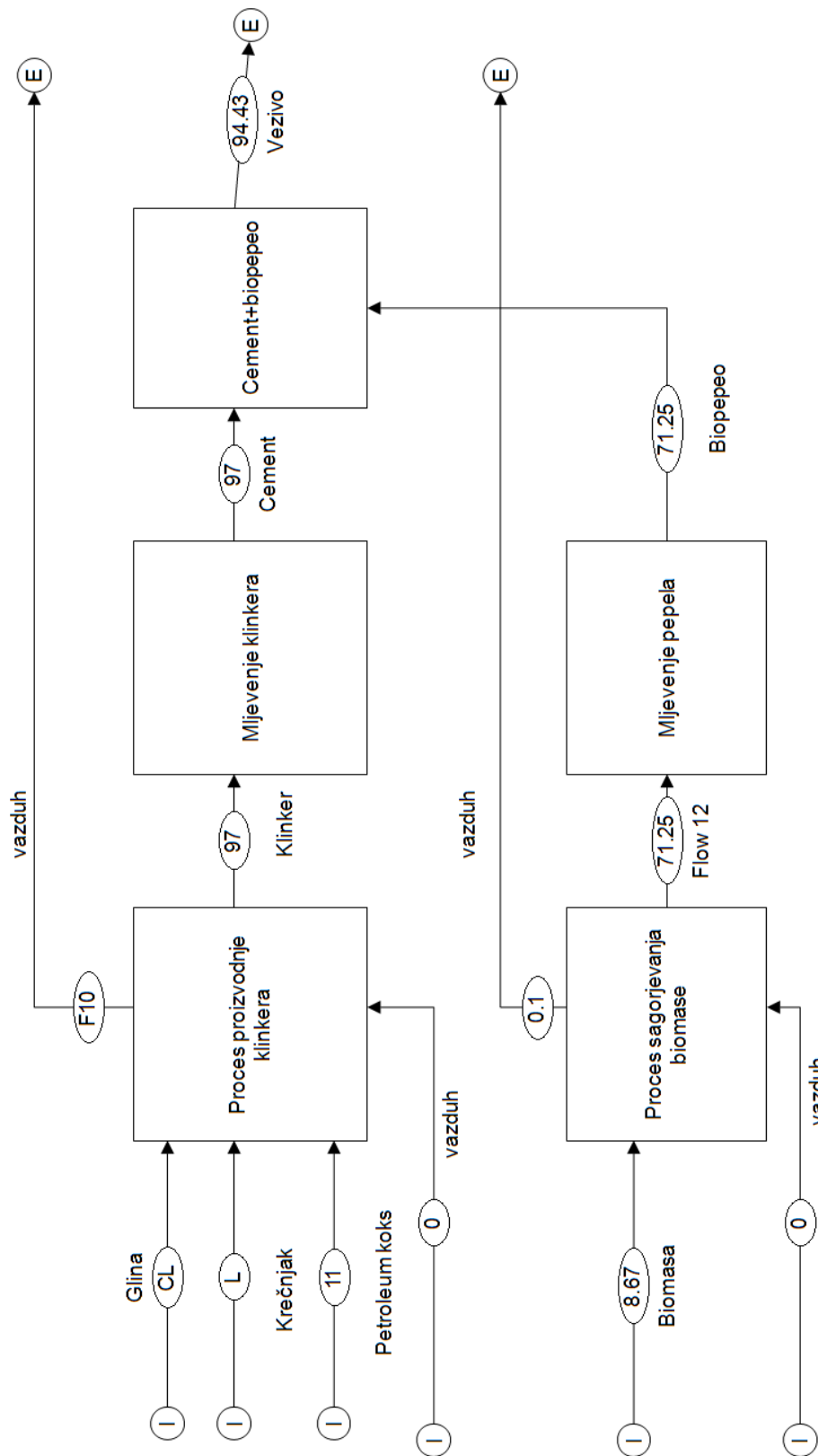
	Cr (mg/kg)	1999/31/EC	Službeni glasnik RS 23/1994
CEM I	97	NE ZADOVOLJAVA	ZADOVOLJEN
Biopepeo	71,25	NE ZADOVOLJAVA	ZADOVOLJEN

U softveru Stan, razvijena su 4 modela, odnosno scenarija:

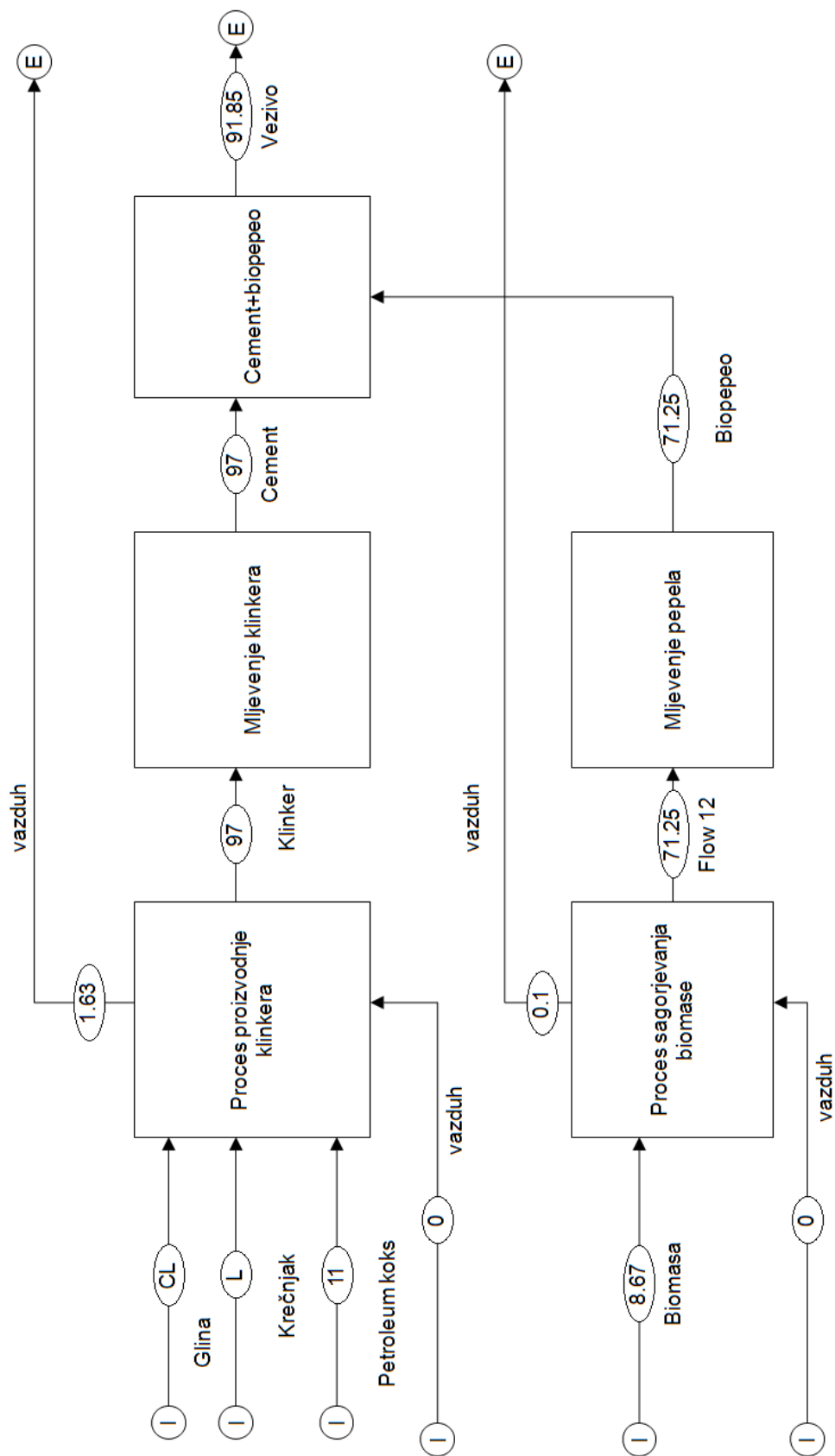
- Status Quo – referentni model, u kojem se sagledava koncentracija ukupnog hroma referentnog veziva (100% cement) - Slika 181,
- Model 10% - model u kojem se sagledava koncentracija ukupnog hroma veziva 90% cement + 10% biopepeo - Slika 182,
- Model 20% - model u kojem se sagledava koncentracija ukupnog hroma veziva 80% cement + 20% biopepeo - Slika 183,
- Model 50% - model u kojem se sagledava koncentracija ukupnog hroma veziva 50% cement + 50% biopepeo - Slika 184.



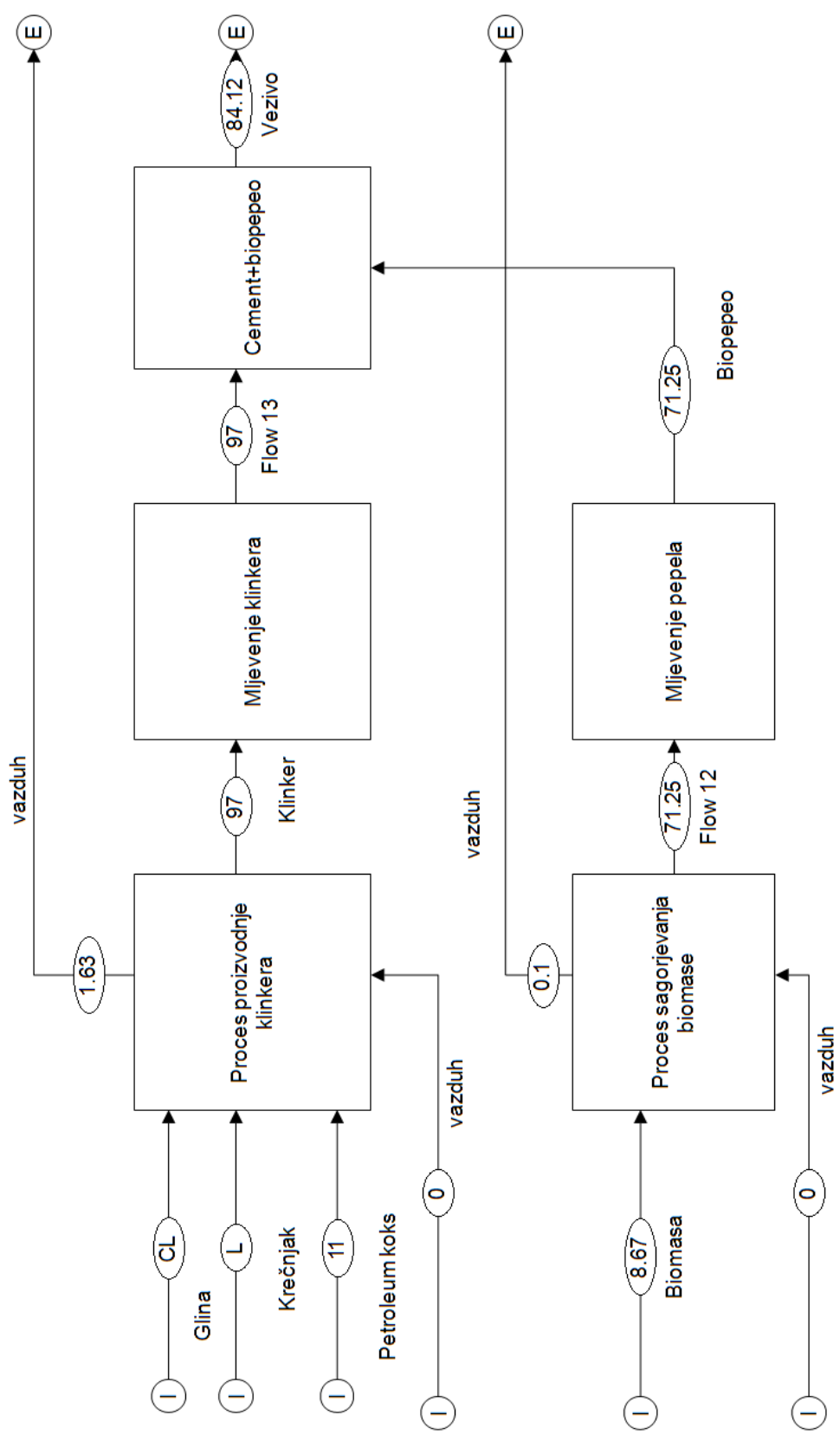
Slika 181 - Koncentracija ukupnog hroma referentnog veziva - 100% cement (Model Status Quo)



Slika 182 - Koncentracija ukupnog hroma veziva 90% cement + 10% biopepeo (Model 10%)

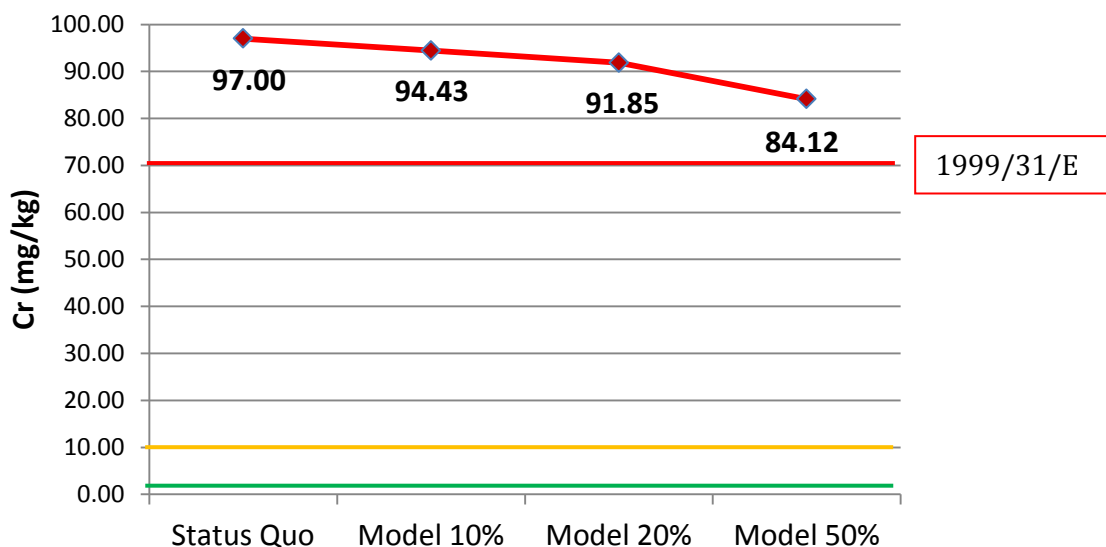


Slika 183 - Koncentracija ukupnog hroma veziva 80% cement + 20% biopepeo (Model 20%)



Slika 184 - Koncentracija ukupnog hroma veziva 50% cement + 50% biopepeo (Model 50%)

Rekapitulacija rezultata prikazanih na prethodnim modelima, predstavljena je grafički na Slika 185 – smanjenje koncentracije ukupnog hroma u vezivu (cement i biopepeo), pri nivoima supstitucije cementa biopepelom 10%, 20% i 50%.



Slika 185 - Smanjenje koncentracije ukupnog hroma u vezivnoj komponenti supstitucijom cementa biopepelom i dozvoljene koncentracije prema Direktivi 1999/31/E

1.4.2. Arsen

Arsen (As) – je metaloid sa kompleksnim hemijskim osobinama koji može da formira brojna neorganska i organska jedinjenja. Arsen je zastupljen je u zemljinoj kori u količini od 2.5 ppm, uglavnom se javlja kao elementarni, ali najčešće u obliku jedinjenja sa oksidacionim stanjima -3, +3 i +5. Oksidi arsena (III) su veoma otrovne i izazivaju rak, smrtonosna doza iznosi 50 miligrama. Oksidi arsena (V) su neotrovne, sastojci su pesticida, ali imaju jako baktericidno dejstvo. Ipak, unošenjem velikih količina one se nagomilavaju u organizmu i redukuju se do toksičnih oksidi arsena (III).

Arsen je veoma isparljiv element, i moguća je njegova kondenzacija na prašini iz procesa proizvodnje cementa. Ispitivanjima se došlo do zaključka da arsen ipak ostaje većim dijelom zarobljen u klinkeru, kao posledica parametara oksidacije, visokih temperatura i prisustva veće količine CaO [102]. Istaživanja su pokazala da je jedan od glavnih izvora arsena leteći pepeo, nastao sagorjevanjem uglja.

Ukupan sadržaj arsena se, prema Evropskoj direktivi za otpad na deponijama - 1999/31/EC [97], ograničava na:

- 0,5 mg/kg - za inertne materijale,
- 2 mg/kg – za nehazardne materijale,
- 25 mg/kg – za hazardne materijale.

Prema Pravilniku o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje i metodama njihovog ispitivanja [98], količina istog se ograničava na 25mg/kg zemlje i 0,05 mg/litri vode.

Glavni izvor arsena u portland cementu su polazne sirovine: krečnjak i glina, leteći pepeo (nastao sagorjevanjem uglja), i manjim dijelom, goriva [99]. Prosječne koncentracije arsena u polaznim sirovinama i gorivu su date u Tabela 62.

Tabela 62. Sadržaj arsena u polaznim sirovinama i gorivu [100]

	Krečnjak	Glina	Prašina cementnih peći	Petroleum koks
As (mg/kg)	<6	6,4	<6	<6

Prosječna koncentracija arsena u portland cementu je, prema literaturnim podacima, 8mg/kg [99].

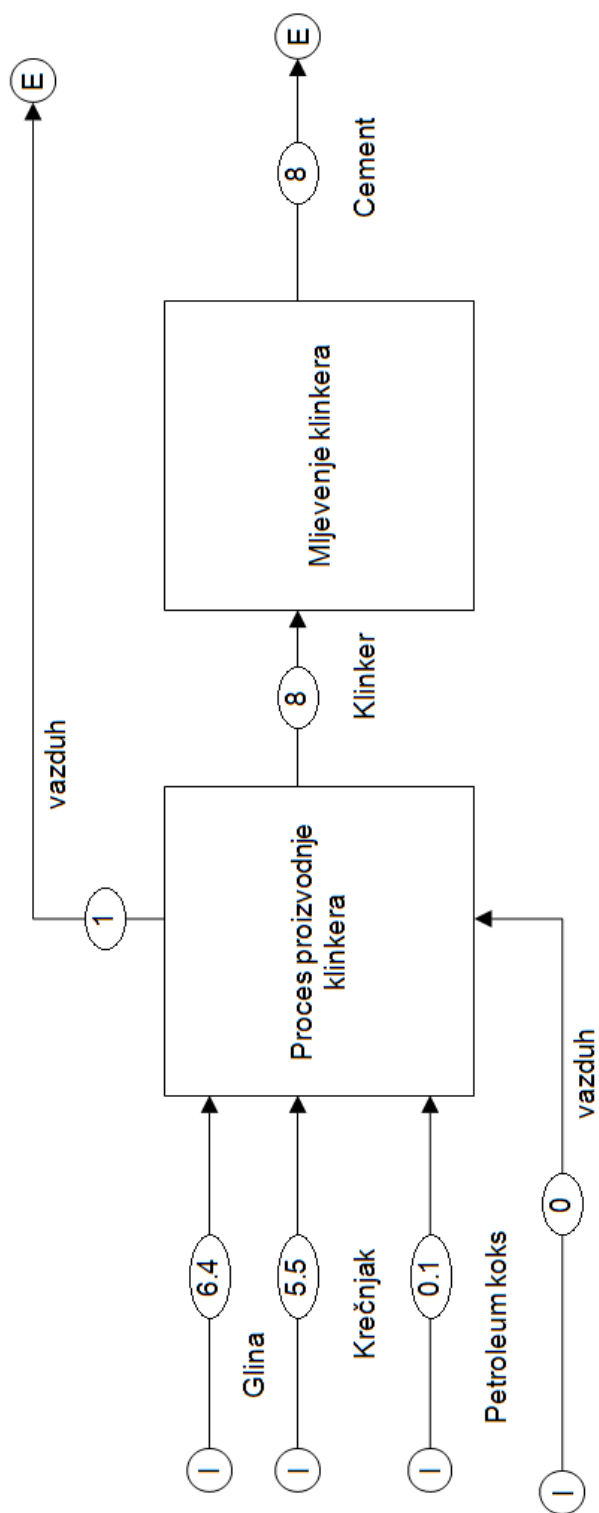
Ispitivanje sadržaja arsena u biopepelu (pepeo pšenične slame, Mitrosrem) urađeno je u Institutu IMS u Beogradu i rezultati su dati u Tabela 63.

Tabela 63. Sadržaj arsena u cementu i biopepelu

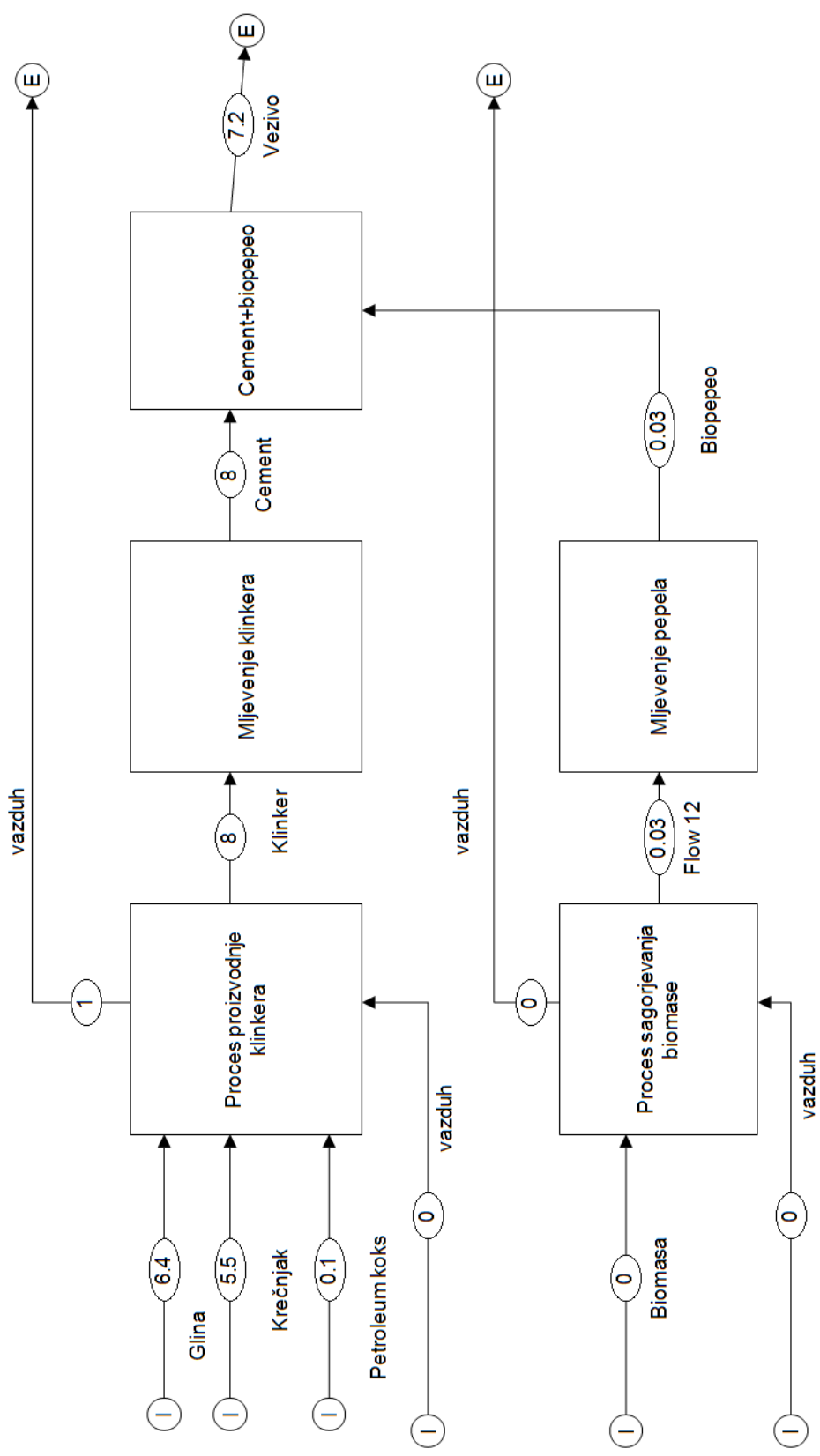
	Cr (mg/kg)	1999/31/EC	Službeni glasnik RS 23/1994
CEM I	8	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN
Biopepeo	0,03	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN

U softveru Stan, razvijena su 4 modela, odnosno scenarija:

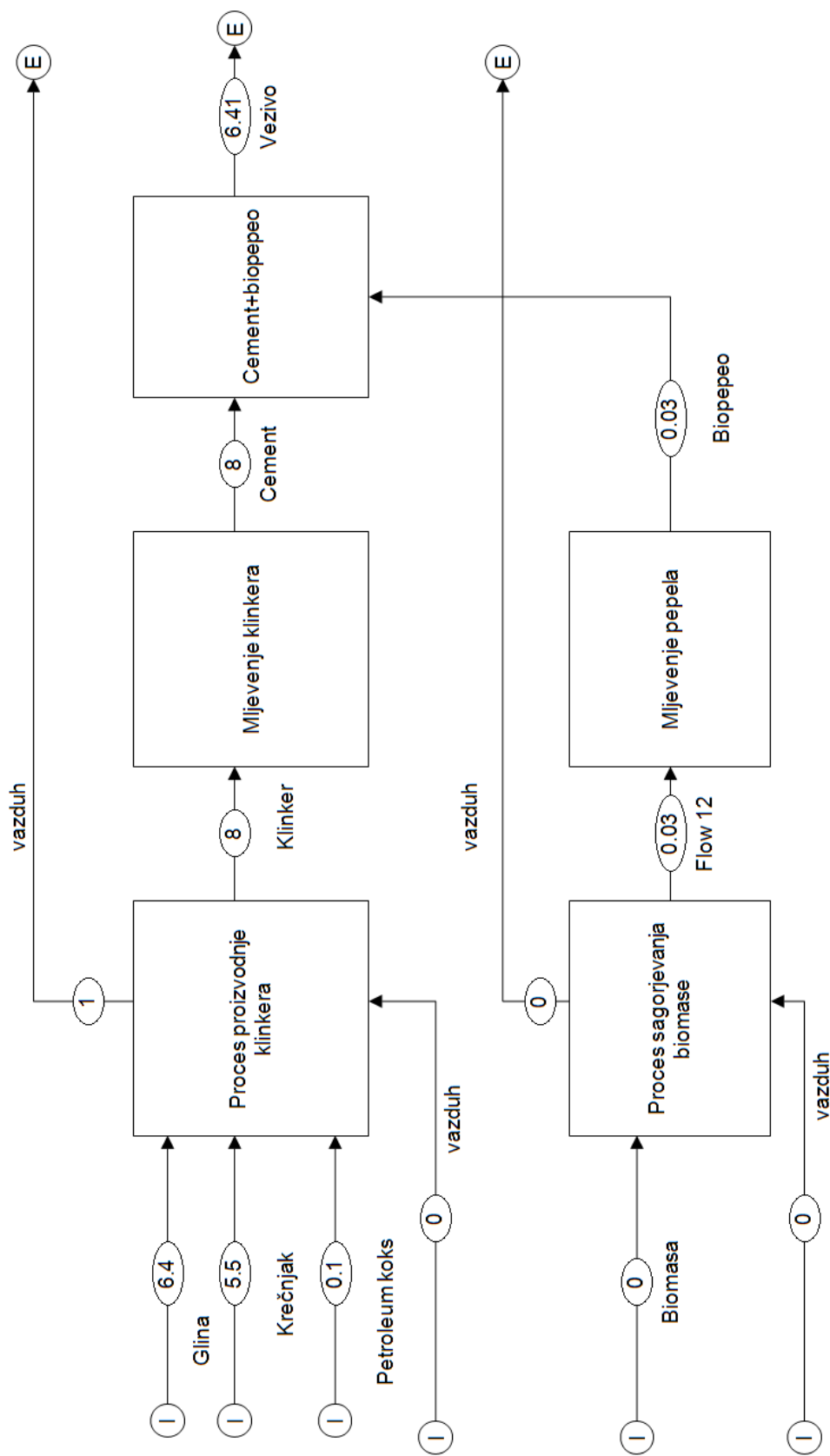
- Status Quo – referentni model, u kojem se sagledava koncentracija arsena referentnog veziva (100% cement) - Slika 181,
- Model 10% - model u kojem se sagledava koncentracija arsena veziva 90% cement + 10% biopepeo - Slika 182,
- Model 20% - model u kojem se sagledava koncentracija arsena veziva 80% cement + 20% biopepeo - Slika 183,
- Model 50% - model u kojem se sagledava koncentracija arsena veziva 50% cement + 50% biopepeo - Slika 184.



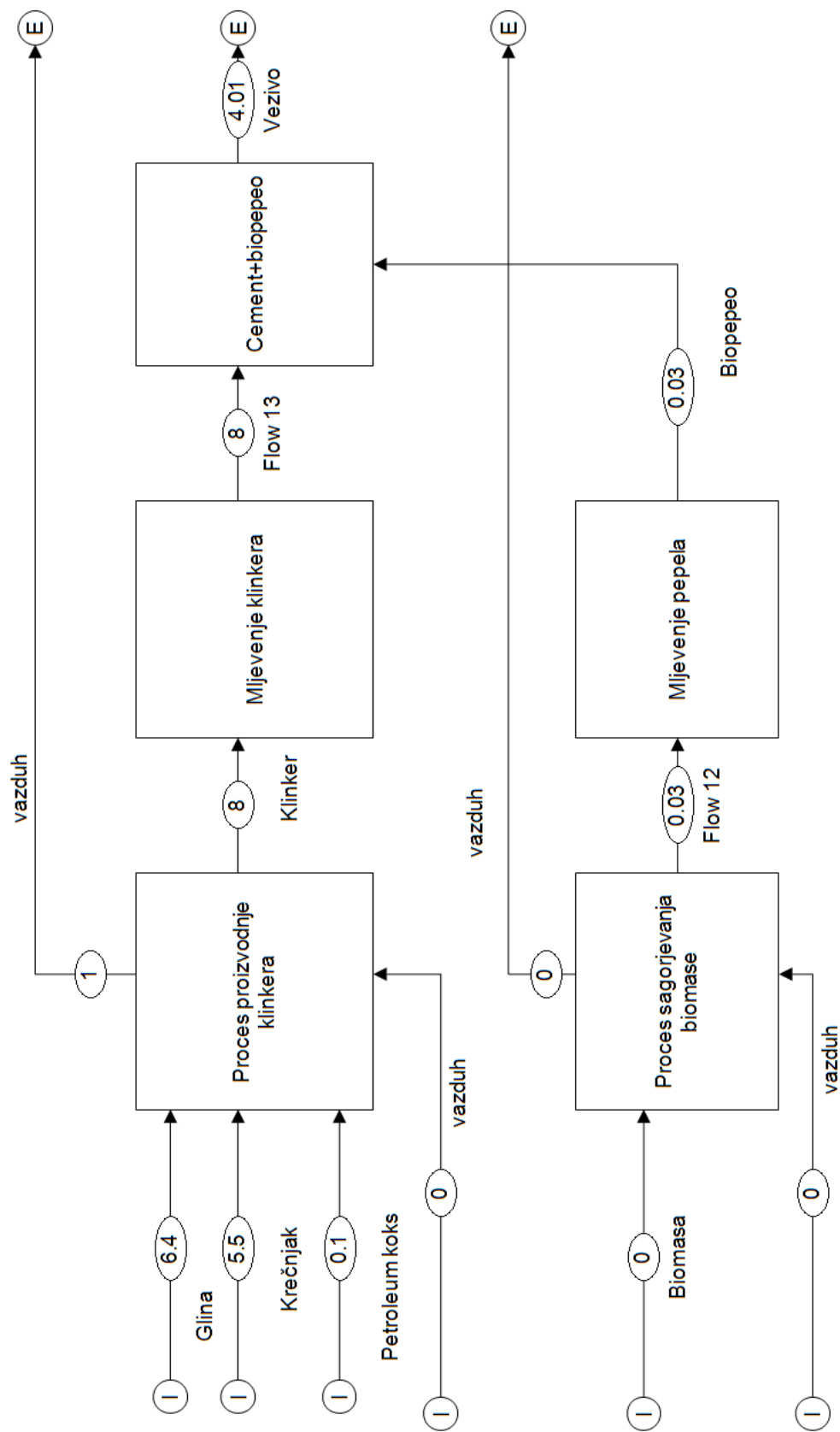
Slika 186 - Koncentracija arsena u vezivu: 100% cement (Model Status Quo)



Slika 187 - Koncentracija arsena u vezivu: 90% cement + 10% biopepel (Model 10%)

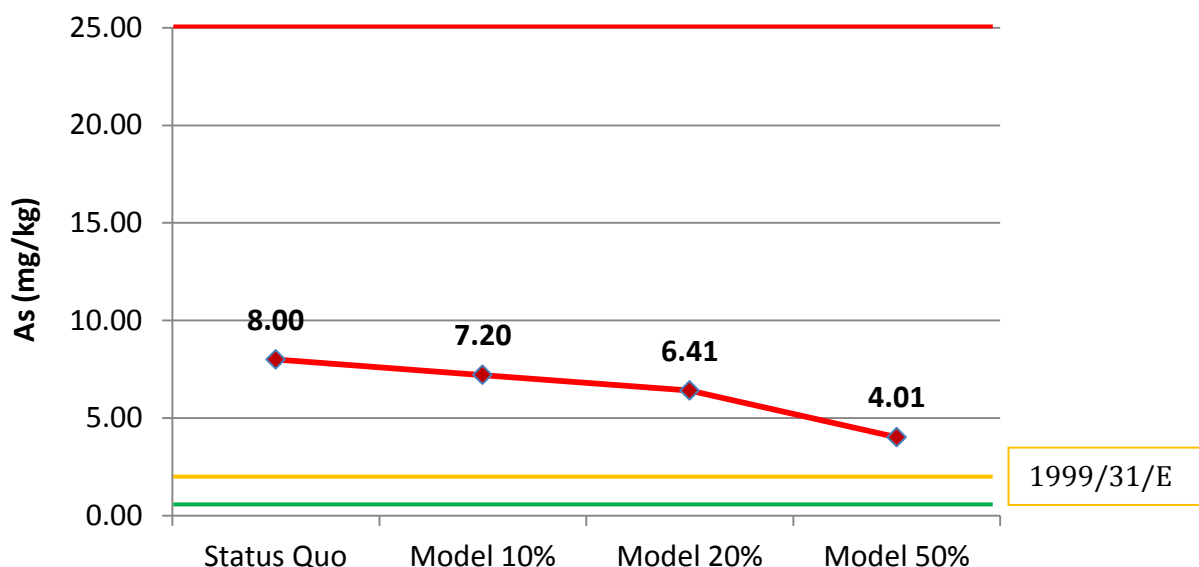


Slika 188 - Koncentracija arsena u vezivu: 80% cement + 20% biopepeo (Model 20%)



Slika 189 - Koncentracija arsena u vezivu: 50% cement + 50% biopepeo (Model 50%)

Rekapitulacija rezultata prikazanih na prethodnim modelima, predstavljena je grafički na Slika 190 – smanjenje koncentracije arsena u vezivu (cement i biopepeo), pri nivoima supstitucije cementa biopepelom 10%, 20% i 50%.



Slika 190 - Smanjenje koncentracije arsena u vezivnoj komponenti supstitucijom cementa biopepelom i dozvoljene koncentracije prema Direktivi 1999/31/E

1.4.3. Olovo

Olovo spada u grupu metala IVa grupe. Olovo je halkofilni element i ima veliki broj sulfidnih minerala (oko 80), od kojih je najznačajniji galenit-PbS. U prirodnim uslovima galenit lako oksidiše pri čemu se obrazuje sekundarni mineral olova anglezit $PbSO_4$, koji zatim prelazi u cerusit.

Olovo je veoma rasprostranjen jon u prirodnim vodama, zato što se javlja kao dvovalentni jon i to sadržajima koji su uobičajeni za vode (mg/l). Može se naći i u vodi sa vrlo visokim vrednostima pH (do 10,5). Maksimalne količine olova sreću se u kiselim podzemnim vodama sa $pH < 5,5$. U površinskim i podzemnim vodama kreće se u opsegu od tragova do 0,04 mg/l, uz srednju vrednost od 0,01 mg/l.

Toksikološki efekti olova se mjere na osnovu koncentracije u krvi. Olovo je toksično i za centralni i za periferni nervni sistem, izazivajući subencefalopatske, neurološke i efekte u ponašanju. Ima elektrofizioloških dokaza o efektima na nervni sistem djece i manjeg koeficijenta inteligencije kod djece za oko 4 poena. Rezultati preglednih (dugotrajnih) epidemioloških studija sugerišu, da prenatalna izlaganja olovu mogu imati rane efekte na mentalni razvoj do 4 godine. Olovo je kumulativni otrov za ljude, akutno trovanje je ekstremno rijetko, tipični simptomi povećanog trovanja olovom su zatvor, anemija, gastrointestinalne smetnje, osjetljivost i postepena paraliza mišića, posebno ruku, sa

moćim slućajevima letargije i mrzovoljnosti. Glavni efekat kod ljudi je smanjenje sinteze hemoglobina i porfirina [103].

Ukupan sadržaj olova se, prema Evropskoj direktivi za otpad na deponijama - 1999/31/EC [97], ogranićava na:

- 0,5 mg/kg - za inertne materijale,
- 10 mg/kg – za nehazardne materijale,
- 50 mg/kg – za hazardne materijale.

Prema Pravilniku o dozvoljenim kolićinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje i metodama njihovog ispitivanja [98], kolićina istog se ogranićava na 100mg/kg zemlje i 0,1 mg/litri vode.

Glavni izvor olova u portland cementu su polazne sirovine: krećnjak i glina, sekundarne sirovine i gorivo (prevashodno ugalj) [99]. Prosjećne koncentracije olova u polaznim sirovinama i gorivu su date u Tabela 64.

Tabela 64. Sadržaj olova u polaznim sirovinama i gorivu [100]

	Krećnjak	Glina	Prašina cementnih peći	Petroleum koks
As (mg/kg)	4,4	13	31	2,9

Prosjećna koncentracija olova u portland cementu je, prema literaturnim podacima, 27mg/kg [99].

Ispitivanje sadržaja olova u biopepelu (pepeo pšenićne slame, Mitrosrem) uraćeno je u Institutu IMS u Beogradu i rezultati su dati u Tabela 65.

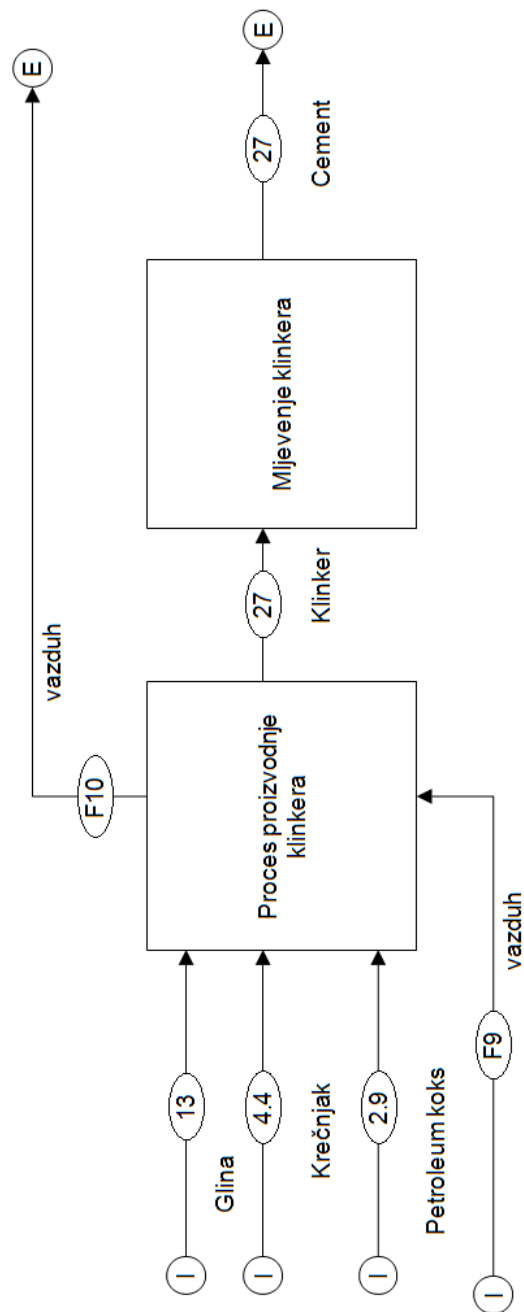
Tabela 65. Sadržaj olova u cementu i biopepelu

	Pb (mg/kg)	1999/31/EC	Službeni glasnik RS 23/1994
CEM I	27	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN
Biopepeo	0,01	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN

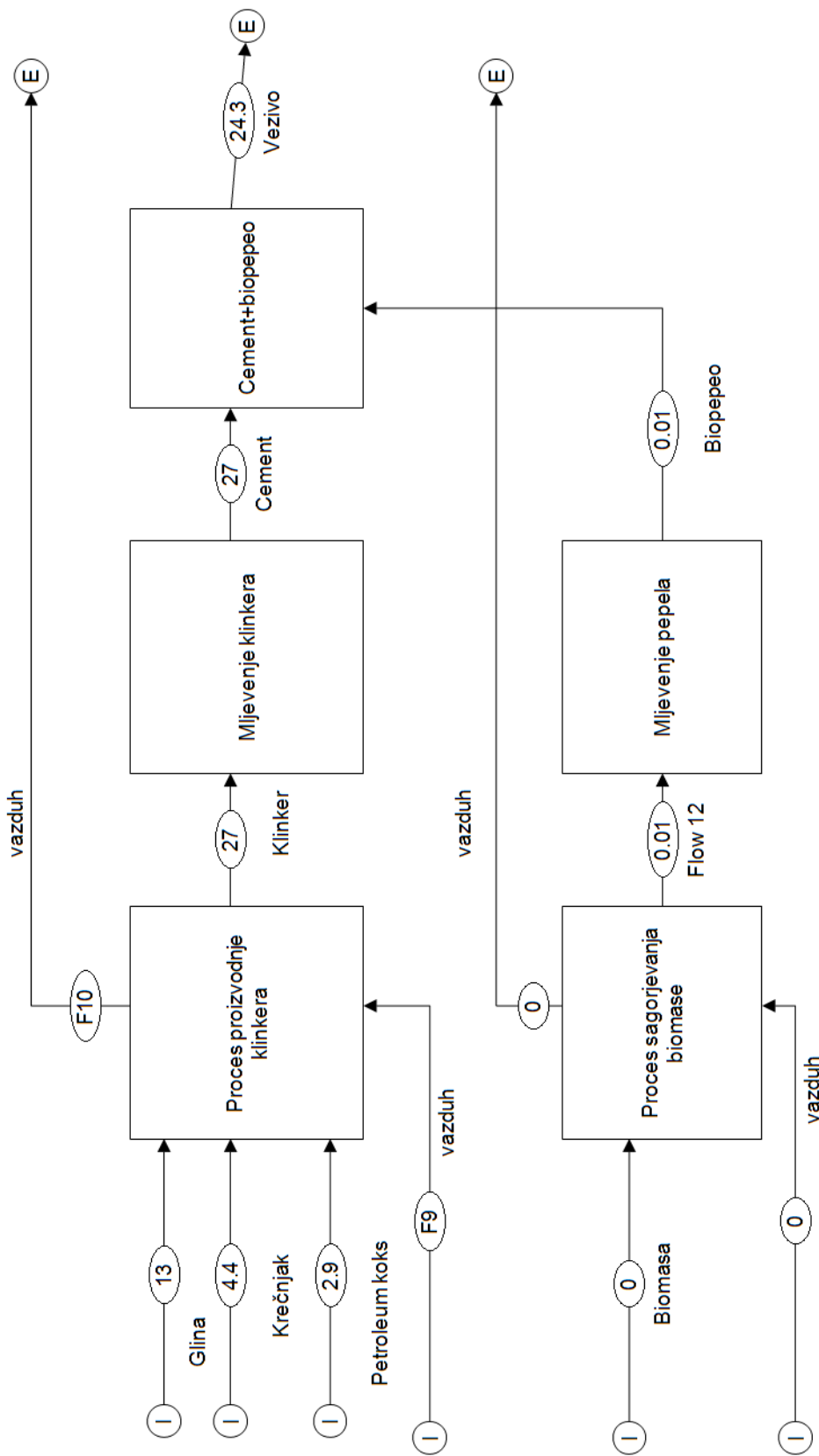
U softveru Stan, razvijena su 4 modela, odnosno scenarija:

- Status Quo – referentni model, u kojem se sagledava koncentracija olova referentnog veziva (100% cement) - Slika 191,
- Model 10% - model u kojem se sagledava koncentracija olova veziva 90% cement + 10% biopepeo - Slika 192,

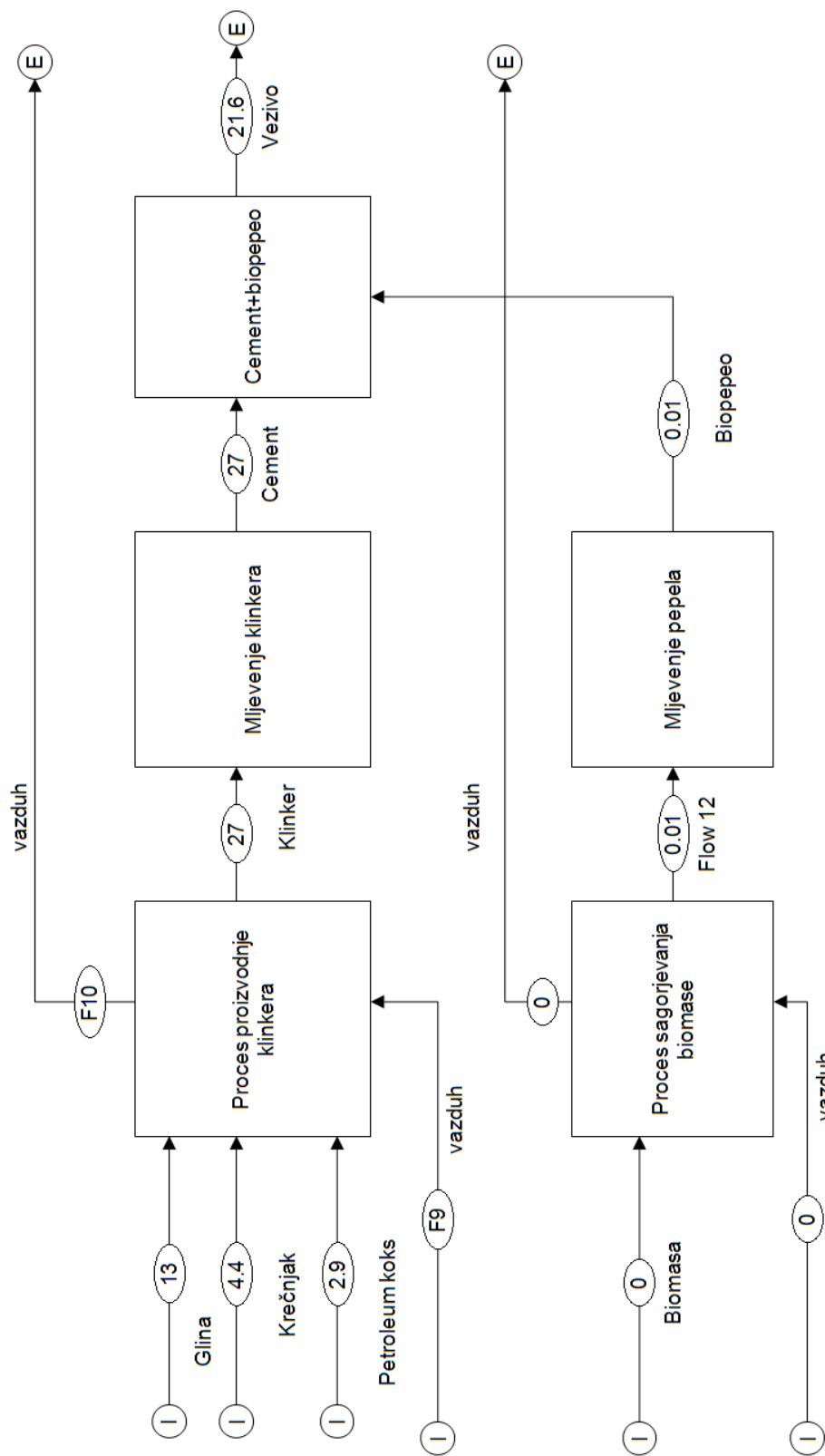
- Model 20% - model u kojem se sagledava koncentracija olova veziva 80% cement + 20% biopepeo - Slika 193,
- Model 50% - model u kojem se sagledava koncentracija olova veziva 50% cement + 50% biopepeo - Slika 194.



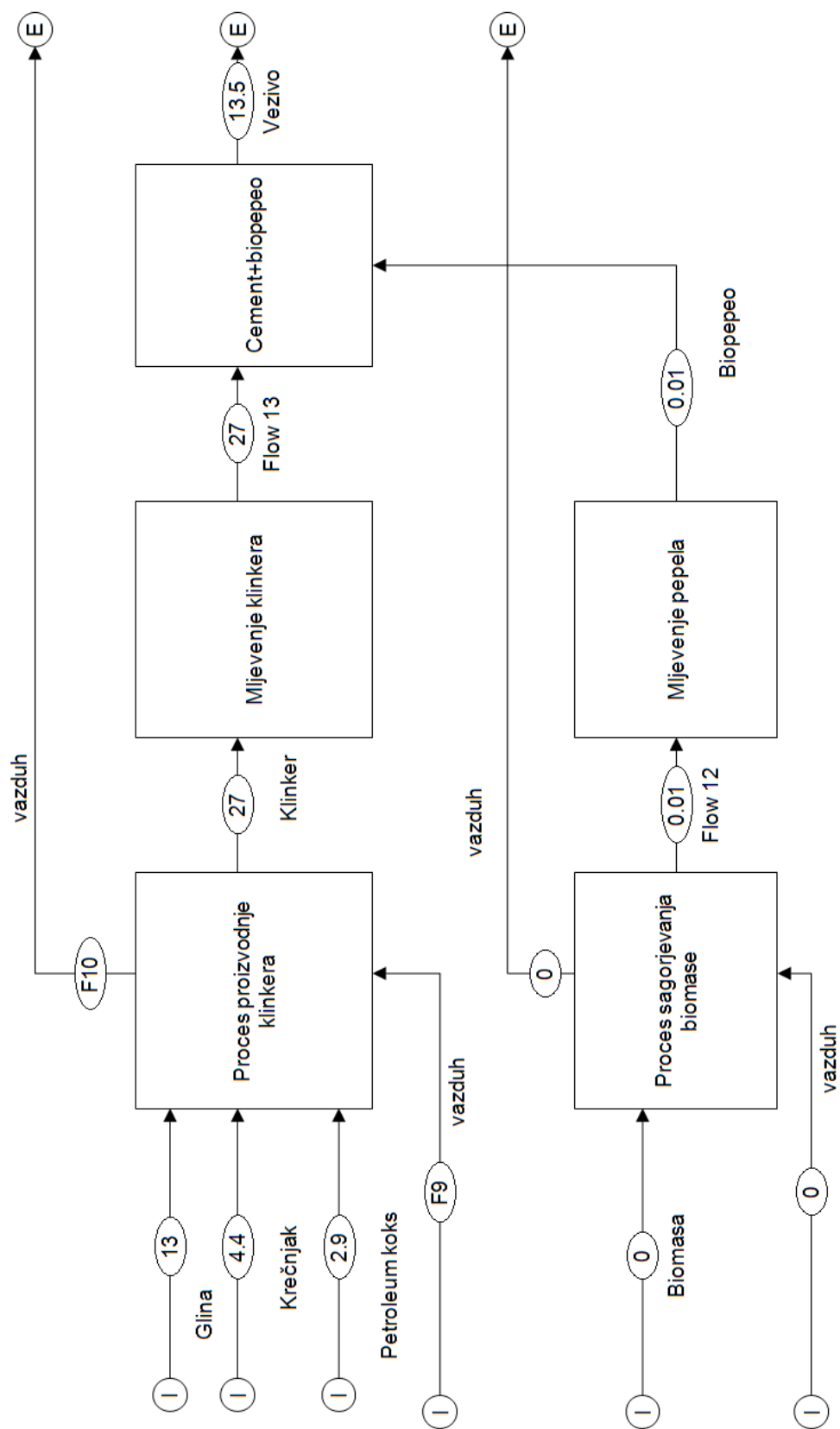
Slika 191 - Koncentracija olova u vezivu: 100% cement (Model Status Quo)



Slika 192 - Koncentracija olova u vezivuu: 90% cement + 10% biopepeo (Model 10%)

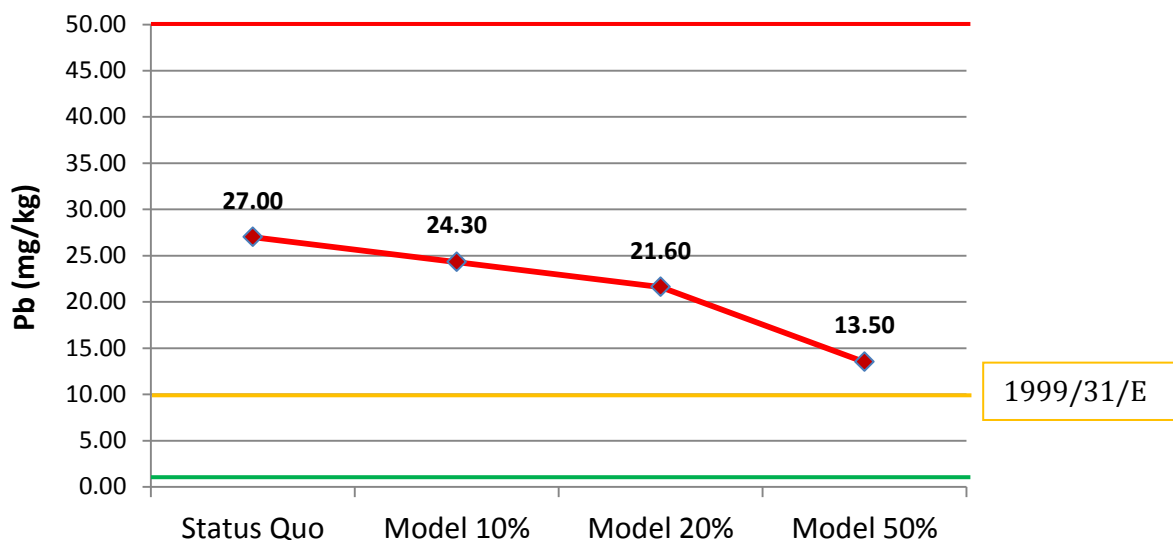


Slika 193 - Koncentracija olova u vezivu: 80% cement + 20% biopepeo (Model 20%)



Slika 194 - Koncentracija olova u veziivo: 50% cement + 50% biopepeo (Model 50%)

Rekapitulacija rezultata prikazanih na prethodnim modelima, predstavljena je grafički na Slika 195 – smanjenje koncentracije arsena u vezivu (cement i biopepeo), pri nivoima supstitucije cementa biopepelom 10%, 20% i 50%.



Slika 195 - Smanjenje koncentracije olova u vezivnoj komponenti supstitucijom cementa biopepelom i dozvoljene koncentracije prema Direktivi 1999/31/E

1.4.4. Kadmijum

Kadmijum se nalazi u okviru IIb grupe periodnog sistema i pripada grupi prelaznih metala srebrnasto-bele boje. U prirodi se javlja u rudama cinka, bakra i olova. U elementarnom obliku kadmijum nije rastvoran u vodi, dok su hloridi, nitrati i sulfati rastvorni. Na visokoj pH vrednosti će se istaložiti, jer su karbonat i hidroksid nerastvorni.

Apsorpcija kadmijuma zavisi od rastvorljivosti njegovih jedinjenja. Kod ljudi se javlja muka i povraćanje pri većim koncentracijama kadmijuma. Kadmijum se primarno akumulira u bubrezima i ima dugo biološko vreme poluraspada od 10-35 godina (bubrežna disfunkcija, hipertenzija i anemija) [104].

Ukupan sadržaj kadmijuma se, prema Evropskoj direktivi za otpad na deponijama - 1999/31/EC [97], ograničava na:

- 0,04 mg/kg - za inertne materijale,
- 1 mg/kg – za neopasne materijale,
- 5 mg/kg – za opasne materijale.

Prema Pravilniku o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje i metodama njihovog ispitivanja [98], količina istog se ograničava na 3mg/kg zemlje i 0,01 mg/litri vode.

Primarne sirovine za proizvodnju klinkera: krečnjak i glina učestvuju sa manje od 50% kao izvori koncentracije kadmijuma u cementu [99]. Kao važni izvori kadmijuma, u povećanju koncentracije kadmijuma u cementu učestvuju gorivo (ugalj), te sirovine iz proizvodnje čelika, kao i sekundarna goriva, kao što su: gume, otpadno ulje, gradski i industrijski otpad. Prosječne koncentracije kadmijuma u polaznim sirovinama i gorivu su date u Tabela 66.

Tabela 66. Sadržaj kadmijuma u polaznim sirovinama i gorivu [100]

	Krečnjak	Glina	Prašina cementnih peći	Petroleum koks
As (mg/kg)	<0,5	<0,5	0,86	0,5

Prosječna koncentracija kadmijuma u portland cementu je, prema literaturnim podacima, 0,6mg/kg [99].

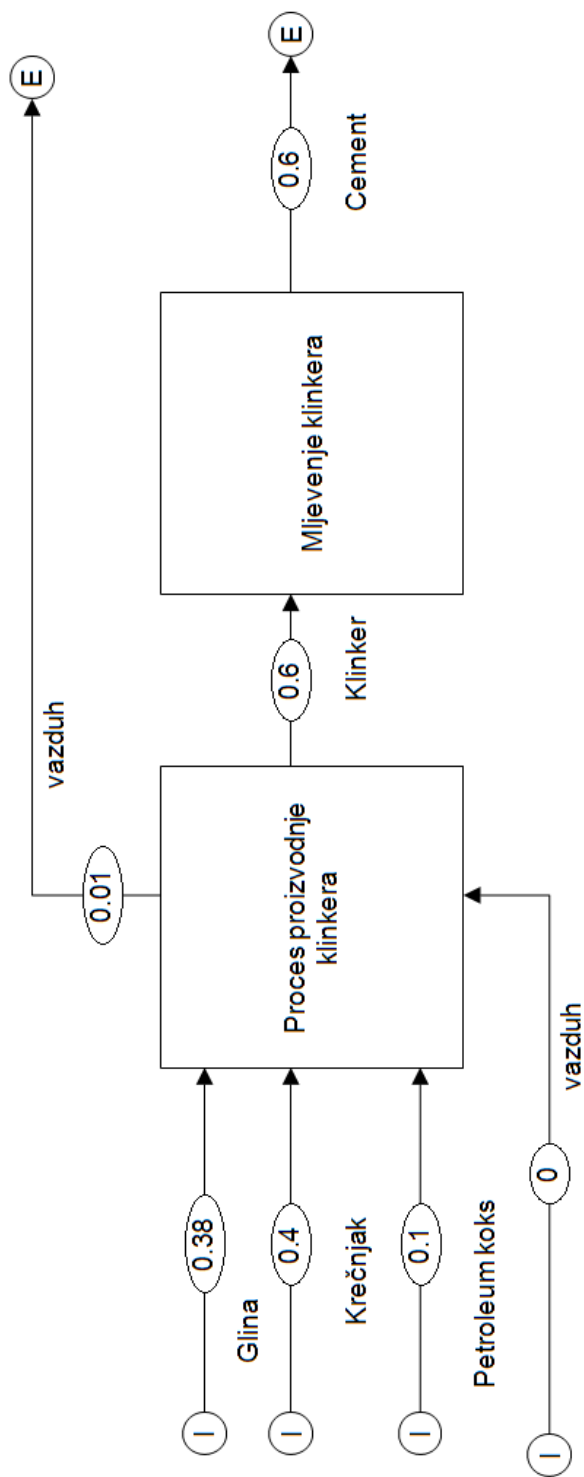
Ispitivanje sadržaja kadmijuma u biopepelu (pepeo pšenične slame, Mitrosrem) urađeno je u Institutu IMS u Beogradu i rezultati su dati u Tabela 67.

Tabela 67. Sadržaj kadmijuma u cementu i biopepelu

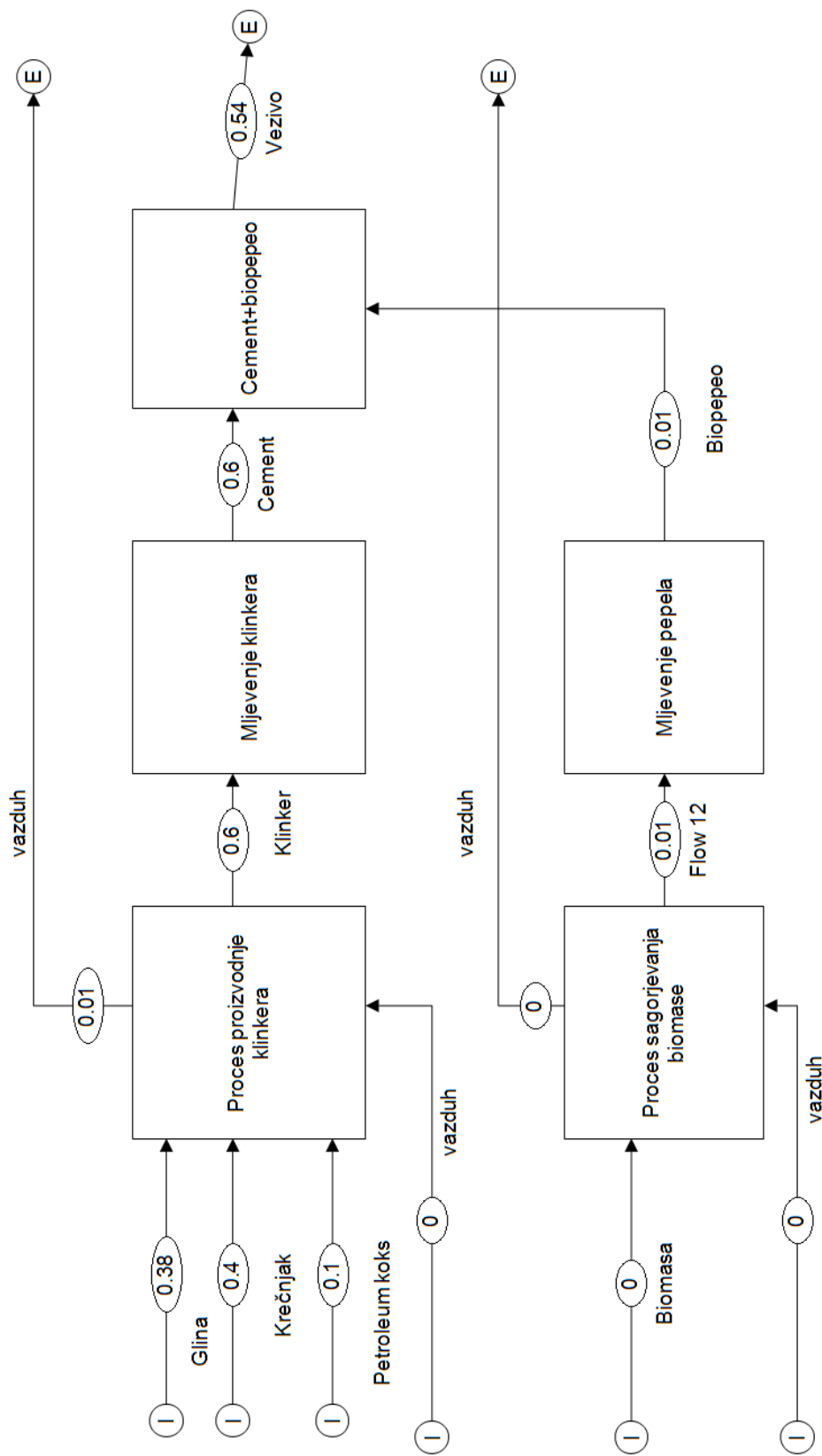
	Pb (mg/kg)	1999/31/EC	Službeni glasnik RS 23/1994
CEM I	0,6	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN
Biopepeo	0,01	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN

U softveru Stan, razvijena su 4 modela, odnosno scenarija:

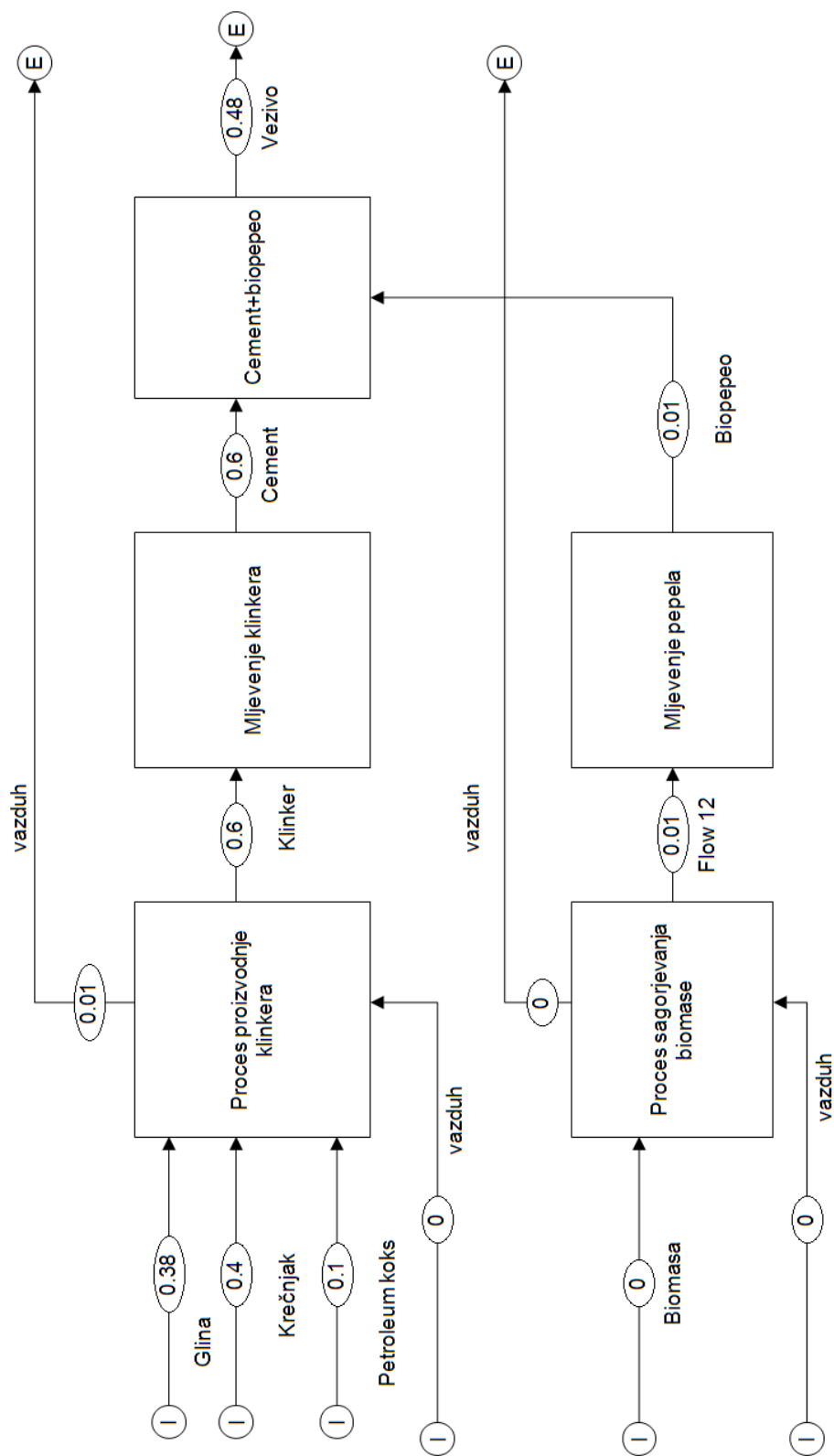
- Status Quo – referentni model, u kojem se sagledava koncentracija kadmijuma referentnog veziva (100% cement) - Slika 196,
- Model 10% - model u kojem se sagledava koncentracija kadmijuma veziva 90% cement + 10% biopepeo - Slika 197,
- Model 20% - model u kojem se sagledava koncentracija kadmijuma veziva 80% cement + 20% biopepeo - Slika 198,
- Model 50% - model u kojem se sagledava koncentracija kadmijuma veziva 50% cement + 50% biopepeo - Slika 199.



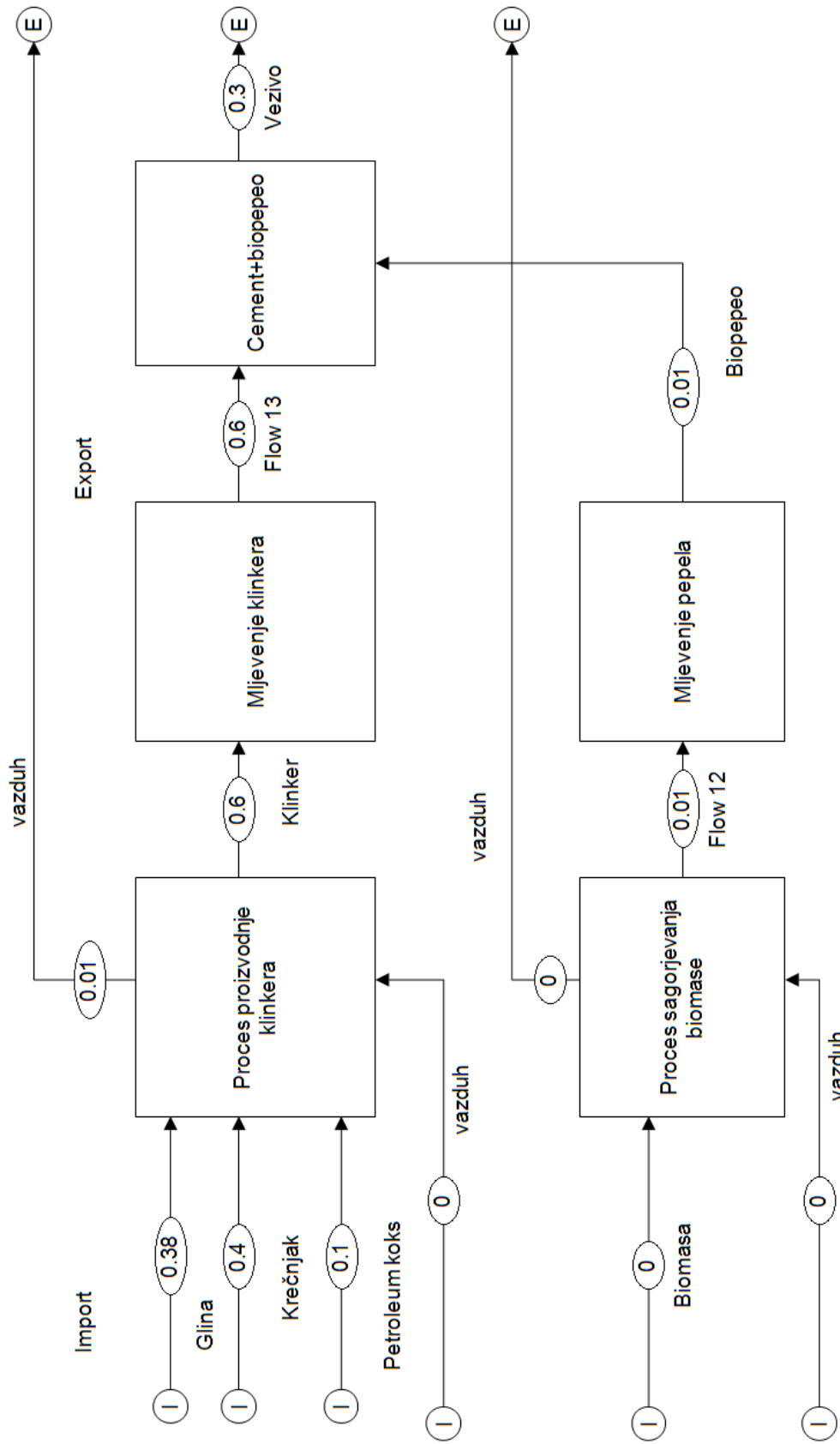
Slika 196 - Koncentracija kadmijuma u vezivu: 100% cement (Model Status Quo)



Slika 197 - Koncentracija kadmijuma u vezivu: 90% cement + 10% biopepeo (Model 10%)

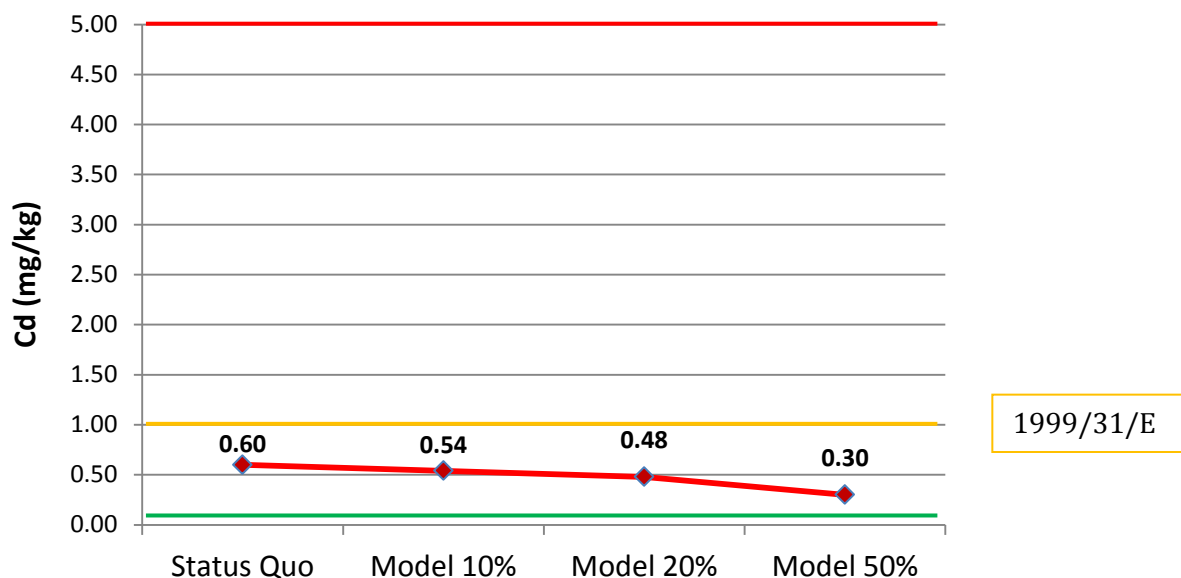


Slika 198 - Koncentracija kadmijuma u vezivu: 80% cement + 20% biopepeo (Model 20%)



Slika 199 - Koncentracija kadmijuma u vezivu: 50% cement + 50% biopepeo (Model 50%)

Rekapitulacija rezultata prikazanih na prethodnim modelima, predstavljena je grafički na Slika 200 – smanjenje koncentracije kadmijuma u vezivu (cement i biopepeo), pri nivoima supstitucije cementa biopepelom 10%, 20% i 50%.



Slika 200 - Smanjenje koncentracije kadmijuma u vezivnoj komponenti supstitucijom cementa biopepelom i dozvoljene koncentracije prema Direktivi 1999/31/E

1.5. Izluživanje teških metala iz očvrsljih kompozita: maltera i betona

Ispitivanje izluživanja teških metala iz očvrsljih cementnih kompozita je urađeno u Institutu za zaštitu na radu u Novom Sadu, u skladu sa relevantnim standardima: BS EN 14346:2006 (metoda A) [105], EPA 7010:2007 [106], EPA 7000B:2007 [107], SRPS EN 12457-2:2008 [108]. Ispitivanjem su obuhvaćeni sledeći teški metali:

- olovo,
- kadmijum,
- željezo,
- bakar,
- nikl,
- hrom,
- mangan,
- arsen.

Test izluživanja izabranih teških metala je sproveden na malterima i betonima:

- malteri:
 - malter u kojem je 50% cementa supstituisano sa pepelom pšenične slame (MP50), pri starosti od 28, 60 i 90 dana,

- malter u kojem je 50% cementa supstituisano sa pepelom mješavine pšenične i sojine slame (SP50), pri starosti od 28, 60 i 90 dana.
- betoni:
 - referentni cementni beton (A0), pri starosti od 28 i 90 dana,
 - beton u kojem je 50% cementa supstituisano sa pepelom pšenične slame (D0), pri starosti od 28 i 90 dana.

Rezultati ispitivanja sadržaja teških metala su prikazani u Tabela 68, a betona u Tabela 69.

Tabela 68. Sadržaj teških metala u malterima

		Pb	Cd	Fe	Cu	Ni	Cr	Mn	As
MP50	MP50-28	0,91	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	<0,04	<0,5	0,05
	MP50-60	<0,5	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	0,4	<0,5	<0,04
	MP50-90	0,76	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	0,32	<0,5	<0,04
SP50	SP50-28	1,09	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	<0,04	<0,5	0,1
	SP50-60	<0,5	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	0,24	<0,5	<0,04
	SP50-90	1,2	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	0,24	<0,5	<0,04

Tabela 69. Sadržaj teških metala u betonima

		Pb	Cd	Fe	Cu	Ni	Cr	Mn	As
A0	A0-28	0,74	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	<0,04	<0,5	<0,04
	A0-90	2,13	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	<0,04	<0,5	0,27
D0	D0-28	<0,5	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	<0,04	<0,5	<0,04
	D0-90	<0,5	<0,1	<0,5	<0,3	<0,5	0,3	<0,5	0,06

Dobijene vrijednosti za koncentracije teških metala su upoređene sa graničnim koncentracijama datim u Pravilniku o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje i metodama njihovog ispitivanja [98]. Granične koncentracije su prikazane u Tabela 70.

Tabela 70. Granične koncentracije teških metala [98]

	Pb	Cd	Cu	Ni	Cr	As
Inertni materijali	0,5	0,04	2	0,4	0,5	0,5
Ne-hazardni materijali	10	1	50	10	10	2
Hazardni materijali na deponiji sa ne-hazardnim otpadom	10	1	50	10	10	2
Hazardni materijali na deponiji sa hazardnim otpadom	50	5	100	40	70	25

Analizom dobijenih rezultata, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Koncentracije: kadmijuma, željeza, bakra, nikla i mangana, se i u malterima i betonima, nalaze ispod vrijednosti koje je moguće izmjeriti, tako da, prema datom Pravilniku, zadovoljavaju kriterijum za inertne materijale,
- Koncentracija olova u malterima se ne mijenja značajno sa vremenom, te su vrijednosti ujednačene pri starostima 28 i 90 dana. Vrijednosti su veće od gornje granice za inertne materijale, a zadovoljen je kriterijum za neopasne materijale. U referentnom cementnom betonu, rezultati izluživanja pokazuju veći sadržaj olova od granice za inertne materijale i koncentracija se povećava sa vremenom. Supstitucija 50% cementa sa biopepelom je imala pozitivan uticaj na koncentraciju olova, pa beton D0 zadovoljava kriterijum za inertne materijale sa minimalnom koncentracijom olova.
- Koncentracija hroma je, i u malterima i betonima, na niskom nivou i svi materijali zadovoljavaju kriterijum za inertne materijale. Supstitucija cementa biopepelom ne utiče značajno na koncentraciju hroma.
- Koncentracija arsena je, i u malterima i betonima, na niskom nivou i svi materijali zadovoljavaju kriterijum za inertne materijale. Supstitucija cementa biopepelom ne utiče značajno na koncentraciju arsena. Kod maltera, sa vremenom, dolazi do smanjenja koncentracije arsena, a kod betona do povećanja, pri čemu je ovo povećanje izraženije kod referentnog cementnog betona u odnosu na beton sa biopepelom.

1.6. Rekapitulacija dobijenih rezultata

Analizom svih prikupljenih i obrađenih podataka, sa aspekta ekološkog uticaja supstitucije dijela cementa pepelom nastalim sagorjevanjem žetvenih ostataka, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- I. **Aspekt očuvanja prirodnih resursa:** Supstitucija cementa biopepelom vodi ga očuvanju prirodnih sirovina koje se koriste za proizvodnju cementnog klinkera: krečnjaka i gline, kao i neobnovljivih izvora energije, prvenstveno fosilnih goriva (ugalj, derivati nafte, petroleum koks). Na osnovu prosječne godišnje proizvodnosti fabrike cementa La Farge u Beočinu, utvrđeno je da nivo supstitucije cementa biopepelom od 50% ima za rezultat smanjenu potrošnju resursa u količinama: 562.000 tona krečnjaka, 187.500 tona gline i 50.000 tona petroleum koks.

- II. **Aspekt upravljanja otpadom:** Mala količina biopepela, generisanog sagorjevanjem žetvenih ostataka na području AP Vojvodine se odlaže na neuređene deponije u krugu firmi, a najveća količina pepela se odlaže u kontejnere i odvozi na gradske deponije, gdje predstavlja otpad. Analizom prikupljenih podataka, dobijenih ispitivanjem rada kompanija koje proizvode biopepeo, procjenjena je količina od 5.000 tona otpadnog materijala na godišnjem nivou. Održivo korišćenje ove vrste otpada i ponovno vraćanje istog u proizvodni ciklus smanjuje količinu otpada na deponijama, ali i buduće takse koje Republika Srbija očekuje, kao kandidat za članstvo u Evropskoj Uniji.
- III. **Aspekt redukcija emisije CO₂:** Prema literaturnim podacima, cementna industrija je odgovorna za cca 8% globalne emisije CO₂. Prosječna emisija pri proizvodnji 1 tone klinkera je 950kg, zavisno od vrste peći i primjenjenog goriva za sagorjevanje. Veći procenat emisije potiče iz procesa kalcinacije krečnjaka (cca 60%), a ostatak od sagorjevanja goriva, uglavnom uglja i naftnih derivata (cca 40%). Supstitucija cementa biopepelom, kao CO₂ neutralnim gorivom, značajno bi smanjila emisiju gasova staklene bašte koji potiču iz procesa proizvodnje cementa. Na osnovu prosječne godišnje proizvodnosti fabrike cementa La Farge u Beočinu, utvrđeno je da nivo supstitucije cementa biopepelom od 50% ima za rezultat smanjenu emisiju CO₂ u količini od 475.000 tona.
- IV. **Aspekt koncentracije teških metala u vezivnoj komponenti:**
1. Hrom (Cr): Obični portland cementi se odlikuju velikim sadržajem hroma, koji potiče, uglavnom, od polaznih sirovina za proizvodnju klinkera. Prema literaturnim podacima, koncentracija As se u cementima kreće u širokim granicama od 2-117 mg/kg. Heksavalentni hrom je ljudski karcinogen, koji se unosi u tijelo udisanjem, što nameće potrebu za ograničavanjem koncentracije ovog metala u cementu. Na osnovu metode toka supstanci, utvrđeno je da se, sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, smanjuje i koncentracija ukupnog hroma u vezivnoj komponenti, čime se vrijednost iste približava graničnoj vrijednosti za nehazardne materijale (70 mg/kg).

2. Arsen (As): Obični portland cementi se odlikuju umjerenim sadržajem arsena, koji potiče, uglavnom, od polaznih sirovina za proizvodnju klinkera. Prema literaturnim podacima, koncentracija Cr se u cementima kreće u širokim granicama od 25-712 mg/kg. Oksidi arsena (III) su veoma otrovni i izazivaju rak, te se njegova koncentracija kontroliše. Biopepeo nastao sagorjevanjem biomase se odlikuje neznatnim sadržajem arsena, od 0,03mg/kg, te se njegova primjena kao zamjena dijela cementa povoljno odražava na smanjenje koncentracije arsena. Na osnovu rezultata analize toka supstanci, utvrđeno je da koncentracija arsena referentnog cementa zadovoljava kriterijum za hazardne materijale, a koncentracija kod veziva u kojem je 50% cementa supstituisano biopepelom se približava granici koja je definisana za nehazardne materijale.
3. Olovo (Pb): Obični portland cementi se odlikuju umjerenim sadržajem arsena, koji potiče, uglavnom, od polaznih sirovina za proizvodnju klinkera i goriva. Prema literaturnim podacima, koncentracija Pb se u cementima kreće u širokim granicama od 5-254 mg/kg. Olovo je toksično i za centralni i za periferni nervni sistem, naročito kod djece. Biopepeo nastao sagorjevanjem biomase se odlikuje neznatnim sadržajem olova, od 0,01mg/kg, te se njegova primjena kao zamjena dijela cementa povoljno odražava na smanjenje njegove koncentracije. Na osnovu rezultata analize toka supstanci, utvrđeno je da koncentracija olova referentnog cementa zadovoljava kriterijum za hazardne materijale, a koncentracija kod veziva u kojem je 50% cementa supstituisano biopepelom se približava granici koja je definisana za nehazardne materijale.
4. Kadmijum (Cd): Obični portland cementi se odlikuju umjerenim sadržajem arsena, koji potiče, uglavnom, od polaznih sirovina za proizvodnju klinkera i goriva. Prema literaturnim podacima, koncentracija Pb se u cementima kreće u granicama od 0,03-6 mg/kg. Kadmijum je element velike toksičnosti (nekoliko puta veće od arsena). Ima kancerogeno dejstvo, oštećuje bubrege, izaziva anemiju i bolesti kostiju. Biopepeo nastao sagorjevanjem biomase se odlikuje

neznatnim sadržajem kadmijuma, od 0,01mg/kg, te se njegova primjena kao zamjena dijela cementa povoljno odražava na smanjenje njegove koncentracije. Na osnovu rezultata analize toka supstanci, utvrđeno je da koncentracija arsena referentnog cementa zadovoljava kriterijum za neškodne materijale, a koncentracija kod veziva u kojem je 50% cementa supstituisano biopepelom se približava granici koja je definisana za inertne materijale.

V. Aspekt izluživanja teških metala iz očvrslih cementnih kompozita:

Koncentracije teških metala (kadmijum, željezo, nikl, mangan, hrom, arsen i bakar) u očvrslim kompozitima: malterima i betonima se nalaze u dozvoljenim granicama za inertne materijale. Supstitucija dijela cementa biopepelom nema značajan uticaj na koncentraciju ovih metala. U referentnom cementnom betonu, rezultati izluživanja pokazuju veći sadržaj olova od granice za inertne materijale i koncentracija se povećava sa vremenom. Supstitucija 50% cementa sa biopepelom ima pozitivan uticaj na koncentraciju olova, pa beton D0 zadovoljava kriterijum za inertne materijale sa minimalnom koncentracijom olova.

VIII ZAKLJUČNA
RAZMATRANJA I
PRAVCI DALJEG
ISTRAŽIVANJA

1. UVOD

U okviru ovog poglavlja prikazani su rezultati analize uzoraka biopepela (karakterizacija); maltera spravljenih sa dvije vrste biopepela i tri vrste sitnozrnog agregata; betona spravljenih sa biopepelom i dvije vrste krupnog agregata i rezultati analize ekološkog uticaja susptitucije cementa biopepelom u cementnim kompozitima. Izvedeni su zaključci o mogućoj primjeni biopepela nastalog sagorjevanjem žetvenih ostataka na području AP Vojvodine i pravci daljeg istraživanja u ovoj oblasti.

Karakterizacija biopepela je urađena u skladu sa odredbama standarda EN 450-1 i obuhvatila je ispitivanje zahtjevanih fizičkih i hemijskih svojstava materijala.

Mogućnost primjene biopepela u malterima provjerena je kroz sledeća ispitana svojstva:

- konzistencija,
- čvrstoća pri pritisku,
- kapilarno upijanje vode.

Mogućnost primjene biopepela u malterima provjerena je kroz sledeća ispitana svojstva:

- čvrstoća pri pritisku,
- skupljanje pri sušenju,
- kapilarno upijanje vode,
- vodonepropustljivost betona (upijanje vode pod pritiskom),
- otpornost betona na habanje,
- dinamički modul elastičnosti,
- čvrstoća na savijanje betona.

Analiza ekološkog doprinosa primjene biopepela, kao mineralnog dodatka i zamjene za dio cementa u očvrslim cementnim kompozitima: malterima i betonima, je urađena sa sledećih aspekata:

- Očuvanje prirodnih resursa,
- Održivo upravljanje otpadom,
- Redukcija emisije CO₂,
- Koncentracija teških metala u vezivnoj komponenti,
- Izluživanje teških metala iz očvrslih cementnih kompozita.

U nastavku teksta prikazani su zaključci po odabranim metodama za provjeru mogućnosti primjene biopepela kao zamjene za dio cementa u cementnim kompozitima.

2. KARAKTERIZACIJA BIOPEPELA KAO MINERALNOG DODATKA

2.1. Pepeo pšenične slame

Pepeo pšenične slame je, po hemijskom sastavu, visoko reaktivan pucolanski materijal. Ukupan sadržaj važnih oksida ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) prelazi 70%, a sadržaj reaktivnog SiO_2 je 67%. Visok sadržaj reaktivnog SiO_2 omogućava materijalu da, u fino usitnjenom obliku, u prisustvu vlage, reaguje sa $\text{Ca}(\text{OH})_2$, i formira C-S-H produkte koji imaju vezivna svojstva.

Analizom hemijskog sastava pepela pšenične slame, zaključuje se da pepeo zadovoljava i kriterijume u pogledu sadržaja: hlorida, sulfata, fosfata, rastvorljivih fosfata i slobodnog CaO . Gubitak žarenjem je manji od 7%, što ovaj materijal klasifikuje u Kategoriju B.

Pepeo se karakteriše visokim sadržajem alkalija, čija ukupna količina prelazi 5% (8,68%), što može predstavljati opasnost sa aspekta mogućnosti nastanka alkalno-silikatne reakcije u očvrslom betonu. Osnovni preduslovi za podsticanje ove reakcije su: alkalije u vezivnoj komponenti, reaktivni SiO_2 u agregatu i prisustvo vlage. Prema preporukama nekih autora, tretiranje biopepela ispiranjem vodom može da rezultuje smanjenjem sadržaja alkalija u materijalu.

Fino usitnjen (samljeven) pepeo, odlikuje se velikom specifičnom površinom, što pozitivno utiče na popunjavanje strukture očvrslih cementnih kompozita (filer efekat). Zahvaljujući visokom sadržaju reaktivnog SiO_2 , pepeo zadovoljava visoku Klasu 10 pucolanske aktivnosti.

Finoća materijala, ispitana Air Jet vazдушnim prosijavanjem, kroz sito otvora 0,045mm, pokazuje klasu S finoće materijala.

Pepeo zadovoljava kriterijume za indeks aktivnosti, pri starosti od 28 i 90 dana. Kao rezultat pucolanske reakcije i filer efekta sitnih čestica biopepela, čvrstoća pri pritisku maltera u kojem je 25% cementa supstituisano biopepelom prekoračuje čvrstoću referentnog cementnog maltera, pri obe ispitivane starosti.

Vrijeme vezivanja biopepela je duže u odnosu na vrijeme vezivanja standardne cementne paste, što je rezultat usporene hidratacije biopepela u odnosu na cement i prolongirane pucolanske reakcije. Kriterijumi za početak vezivanja su zadovoljeni.

Ispitivanje stalnosti zapremine biopepela pokazuje zanemarljivu ekspanziju, čime materijal zadovoljava i ovaj kriterijum.

2.2. Pepeo mješavine pšenične i sojine slame

Pepeo mješavine pšenične i sojine slame je, po hemijskom sastavu, umjereno reaktivan pucolanski materijal. Ukupan sadržaj važnih oksida ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) je manji od zahtjevanih 70%, a sadržaj reaktivnog SiO_2 je 41% (zadovoljava kriterijum). Umjeren

sadržaj reaktivnog SiO_2 omogućava materijalu da, u fino usitnjenom obliku, u prisustvu vlage, reaguje sa $\text{Ca}(\text{OH})_2$, i formira C-S-H produkte koji imaju vezivna svojstva.

Analizom hemijskog sastava pepela, zaključuje se da pepeo zadovoljava i kriterijume u pogledu sadržaja: hlorida, sulfata, fosfata i slobodnog CaO . Gubitak žarenjem je manji od 5%, što ovaj materijal klasifikuje u Kategoriju A.

Pepeo ne zadovoljava kriterijum za dozvoljenu količinu rastvorljivih fosfata (116mg/kg). Rastvorljivi fosfati negativno utiču na vrijeme vezivanja cementnih kompozita, produžavajući ga sa povećanjem koncentracije.

Pepeo se karakteriše visokim sadržajem alkalija, čija ukupna količina prelazi 5% (13,37%), što može predstavljati opasnost sa aspekta mogućnosti nastanka alkalno-silikatne reakcije u očvrslom betonu.

Zahvaljujući umjerenom sadržaju reaktivnog SiO_2 , pepeo zadovoljava Klasu 5 pucolanske aktivnosti.

Finoća materijala, ispitana Air Jet vazдушnim prosijavanjem, kroz sito otvora 0,045mm, pokazuje klasu S finoće materijala.

Fino usitnjen (samljeven) pepeo, odlikuje se velikom specifičnom površinom, što pozitivno utiče na popunjavanje strukture očvrslih cementnih kompozita (filer efekat). Pepeo, pri velikoj specifičnoj površini, zadovoljava kriterijume za indeks aktivnosti, pri starosti od 28 i 90 dana.

Vrijeme vezivanja biopepela je duže u odnosu na vrijeme vezivanja standardne cementne paste, što je rezultat usporene hidratacije biopepela u odnosu na cement i prolongirane pucolanske reakcije. Kriterijumi za početak vezivanja su zadovoljeni.

Ispitivanje stalnosti zapremine biopepela pokazuje zanemarljivu ekspanziju, čime materijal zadovoljava i ovaj kriterijum.

3. PRIMJENA BIOPEPELA PRI SPRAVLJANJU MALTERA

3.1. Konzistencija

Vrsta i količina biopepela, do nivoa supstitucije cementa od 30%, nema velikog uticaja na konzistenciju maltera. Usled velike finoće mliva, pri zamjeni od 50%, dodat je superplastifikator za očuvanje konzistencije.

Pri primjeni agregata 2, a naročito agregata 3, registrovano je izdvajanje vode maltera pri dinamičkim potresima (ugrađivanju i rasprostiranju) kod referentnog cementnog maltera. Sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, ovaj efekat se smanjuje, a kod maltera sa 50% biopepela i eliminiše, pa se može zaključiti da biopepeo, usled velike finoće mliva, ima dobru sposobnost zadržavanja vode.

3.2. Čvrstoća pri pritisku

Pri zamjeni dijela cementa biopepelom, dominantni faktori koji utiču na čvrstoću pri pritisku maltera su finoća mliva maltera i pucolanska aktivnost. Obe vrste pepela se odlikuju velikom finoćom mliva, u odnosu na cement, tako da preko filer efekta (zapunjavanje strukture maltera) utiču pozitivno na vrijednosti čvrstoće pri pritisku. Pepeo MP se odlikuje značajno većom količinom reaktivnog (amorfnog) SiO_2 , koji u pucolanskoj reakciji reaguje sa Ca(OH)_2 (produktom hidratacije cementa), pri čemu nastaju novi C-S-H produkti koji dodatno zapunjavaju strukturu maltera, povećavajući mu čvrstoću. Pepeo SP se odlikuje manjom količinom reaktivnog SiO_2 , pa je njegov uticaj na čvrstoću maltera manje pozitivan.

Pri starosti od 28 dana, malteri sa agregatima 1 i 2, spravljani sa pepelom MP u količini do 30% mase cementa su imali uporedive, pa čak i veće čvrstoće od referentnog maltera, što je, pri ovoj starosti, rezultat pomenutog prvog uticajnog faktora – filer efekta. Pri većim starostima, uz filer efekat, dolazi do izražaja i pucolanska reakcija biopepela. Ovaj dvojni efekat: filer efekat i pucolanska aktivnost vodi ka daljem zgušnjavanju strukture maltera i povećanju čvrstoće maltera sa biopepelom. Pri starosti od 60 i više dana, malteri sa agregatom 2 sa 10%, 20% i 30%, a pri primjeni agregata 1 i malteri sa 50% biopepela su prekoračili čvrstoće referentnog maltera.

Kao rezultat slabije pucolanske aktivnosti pepela SP, pri primjeni agregata 1 i 2, sa povećanjem udjela pepela, smanjuje se čvrstoća maltera. Pri većim starostima, kao rezultat pucolanske aktivnosti i filer efekta, razlika u čvrstoćama se smanjuje, tako da malteri sa do 30% biopepela imaju čvrstoće uporedive sa čvrstoćama referentnog cementnog maltera.

Najveće čvrstoće pri pritisku je pokazala, bez obzira na vrstu biopepela, grupa maltera spravljena sa standardnim kvarcnim pjeskom. Usled povećanog vodovezivnog faktora kod maltera spravljenih sa agregatom 3 i, posledično, povećanog sadržaja kapilarnih pora u strukturi materijala, čvrstoća pri pritisku maltera ove grupe je smanjena za cca 50% u odnosu na čvrstoće maltera sa agregatima 1 i 2. Uticaj količine biopepela na čvrstoću je bio manje značajan kod ove grupe maltera.

Sa aspekta dobijenih rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava, može se zaključiti da se pepeo pšenične slame može uspješno koristiti za spravljanje maltera, kao zamjena za dio cementa čak i za nivo supstitucije 50%, a pepeo mješavine pšenične i sojine slame do 30%.

3.3. Kapilarno upijanje vode

Na trend upijanja vode maltera, značajan uticaj ima vrsta i količina biopepela, kao i vrsta sitnozrnog agregata. Pri starosti od 28 dana, najveće vrijednosti upijanja imaju malteri

sa agregatom 3 (pjesak za malterisanje), a najmanje sa agregatom 1 (standardni kvarcni pjesak).

Pri starosti od 28 dana, sa povećanjem udjela biopepela, rastu i vrijednosti upijanja vode. Pri ovoj starosti, hidratacija biopepela još nije intenzivirana, pa se malteri sa većim količinama pepela, naročito 50%, ističu sa najvećim trendom upijanja. Ovo je direktna posledica veće poroznosti sistema, odnosno veće količine kapilarnih pora u strukturi maltera sa biopepelom.

Pri starosti od 90 dana, uočava se smanjenje upijanja vode kod maltera sa agregatima 2 i 3, dok malteri sa agregatom 1, iz nepoznatih razloga, imaju nešto više vrijednosti u odnosu na vrijednosti upijanja istih maltera pri starosti od 28 dana. Pri ovoj starosti, kod pojedinih grupa maltera, supstitucija cementa biopepelom (do 30%) ima pozitivan efekat na trend upijanja vode maltera, što je rezultata zapunjavanja strukture tokom hidratacije biopepela. Svi malteri sa agregatom 3 imaju bliske vrijednosti upijanja u okviru grupe.

4. PRIMJENA BIOPEPELA PRI SPRAVLJANJU BETONA

4.1. Konzistencija

Dominantan uticaj na konzistenciju betona ima količina biopepela. Najveće slijeganje je registrovano kod betona sa cementom kao jedinim vezivom. Sa povećanjem udjela biopepela, slijeganje se smanjuje, odnosno beton postaje krući. Ovo se može objasniti većom specifičnom površinom, odnosno finoćom mliva čestica biopepela, koje imaju dobru sposobnost zadržavanja vode, što vodi ka manjem slijeganju betona. Od ovog trenda odstupili su betoni sa 50% biopepela, pri primjeni agregata od starog betona, jer je kod ovih vrsta betona povećana količina superplastifikatora. Svi betonske mješavine su izgledale kohezivno, povezano; pri ispitivanju mjere slijeganja nije dolazilo do segregacije i betoni su se lako ugradili u kalupe.

4.2. Čvrstoća pri pritisku

Na čvrstoću pri pritisku betona, dominantan uticaj imaju: vrsta krupnog agregata i stepen hidratacije veziva.

Zahvaljujući dobrim pucolanskim svojstvima pepela pšenine slame i velikoj finoći mliva materijala, čak i pri starosti od 28 dana, supstitucija cementa biopepelom nema značajan uticaj na čvrstoću betona pri pritisku. Sa progresom hidratacije, betoni sa biopepelom dobijaju na čvrstoći i prekoračuju čvrstoće referentnih cementnih betona u okviru grupe sa istom vrstom krupnog agregata.

Supstitucija prirodnog agregata agregatom od starog betona je uglavnom, pri svim starostima, uticala na smanjenje čvrstoće pri pritisku betona. Ovo je rezultat slabijih

mehaničkih karakteristika agregata od starog betona, koji u strukturi ima dosta vezivne cementne matrice, u odnosu na karakteristike prirodnog agregata.

Sa razvojem hidratacije biopepela, pri većim starostima betona, ova razlika se smanjuje. Štaviše, u slučaju betona sa 10% i 20% pepela, čvrstoća betona sa krupnim agregatom od starog betona je prekoračila čvrstoću referentnog betona sa prirodnim agregatom. Može se zaključiti da biopepeo doprinosi boljoj vezi između zrna agregata i vezivne matrice starog betona.

Pri starosti od 60 dana, svi betoni sa biopepelom, bez obzira na vrstu primjenjenog agregata, su imali čvrstoću pri pritisku veću od 50MPa. Cementni betoni sa 50% i 100% agregata od starog betona, kao krupnog agregata, su prekoračili ovaj prag, tek pri starosti od 90 dana. Ovo se može objasniti trostrukim efektom biopepela:

- sitne čestice biopepela imaju, usled velike finoće mliva, filer efekat – efekat pakovanja u strukturi betona; zapunjavaju i progušćuju strukturu betona, što se pozitivno odražava na čvrstoće pri pritisku betona pri svim starostima, a naročito pri starosti od 28 dana,
- sa vremenom, uz filer efekat, dolazi do izražaja i pucolanska reakcija biopepela; kao rezultat reakcije, formiraju se novi C-S-H produkti koji dalje popunjavaju strukturu betona i, posledično, povećavaju čvrstoću betona pri pritisku,
- biopepeo pospješuje dobru vezu između cementne matrice starog betona, starog agregata i cementa.

Sa aspekta dobijenih rezultata, može se zaključiti da se pepeo pšenične slame može uspješno koristiti kao zamjena dijela cementa, čak i pri nivou supstitucije od 50%, uz istovremenu zamjenu krupnog agregata agregatom od starog betona.

4.3. Kapilarno upijanje vode

Supstitucija prirodnog agregata agregatom od starog betona ima značajan uticaj na vrijednosti upijanja. Sa povećanjem nivoa supstitucije, vrijednost kapilarnog upijanja vode se, uglavnom, smanjuje. Od ovog trenda odstupa kapilarno upijanje referentnog betona i betona sa 20% biopepela, gdje je najmanje upijanje registrovano pri upotrebi kombinacije riječnog i agregata od starog betona, kao krupnog agregata.

Pri starosti od 90 dana, referentni cementni betoni imaju najmanje upijanje, bez obzira na vrstu upotrebjenog krupnog agregata. Kod ove grupe betona, sa povećanjem nivoa supstitucije prirodnog agregata agregatom od starog betona, smanjuje se i vrijednost kapilarnog upijanja vode. Sa povećanjem količine biopepela, pri ovoj starosti, povećava se vrijednost koeficijenta kapilarnog upijanja.

U slučaju betona sa 10% i 20% biopepela, najmanja vrijednost upijanja je registrovana pri upotrebi kombinacije riječnog i agregata od starog betona, kao krupnog agregata. Vrsta upotrebljenog krupnog agregata nije imala uticaj na upijanje vode Eko betona (beton sa 50% biopepela i 100% agregata od starog betona kao krupnog agregata). Konačne vrijednosti upijanja su za betone ove grupe bile izjednačene.

4.4. Dinamički modul elastičnosti

Dominantan uticaj na modul elastičnosti betona ima vrsta primjenjenog agregata. Nivo supstitucije cementa biopepelom nema veliki uticaj na modul elastičnosti.

Sa povećanjem procenta zamjene prirodnog agregata agregatom od starog betona, vrijednosti dinamičkih modula elastičnosti se smanjuju. Smanjenje modula elastičnosti betona sa većom količinom agregata od starog betona je posledica lošijih mehaničkih karakteristika starog betona, koji se sastoji od zrna agregata i cementne matrice.

Redukcija modula elastičnosti Eko betona (beton sa 50% biopepela i 100% agregata od starog betona kao krupnog agregata), u odnosu na referentni cementni beton sa prirodnim agregatom iznosi 20%.

4.5. Upijanje vodom pod pritiskom

Supstitucija dijela cementa biopepelom ima pozitivan efekat na upijanje vodom pod pritiskom. Sve vrste betona sa biopepelom su imale manju dubinu prodora vode od referentnog cementnog betona. Ovo se može pripisati filer efektu sitnih čestica biopepela, ali pri starosti od 60 dana, kada je izvršeno ispitivanje, i pucolanskoj reakciji biopepela

Supstitucija krupnog prirodnog agregata agregatom od starog betona ima značajan uticaj na dubinu prodora vode pri nivou susptitucije 100%. Ovo je rezultat veće apsorpcione moći recikliranog betona, koji se sastoji od zrna agregata i vezivne matrice, u odnosu na prirodni agregat. Supstitucijom prirodnog agregata agregatom od starog betona, smanjuje se ukupan zapreminski sadržaj agregata, a povećava se zapremina vezivne komponente, koja se odlikuje većim sadržajem kapilarnih pora i, posledično, većim upijanjem vode. Kao rezultat, betoni sa agregatom od starog betona imaju veći kapacitet upijanja vode, što uzrokuje sporiji prodor vode u dubinu betona.

4.6. Otpornost na habanje

Sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, povećava se i širina otiska. Slabija otpornost na habanje betona sa biopepelom može se objasniti smanjenjem apsolutne zapremine agregata pri povećanju sadržaja biopepela, a vezivna matrica ima, generalno, manju otpornost na habanje, u odnosu na agregat.

Na otpornost betona na habanje, značajan uticaj ima vrsta agregata. Najmanju širinu otiska, odnosno najveću otpornost na habanje, pokazali su betoni spravljeni sa prirodnim agregatom. Ovo je rezultat boljih mehaničkih svojstava prirodnog agregata, u odnosu na agregat od starog betona. Agregat od starog betona se sastoji od zrna agregata i vezivne komponente koja, generalno, ima malu otpornost na abrazivno dejstvo.

Imajući u vidu da svi betoni imaju širinu otiska u rasponu 20-23mm, što ih klasifikuje u II klasu otpornosti, može se zaključiti da biopepeo nema značajan uticaj na otpornost betona na habanje.

4.7. Skupljanje pri sušenju

Supstitucija dijela cementa biopepelom ima pozitivan uticaj na skupljanje betona pri sušenju. Sa povećanjem količine biopepela, vrijednosti skupljanja se smanjuju. Fine čestice biopepela imaju tendenciju držanja vode, čime se smanjuje sadržaj slobodne vode u strukturi betona, pa, posledično, i skupljanje betona pri sušenju.

Vrsta krupnog agregata ima dominantan uticaj na skupljanje pri sušenju betona. Sa povećanjem udjela krupnog agregata, povećava se i skupljanje pri sušenju betona. Ovo je naročito primjetno kod referentnog cementnog betona.

Kod betona sa biopepelom, supstitucija prirodnog agregata sa 50% agregata od krupnog betona nije imala veliki uticaj na skupljanje pri sušenju betona. Kod svih vrsta, bez obzira na nivo supstitucije cementa biopepelom, betoni sa 100% krupnog agregata od starog betona imaju najveće skupljanje pri sušenju.

4.8. Čvrstoća na savijanje

Nivo supstitucije cementa biopepelom i prirodnog agregata agregatom od starog betona nemaju značajan uticaj na čvrstoću betona na savijanje. Sa porastom nivoa supstitucije i cementa i agregata, čvrstoće se, uglavnom, djelimično smanjuju.

5. EKOLOŠKI ASPEKTI PRIMJENE BIOPEPELA KAO MINERALNOG DODATKA

Supstitucija cementa biopepelom vodi ga očuvanju prirodnih sirovina koje se koriste za proizvodnju cementnog klinkera: krečnjaka i gline, kao i neobnovljivih izvora energije, prvenstveno fosilnih goriva (ugalj, derivati nafte, petroleum koks). Na osnovu prosječne godišnje proizvodnosti fabrike cementa La Farge u Beočinu, utvrđeno je da nivo supstitucije cementa biopepelom od 50% ima za rezultat smanjenu potrošnju resursa u količinama: 562.000 tona krečnjaka, 187.500 tona gline i 50.000 tona petroleum koks.

Analizom prikupljenih podataka, dobijenih ispitivanjem rada kompanija koje proizvode biopepeo, procjenjena je količina od 5.000 tona biopepela, generisanog sagorjevanjem

žetvenih ostataka u AP Vojvodini, na godišnjem nivou. Održivo korišćenje ove vrste otpada i ponovno vraćanje istog u proizvodni ciklus smanjuje količinu otpada na deponijama, ali i buduće takse koje Republika Srbija očekuje, kao kandidat za članstvo u Evropskoj Uniji.

Cementna industrija je odgovorna za cca 8% globalne emisije CO₂. Supstitucija cementa biopepelom, kao CO₂ neutralnim gorivom, značajno bi smanjila emisiju gasova staklene bašte koji potiču iz procesa proizvodnje cementa. Na osnovu prosječne godišnje proizvodnosti fabrike cementa La Farge u Beočinu, utvrđeno je da nivo supstitucije cementa biopepelom od 50% ima za rezultat smanjenu emisiju CO₂ u količini od 475.000 tona.

Obični portland cementi se odlikuju velikim sadržajem hroma, koji potiče, uglavnom, od polaznih sirovina za proizvodnju klinkera: 2-117 mg/kg. Na osnovu metode toka supstanci, utvrđeno je da se, sa povećanjem nivoa supstitucije cementa biopepelom, smanjuje i koncentracija ukupnog hroma u vezivnoj komponenti, čime se vrijednost iste približava graničnoj vrijednosti za neškodne materijale (70 mg/kg).

Obični portland cementi se odlikuju umjerenim sadržajem arsena, koji potiče, uglavnom, od polaznih sirovina za proizvodnju klinkera: 25-712 mg/kg. Na osnovu rezultata analize toka supstanci, utvrđeno je da koncentracija arsena referentnog cementa zadovoljava kriterijum za škodne materijale, a koncentracija kod veziva u kojem je 50% cementa supstituisano biopepelom se približava granici koja je definisana za neškodne materijale.

Obični portland cementi se odlikuju umjerenim sadržajem arsena, koji potiče, uglavnom, od polaznih sirovina za proizvodnju klinkera i goriva: 5-254 mg/kg. Na osnovu rezultata analize toka supstanci, utvrđeno je da koncentracija olova referentnog cementa zadovoljava kriterijum za škodne materijale, a koncentracija kod veziva u kojem je 50% cementa supstituisano biopepelom se približava granici koja je definisana za neškodne materijale.

Obični portland cementi se odlikuju umjerenim sadržajem arsena, koji potiče, uglavnom, od polaznih sirovina za proizvodnju klinkera i goriva: 0,03-6 mg/kg. Na osnovu rezultata analize toka supstanci, utvrđeno je da koncentracija arsena referentnog cementa zadovoljava kriterijum za neškodne materijale, a koncentracija kod veziva u kojem je 50% cementa supstituisano biopepelom se približava granici koja je definisana za inertne materijale.

Koncentracije teških metala (kadmijum, željezo, nikl, mangan, hrom, arsen i bakar) u očvrslim kompozitima: malterima i betonima se nalaze u dozvoljenim granicama za inertne materijale. Supstitucija 50% cementa sa biopepelom ima pozitivan uticaj na koncentraciju olova, pa beton D0 zadovoljava kriterijum za inertne materijale sa minimalnom koncentracijom olova.

Na osnovu detaljno urađene analize očigledno je da se pepeo pšenične slame može koristiti za spravljanje cementnih kompozita: maltera i betona, do nivoa supstitucije cementa od 50%, bez značajnog ugrožavanja fizičkih i mehaničkih svojstava kompozita. Pepeo mješavine pšenične i sojine slame se može koristiti za spravljanje malterskih mješavina, do nivoa supstitucije cementa od 30%, pri čemu nema drastičnog pada mehaničkih svojstava maltera.

Pepeo pšenične slame se može koristiti kao zamjena za dio cementa, pri istovremenoj supstituciji prirodnog agregata agregatom od starog betona, pri čemu se dobijaju betoni zadovoljavajućih fizičkih i mehaničkih svojstava, uporedivih sa svojstvima referentnog cementnog betona sa prirodnim agregatom. Ovo se može pripisati velikoj finoći mliva i dobrim pucolanskim svojstvima biopepela, kao i ostvarivanju dobre veze između biopepela i agregata od starog betona.

Budući da je beton D100 spravljen sa velikim udjelom biopepela, kao zamjenom za dio cementa od 50% i agregatom od starog betona, kao krupnim agregatom (100%), pokazano je da se može proizvesti Eko konstrukcijski beton, na bazi lokalno dostupnih otpadnih materijala sa zadovoljavajućim fizičkim i mehaničkim svojstvima.

6. PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

U okviru teorijsko-istraživačkog dijela je naglašeno da je pronađen relativno mali broj naučnih radova u kojima je istraživana mogućnost primjene pepela žetvenih ostataka: pšenice i soje kao mineralnog dodatka u cementnim kompozitima. U postojećim radovima, uglavnom je pepeo pšenične slame korišten kao zamjena za dio cementa pri spravljanju malterskih mješavina, pri čemu su svojstva kompozita ispitivana pri starosti od 28 dana.

Predmetnim istraživanjem je dokazano da se ispitivane vrste pepela mogu koristiti za spravljanje maltera i betona. Ispitivanje svojstava kompozita je rađeno pri starostima od 28-90 dana, u cilju boljeg sagledavanja razvoja mikrostrukture i hemijskih reakcija u okviru procesa hidratacije vezivne komponente. Zahvaljujući pucolanskim svojstvima, biopepeli se karakterišu usporenom hidratacijom, koja za rezultat ima naknadno formiranje produkata mikrostrukture i povećavanje čvrstoće kompozita sa vremenom. S druge strane, velika finoća materijala vodi, pri manjim starostima, ka gušćoj strukturi kompozita.

Supstitucija dijela cementa biopepelom ima povoljan ekološki impakt: smanjenje potrošnje prirodnih resursa, redukciju otpada na deponijama, smanjenje emisije gasova staklene bašte, te smanjenje koncentracije teških metala cementnih kompozita.

Svi navedeni efekti opravdavaju mogućnost primjene pepela nastalog sagorjevanjem žetvenih ostataka kao mineralnog dodatka u cementnim kompozitima.

Oslanjajući se na rezultate istraživanja primjene pepela žetvenih ostataka kao mineralnog dodatka, koji su dobijeni u ovoj disertaciji, pravci daljih istraživanja bi bili:

Da se ispituju trajnosna svojstva cementnih kompozita spravljenih sa velikim sadržajem pepela žetvenih ostataka, pri istovremenoj upotrebi različitih vrsta agregata, prvenstveno agregata od starog betona. Imajući u vidu da pepeli nisu zadovoljili kriterijum za dozvoljenu količinu alkalija, na istima, kao i na cementnim kompozitima bi trebalo ispitati alkalno-silikatnu reakciju, pri korištenju različitih lokalno dostupnih vrsta agregata.

Da se pepeli, kao materijali sa pucolanskim svojstvima, koriste za spravljanje produžnih (cementno-krečnih) maltera, koji se mogu komercijalno koristiti za zidanje i malterisanje, pri čemu se ne zahtjevaju visoke mehaničke karakteristike ovih kompozita. U ovom pogledu, bilo bi interesantno analizirati uticaj različitih parametara (uslovi njege, zapreminski odnosi komponenti...) na odigravanje reakcija između cementa i vode - hidratacija, biopepela i kreča – pucolanska reakcija i, posledično, dobijena svojstva očvrsljih kompozita.

IXLITERATURA

LITERATURA

- [1] Caric M., Solesa D. (2014): *Biomass as renewable energy source and waste treatment technologies for biogas production* - The Manual for five-day educational course, DAI, the Agency for consulting, Leskovac
- [2] Jevtić D., Zakić D., Savić A. (2009): Specifičnosti tehnologije spravljanja betona na bazi recikliranog agregata, *Materijali i konstrukcije* 52, str. 52-62.
- [3] Materijal sa predavanja, Građevinski fakultet u Beogradu, Mogućnost korišćenja recikliranih materijala kao agregata za beton u savremenoj građevinskoj praksi.
- [4] Radonjanin V., Malešev M. , Marinković S. (2010): Mogućnosti primene starog betona kao nove vrste agregata u savremenom građevinarstvu, *Zaštita materijala* 51, 178-188.
- [5] Rakić A, Milovanović M. (2015): [*Problem nedovoljnog iskorišćavanja biomase u poljoprivredi.*](#)
- [6] Zekić V. (2018): Studija - *Ekspertiza o distribuciji, vrstama i količinama dostupnog pepela biomase.*
- [7] Jovanović B., Parović M. (2009): *Stanje i razvoj biomase u Srbiji*, Beograd, Jefferson Institute
- [8] Brkić M, Janić T. (1996): *Prikupljanje, skladištenje i briketiranje biomase u poljoprivredi*, Zbornik radova sa savetovanja: „Značaj i perspektive briketiranja biomase”, Ekološki pokret Vojvodine, Šumarski fakultet Beograd, Savezno ministarstvo za nauku, razvoj i životnu sredinu, Vrnjačka Banja, str. 15 – 24.
- [9] Weiting Xu, Tommy Y. Lo, Shazim Ali Memon (2012): *Microstructure and reactivity of rich husk ash*, *Construction and Building Materials* 29 (2012), 541–547.
- [10] Ha Thanh Le, Sang Thanh Nguyen, Horst-Michael Ludwig (2014): *A Study on High Performance Fine-Grained Concrete Containing Rice Husk Ash*, *International Journal of Concrete Structures and Materials* Vol. 8, 301–307.
- [11] R. Zerbino, G. Giaccio, O.R. Batic, G.C. Isaia (2012): *Alkali-silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash*, *Construction and Building Materials* 36, 796–806.
- [12] Ki-Bong Park, Seung-Jun Kwonb, Xiao-Yong Wang (2016): *Analysis of the effects of rice husk ash on the hydration of cementitious materials*, *Construction and Building Materials* 105, 196–205.
- [13] V. Kannan, K. Ganesan (2014): *Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin*, *Construction and Building Materials* 51, 225–234.
- [14] A.L.G. Gastaldini, G.C. Isaia, N.S. Gomes, J.E.K. Sperb (2007): *Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators*, *Cement & Concrete Composites* 29, 176–180.
- [15] Ha Thanh Le, Horst-Michael Ludwiga (2016): *Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete*, *Materials and Design* 89, 156–166.

- [16] Hwang Chao-Lung, Bui Le Anh-Tuan, Chen Chun-Tsun (2011): *Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete*, Construction and Building Materials 25, 3768–3772.
- [17] V. Sata, Tangpagasit, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt (2012): *Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix*, Cement & Concrete Composites 34, 94–100.
- [18] B. Chatveera, P. Lertwattanakul (2009): *Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash*, Journal of Environmental Management 90, 1435–1441.
- [19] Mahboubeh Z., Ali Akbar R., Amir M. R. (2015): *Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration*, Construction and Building Materials 78, 354–361.
- [20] Josephin Alex, J. Dhanalakshmi, B. Ambedkar (2016): *Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production*, Construction and Building Materials 127, 353–362.
- [21] A.L.G. Gastaldini, G.C. Isaia, A.P. Saciloto, F. Missau, T.F. Hoppe (2010): *Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing rice husk ash: A technical and economical feasibility study*, Cement & Concrete Composites 32, 783–793.
- [22] Huanghuang Huang, Xiaojian Gao, Hui Wang, Huan Ye (2017): *Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete*, Construction and Building Materials 149, 621–628.
- [23] H. B. Mahmud, S. Bahri, Y. W. Yee, Y T. Yeap (2016): *Effect of rice husk ash on strength and durability of high strength high performance concrete*, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol. 10, 390-395.
- [24] Kah Yen Foong, J. Alengaram, M. Z. Jumaat, Kim H.Mo (2014): *Enhancement of the mechanical properties of lightweight oil palm shell concrete using rice husk ash and manufactured sand*, Applied Physics and Engineering Online.
- [25] A.L.G. Gastaldini, M.P. da Silva, F.B. Zamberlan, C.Z. Mostardeiro Neto (2014): *Total shrinkage, chloride penetration, and compressive strength of concretes that contain clear-colored rice husk ash*, Construction and Building Materials 54, 369–377.
- [26] B. Chatveera, P. Lertwattanakul (2009): *Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash*, Journal of Environmental Management 90, 1435–1441.
- [27] Radeka M., Zekić V., Milić D., Malešev M., Radonjanin V. (2015): *Fizička, hemijska i pucolanska svojstva pepela od biomase*, 13. međunarodna konferencija iNDIS - Planiranje, projektovanje, građenje i obnova graditeljstva, Novi Sad, str. 114-127.

- [28] Ondřej J., Pavlíková M., Sedmidubský D., Bouša D., Lojka M., Pokorný J., Záleská M., Pavlík Z. (2017): *Study on pozzolana activity of wheat straw ash as potential admixture for blended cements*, *Ceramics* 61, 327-339.
- [29] Rao A. K., Syed Ali R., Shazim Ali Memon, Jean-Marc T., Giuseppe A. F. (2014): *Experimental investigation on use of wheat straw ash and bentonite in self-compacting cementitious system*, *Advances in Materials Science and Engineering*.
- [30] Ajay G., Hattori K., Hidehiko O., Monika G., A.M. Anwar, M. Ashraf, Mandula (2007): *Synergic effect of wheat straw ash and rice-husk ash on strength properties of mortar*, *Journal of Applied Science*, Vol. 7, 3256-3261.
- [31] Sani A., Kashim I.Y. (2007): *Wheat straw ash as cement replacement material in concrete*, https://www.academia.edu/23705419/WHEAT_STRAW_ASH_AS_CEMENT_REPLACEMENT_MATERIAL_IN_CONCRETE.
- [32] Amardeep B. D., S. G. Makarande, N. P. Shende (2015): *Effect of wheat husk ash as a pozzolanic material on mortar*, *Civil Engineer* Vol. 2, 1-4.
- [33] Hasan B., Fevziye A., Fikret T., İlhan B. (2000): *Resistance to magnesium sulfate and sodium sulfate attack of mortars containing wheat straw ash*, *Cement and Concrete Research* Vol. 30, 1189-1197.
- [34] Nabil M. A., Bilal A. Abu-Alfoul (2002): *Effect of wheat straw ash on mechanical properties of autoclaved mortar*, *Cement and Concrete Research* Vol. 32, 859-863.
- [35] Abdul Qudoos, Hong Gi Kim, Atta-ur-Rehman, Jae-Suk Ryou (2018): *Effect of mechanical processing on the pozzolanic efficiency and the microstructure development of wheat straw ash blended cement composites*, *Construction and Building Materials* 193, 481-490.
- [36] D.A. Adesanya, A.A. Raheem (2009): *Development of corn cob ash blended cement*, *Construction and Building Materials* 23, 347-352.
- [37] P. Suwanmaneechot (2015): *Improvement, characterization and use of waste corn cob ash in cement based materials*, *Materials Science and Engineering* 103, 1-12.
- [38] D.A. Adesanya (1996): *Evaluation of blended cement mortar, concrete and stabilized earth made from ordinary Portland cement and corn cob ash*, *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 6, 451-456.
- [39] Ahangba A. S & T. Michael (2016): *Partial replacement of cement with corn cob ash*, *International journal for innovative research in multidisciplinary field* Vol. 2, 159-169.
- [40] Antonio P., Ryan Y., Ellie F., Taher Abu-L. (2014): *Investigating effects of introduction of corncob ash into portland cements concrete: mechanical and thermal properties*, *American Journal of Engineering and Applied Sciences* Vol. 7, 137-148.
- [41] D.A. Adesanya, A. A. Raheem (2010): *A study of the permeability and acid attack of corn cob ash blended cements*, *Construction and Building Materials* 24, 403-409.
- [42] Hanifi B., Faruk Y., Orhan A., Hasan K. (2008): *Effect of Corncob, Wheat Straw, and Plane Leaf Ashes as Mineral Admixtures on Concrete Durability*, *Journal of Materials in Civil Engineering*.

- [43] John K., Ash A., Paul H., Joseph K. (2016): *Suitability of Corncob Ash as a Supplementary Cementitious Material*, International Journal of Materials Science and Engineering Vol 4, 215-229.
- [44] Jorge P., Barbosa V., Hélder P., Carlos J., Paulo V., Anabela P. (2012): *Corn cob lightweight concrete for non-structural applications*, Construction and Building Materials 34, 346–351.
- [45] K. A. Mujedu, S. A. Adebara, I. O. Lamidi (2014): *The Use of Corn Cob Ash and Saw Dust Ash as Cement Replacement in Concrete Works*, The International Journal Of Engineering And Science Vol 3, 22-29.
- [46] Olafusi O., Olutoge F. (2012): *Strength Properties of Corn Cob Ash Concrete*, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences Vol 3, 297-301.
- [47] Oluborode K.D., Olofintuyi I.O. (2015): *Strength Evaluation of Corn cob ash in a blended Portland cement*, International Journal of Engineering and Innovative Technology Vol 4, 14-17.
- [48] SRPS EN 1015-3: Metode ispitivanja maltera za zidanje - Deo 3: Određivanje konzistencije svežeg maltera (pomoću potresnog stola), Institut za standardizaciju Srbije; 2008.
- [49] SRPS EN 196-1: Metode ispitivanja cementa - Deo 1: Ispitivanje čvrstoće. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2008.
- [50] ASTM C1585-13: Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.
- [51] SRPS EN 12390-3: Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010.
- [52] UNI 11307: Testing for hardened concrete: Shrinkage determination. Milano; 2008.
- [53] SRPS EN 12390-8: Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 8: Dubina penetracije vode pod pritiskom. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010.
- [54] SRPS EN 1338:2012: Betonski blokovi za popločavanje - Zahtevi i metode ispitivanja.
- [55] ASTM E1876 – 01: 2006: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.
- [56] SRPS EN 12390-5:2008: Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 5: Čvrstoća pri savijanju uzoraka za ispitivanje
- [57] Pravilnik o kvalitetu cementa, Službeni glasnik RS, br. 34/2013.
- [58] SRPS EN 196-3: Metode ispitivanja cementa - Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010.
- [59] SRPS EN 196-6: Metode ispitivanja cementa — Deo 6: Određivanje finoće mliva. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2011.

- [60] SRPS EN 197-1: Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2013.
- [61] SRPS EN 1097-3: Ispitivanja mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Deo 3: Određivanje šupljina i zapreminske mase u rastresitom stanju.
- [62] SRPS EN 1097-6: Ispitivanje mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Deo 6: Određivanje stvarne zapreminske mase i upijanja vode. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2007.
- [63] SRPS EN 933-1: Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata — Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava — Metoda prosejavanja. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2013.
- [64] SRPS EN 933-4: Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata - Deo 4: Određivanje oblika zrna - Indeks oblika. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010.
- [65] SRPS EN 1097-2: Ispitivanje mehaničkih i fizičkih svojstava agregata — Deo 2: Metode određivanja otpornosti na drobljenje. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2013.
- [66] SRPS EN 1744-6: Ispitivanja hemijskih svojstava agregata - Deo 6: Određivanje uticaja recikliranog agregata na početno vreme vezivanja cementa. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2008.
- [67] Sanchez de Juan M., Gutierrez P. A.: *Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate*, Construction and Building Materials (23), str. 872-877, 2009.
- [68] SRPS EN 933-2: Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata - Deo 2: Određivanje granulometrijskog sastava - Ispitna sita, nazivne veličine otvora. Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2008.
- [69] SRPS B.B8.032: Određivanje volumenske težine, specifične težine, ispunjenosti i poroznosti prirodnog kamena. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 1962.
- [70] EN 196-2:2013: Method of testing cement - Part 2: Chemical analysis of cement.
- [71] ISO 29581-2:2010: Cement -- Test methods -- Part 2: Chemical analysis by X-ray fluorescence.
- [72] SRPS B.C1.017-2001: Nemetalne mineralne sirovine - Zgura - sastojak za proizvodnju cementa - Klasifikacija, tehnički uslovi i metode ispitivanja.
- [73] SRPS B.C1.018-2001: Nemetalne mineralne sirovine - Pucolanski materijali - sastojci za proizvodnju cementa - Klasifikacija, tehnički uslovi i metode ispitivanja.
- [74] EN 450-1: Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria.
- [75] SRPS EN 1015-3:2008: Metode ispitivanja maltera za zidanje - Deo 3: Određivanje konzistencije svežeg maltera (pomoću potresnog stola).

- [76] SRPS EN 12350-2:2010: Ispitivanje svežeg betona - Deo 2: Ispitivanje sleganja.
- [77] SRPS ISO 6276:1997: Beton - Zbijeni sveži beton - Određivanje zapreminske mase.
- [78] ASTM C 618-08: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [79] EN 451-1:2017: Method of testing fly ash. Determination of free calcium oxide content.
- [80] Marie-Noëlle De N., Sandrine T.N., Marcel S.F., Gilles G., Caroline G.L.: *Effect of phosphorus on tricalcium silicate T1: from synthesis to structural characterization*. Journal of the American Ceramic Society, Wiley, 2009, 92 (10), str. 2337-2344.
- [81] ISO 29581-2:2010: Cement - Test methods -- Part 2: Chemical analysis by X-ray fluorescence.
- [82] EN 933-10:2009: Tests for geometrical properties of aggregates. Assessment of fines. Grading of filler aggregates (air jet sieving).
- [83] Tošić N., Marinković S., Pecić N., Ignjatović I., Dragaš J. (2018). *Long-term behaviour of reinforced beams made with natural or recycled aggregate concrete and high-volume fly ash concrete*. Construction and Building Materials 176, 344–358.
- [84] Xiang Hua, Zhenguang Shi, Caijun Shi, Zemei Wua, Baihui Tong, Zhihua Oud, Geert de Schutter (2017): *Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components*. Construction and Building Materials 149, 406–415.
- [85] Rawaz Kurda, Jorge de Brito, José D. Silvestre (2017). *Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete properties*. Construction and Building Materials 157, 554–572.
- [86] Limbachiya M., Seddik M.M., Ouchagour Y. (2012). *Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete*. Construction and Building Materials 27, 439–449.
- [87] Ilić B., Mihajlović D. (2017). *Upravljanje prirodnim resursima, održivost i zaštita*. Megabiznis 1, 29-43.
- [88] Vlastimir Radonjanin, Mirjana Malešev (2018). Materijali u građevinarstvu 2 – Materijal sa predavanja.
- [89] Cencic, O., Rechberger, H. (2008). *Material flow analysis with software STAN*. Journal of Environmental Engineering and Management 18 (1), 3-7.
- [90] Abd ElAzim Mohammed Ahmed ElAmrany (2005). *Utilization of Petroleum Coke as Alternative Fuel in Cement Kilns*. Master of Science in Chemical Engineering.
- [91] Jennifer Ruth Dodson (2011). Wheat straw ash and its use as a silica source. PhD Thesis. University of York – Chemistry.
- [92] Hernane G. Caruso (2006). *Reduction of CO₂ Emissions from Cement Plants*. Master of Applied Science in Chemical Engineering.

- [93] Zavod za statistiku Srbije. Oblasti – Životna sredina. <http://www.stat.gov.rs/oblasti/zivotna-sredina/> preuzeto 02.03.2019.
- [94] Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) (2001). Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries.
- [95] Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment 2002/95/EC, Evropska Unija, Februar 2003.
- [96] Pravilnik o ograničenjima i zabranama proizvodnje, stavljanja u promet i korišćenja hemikalija, Službeni glasnik RS, br. 90 od 14. oktobra 2013, 25 od 13. marta 2015, 2 od 8. januara 2016, 44 od 9. maja 2017, 36 od 10. maja 2018.
- [97] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.
- [98] Pravilnik o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje i metodama njihovog ispitivanja, „Službeni glasnik RS”, broj 23 od 18. marta 1994.
- [99] Achternbosch M., Brautigam K.R., Hartlieb M., Kupsch C., Richers U., Stemmermann P. (2003). Heavy metals in cement and concrete resulting from co-incineration of wastes in cement kilns with regard to legitimacy of waste utilisation. Report. FZKA 6923.
- [100] Environmental, Health, and Safety Guidelines for Cement and Lime Manufacturing (2007). IFC. <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f74848804951d04eb75cb719583b6d16/Final+-+Cement+and+Lime+Manufacturing.pdf?MOD=AJPERES> (preuzeto 03.03.2019.).
- [101] Yassir A., Douch J., Ali Assabbane, Kaaouachi K., Tian H., Hamdani M. (2018). Assessment of heavy metals released into the air from the cement kilns co-burning waste: Case of Oujda cement manufacturing (Northeast Morocco). Sustainable Environment Research 28, 363-373.
- [102] Bhatti J.I. (1995). Role of elements in cement manufacture and use, Portland Cement Association (PCA).
- [103] Toksikološki profil za živu (2007). U.S. department of health and human services. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf> (preuzeto 08.03.2019.)
- [104] <http://www.nmw.co.rs> (preuzeto 08.03.2019.).
- [105] BS EN 14346:2006. Characterization of waste. Calculation of dry matter by determination of dry residue or water content.
- [106] EPA Method 7010 (2007). Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrophotometry, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods.
- [107] EPA Method 7000B (2007). Flame Atomic Absorption Spectrophotometry, part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods.

-
- [108] SRPS EN 12457-2:2008. Karakterizacija otpada - Izluživanje - Ispitivanje usaglašenosti za izluživanje zrnastih otpadnih materijala i muljeva - Deo 2: Jednostepeno šaržno ispitivanje pri odnosu tečno-čvrsto od 10 L/kg za materijale sa veličinom čestica manjom od 4 mm (sa smanjenjem veličine čestica ili bez smanjenja).

X PRILOZI

PRILOG 1

Određivanje hemijsko-fizičko-mehaničkih svojstava cementa

Tabela 71. Hemijska svojstva upotrebljenog cementa

Svojstvo	Vrsta cementa		Kriterijum
	CEM I 42,5R		
Nerastvoreni ostatak [%]	0,19		≤ 5,0
Gubitak žarenjem [%]	1,31		≤ 5,0
Sadržaj SO ₃ [%]	3,52		≤ 4,0
Sadržaj hroma (C _{r,v}) [%]	0,014		≤ 0,10

Tabela 72. Fizička svojstva upotrebljenog cementa

Svojstvo	Vrsta cementa	
	CEM I 42,5R	
Finoća mliva [%]	2,8	
Specifična površina [cm ² /g]	4020	
Specifična masa [g/cm ³]	3,1	
Standardna konzistencija [%]	28,4	
Početak vezivanja [min]	230	
Kraj vezivanja [min]	275	
Stalnost zapremine(Le Chatelier) [mm]	0	

Tabela 73. Mehanička svojstva upotrebljenog cementa

Vrsta cementa	Čvrstoća pri pritisku [MPa]		Čvrstoća na zatezanje pri savijanju [MPa]	
	2 dana	28 dana	2 dana	28 dana
	CEM I 42,5R	35,0	54,8	6,6

Tabela 74. Hemijski sastav cementa (%)

Parametar	Jedinica	CEM I 42,5R
NO	%	0,37
SiO ₂	%	20,98
Al ₂ O ₃	%	5,51
Fe ₂ O ₃	%	2,58
CaO	%	61,96
MgO	%	2,50
SO ₃	%	3,60
Na ₂ O	%	0,22
K ₂ O	%	0,74
Cl ⁻	%	0,03
Slobodan CaO	%	1,11
Gubitak žarenjem	%	1,35

Tabela 75. Mineraloški sastav cementa (%)

Parametar	Jedinica	CEM I 42,5R
C ₃ S	%	58,41
C ₂ S	%	14,65
C ₃ A	%	6,22
C ₄ AF	%	8,99
CaCO ₃	%	0,45
Gips	%	1,89
Poluhidrat	%	0,99
SO ₃	%	2,23
Amorfna faza	%	4,67
Ostalo	%	1,5

PRILOG 2

Određivanje svojstava agregata

A. Riječni agregat

Tabela 76. Granulometrijski sastav prirodnog riječnog agregata 0/4

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$a_{i/1}$ [g]	2,8	65,9	328,1	146,6	122,5	129,0	65,8	0,5	0	0
$a_{i/2}$ [g]	4,2	71,9	392,1	140,4	92,1	149,8	60,0	0,5	0	0
a_i [g]	3,5	68,9	360,1	143,5	107,3	139,4	62,9	0,5	0	0
O_i [g]	886,1	882,6	813,7	453,6	310,1	202,8	63,4	0,5	0	0
P_i [%]	100	99,6	91,8	51,2	35	22,8	7,7	0,1	0	0
Y_i [%]	0	0,4	8,2	48,8	65	77,2	92,9	99,9	100	100

Tabela 77. Granulometrijski sastav prirodnog riječnog agregata 4/8

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$a_{i/1}$ [g]	1,5	7,0	1,4	0,18	1,9	22,8	1297,3	148,2	0	0
$a_{i/2}$ [g]	0,6	3,0	0,6	0,22	1,1	25,2	1358,9	142,0	0	0
a_i [g]	1,05	5,0	1,0	0,2	1,5	24,0	1328,1	145,1	0	0
O_i [g]	1505,9	1504,8	1499,8	1498,8	1498,6	1497,1	1473,1	145,1	0	0
P_i [%]	100	99,9	99,6	99,6	99,5	99,4	97,8	9,6	0	0
Y_i [%]	0,0	0,1	0,4	0,4	0,5	0,6	22,2	90,4	100	100

Tabela 78. Granulometrijski sastav prirodnog riječnog agregata 8/16

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$a_{i/1}$ [g]	4,2	1,4	1,1	1,2	4,9	21,0	178,5	2712,8	38,6	0
$a_{i/2}$ [g]	3,6	1,2	0,7	1,2	5,5	20,0	204,5	2757,4	42,0	0
a_i [g]	3,9	1,3	0,9	1,2	5,2	20,5	191,5	2735,1	40,3	0
O_i [g]	2999,9	2996,0	2994,7	2993,8	2992,6	2987,4	2966,9	2775,4	40,3	0
P_i [%]	100	99,9	99,8	99,8	99,8	99,6	98,9	92,5	1,3	0

Y_i [%]	0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	1,1	7,5	98,7	100
-----------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----

Modul finoće sitnog agregata (frakcije 0/4) iznosi

$$M = \frac{\sum P_i}{100} = \frac{\sum (100 - Y_i)}{100} = 3,08$$

Tabela 79. Fizička svojstva riječnog agregata

Svojstvo	Standard	Preporuka (prema EN 206)	Rezultat		
			0/4mm	4/8mm	8/16mm
Količina sitnih čestica [%]	EN 933-1	/	0,75	0	0
Oblik zrna	EN 933-4	$\leq SI_{55}$	/	9,1 (SI_{15})	10,8 (SI_{15})
Otpornost na drobljenje (LA)	EN 1097-2	$\leq LA_{50}$	23,8 (LA_{25})	23,8 (LA_{25})	25,3 (LA_{30})
Zapreminska masa vodom zasićenog, površinski suvog uzorka [kg/m^3]	EN 1097-6	/	2510	2528	2624
Upijanje vode [%]	EN 1097-6	/	1,0	0,6	0,7

B. Reciklirani agregat

Tabela 80. Granulometrijski sastav recikliranog agregata 4/8

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$a_{i/1}$ [g]	1,3	4,0	4,8	3,9	15,2	150,9	1266,9	33,2	0	0
$a_{i/2}$ [g]	0,7	2,0	4,4	7,1	13,4	134,7	1308,9	45,4	0	0
a_i [g]	1,0	3,0	4,6	5,5	14,3	142,8	1287,9	39,3	0	0
O_i [g]	1498,4	1497,4	1494,4	1489,8	1484,3	1470,0	1327,2	39,3	0	0
P_i [%]	100	99,9	99,7	99,4	99,1	98,1	88,6	2,6	0	0
Y_i [%]	0	0,1	0,3	0,6	0,9	1,9	11,4	97,4	100	100

Tabela 81. Granulometrijski sastav recikliranog agregata 8/16

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$a_{i/1}$ [g]	1,2	8,1	7,4	1,3	2,7	7,0	124,1	2785,2	6,6	0
$a_{i/2}$ [g]	1,8	6,9	7,6	1,9	1,7	8,0	136,3	2865,6	5,8	0
a_i [g]	1,5	7,5	7,5	1,6	2,2	7,5	130,2	2825,4	6,2	0
O_i [g]	2989,6	2988,1	2980,6	2973,1	2971,5	2969,3	2961,8	2831,6	6,2	0
P_i [%]	100	99,9	99,7	99,4	99,4	99,3	99,1	94,7	0,1	0
Y_i [%]	0	0,1	0,3	0,6	0,6	0,7	0,9	5,3	99,9	100

Tabela 82. Fizička svojstva recikliranog agregata

Svojstvo	Standard	Preporuka (prema EN 206)	Rezultat	
			4/8mm	8/16mm
Količina sitnih čestica [%]	EN 933-1	/	0,03	0,04
Oblik zrna	EN 933-4	$\leq SI_{55}$	11,2 (SI_{15})	11,1 (SI_{15})
Otpornost na drobljenje (LA)	EN 1097-2	$\leq LA_{50}$	27,8 (LA_{30})	37,0 (LA_{30})
Utjecaj na vrijeme početka vezivanja	EN 1744-6	$\leq A_{40}$	5min (A_{10})	5min (A_{10})
Zapreminska masa u suvom stanju [kg/m^3]	EN 1097-6	$\geq 2100kg/m^3$	2400	2430
Upijanje vode [%]	EN 1097-6	/	6,2	5,5

C. Sitnozrni agregat

Tabela 83. Specifična masa i modul finoće sitnozrnog agregata

	Specifična masa (kg/m ³) (SRPS B.B8.032)	Modul finoće (%)
Kvarcni pjesak	2700	1.86
Frakcionisani agregat riječnog porjekla	2630	3,08
Pjesak za malterisanje riječnog porjekla	2370	0.97

Tabela 84. Mineraloški sastav agregata

	Pjesak za malterisanje riječnog porjekla / %	Frakcionisani agregat riječnog porjekla / %
Kvarc	82,0	76,1
Kalcit	3,0	12,6
Albit	13,6	6,8
Mikroklinit	1,4	
Dolomit		4,5

PRILOG 3

Određivanje svojstava mineralnih dodataka

Tabela 85. Hemijski sastav biopepela

Pepeo (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	C _a O	SO ₃	P ₂ O ₅	LOI*	LOM**
MP	69.13	1.12	0.73	0.11	13.03	2.5	5.78	0.2	1.72	5.18	0.95
SP	56.36	2.03	1.53	0.2	20.02	3.54	7.13	0.18	3.72	4.85	1.0

* Gubitak žarenjem na 950°C,

** Gubitak vlage na 105°C.

Tabela 86. Sadržaj reaktivnog SiO₂, slobodnog C_aO, rastvornih fosfata i hlorida u biopepelima

Pepeo (%)	Sadržaj reaktivnog SiO ₂ (%)	Sadržaj slobodnog C _a O (%)	Sadržaj rastvornih P ₂ O ₅ (mg/kg)	Sadržaj hlorida (%)
MP	67.07	0.14	13,77	0,06
SP	40.99	0.28	115,95	0,025

Tabela 87. Elementi u tragovima u biopepelima

Pepeo, mg/kg	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn
MP	<0,03	407.0	<0,03	<0,01	71.25	84.2	<0,01	500.0	<0,01	<0,01	<0,01	<0,03	<0,05	5.0
SP	<0,03	325.0	<0,03	<0,01	87.25	107.7	<0,01	587.0	<0,01	<0,01	<0,01	12.5	<0,05	37.5

Tabela 88. Fizička svojstva mineralnih dodataka

Mineralni dodatak	Specifična površina [cm²/g]	Specifična masa [g/cm³]
MP	9440	2,38
SP	5500	2,37
SP*	15000	2.32

*Dodatno mljeven pepeo

Tabela 89. Rezultati ispitivanja klase pucolanske aktivnosti za pepeo pšenične slame

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, min (MPa)	KLASA	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,min (Mpa)	KLASA
MP1	530	2,676	3,3			16,5	10,3		
						17	10,6		
MP2	532	3,101	3,8	3,3	<u>10</u>	18,5	11,6	10,3	<u>10</u>
						18	11,25		
MP3	525	3,023	3,7			17,5	10,9		
						18,5	11,6		

Tabela 90. Rezultati ispitivanja klase pucolanske aktivnosti za pepeo mješavine pšenične i sojine slame

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, min (MPa)	KLASA	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,min (Mpa)	KLASA
SP1	508	2,728	3,4	3,3	<u>10</u>	15,5	9,7	8,75	<u>5</u>
						15	9,4		
SP2	507	2,751	3,4			14	8,75		
						14,5	9,1		

SP3	510	2,667	3,3	15	9,4
				15	9,4

Tabela 91. Rezultati ispitivanja indeksa aktivnosti za referentni cementni malter pri starosti od 28 dana

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, sr (MPa)	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,sr (Mpa)
C1	564	7,602	9,41		80	50	
					81	50,62	
C2	575	7,701	9,53	9,71	80	50	50,26
					80,5	50,31	
C3	564	8,228	10,18		81	50,62	
					80	50	

Tabela 92. Rezultati ispitivanja indeksa aktivnosti za referentni cementni malter pri starosti od 90 dana

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, sr (MPa)	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,sr (Mpa)
C4	573	7,232	8,95	8,64	88,5	55,31	54,53

				86,5	54,06
C5	565	6,667	8,25	84,5	52,81
				91	56,88
C6	570	7,042	8,71	84,5	52,81
				88,5	55,31

Tabela 93. Rezultati ispitivanja indeksa aktivnosti za pepeo pšenične slame pri starosti od 28 dana

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, sr (MPa)	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,sr (Mpa)
MP1	583	9,180	11,36		88	55	
					86,5	54,06	
MP2	577	9,070	11,22	11,22	88	55	52,39
					86,5	54,06	
MP3	581	8,989	11,09		78	48,75	
					76	47,50	

Tabela 94. Rezultati ispitivanja indeksa aktivnosti za pepeo pšenične slame pri starosti od 90 dana

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, sr (MPa)	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,sr (Mpa)
MP4	574	7,994	9,89		96	60	
					96	60	
MP5	580	8,153	10,07	9,87	94	58,75	58,96
					94	58,75	
MP6	581	7,808	9,66		90	56,25	
					96	60	

Tabela 95. Rezultati ispitivanja indeksa aktivnosti za pepeo mješavine pšenične i sojine slame pri starosti od 28 dana

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, sr (MPa)	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,sr (Mpa)
SP1	530	5,293	6,55		52,5	32,8	
					52,5	32,8	32,65
				6,27	51	31,875	
SP2	522	4,778	5,91		52	32,5	

SP3	517	5,127	6,34	52,5	32,8
				53	33,125

Tabela 96. Rezultati ispitivanja indeksa aktivnosti za pepeo mješavine pšenične i sojine slame pri starosti od 90 dana

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, sr (MPa)	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,sr (Mpa)
SP4	519	5.376	6.6528		69	43.125	
					70	43.75	
SP5	530	5.7	7.05375	6,71	66	41.25	42,40
					63	39.375	
SP6	526	5.2	6.435		69	43.125	
					70	43.75	

Tabela 97. Rezultati ispitivanja indeksa aktivnosti za pepeo mješavine pšenične i sojine slame pri starosti od 28 dana, nakon dodatnog mljevenja

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, sr (MPa)	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,sr (Mpa)
--	---------------	---------------	------------------	----------------------	----------------	-----------------	--------------------

SP1*	555	5,854	7,24		72	45	
					72,5	45,31	
SP2*	561	6,146	7,6	7,45	73,5	45,94	46,1
					74	46,25	
SP3*	557	6,057	7,5		74	46,25	
					76,5	47,81	

Tabela 98. Rezultati ispitivanja indeksa aktivnosti za pepeo mješavine pšenične i sojine slame pri starosti od 90 dana, nakon dodatnog mljevenja

	ms (g)	Ps(kg)	fzs (MPa)	fzs, sr (MPa)	Pp (kN)	fp (Mpa)	fp,sr (Mpa)
MSP1	546	5.42	6.70725		82	51.25	
					82	50	
MSP2	553	6.13	7.585875	7,28	83	51.875	51,56
					82	51.25	
MSP3	549	6.1	7.54875		83	51.875	

Tabela 99. Rezultati ispitivanja vremena vezivanja mineralnih dodataka

	Vrijeme mješanja komponenti	Vrijeme početka vezivanja	Početak vezivanja	Kriterijum za početak vezivanja**	Kriterijum za početak vezivanja***	Vrijeme kraja vezivanja	Kraj vezivanja
C	07:40h	09:40h	120'	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN	10:15h	155'
MP	08:20h	11:50h	210'	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN	13:40h	320'
SP	08:30h	14:20h	350'	ZADOVOLJEN	ZADOVOLJEN	15:30h	420'

Tabela 100. Rezultati ispitivanja stalnosti zapremine mineralnih dodataka

	Rastojanje vrha krakova igli Šatelijeovog prstena nakon odležavanja 24h u vlažnoj komori A-A (mm)	Rastojanje vrha krakova igli Šatelijeovog prstena nakon 3h kuvanja u vodi C-C (mm)	Ekspanzija C-A (mm)	Kriterijum**
C	28	28	0	ZADOVOLJEN

Error! No text of specified style in document.

MP	18	18,5	0,5	ZADOVOLJEN
SP	13	14	1	ZADOVOLJEN

PRILOG 4

Granulometrijski sastav mješavine agregata za betone A0-D0

Za određivanje učešća pojedinih frakcija agregata i granulometrijskog sastava mješavine agregata, pretpostavljeno je da granulometrijski sastav mješavine odgovara Fuller-ovoj krivi sa analitičkim izrazom:

$$Y_i = 100 \sqrt{\frac{d_i}{D}} \% \quad (1.1)$$

gde su:

- Y_i – prolazi mješavine kroz i-to sito, %
- d_i – otvor i-tog sita, mm
- D – nominalno najkrupnije zrno agregata

$$Y_4 = 100 \sqrt{\frac{4}{16}} = 50\% \quad Y_8 = 100 \sqrt{\frac{8}{16}} = 70,7\%$$

$$\begin{aligned} 92,9 \cdot X_{0/4} + 22,2 \cdot X_{4/8} + 1,1 \cdot X_{8/16} &= 50 & X_{0/4} &= 0,479 \\ 99,9 \cdot X_{0/4} + 90,4 \cdot X_{4/8} + 7,5 \cdot X_{8/16} &= 70,7 & X_{4/8} &= 0,232 \\ X_{0/4} + X_{4/8} + X_{8/16} &= 1 & X_{8/16} &= 0,289 \end{aligned} \Rightarrow$$

Tabela 101. Granulometrijski sastav mješavine agregata za betone A0-D0

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$Y_{i,0/4}$	0	0.4	8.2	48.8	65	77.2	92.9	99.9	100	100
$Y_{i,4/8}$	0	0.1	0.4	0.4	0.5	0.6	22.2	90.4	100	100
$Y_{i,8/16}$	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	1.1	7.5	98.7	100
Y_M	0	0	4	23	31	37	50	71	100	100
Referentne	0	0	3	8	20	32	42	56	76	100
krive	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100

PRILOG 5

Granulometrijski sastav mješavine agregata za betone A50-D50

Za određivanje učešća pojedinih frakcija agregata i granulometrijskog sastava mješavine agregata, pretpostavljeno je da granulometrijski sastav mješavine odgovara Fuller-ovoj krivi sa analitičkim izrazom:

$$Y_i = 100 \sqrt{\frac{d_i}{D}} \% \quad (1.2)$$

gde su:

- Y_i – prolazi mješavine kroz i-to sito, %
- d_i – otvor i-tog sita, mm
- D – nominalno najkrupnije zrno agregata

$$Y_4 = 100 \sqrt{\frac{4}{16}} = 50\% \quad Y_8 = 100 \sqrt{\frac{8}{16}} = 70,7\%$$

$$\begin{aligned} 92,9 \cdot X_{0/4} + 16,8 \cdot X_{4/8} + 1,0 \cdot X_{8/16} &= 50 & X_{0/4} &= 0,50 \\ 99,9 \cdot X_{0/4} + 93,9 \cdot X_{4/8} + 6,4 \cdot X_{8/16} &= 70,7 & X_{4/8} &= 0,21 \\ X_{0/4} + X_{4/8} + X_{8/16} &= 1 & X_{8/16} &= 0,29 \end{aligned} \Rightarrow$$

Tabela 102. Granulometrijski sastav mješavine agregata za betone A50-D50

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$Y_{i,0/4}$	0	0.4	8.2	48.8	65	77.2	92.9	99.9	100	100
$Y_{i,4/8}$	0	0.1	0.35	0.5	0.7	1.25	16.8	93.9	100	100
$Y_{i,8/16}$	0	0.1	0.25	0.4	0.4	0.55	1	6.4	99.3	100
Y_M	0	0	4	25	33	39	50	71	100	100
Referentne	0	0	3	8	20	32	42	56	76	100
krive	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100

PRILOG 6

Granulometrijski sastav mješavine agregata za betone A100-D100

Za određivanje učešća pojedinih frakcija agregata i granulometrijskog sastava mješavine agregata, pretpostavljeno je da granulometrijski sastav mješavine odgovara Fuller-ovoj krivi sa analitičkim izrazom:

$$Y_i = 100 \sqrt{\frac{d_i}{D}} \% \quad (1.3)$$

gde su:

- Y_i – prolazi mješavine kroz i-to sito, %
- d_i – otvor i-tog sita, mm
- D – nominalno najkrupnije zrno agregata

$$Y_4 = 100 \sqrt{\frac{4}{16}} = 50\% \quad Y_8 = 100 \sqrt{\frac{8}{16}} = 70,7\%$$

$$\begin{aligned} 92,9 \cdot X_{0/4} + 11,4 \cdot X_{4/8} + 0,9 \cdot X_{8/16} &= 50 & X_{0/4} &= 0,51 \\ 99,9 \cdot X_{0/4} + 97,4 \cdot X_{4/8} + 5,3 \cdot X_{8/16} &= 70,7 & X_{4/8} &= 0,19 \\ X_{0/4} + X_{4/8} + X_{8/16} &= 1 & X_{8/16} &= 0,30 \end{aligned} \Rightarrow$$

Tabela 103. Granulometrijski sastav mješavine agregata za betone A100-D100

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$Y_{i,0/4}$	0	0.4	8.2	48.8	65	77.2	92.9	99.9	100	100
$Y_{i,4/8}$	0	0.1	0.3	0.6	0.9	1.9	11.4	97.4	100	100
$Y_{i,8/16}$	0	0.1	0.3	0.6	0.6	0.7	0.9	5.3	99.9	100
Y_M	0	0	4	25	33	40	50	71	100	100
Referentne	0	0	3	8	20	32	42	56	76	100
krive	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100

PRILOG 7

Određivanje konzistencije svežeg maltera

Tabela 104. Rezultati ispitivanja konzistencije maltera

Vrsta maltera	R ₁ [mm]	R ₂ [mm]	R _{sr} [mm]	w	m _{sup} (%m _{vez})
C-K	135	129	132	0,5	/
MP10-K	154	162	158	0,5	/
MP20-K	141	148	145	0,5	/
MP30-K	136	140	138	0,5	/
MP50-K	150	156	153	0,5	0,2
SP10-K	144	147	146	0,5	/
SP20-K	142	145	144	0,5	/
SP30-K	148	148	148	0,5	/
SP50-K	150	151	151	0,5	0,1
C-F	136,5	136	136	0,5	/
MP10-F	143	149	146	0,5	/
MP20-F	139	144	142	0,5	/
MP30-F	141	146	144	0,5	/
MP50-F	145	151	148	0,5	0,2
SP10-F	136	140	138	0,5	/
SP20-F	142	144	143	0,5	/
SP30-F	146	148	147	0,5	/
SP50-F	143	145	144	0,5	0,1
C-D	140	140	140	0,7	/
MP10-D	138	136	137	0,7	/
MP20-D	138	140	139	0,7	/
MP30-D	129	133	131	0,7	/
MP50-D	164	166	165	0,7	0,2
SP10-D	150	155	153	0,7	/
SP20-D	144	144	144	0,7	/
SP30-D	140	142	141	0,7	/
SP50-D	150	156	153	0,7	/

PRILOG 8

Određivanje čvrstoće pri pritisku maltera

Čvrstoća pri pritisku je sračunata prema izrazu:

$$f_p = \frac{P}{A} \cdot 10^3$$

gdje su:

- f_p – čvrstoća pri pritisku (MPa)
- P – sila loma (kN)
- A – površina malterske prizmice na koju djeluje sila (mm^2)

A. Malteri sa standardnim kvarcnim pjeskom

Tabela 105. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera C-K

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m^3)	$Y_{z,sr}$ (kg/m^3)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	C-K 1	560	2188	85	83,50	52,81	52,19		
28	C-K 2	570	2227	2211	81,5	84,00	50,94	52,50	52,76
	C-K 3	568	2219	85,5	87,50	53,44	54,69		

	C-K 4	572	2234		88	87,00	55,00	54,38	
60	C-K 5	588	2297	2264	86	86,00	53,75	53,75	54,53
	C-K 6	579	2262		86,5	90,00	54,06	56,25	
	C-K 7	558	2180		90	86,00	56,25	53,75	
90	C-K 8	567	2215	2189	86	85,00	53,75	53,13	55,21
	C-K 9	556	2172		91	92,00	56,88	57,50	

Tabela 106. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP10-K

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	MP10-K 1	588	2297	83	83	51,88	51,88		
28	MP10-K 2	570	2227	2268	81	83	50,63	51,88	51,67
	MP10-K 3	584	2281		83	83	51,88	51,88	
	MP10-K 4	585	2285		91	92	56,88	57,50	
60	MP10-K 5	587	2293	2289	90	92	56,25	57,50	57,19
	MP10-K 6	586	2289		92	92	57,50	57,50	
	MP10-K 7	585	2285		93	92	58,13	57,50	
90	MP10-K 8	584	2281		93	94	58,13	58,75	58,13

MP10-K 9 583 2277 92 94 57,50 58,75

Tabela 107. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP20-K

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	MP20-K 1	556	2172	92	95	57,50	59,38		
28	MP20-K 2	563	2199	2193	91	90	56,88	56,25	57,08
	MP20-K 3	565	2207	90	90	56,25	56,25		
	MP20-K 4	575	2246	100	103	62,50	64,38		
60	MP20-K 5	579	2262	2255	100	103	62,50	64,38	63,13
	MP20-K 6	578	2258	100	100	62,50	62,50		
	MP20-K 7	588	2297	102	103	63,75	64,38		
90	MP20-K 8	590	2305	2289	103	104	64,38	65,00	64,48
	MP20-K 9	580	2266	103	104	64,38	65,00		

Tabela 108. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP30-K

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)
-------------------	----------	-------------------------------	---------------------------------	---------------	----------------	---------------------

	MP30-K 1	558	2180		84	81	52,50	50,63	
28	MP30-K 2	563	2199	2195	80	81	50,00	50,63	51,56
	MP30-K 3	565	2207		84	85	52,50	53,13	
	MP30-K 4	575	2246		92	92	57,50	57,50	
60	MP30-K 5	584	2281	2258	94	94	58,75	58,75	58,54
	MP30-K 6	575	2246		97	93	60,63	58,13	
	MP30-K 7	590	2305		97	95	60,63	59,38	
90	MP30-K 8	600	2344	2305	96	94	60,00	58,75	59,79
	MP30-K 9	580	2266		97	95	60,63	59,38	

Tabela 109. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP50-K

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	MP50-K 1	558	2180	77	78	48,13	48,75		
28	MP50-K 2	567	2215	2201	78	80	48,75	50,00	48,85
	MP50-K 3	565	2207		78	78	48,75	48,75	
	MP50-K 4	576	2250		88	87,5	54,69	54,69	
60	MP50-K 5	570	2227	2237	87,5	92	54,69	57,50	55,63

	MP50-K 6	572	2234		87,5	92	54,69	57,50	
	MP50-K 7	577	2254		90	93	56,25	58,13	
90	MP50-K 8	583	2277	2283	92	92	57,50	57,50	57,29
	MP50-K 9	593	2316		91	92	56,88	57,50	

Tabela 110. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP10-K

Starost (dani)	m (g)	γ_z (kg/m ³)	$\gamma_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP10-K 1	563	2199	72	74	45,00	46,25		
28	SP10-K 2	566	2211	2189	77	75	48,13	46,88	46,98
	SP10-K 3	552	2156		77	76	48,13	47,50	
	SP10-K 4	564	2203		77	77	48,13	48,13	
60	SP10-K 5	568	2219	2224	77	80	48,13	50,00	48,96
	SP10-K 6	576	2250		77	82	48,13	51,25	
	SP10-K 7	559	2184		84	80	52.50	50.00	
90	SP10-K 8	560	2188	2182	80	82.5	50.00	51.56	51,20
	SP10-K 9	557	2176		81.5	83.5	50.94	52.19	

Tabela 111. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP20-K

Starost _____ (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP20-K 1	553	2160	68	64	42,50	40,00		
28	SP20-K 2	552	2156	2155	66	63	41,25	39,38	40,00
	SP20-K 3	550	2148	63	65	39,38	40,63		
	SP20-K 4	567	2215	74	70	46,25	43,75		
60	SP20-K 5	575	2246	2229	74	71	46,25	44,38	43,96
	SP20-K 6	570	2227	70	70	43,75	43,75		
	SP20-K 7	556	2172	74	76	46,25	47,50		
90	SP20-K 8	552	2156	2172	75	78	46,88	48,75	47,71
	SP20-K 9	560	2188	74	81	46,25	50,63		

Tabela 112. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP30-K

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP30-K 1	540	2109	67	70	41,88	43,75		
28	SP30-K 2	545	2129	2120	68	70	42,50	43,75	43,75
	SP30-K 3	543	2121	69	70	43,13	43,75		

	SP30-K 4	551	2152		73	81	45,63	50,63	
60	SP30-K 5	555	2168	2167	77	78	48,13	48,75	49,79
	SP30-K 6	558	2180		78	80	48,75	50,00	
	SP30-K 7								
90	SP30-K 8								
	SP30-K 9								

Tabela 113. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP50-K

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP50-K 1	542	2117	59	61	36,88	38,13		
28	SP50-K 2	550	2148	2138	60	61	37,50	38,13	38,13
	SP50-K 3	550	2148		60	61	37,50	38,13	
	SP50-K 4	538	2102		62	65	38,75	40,63	
60	SP50-K 5	548	2141	2124	60	63	37,50	39,38	40,00
	SP50-K 6	545	2129		64	64	40,00	40,00	
	SP50-K 7	548	2141		80	78	50,00	48,75	
90	SP50-K 8	542	2117	2138	83	80	51,88	50,00	50,10

SP50-K 9 552 2156 81 79 50.63 49.38

B. Malteri sa frakcionisanim riječnim agregatom

Tabela 114. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera C-F

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	C-F 1	567	2215	78	79.5	48,75	49,69		
28	C-F 2	579	2262	2240	77.5	79.5	48,44	49,69	49,27
	C-F 3	574	2242	82	76.5	51,25	47,81		
	C-F 4	572	2234	75	85	46,88	53,13		
60	C-F 5	576	2250	2245	82,5	82,5	51,56	51,56	51,67
	C-F 6	576	2250	86	85	53,75	53,13		
	C-F 7	558	2180	85	83	53,13	51,88		
90	C-F 8	567	2215	2189	83	86	51,88	53,75	52,08
	C-F 9	556	2172	80	83	50,00	51,88		

Tabela 115. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP10-F

Starost	m	Y_z	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p	f_p	$f_{p,sr}$
---------	---	-------	---------------------------------	-------	-------	------------

(dani)		(g)	(kg/m ³)		(kN)		(Mpa)		(Mpa)
	MP10-F 1	581	2270		87.5	90	54,69	56,25	
28	MP10-F 2	583	2277	2283	85	88.5	53,13	55,31	54,69
	MP10-F 3	589	2301		89	85	55,63	53,13	
	MP10-F 4	573	2238		82	92,5	51,25	57,81	
60	MP10-F 5	597	2332	2279	94,5	91,5	59,06	57,19	56,35
	MP10-F 6	580	2266		85	95,5	53,13	59,69	
	MP10-F 7	585	2285		92	96	57,5	60	
90	MP10-F 8	584	2281	2281	91	96	56,875	60	58,44
	MP10-F 9	583	2277		90	96	56,25	60	

Tabela 116. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP20-F

Starost (dani)	m (g)	Y _z (kg/m ³)	Y _{z,sr} (kg/m ³)	P _p (kN)	f _p (Mpa)	f _{p,sr} (Mpa)			
	MP20-F 1	583	2277	83.5	84	52,19	52,50		
28	MP20-F 2	583	2277	2290	83.5	84	52,19	52,50	52,71
	MP20-F 3	593	2316		84	85	52,50	53,13	
	MP20-F 4	597	2332	2306	92,5	87	57,81	54,38	57,40

60	MP20-F 5	591	2309		97,5	91	60,94	56,88	
	MP20-F 6	583	2277		91	92	56,88	57,50	
	MP20-F 7	588	2297		95	92	59,375	57,5	
90	MP20-F 8	890	3477	2680	94	95	58,75	59,375	58,65
	MP20-F 9	580	2266		94	93	58,75	58,125	

Tabela 117. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP30-F

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	MP30-F 1	588	2297	85	83	53,13	51,88		
28	MP30-F 2	585	2285	2294	83	83	51,88	51,88	52,5
	MP30-F 3	589	2301		83	86	51,88	53,75	
	MP30-F 4	585	2285		93,5	97,5	58,44	60,94	
60	MP30-F 5	588	2297	2277	94	96	58,75	60,00	59,64
	MP30-F 6	576	2250		96	95,5	60,00	59,69	
	MP30-F 7	590	2305		94	96	58,75	60	
90	MP30-F 8	600	2344	2305	101	94	63,125	58,75	60,21
	MP30-F 9	580	2266		96	97	60	60,625	

Tabela 118. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP50-F

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	MP50-F 1	576	2250	73	73	45,63	45,63		
28	MP50-F 2	582	2273	2267	76	74	47,50	46,25	45,83
	MP50-F 3	583	2277	76	73	47,50	45,63		
	MP50-F 4	578	2258	82	78	51,25	48,75		
60	MP50-F 5	577	2254	2249	84,5	80	52,81	50,00	51,09
	MP50-F 6	572	2234	83	83	51,88	51,88		
	MP50-F 7	577	2254	83	80	51,88	50,00		
90	MP50-F 8	583	2277	2283	80	80	50,00	50,00	51,15
	MP50-F 9	593	2316	85	83	53,13	51,88		

Tabela 119. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP10-F

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP10-F 1	565	2207	2188	74,5	73,5	46,56	45,94	46,09

28	SP10-F 2	560	2187,5		73	73	45,63	45,63	
	SP10-F 3	555	2168		71,5	77	44,69	48,13	
60	SP10-F 4	557	2176		75	78	46,88	48,75	
	SP10-F 5	565	2207	2193	76	79	47,50	49,38	48,44
	SP10-F 6	562	2195		77	80	48,13	50,00	
90	SP10-F 7	561	2191		85	85	53,13	53,13	
	SP10-F 8	552	2156	2169	84	84	52,50	52,50	52,81
	SP10-F 9	553	2160		84	85	52,50	53,13	

Tabela 120. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP20-F

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
28	SP20-F 1	560	2188	69	71,5	43,13	44,69		
	SP20-F 2	565	2207	2195	71	73	44,38	45,63	44,79
	SP20-F 3	561	2191		72,5	73	45,31	45,63	
60	SP20-F 4	564	2203		73	73	45,63	45,63	
	SP20-F 5	570	2227	2212	73	75	45,63	46,88	46,35
	SP20-F 6	565	2207		75	76	46,88	47,50	

	SP20-F 7	543	2121		76	76	47.50	47.5	
90	SP20-F 8	549	2145	2128	77	80	48.13	50	48,13
	SP20-F 9	542	2117		78	75	48.75	46.88	

Tabela 121. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP30-F

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP30-F 1	553	2160	66	67	41,25	41,88		
28	SP30-F 2	563	2199	2174	67	68	41,88	42,50	41,98
	SP30-F 3	554	2164		67	68	41,88	42,50	
	SP30-F 4	555	2168		72	75	45,00	46,88	
60	SP30-F 5	560	2188	2177	74	75	46,25	46,88	46,25
	SP30-F 6	557	2176		74	74	46,25	46,25	
	SP30-F 7	544	2125		78.5	80	49.06	50	
90	SP30-F 8	544	2125	2129	80	79	50	49.375	49,43
	SP30-F 9	547	2137		78	79	48.75	49.375	

Tabela 122. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP50-F

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP50-F 1	547	2137	55	55	34,38	34,38		
28	SP50-F 2	552	2156	2158	55	53	34,38	33,13	34,69
	SP50-F 3	558	2180	56	59	35,00	36,88		
	SP50-F 4	559	2184	60	62	37,50	38,75		
60	SP50-F 5	560	2188	2168	61	63	38,13	39,38	38,44
	SP50-F 6	546	2133	62	61	38,75	38,13		
	SP50-F 7	544	2125	68.5	67	42.81	41.875		
90	SP50-F 8	547	2137	2130	66	66	41.25	41.25	41,30
	SP50-F 9	545	2129	65	64	40.625	40		

C. Malteri sa sitnozrnim agregatom za malterisanje

Tabela 123. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera C-D

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	C-D 1	528	2063	2053	38	38	23,75	23,75	24,43

28	C-D 2	531	2074		39	39,5	24,38	24,69	
	C-D 3	518	2023		40	40	25,00	25,00	
60	C-D 4	534	2086		46	46	28,75	28,75	
	C-D 5	534	2086	2086	46	48	28,75	30,00	29,17
	C-D 6	534	2086		46	48	28,75	30,00	
90	C-D 7	500	1953		48	49	30,00	30,63	
	C-D 8	500	1953	1958	49	48	30,63	30,00	30,31
	C-D 9	504	1969		49	48	30,63	30,00	

Tabela 124. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP10-D

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	MP10-D 1	535	2090	43	42	26,88	26,25		
28	MP10-D 2	530	2070	2081	42	43	26,25	26,88	26,77
	MP10-D 3	533	2082		44	43	27,50	26,88	
60	MP10-D 4	550	2148		48	48	30,00	30,00	
	MP10-D 5	540	2109	2109	49	48,5	30,63	30,31	30,57
	MP10-D 6	530	2070		49	51	30,63	31,88	

	MP10-D 7	524	2047		51	51	31,88	31,88	
90	MP10-D 8	532	2078	2073	51	52	31,88	32,50	31,88
	MP10-D 9	536	2094		50	51	31,25	31,88	

Tabela 125. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP20-D

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	MP20-D 1	545	2129	45	44	28,13	27,50		
28	MP20-D 2	545	2129	2122	47	46	29,38	28,75	28,54
	MP20-D 3	540	2109		46	46	28,75	28,75	
	MP20-D 4	546	2133		57	54,5	35,31	34,06	
60	MP20-D 5	551	2152	2141	56,5	57,5	35,31	35,94	35,26
	MP20-D 6	547	2137		55,5	58	34,69	36,25	
	MP20-D 7	532	2078		57	59	35,63	36,88	
90	MP20-D 8	538	2102	2099	60	61	37,50	38,13	37,29
	MP20-D 9	542	2117		60	61	37,50	38,13	

Tabela 126. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP30-D

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	MP30-D 1	537	2098	41	46	25,63	28,75		
28	MP30-D 2	542	2117	2108	43	41	26,88	25,63	26,88
	MP30-D 3	540	2109	42	45	26,25	28,13		
	MP30-D 4	544	2125	50	47,5	31,25	29,69		
60	MP30-D 5	542	2117	2117	51	51	31,88	31,88	30,99
	MP30-D 6	540	2109	47,5	50,5	29,69	31,56		
	MP30-D 7	530	2070	51	54	31,88	33,75		
90	MP30-D 8	537	2098	2085	53	54	33,13	33,75	33,44
	MP30-D 9	534	2086	54	55	33,75	34,38		

Tabela 127. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera MP50-D

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	MP50-D 1	535	2090	42	41	26,25	25,63		
28	MP50-D 2	525	2051	2074	41	41	25,63	25,63	25,94
	MP50-D 3	533	2082	43	41	26,88	25,63		

	MP50-D 4	530	2070		51	51	31,88	31,88	
60	MP50-D 5	535	2090	2077	51	51	31,88	31,88	31,77
	MP50-D 6	530	2070		51	50	31,88	31,25	
	MP50-D 7	522	2039		52	56	32,50	35,00	
90	MP50-D 8	525	2051	2047	53	55	33,13	34,38	33,85
	MP50-D 9	525	2051		53	56	33,13	35,00	

Tabela 128. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP10-D

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP10-D 1	533	2082	35	37	21,88	23,13		
28	SP10-D 2	536	2094	2085	37	35	23,13	21,88	22,50
	SP10-D 3	532	2078		35	37	21,88	23,13	
	SP10-D 4	534	2086		36	37	22,50	23,125	
60	SP10-D 5	538	2102	2096	37	36	23,13	22,5	23,02
	SP10-D 6	538	2102		36	39	22,50	24,375	
	SP10-D 7	495	1934		48	48	30,00	30,00	
90	SP10-D 8	505	1973	1958	47	48	29,38	30,00	30,00

SP10-D 9 504 1969 49 48 30.63 30.00

Tabela 129. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP20-D

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP20-D 1	528	2063	32	34	20,00	21,25		
28	SP20-D 2	526	2055	2052	30	33	18,75	20,63	20,52
	SP20-D 3	522	2039	35	33	21,88	20,63		
	SP20-D 4	524	2047	32	35	20,00	21,875		
60	SP20-D 5	520	2031	2034	33	35	20,63	21,875	21,25
	SP20-D 6	518	2023	34	35	21,25	21,875		
	SP20-D 7	503	1965	41	42	25.63	26.25		
90	SP20-D 8	501	1957	1952	41	42	25.63	26.25	26,46
	SP20-D 9	495	1934	42	43	26.25	26.875		

Tabela 130. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP30-D

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP30-D 1	511	1996	34	35	21,25	21,88		
28	SP30-D 2	526	2055	2017	35	33	21,88	20,63	21,15
	SP30-D 3	512	2000	32	34	20,00	21,25		
	SP30-D 4	509	1988	35	36	21,88	22,5		
60	SP30-D 5	510	1992	1991	36	36	22,50	22,5	22,40
	SP30-D 6	510	1992	36	36	22,50	22,5		
	SP30-D 7	500	1953	41	42	25.63	26.25		
90	SP30-D 8	482	1883	1932	41	41	25.63	25.625	25,83
	SP30-D 9	502	1961	40	41	25.00	25.625		

Tabela 131. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera SP50-D

Starost (dani)	m (g)	Y_z (kg/m ³)	$Y_{z,sr}$ (kg/m ³)	P_p (kN)	f_p (Mpa)	$f_{p,sr}$ (Mpa)			
	SP50-D 1	515	2012	2021	32	31	20,00	19,38	19,17

Error! No text of specified style in document.

28	SP50-D 2	519	2027		30	31	18,75	19,38	
	SP50-D 3	518	2023		30	30	18,75	18,75	
	SP50-D 4	512	2000		31	32	19,38	20	
60	SP50-D 5	515	2012	2007	34	32	21,25	20	20,10
	SP50-D 6	514	2008		32	32	20,00	20	
	SP50-D 7	497	1941		42	41	26.25	25.625	
90	SP50-D 8	492	1922	1935	42	42	26.25	26.25	26,04
	SP50-D 9	497	1941		43	42	26.88	26.25	

PRILOG 9

Određivanje kapilarnog upijanja vode maltera

Kapilarno upijanje vode je izračunato prema izrazu:

$$I = \frac{m_t}{a \cdot d}$$

gdje su:

- I – upijanje
- m_t – promjena mase uzorka u gramima, u određenom vremenskom intervalu
- a – izložena površina uzorka, u mm^2
- d – zapreminska masa vode, u g/mm^3

Tabela 132. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera – inicijalno upijanje do 6h ($\text{mm}/\text{s}^{0,5}$), 28 dana

	0	1min	5min	10min	20min	30min	1h	2h	3h	4h	5h	6h
C-F	0,0000	0,0359	0,0703	0,0917	0,1177	0,1380	0,1703	0,2219	0,2464	0,2698	0,2854	0,3021
MP10-F	0,0000	0,1036	0,1714	0,2255	0,2818	0,3182	0,3823	0,4437	0,4865	0,5094	0,5464	0,5531
MP20-F	0,0000	0,1021	0,1823	0,2302	0,2859	0,3182	0,3682	0,4219	0,4542	0,4693	0,4901	0,5021
MP30-F	0,0000	0,1625	0,2328	0,2776	0,3307	0,3625	0,4083	0,4536	0,4781	0,4938	0,5068	0,5193

MP50-F	0,0000	0,1656	0,2854	0,3568	0,4432	0,4859	0,5625	0,6474	0,6906	0,7187	0,7479	0,7672
SP10-F	0,0000	0,0943	0,1750	0,2312	0,2964	0,3349	0,4094	0,4885	0,5318	0,5677	0,5906	0,6182
SP20-F	0,0000	0,1068	0,1995	0,2583	0,3286	0,3708	0,4396	0,4911	0,5828	0,6182	0,6526	0,6755
SP30-F	0,0000	0,0844	0,1344	0,1635	0,1979	0,2250	0,2682	0,3146	0,3422	0,3609	0,3745	0,3870
SP50-F	0,0000	0,0990	0,1615	0,1990	0,2484	0,2854	0,3484	0,4219	0,4698	0,5000	0,5208	0,5453
C-K	0,0000	0,0224	0,0260	0,0370	0,0510	0,0583	0,0703	0,0911	0,1042	0,1161	0,1224	0,1271
MP10-K	0,0000	0,0302	0,0464	0,0510	0,0615	0,0677	0,0833	0,0984	0,1125	0,1208	0,1224	0,1250
MP20-K	0,0000	0,0432	0,0594	0,0682	0,0771	0,0844	0,1000	0,1094	0,1234	0,1323	0,1349	0,1391
MP30-K	0,0000	0,0677	0,1042	0,1255	0,1464	0,1719	0,2000	0,2292	0,2490	0,2583	0,2740	0,2807
MP50-K	0,0000	0,1260	0,2052	0,2427	0,2917	0,3115	0,3536	0,3865	0,4073	0,4198	0,4302	0,4422
SP10-K	0,0000	0,0167	0,0224	0,0318	0,0422	0,0531	0,0599	0,0698	0,0755	0,0802	0,0911	0,0979
SP20-K	0,0000	0,0391	0,0479	0,0484	0,0599	0,0615	0,0729	0,0823	0,0870	0,0896	0,0974	0,1016
SP30-K	0,0000	0,0583	0,0734	0,0964	0,1083	0,1109	0,1307	0,1474	0,1510	0,1563	0,1734	0,1807
SP50-K	0,0000	0,1750	0,3625	0,4734	0,5818	0,6422	0,7391	0,8104	0,8521	0,8781	0,9026	0,9234
C-D	0,0000	0,0714	0,1250	0,1682	0,2276	0,2698	0,3552	0,4635	0,5401	0,6036	0,6578	0,7026
MP10-D	0,0000	0,0464	0,0792	0,1047	0,1422	0,1740	0,2458	0,3219	0,3740	0,4141	0,4365	0,4594
MP20-D	0,0000	0,1234	0,2474	0,3297	0,4307	0,4943	0,6078	0,7240	0,7979	0,8438	0,8807	0,9104
MP30-D	0,0000	0,1281	0,2547	0,3484	0,4755	0,5464	0,6823	0,8172	0,9000	0,9589	1,0042	1,0359

Error! No text of specified style in document.

MP50-D	0,0000	0,1542	0,2938	0,3896	0,5021	0,5672	0,6847	0,8208	0,9229	0,9880	1,0427	1,0849
SP10-D	0,0000	0,1193	0,2484	0,3578	0,4583	0,5443	0,6880	0,8266	0,9208	0,9839	1,0359	1,0688
SP20-D	0,0000	0,1281	0,2693	0,3635	0,4661	0,5354	0,6453	0,7781	0,8557	0,9005	0,9354	0,9562
SP30-D	0,0000	0,3469	0,5016	0,6594	0,8292	0,9224	1,0734	1,2161	1,2953	1,3458	1,3755	1,4042
SP50-D	0,0000	0,1818	0,3625	0,4833	0,6323	0,7276	0,8990	1,0729	1,1729	1,2443	1,2953	1,3422

Tabela 133. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera: jednačina upijanja i koeficijent inicijalnog upijanja, 28 dana

	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R^2	R	Si
C-F	$0.002x + 0.0363$	0,97	0,98	0,002
MP10-F	$0.0034x + 0.1165$	0,91	0,95	
MP20-F	$0.0029x + 0.1281$	0,87	0,93	
MP30-F	$0.0028x + 0.1721$	0,81	0,90	
MP50-F	$0.0045x + 0.2009$	0,87	0,93	
SP10-F	$0.0038x + 0.1131$	0,93	0,96	
SP20-F	$0.0041x + 0.1254$	0,93	0,96	
SP30-F	$0.0023x + 0.0888$	0,91	0,95	
SP50-F	$0.0034x + 0.0987$	0,94	0,97	
C-K	$0.0008x + 0.0156$	0,97	0,98	0,0008
MP10-K	$0.0008x + 0.0278$	0,92	0,96	
MP20-K	$0.0008x + 0.0397$	0,87	0,93	
MP30-K	$0.0016x + 0.0703$	0,89	0,94	
MP50-K	$0.0024x + 0.1489$	0,79	0,89	
SP10-K	$0.0006x + 0.0155$	0,94	0,97	
SP20-K	$0.0005x + 0.0322$	0,84	0,92	
SP30-K	$0.0009x + 0.0551$	0,84	0,92	
SP50-K	$0.0053x + 0.2691$	0,81	0,90	
C-D	$0.0046x + 0.0487$	0,99	0,99	0,0046
MP10-D	$0.0031x + 0.0298$	0,99	0,99	0,0031
MP20-D	$0.0058x + 0.1583$	0,93	0,96	
MP30-D	$0.0067x + 0.1624$	0,94	0,97	
MP50-D	$0.0068x + 0.1807$	0,94	0,97	
SP10-D	$0.0007x + 0.1526$	0,95	0,98	0,0007
SP20-D	$0.0061x + 0.1749$	0,92	0,96	
SP30-D	$0.0082x + 0.3847$	0,85	0,92	
SP50-D	$0.0085x + 0.2326$	0,93	0,96	

Tabela 134. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera – sekundarno upijanje 1-8 dana (mm/ s^{0,5}), 28 dana

	1 dan	2 dana	3 dana	5 dana	6 dana	7 dana	8 dana
C-F	0,4302	0,4891	0,5036	0,5563	0,5568	0,5620	0,5755
MP10-F	0,6802	0,7219	0,7266	0,7490	0,7490	0,7490	0,7490
MP20-F	0,5974	0,6250	0,6557	0,6677	0,6677	0,6734	0,6734
MP30-F	0,5854	0,6031	0,6328	0,6490	0,6568	0,6661	0,6661
MP50-F	0,9187	0,9755	1,0083	1,0135	1,0172	1,0172	1,0172
SP10-F	0.7651	0.8182	0.8266	0.8266	0.8266	0.8266	0.8266
SP20-F	0.8099	0.8344	0.8401	0.8401	0.8401	0.8401	0.8401
SP30-F	0.4807	0.4807	0.4807	0.4807	0.4807	0.4807	0.4807
SP50-F	0.7651	0.7651	0.7651	0.7651	0.7651	0.7651	0.7651
C-K	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792
MP10-K	0,1479	0,1479	0,1479	0,1479	0,1479	0,1479	0,1479
MP20-K	0,1635	0,1635	0,1635	0,1635	0,1635	0,1635	0,1635
MP30-K	0,3344	0,3464	0,3625	0,3625	0,3625	0,3625	0,3625
MP50-K	0,5094	0,5193	0,5318	0,5318	0,5318	0,5318	0,5318
SP10-K	0.1240	0.1240	0.1240	0.1240	0.1240	0.1240	0.1240
SP20-K	0.1182	0.1182	0.1182	0.1182	0.1182	0.1182	0.1182
SP30-K	0.2042	0.2042	0.2042	0.2042	0.2042	0.2042	0.2042
SP50-K	1.0094	1.0229	1.0229	1.0229	1.0229	1.0229	1.0229
C-D	1,2005	1,3568	1,3568	1,3568	1,3568	1,3568	1,3568
MP10-D	0,6396	0,6812	0,6812	0,6812	0,6812	0,6812	0,6812
MP20-D	1,1089	1,1620	1,1792	1,2104	1,2104	1,2104	1,2104
MP30-D	1,2594	1,2818	1,3026	1,3214	1,3214	1,3214	1,3214
MP50-D	1,3193	1,3443	1,3740	1,4276	1,4276	1,4276	1,4276
SP10-D	1.3224	1.3224	1.3224	1.3224	1.3224	1.3224	1.3224
SP20-D	1.0802	1.0802	1.0802	1.0802	1.0802	1.0802	1.0802
SP30-D	1.5328	1.5328	1.5328	1.5328	1.5328	1.5328	1.5328

SP50-D 1.5833 1.5917 1.5917 1.5917 1.5917 1.5917 1.5917

Tabela 135. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera: jednačina upijanja i koeficijent sekundarnog upijanja, 28 dana

	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R ²	R	Ss
C-F	$y = 0.0003x + 0.3701$	0,95	0,98	0,0003
MP10-F	$y = 0.0001x + 0.6612$	0,84	0,92	
MP20-F	$y = 0.0001x + 0.5686$	0,88	0,94	
MP30-F	$y = 0.0002x + 0.5429$	0,97	0,98	0,0002
MP50-F	$y = 0.0002x + 0.8984$	0,76	0,87	
SP10-F	$y = 0.00005x + 0.7652$	0.55	0.74	
SP20-F	$y = 0.00005x + 0.809$	0.59	0.77	
SP30-F	$y = 0.4807$	/	/	
SP50-F	$y = 0.7651$	/	/	
<hr/>				
C-K	$y = 0.1792$	0	0,00	
MP10-K	$y = 1479$	0	0,00	
MP20-K	$y = 1635$	0	0,00	
MP30-K	$y = 0.00005x + 0.3269$	0,73	0,85	
MP50-K	$y = 0.00004x + 0.5037$	0,73	0,85	
SP10-K	$y = 0.1240$	/	/	
SP20-K	$y = 0.1182$	/	/	
SP30-K	$y = 0.2042$	/	/	
SP50-K	$y = 0.00005x + 1.0105$	0.46	0.68	
<hr/>				
C-D	$y = 0.0002x + 1.2137$	0,46	0,68	
MP10-D	$y = 0.00005x + 0.6431$	0,46	0,68	
MP20-D	$y = 0.0002x + 1.076$	0,86	0,93	
MP30-D	$y = 0.0001x + 1.2335$	0,89	0,94	
MP50-D	$y = 0.0002x + 1.2577$	0,93	0,96	
SP10-D	$y = 1.3224$	/	/	
SP20-D	$y = 1.0802$	/	/	

Error! No text of specified style in document.

SP30-D	$y = 1.5328$	/	/
SP50-D	$y = 0.00005x + 1.584$	0.46	0.68

Tabela 136. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera – inicijalno upijanje do 6h ($\text{mm}/\text{s}^{0,5}$), 90 dana

	0	1min	5min	10min	20min	30min	1h	2h	3h	4h	5h	6h
C-F	0,0000	0,0156	0,0172	0,0182	0,0193	0,0208	0,0219	0,0219	0,0219	0,0219	0,0219	0,0219
MP10-F	0,0000	0,0156	0,0177	0,0198	0,0245	0,0255	0,0292	0,0313	0,0318	0,0318	0,0318	0,0318
MP20-F	0,0000	0,0188	0,0276	0,0292	0,0370	0,0417	0,0453	0,0495	0,0521	0,0531	0,0531	0,0531
MP30-F	0,0000	0,0380	0,0516	0,0578	0,0635	0,0677	0,0776	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875
MP50-F	0,0000	0,0661	0,0922	0,1078	0,1214	0,1281	0,1484	0,1698	0,1734	0,1776	0,1812	0,1844
SP10-F	0,0000	0,0531	0,1031	0,1432	0,1891	0,2208	0,2807	0,3583	0,3953	0,4297	0,4500	0,4646
SP20-F	0,0000	0,0635	0,1260	0,1698	0,2255	0,2656	0,3318	0,4240	0,4703	0,5083	0,5354	0,5552
SP30-F	0,0000	0,1062	0,2167	0,3016	0,3979	0,4557	0,5521	0,6698	0,7359	0,7792	0,8141	0,8307
SP50-F	0,0000	0,1620	0,3292	0,4484	0,5875	0,6797	0,8161	1,0193	1,1068	1,1766	1,2307	1,2656
C-K	0,0000	0,0760	0,1500	0,1839	0,2214	0,2432	0,2901	0,3380	0,3677	0,3875	0,4068	0,4208
MP10-K	0,0000	0,0938	0,1839	0,2245	0,2677	0,2833	0,3344	0,3792	0,3995	0,4214	0,4313	0,4401
MP20-K	0,0000	0,0740	0,1328	0,1688	0,2073	0,2307	0,2661	0,3016	0,3234	0,3286	0,3443	0,3495
MP30-K	0,0000	0,0708	0,1292	0,1604	0,2057	0,2250	0,2693	0,2958	0,3141	0,3318	0,3385	0,3474
MP50-K	0,0000	0,0922	0,1719	0,2224	0,2714	0,3115	0,3708	0,4094	0,4297	0,4510	0,4609	0,4693
SP10-K	0,0000	0,0839	0,1755	0,2333	0,3115	0,3562	0,4380	0,5344	0,5932	0,6401	0,6750	0,7073

SP20-K	0,0000	0,1026	0,2177	0,3010	0,3995	0,4667	0,5641	0,6807	0,7432	0,7854	0,8208	0,8490
SP30-K	0,0000	0,1073	0,1917	0,2984	0,3865	0,4521	0,5646	0,6724	0,7370	0,7833	0,8135	0,8422
SP50-K	0,0000	0,0932	0,1964	0,3036	0,4099	0,5036	0,6786	0,8781	1,0000	1,0750	1,1359	1,1833
C-D	0,0000	0,0214	0,0323	0,0464	0,0526	0,0630	0,0797	0,0969	0,1078	0,1203	0,1276	0,1359
MP10-D	0,0000	0,0266	0,0266	0,0297	0,0406	0,0505	0,0620	0,0714	0,0724	0,0786	0,0786	0,0786
MP20-D	0,0000	0,0245	0,0438	0,0557	0,0661	0,0745	0,0870	0,1089	0,1161	0,1214	0,1276	0,1276
MP30-D	0,0000	0,0479	0,0729	0,0833	0,0932	0,1135	0,1302	0,1495	0,1630	0,1641	0,1698	0,1714
MP50-D	0,0000	0,0698	0,1000	0,1203	0,1380	0,1469	0,1760	0,1917	0,2042	0,2115	0,2151	0,2167
SP10-D	0,0000	0,0349	0,0562	0,0786	0,1068	0,1312	0,1953	0,2896	0,3594	0,4057	0,4490	0,4818
SP20-D	0,0000	0,0370	0,0719	0,0927	0,1250	0,1443	0,1964	0,2557	0,2922	0,3182	0,3370	0,3479
SP30-D	0,0000	0,0734	0,1328	0,1656	0,2063	0,2375	0,2833	0,3411	0,3771	0,3974	0,4115	0,4214
SP50-D	0,0000	0,1479	0,2396	0,2875	0,3359	0,3604	0,4125	0,4714	0,5089	0,5312	0,5500	0,5599

Tabela 137. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera: jednačina upijanja i koeficijent inicijalnog upijanja, 90 dana

	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R^2	R	Si
C-F	$0.00008x + 0.0136$	0.4	0.63	
MP10-F	$0.0002x + 0.0143$	0.69	0.83	
MP20-F	$0.0003x + 0.0202$	0.75	0.87	
MP30-F	$0.0004x + 0.0384$	0.69	0.83	
MP50-F	$0.001x + 0.0672$	0.78	0.88	
SP10-F	$0.0031x + 0.0581$	0.96	0.98	0,031
SP20-F	$0.0037x + 0.0698$	0.96	0.98	0,037
SP30-F	$0.0054x + 0.1419$	0.93	0.96	
SP50-F	$0.0082x + 0.2081$	0.93	0.96	
C-K	$0.0025x + 0.0957$	0.9	0.95	
MP10-K	$0.0025x + 0.1257$	0.84	0.92	
MP20-K	$0.0020x + 0.0957$	0.85	0.92	
MP30-K	$0.0020x + 0.0926$	0.85	0.92	
MP50-K	$0.0028x + 0.1255$	0.85	0.92	
SP10-K	$0.0045x + 0.1033$	0.95	0.98	
SP20-K	$0.0054x + 0.1419$	0.93	0.96	
SP30-K	$0.0055x + 0.1347$	0.93	0.96	
SP50-K	$0.0081x + 0.0945$	0.97	0.98	
C-D	$0.0008x + 0.0188$	0.97	0.98	0,0046
MP10-D	$0.0005x + 0.0205$	0.87	0.93	
MP20-D	$0.0008x + 0.0286$	0.9	0.95	
MP30-D	$0.001x + 0.0496$	0.85	0.92	
MP50-D	$0.0012x + 0.0731$	0.81	0.90	
SP10-D	$0.0034x + 0.0011$	0.998	1.0	0,0034
SP20-D	$0.0024x + 0.0325$	0.98	0.99	0,0024
SP30-D	$0.0026x + 0.0844$	0.92	0.96	

SP50-D 0.0031x + 0.1651 0.85 0.92

Tabela 138. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera – sekundarno upijanje 1-8 dana (mm/ s^{0,5}), 90 dana

	1 dan	2 dana	3 dana	5 dana	6 dana	7 dana	8 dana
C-F	0.0219	0.0219	0.0219	0.0219	0.0219	0.0219	0.0219
MP10-F	0.0318	0.0318	0.0318	0.0318	0.0318	0.0318	0.0318
MP20-F	0.0531	0.0531	0.0531	0.0531	0.0531	0.0531	0.0531
MP30-F	0.0875	0.0875	0.0875	0.0875	0.0875	0.0875	0.0875
MP50-F	0.1844	0.1844	0.1844	0.1844	0.1844	0.1844	0.1844
SP10-F	0.6161	0.7167	0.7339	0.7365	0.7365	0.7365	0.7365
SP20-F	0.7109	0.8099	0.8099	0.8099	0.8099	0.8099	0.8099
SP30-F	0.9844	1.0328	1.0760	1.0833	1.0833	1.0833	1.0833
SP50-F	1.6214	1.6750	1.7167	1.7167	1.7167	1.7167	1.7167
C-K	0.5422	0.5964	0.6182	0.6182	0.6182	0.6182	0.6182
MP10-K	0.4974	0.5161	0.5161	0.5161	0.5161	0.5161	0.5161
MP20-K	0.3896	0.4036	0.4036	0.4036	0.4036	0.4036	0.4036
MP30-K	0.3823	0.3896	0.3896	0.3896	0.3896	0.3896	0.3896
MP50-K	0.5250	0.5406	0.5427	0.5427	0.5427	0.5427	0.5427
SP10-K	0.9260	1.0542	1.1135	1.1604	1.1630	1.1630	1.1630
SP20-K	1.0031	1.0797	1.1458	1.1786	1.1807	1.1807	1.1807
SP30-K	0.9729	1.0365	1.0594	1.0948	1.0948	1.0948	1.0948
SP50-K	1.4458	1.5500	1.6026	1.6526	1.6526	1.6526	1.6526
C-D	0.1776	0.1776	0.1776	0.1776	0.1776	0.1776	0.1776
MP10-D	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786
MP20-D	0.1276	0.1276	0.1276	0.1276	0.1276	0.1276	0.1276
MP30-D	0.1714	0.1714	0.1714	0.1714	0.1714	0.1714	0.1714
MP50-D	0.2167	0.2167	0.2167	0.2167	0.2167	0.2167	0.2167
SP10-D	0.7599	0.7880	0.7880	0.7880	0.7880	0.7880	0.7880
SP20-D	0.4375	0.4375	0.4375	0.4375	0.4375	0.4375	0.4375

SP30-D	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
SP50-D	0.6333	0.6333	0.6333	0.6333	0.6333	0.6333	0.6333

Tabela 139. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode maltera: jednačina upijanja i koeficijent sekundarnog upijanja, 90 dana

	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R ²	R	Ss
C-F	$y = 0.0219$	/	/	
MP10-F	$y = 0.0318$	/	/	
MP20-F	$y = 0.0531$	/	/	
MP30-F	$y = 0.0875$	/	/	
MP50-F	$y = 0.1844$	/	/	
SP10-F	$y = 0.0002x + 0.6133$	0.58	0.76	
SP20-F	$y = 0.0001x + 0.7193$	0.46	0.68	
SP30-F	$y = 0.0002x + 0.9593$	0.77	0.88	
SP50-F	$y = 0.0002x + 1.6041$	0.7	0.84	
C-K	$y = 0.0001x + 0.5353$	0.64	0.80	
MP10-K	$y = 0.00002x + 0.499$	0.46	0.68	
MP20-K	$y = 0.00002x + 0.3908$	0.46	0.68	
MP30-K	$y = 0.00001x + 0.3829$	0.46	0.68	
MP50-K	$y = 0.00002x + 0.5252$	0.54	0.73	
SP10-K	$y = 0.0004x + 0.8614$	0.83	0.91	
SP20-K	$y = 0.0003x + 0.9436$	0.85	0.92	
SP30-K	$y = 0.0002x + 0.9345$	0.86	0.93	
SP50-K	$y = 0.0004x + 1.3822$	0.85	0.92	
C-D	$y = 0.1776$	/	/	
MP10-D	$y = 0.0786$	/	/	
MP20-D	$y = 0.1276$	/	/	
MP30-D	$y = 0.1714$	/	/	
MP50-D	$y = 0.2167$	/	/	
SP10-D	$y = 0.00004x + 0.7623$	0.46	0.68	

Error! No text of specified style in document.

SP20-D	y =0.4375	/	/
SP30-D	y =0.5	/	/
SP50-D	y =0.6333	/	/

PRILOG 10

Određivanje konzistencije svježeg betona

Tabela 140. Konzistencija betona

Oznaka betona	Vrsta hem. dodatka	Količina hemijskog dodatka [%m _{vez}]	Slijeganje [cm]	Konzistencija
A0	Sika VSC 3077	0,6	22	Tečna
B0	Sika VSC 3077	0,6	21	
C0	Sika VSC 3077	0,6	20	
D0	Sika VSC 3077	0,6	14,5	
A50	Sika VSC 3077	0,5	22	
B50	Sika VSC 3077	0,4	18	
C50	Sika VSC 3077	0,4	13,5	
D50	Sika VSC 3077	0,5	15,5	
A100	Sika VSC 3077	0,4	22	
B100	Sika VSC 3077	0,4	21	
C100	Sika VSC 3077	0,4	11	
D100	Sika VSC 3077	0,5	20,5	

PRILOG 11

Određivanje zapreminske mase svježeg betona

Zapreminska masa svježeg betona je izračunata prema izrazu:

$$\gamma_{b,sv} = \frac{m_{k,pun} - m_k}{V_k} = \frac{m_{b,sv}}{V_k}$$

gde su:

- m_k – masa praznog kalupa
- $m_{k,pun}$ – masa punog kalupa
- $m_{b,sv}$ – masa svježeg betona
- V_k – Zapremina kalupa (kalup oblika kocke ivice 15cm).

A. Beton sa riječnim agregatom

Tabela 141. Određivanje zapreminske mase svježeg betona A0

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m ³]	
A0/1	9620	17130	7510	2225	
A0/2	9585	17000	7415	2197	2212
A0/3	9625	17100	7475	2215	

Tabela 142. Određivanje zapreminske mase svježeg betona B0

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m ³]	
B0/1	9620	17305	7685	2277	
B0/2	9585	17290	7705	2283	2284
B0/3	9625	17360	7735	2292	

Tabela 143. Određivanje zapreminske mase svježeg betona C0

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m ³]	
C0/1	9620	17380	7760	2299	
C0/2	9585	17305	7720	2287	2291
C0/3	9625	17345	7720	2287	

Tabela 144. Određivanje zapreminske mase svežeg betona D0

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$v_{b,sv}$ [kg/m ³]	
D0/1	9620	17315	7695	2280	
D0/2	9585	17300	7715	2286	2280
D0/3	9625	17295	7670	2273	

B. Beton sa mješavinom riječnog i recikliranog agregata

Tabela 145. Određivanje zapreminske mase svežeg betona A50

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$v_{b,sv}$ [kg/m ³]	
A50/1	9620	17320	7700	2281	
A50/2	9585	17290	7705	2283	2283
A50/3	9625	17340	7715	2286	

Tabela 146. Određivanje zapreminske mase svežeg betona B50

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$v_{b,sv}$ [kg/m ³]	
B50/1	9620	17310	7690	2278	
B50/2	9585	17290	7705	2283	2275
B50/3	9625	17270	7645	2265	

Tabela 147. Određivanje zapreminske mase svežeg betona C50

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$v_{b,sv}$ [kg/m ³]	
C50/1	9620	17255	7635	2262	
C50/2	9585	17240	7655	2268	2268
C50/3	9625	17300	7675	2274	

Tabela 148. Određivanje zapreminske mase svežeg betona D50

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$v_{b,sv}$ [kg/m ³]	
D50/1	9620	17250	7630	2261	
D50/2	9585	17175	7590	2249	2253
D50/3	9625	17215	7590	2249	

C. Beton sa recikliranim agregatom

Tabela 149. Određivanje zapreminske mase svežeg betona A100

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m ³]	
A100/1	9620	17240	7620	2258	
A100/2	9585	17235	7650	2267	2261
A100/3	9625	17250	7625	2259	

Tabela 150. Određivanje zapreminske mase svežeg betona B100

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m ³]	
B100/1	9620	17225	7605	2253	
B100/2	9585	17120	7535	2233	2237
B100/3	9625	17135	7510	2225	

Tabela 151. Određivanje zapreminske mase svežeg betona C100

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m ³]	
C100/1	9620	17175	7555	2238	
C100/2	9585	17120	7535	2233	2236
C100/3	9625	17170	7545	2236	

Tabela 152. Određivanje zapreminske mase svežeg betona D100

Uzorak	m_k [g]	$m_{k,pun}$ [g]	$m_{b,sv}$ [g]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m ³]	
D100/1	9620	17100	7480	2216	
D100/2	9585	17115	7530	2231	2228
D100/3	9625	17180	7555	2238	

PRILOG 12

Određivanje čvrstoće pri pritisku betona

Čvrstoća pri pritisku je sračunata prema izrazu:

$$f_c = \frac{P}{A} \cdot 10^3$$

gdje su:

- f_c – čvrstoća pri pritisku (MPa)
- P – sila loma (kN)
- A – površina betonskog tijela na koje djeluje sila (mm^2)

A. Beton sa riječnim agregatom

Tabela 153. Čvrstoća pri pritisku betona A0

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	γ (kg/m^3)	γ_{sr} (kg/m^3)	P (kN)	f_c (MPa)	$f_{c,\text{sr}}$ (MPa)
	A0/1	149,8	150,9	149,8	7925	2340		1256,1	55,58	
28	A0/2	149,8	151,3	150,5	7900	2316	2329	1218,7	53,77	55,19
	A0/3	149,9	151,4	149,6	7920	2332		1276,1	56,23	
	A0/4	149,7	153,3	150,3	7970	2311		1280,0	55,77	
60	A0/5	150,0	152,7	150,0	7960	2317	2317	1275,0	55,66	55,94
	A0/6	149,9	150,6	150,2	7870	2322		1272,8	56,40	
	A0/7	149,9	151,5	149,9	7920	2328		1262,0	55,59	
90	A0/8	149,9	151,3	149,9	7900	2324	2328	1304,1	57,50	56,27
	A0/9	149,7	150,7	150,3	7900	2331		1256,4	55,71	

Tabela 154. Čvrstoća pri pritisku betona B0

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	γ (kg/m^3)	γ_{sr} (kg/m^3)	P (kN)	f_c (MPa)	$f_{c,\text{sr}}$ (MPa)
28	B0/1	149,8	151,1	149,2	7982	2353		1137,9	50,29	
	B0/2	149,9	149,6	150,1	7896	2346	2347	1140,4	50,86	50,59

Error! No text of specified style in document.

	B0/3	149,1	150,9	150,1	7914	2344		1139,0	50,62	
	B0/4	150,3	151,2	149,6	7840	2307		1244	54,77	
60	B0/5	150,5	151,1	150,3	7767	2272	2289	1189	52,29	54,21
	B0/6	149,9	149,9	149,9	7708	2288		1249	55,56	
	B0/7	150,2	150,7	150,6	7710	2262		1250,0	55,24	
90	B0/8	150,7	150,2	150,2	7760	2282	2281	1241,6	54,85	55,49
	B0/9	149,8	149,9	150,0	7740	2298		1265,8	56,37	

Tabela 155. Čvrstoća pri pritisku betona C0

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	γ (kg/m ³)	γ_{sr} (kg/m ³)	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
	C0/1	150,30	150,18	149,75	7800	2308		1177,2	52,15	
28	C0/2	150,89	149,9	149,81	7720	2278	2304	1097,3	48,51	51,69
	C0/3	149,96	150,0	150,10	7850	2325		1223,8	54,41	
	C0/4	150,8	151,1	150,1	7820	2287		1203,8	52,85	
60	C0/5	149,9	152,2	149,9	7800	2281	2286	1220,0	53,47	53,64
	C0/6	150,6	150,6	150,0	7790	2290		1238,2	54,59	
	C0/7	150,0	151,5	150,1	7685	2253		1236,3	54,42	
90	C0/8	150,2	151,5	150,1	7750	2270	2265	1211,1	53,24	54,61
	C0/9	150,1	150,0	150,4	7695	2273		1264,7	56,18	

Tabela 156. Čvrstoća pri pritisku betona D0

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	γ (kg/m ³)	γ_{sr} (kg/m ³)	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
	D0/1	149,66	150,41	150,00	7863	2328,71		1086,7	48,28	
28	D0/2	150,10	151,36	149,74	7791	2290,15	2306	1102,2	48,51	49,05
	D0/3	150,40	150,05	149,75	7765	2297,69		1136,6	50,36	
	D0/4	149,9	150,8	150,3	7740	2278		1262,0	55,83	
60	D0/5	149,6	150,2	151,5	7730	2271	2278	1179,9	52,51	54,86
	D0/6	149,9	150,6	149,9	7730	2285		1269,3	56,23	

Error! No text of specified style in document.

	D0/7	149,8	151,0	150,1	7750	2283		1363,1	60,25	
90	D0/8	150,2	150,4	150,0	7730	2281	2281	1301,0	57,59	58,41
	D0/9	149,9	150,1	149,9	7690	2279		1291,6	57,40	

B. Beton sa riječnim sitnim i kombinacijom riječnog i agregata od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 157. Čvrstoća pri pritisku betona A50

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	γ (kg/m ³)	γ_{sr} (kg/m ³)	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
	A50/1	150	151,4	149,8	7700	2263,40		1033,6	45,51	
28	A50/2	149,9	150,65	149,8	7745	2289,49	2265	1106,2	48,98	46,30
	A50/3	149,78	151,55	150,62	7667	2242,50		1008,2	44,42	
	A50/4	149,7	151,2	150	7654	2254		1045,8	46,20	
60	A50/5	150	151,5	149,8	7750	2277	2260	1129,8	49,72	48,25
	A50/6	150,15	151	150,5	7670	2248		1106,8	48,82	
	A50/7	150,0	152,3	150,4	7740	2253		1363,1	60,25	
90	A50/8	150,1	150,6	150,0	7730	2279	2265	1301,0	57,59	50,55
	A50/9	150,5	150,8	150,2	7720	2263		1291,6	57,40	

Tabela 158. Čvrstoća pri pritisku betona B50

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	γ (kg/m ³)	γ_{sr} (kg/m ³)	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
	B50/1	149,78	150,38	149,96	7685	2275,2		1068,3	47,43	
28	B50/2	150	150,05	149,63	7625	2264,1	2270	1004,6	44,63	45,52
	B50/3	149,75	150,15	150,8	7700	2270,9		1000,2	44,48	
	B50/4	149,8	150,15	150,05	7680	2276		1161,5	51,64	
60	B50/5	150,9	150,05	149,86	7720	2275	2272	1224,4	54,08	52,60
	B50/6	150,28	151,45	149,97	7736	2266		1185,3	52,08	
	B50/7	150,28	150,16	150	7713	2279		1195	52,97	
90	B50/8	150,07	150,04	151,3	7680	2254	2268	1230	54,63	54,39

Error! No text of specified style in document.

B50/9 150,63 149,85 150,19 7700 2271 1254 55,57

Tabela 159. Čvrstoća pri pritisku betona C50

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	$\gamma(\text{kg/m}^3)$	$\gamma_{\text{sr}}(\text{kg/m}^3)$	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
	C50/1	150,5	151,8	151	7650	2217,6		1103,5	48,30	
28	C50/2	149,12	150,17	150,16	7670	2280,9	2254	1071	47,83	48,67
	C50/3	150,34	150,05	150,13	7670	2264,7		1125,2	49,88	
	C50/4	149,92	149,96	149,92	7658	2272		1185,1	52,71	
60	C50/5	149,82	150,44	150,05	7700	2277	2274	1228,2	54,49	53,60
	C50/6	149,82	150,44	150,05	7700	2277		1228,2	54,49	
	C50/7	150,53	150,26	150,92	7660	2244		1239	54,78	
90	C50/8	150	150	150	7680	2276	2263	1308,9	58,17	56,82
	C50/9	149,87	150,34	150	7670	2269		1295,6	57,50	

Tabela 160. Čvrstoća pri pritisku betona D50

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	$\gamma(\text{kg/m}^3)$	$\gamma_{\text{sr}}(\text{kg/m}^3)$	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
	D50/1	150	150,5	149,5	7585	2247		1064,5	47,15	
28	D50/2	150	150	150	7600	2252	2244	1010	44,89	44,60
	D50/3	150,8	150,8	150,3	7630	2232		949,6	41,76	
	D50/4	149,8	150,7	150	7593	2242		1179,9	52,27	
60	D50/5	150	150,82	149,9	7600	2241	2244	1229,5	54,35	51,17
	D50/6	149,8	150,2	150	7587	2248		1190	52,89	
	D50/7	149,8	150,125	150,46	7600	2246		1320	58,70	
90	D50/8	149,8	150,87	149,92	7625	2250	2252	1272,3	56,30	57,12
	D50/9	149,9	150,74	149,86	7655	2261		1273,7	56,37	

C. Beton sa riječnim sitnim i agregatom od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 161. Čvrstoća pri pritisku betona A100

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	$\gamma(\text{kg/m}^3)$	$\gamma_{\text{sr}}(\text{kg/m}^3)$	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
28	A100/1	149,8	151,4	150,65	7690	2250,7		1005,4	44,33	
	A100/2	150,24	151,73	149,7	7655	2243,2	2249	1087,3	47,70	45,59
	A100/3	150,1	151,3	149,7	7655	2251,7		1016	44,74	
60	A100/4	149,81	150,57	150,06	7630	2254		1119,2	49,62	
	A100/5	150,05	149,73	150,1	7560	2242	2249	1142,3	50,84	49,85
	A100/6	149,9	150,9	149,5	7610	2250		1110,6	49,10	
	A100/7	149,88	150,85	149,9	7660	2260		1182,4	52,30	
90	A100/8	149,75	151	150,07	7640	2251	2255	1168,5	51,68	52,26
	A100/9	150,13	150,86	149,93	7650	2253		1196,2	52,82	

Tabela 162. Čvrstoća pri pritisku betona B100

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	$\gamma(\text{kg/m}^3)$	$\gamma_{\text{sr}}(\text{kg/m}^3)$	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
28	B100/1	150,6	150,5	149,76	7580	2233		1098,1	48,45	
	B100/2	150,45	149,68	150,6	7560	2229	2238	1049,1	46,59	47,97
	B100/3	149,85	150,56	149,96	7620	2252		1102,4	48,86	
60	B100/4	149,82	149,86	149,91	7548	2243		1158,5	51,60	
	B100/5	149,82	150,9	150	7600	2241	2243	1137,7	50,32	51,33
	B100/6	149,86	150,8	149,76	7598	2245		1176,9	52,08	
	B100/7	150	149,7	150	7545	2240		1233,3	54,92	
90	B100/8	149,87	150,57	150,14	7560	2231	2236	1218,4	53,99	54,46
	B100/9	149,87	150,57	150,14	7560	2231		1218,4	53,99	

Tabela 163. Čvrstoća pri pritisku betona C100

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	$\gamma(\text{kg/m}^3)$	$\gamma_{\text{sr}}(\text{kg/m}^3)$	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
28	C100/1	150	150,86	149,8	7610	2245	2245	1172,6	51,82	49,61

Error! No text of specified style in document.

	C100/2	149,72	149,87	149,9	7580	2254		1032	45,99	
	C100/3	149,9	150,87	149,62	7570	2237		1153,9	51,02	
	C100/4	149,9	150,8	149,6	7570	2239		1181,3	52,26	
60	C100/5	149,87	151,8	150,4	7556	2208	2227	1182,6	51,98	53,73
	C100/6	150,05	150,8	149,85	7580	2236		1288,3	56,94	
	C100/7	149,92	150,56	150,22	7565	2231		1352,8	59,93	
90	C100/8	150,1	151,27	150	7580	2226	2226	1317,8	58,04	58,46
	C100/9	149,777	151,37	150	7550	2220		1300,2	57,35	

Tabela 164. Čvrstoća pri pritisku betona D100

Starost [dani]	Oznaka uzorka	Dužina (mm)	Širina (mm)	Visina (mm)	Masa (g)	γ (kg/m ³)	γ_{sr} (kg/m ³)	P (kN)	fc (MPa)	fc,sr (MPa)
	D100/1	150,8	150,4	149,5	7400	2182		943,1	41,58	
28	D100/2	149,6	150,4	150	7300	2163	2179	937,2	41,65	42,20
	D100/3	149,9	151,5	149,7	7450	2191		984,9	43,37	
	D100/4	149,8	151,5	149,9	7525	2212		1139	50,19	
60	D100/5	150,25	151	149,8	7440	2189	2194	1161,5	51,20	50,84
	D100/6	150,1	151,5	150,25	7450	2180		1163,1	51,15	
	D100/7	149,9	151,15	150,1	7480	2199		1207,6	53,30	
90	D100/8	149,9	151,63	150	7460	2188	2195	1228,4	54,04	53,45
	D100/9	150,27	150,72	150	7470	2199		1200,8	53,02	

PRILOG 13

Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona

Dinamički modula elastičnosti je određen mjerenjem vremena potrebnog za prolazak ultrazvuka kroz betonski uzorak i računanjem brzine ultrazvuka. Veza između dinamičkog modula elastičnosti i brzine ultrazvuka data je izrazom:

$$E_d = v^2 \cdot \gamma_b$$

gdje su:

- E_d – dinamički modul elastičnosti
- v – brzina ultrazvuka
- γ_b – zapreminska masa betona

A. Beton sa riječnim agregatom

Tabela 165. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona A0

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
A0-1	101,71	100,15	406,5	9270,00	90,40	4140,71	2238,74	4496,68	45,27	
A0-2	101,06	99,89	404,7	9270,00	89,10	4085,40	2269,06	4542,09	46,81	46,7
A0-3	101,34	100,3	402	9260,00	88,10	4086,09	2266,23	4563,00	47,18	

Tabela 166. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona B0

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
B0-1	101,38	101,6	403,7	9320,00	89,00	4158,19	2241,36	4535,96	46,12	
B0-2	101,92	100,16	402,8	9210,00	89,00	4111,91	2239,84	4525,84	45,88	45,6
B0-3	100,32	100,44	402	9105,00	90,00	4050,61	2247,81	4466,67	44,85	

Tabela 167. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona C0

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
---------------	---------	---------	--------	-------	--------	----------------------	------------------------	---------	----------------------	-------------------------

Error! No text of specified style in document.

C0-1	101,71	100,15	406,5	9270,00	90,40	4140,71	2238,74	4496,68	45,27	
C0-2	101,06	99,89	404,7	9270,00	89,10	4085,40	2269,06	4542,09	46,81	46,4
C0-3	101,34	100,3	402	9260,00	88,10	4086,09	2266,23	4563,00	47,18	

Tabela 168. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona D0

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
D0-1	100,96	100,11	400,5	9110,00	89,00	4047,90	2250,55	4500,00	45,57	
D0-2	100,96	100,47	399,5	9180,00	88,40	4052,31	2265,38	4519,23	46,27	45,6
D0-3	100,78	100,02	399,7	9080,00	89,40	4028,98	2253,67	4470,92	45,05	

B. Beton sa riječnim sitnim i kombinacijom riječnog i agregata od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 169. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona A50

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
A50-1	100,97	100,32	404	9130,00	91,70	4092,24	2231,05	4405,67	43,30	
A50-2	99,95	100,37	403	8960,00	92,10	4042,89	2216,24	4375,68	42,43	42,3
A50-3	102,71	100,63	402,5	9060	92,40	4160,12	2177,82	4356,06	41,32	

Tabela 170. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona B50

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
B50-1	101,56	100,61	400,1	9070	89,30	4088,20	2218,58	4480,40	44,54	
B50-2	101,91	100,35	401,4	9124	90,00	4104,98	2222,66	4460,00	44,21	44,1
B50-3	100,29	100,03	402	9057	91,40	4032,87	2245,80	4398,25	43,44	

Tabela 171. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona C50

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
---------------	---------	---------	--------	-------	--------	----------------------	------------------------	---------	----------------------	-------------------------

Error! No text of specified style in document.

C50-1	100,55	99,9	404	9055	89,60	4058,16	2231,31	4508,93	45,36	
C50-2	101,81	100,4	403,8	9160	91,20	4127,53	2219,24	4427,63	43,51	44,2
C50-3	101,39	100,32	404,2	9165	91,20	4111,30	2229,22	4432,02	43,79	

Tabela 172. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona D50

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
D50-1	101,67	99,87	402,2	8965	91,40	4083,85	2195,23	4400,44	42,51	
D50-2	101,81	100,41	402,8	9070	92,20	4117,72	2202,67	4368,76	42,04	41,8
D50-3	101,32	100,83	401	9030	93,00	4096,65	2204,24	4311,83	40,98	

C. Beton sa riječnim sitnim i agregatom od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 173. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona A100

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
A100-1	100	99,94	401,5	8980	93,30	4012,59	2237,96	4303,32	41,44	
A100-2	101,27	100,29	399	9024	92,30	4052,39	2226,83	4322,86	41,61	41,1
A100-3	100,94	100,82	402,2	8949	93,90	4093,10	2186,36	4283,28	40,11	

Tabela 174. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona B100

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
B100-1	100,39	100,41	403,2	8928	93,40	4064,32	2196,68	4316,92	40,94	
B100-2	101	100,1	403	8896	93,30	4074,37	2183,40	4319,40	40,74	40,8
B100-3	101,85	100,37	403,3	8995	93,50	4122,81	2181,77	4313,37	40,59	

Tabela 175. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona C100

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
C100-1	101,68	100,36	401,6	8868	92,30	4098,17	2163,89	4351,03	40,97	41,7

Error! No text of specified style in document.

C100-2	100,77	100,48	402,5	8890	91,70	4075,46	2181,35	4389,31	42,03
C100-3	101,24	99,83	402,5	8900	91,60	4067,98	2187,82	4394,10	42,24

Tabela 176. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona D100

Oznaka uzorka	b, (mm)	h, (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)	E _{d,sr} (GPa)
D100-1	100,35	98,77	403	8725	96,30	3994,36	2184,33	4184,84	38,25	
D100-2	101,91	100,48	402,1	8735	96,70	4117,47	2121,45	4158,22	36,68	37,5
D100-3	100,75	99,9	401,9	8690	96,20	4045,09	2148,28	4177,75	37,50	

PRILOG 14

Određivanje kapilarnog upijanja vode betona

Kapilarno upijanje vode je izračunato prema izrazu:

$$I = \frac{m_t}{a \cdot d}$$

gdje su:

- I – upijanje
- m_t – promjena mase uzorka u gramima, u određenom vremenskom intervalu
- a – izložena površina uzorka, u mm^2
- d – zapreminska masa vode, u g/mm^3

Tabela 177. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode betona – inicijalno upijanje do 6h ($\text{mm}/\text{s}^{0,5}$)

	0	1min	5min	10min	20min	30min	1h	2h	3h	4h	5h	6h
A0	0,0000	0,0602	0,1197	0,1551	0,1958	0,2225	0,2722	0,3249	0,3592	0,3882	0,4093	0,4266
B0	0,0000	0,0211	0,0347	0,0434	0,0520	0,0554	0,0713	0,0845	0,0939	0,1003	0,1071	0,1143
C0	0,0000	0,0276	0,0434	0,0525	0,0600	0,0683	0,0804	0,0936	0,1050	0,1125	0,1197	0,1272
D0	0,0000	0,0462	0,0708	0,0837	0,0946	0,1052	0,1204	0,1397	0,1529	0,1666	0,1723	0,1806

Error! No text of specified style in document.

A50	0,0000	0,0185	0,0298	0,0385	0,0487	0,0567	0,0695	0,0823	0,0937	0,0975	0,1058	0,1126
B50	0,0000	0,0212	0,0378	0,0465	0,0537	0,0602	0,0711	0,0870	0,1029	0,1105	0,1177	0,1233
C50	0,0000	0,0313	0,0453	0,0543	0,0626	0,0671	0,0781	0,0913	0,0984	0,1090	0,1128	0,1184
D50	0,0000	0,0420	0,0685	0,0806	0,0942	0,1037	0,1203	0,1438	0,1517	0,1657	0,1695	0,1740
A100	0,0000	0,0182	0,0384	0,0486	0,0615	0,0729	0,0969	0,1257	0,1497	0,1668	0,1831	0,1926
B100	0,0000	0,0277	0,0443	0,0515	0,0599	0,0656	0,0765	0,0894	0,1012	0,1072	0,1133	0,1197
C100	0,0000	0,0496	0,0720	0,0845	0,0970	0,1099	0,1296	0,1523	0,1652	0,1766	0,1823	0,1864
D100	0,0000	0,0402	0,0610	0,0743	0,0864	0,0970	0,1156	0,1338	0,1478	0,1561	0,1626	0,1687

Tabela 178. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode betona: jednačina upijanja i koeficijent inicijalnog upijanja

	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R^2	R	Si
A0	$y = 0.0027x + 0.0722$	0,94	0,97	
B0	$y = 0.0007x + 0.0207$	0,95	0,98	0,0007
C0	$y = 0.0007x + 0.0267$	0,93	0,96	
D0	$y = 0.0010x + 0.0455$	0,9	0,95	
A50	$y = 0.0007x + 0.0181$	0,95	0,98	0,0007
B50	$y = 0.0008x + 0.0295$	0,96	0,98	0,0008
C50	$y = 0.0007x + 0.0201$	0,95	0,98	0,0007
D50	$y = 0.0010x + 0.0445$	0,9	0,95	
A100	$y = 0.0013x + 0.0137$	0,99	0,99	0,0013
B100	$y = 0.0007x + 0.0272$	0,92	0,96	
C100	$y = 0.0011x + 0.0473$	0,9	0,95	
D100	$y = 0.001x + 0.0401$	0,91	0,95	

Tabela 179. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode betona – sekundarno upijanje 1-8 dana ($\text{mm}/\text{s}^{0,5}$)

	1 dan	2 dana	3 dana	5 dana	6 dana	7 dana	8 dana
A0	0,573791	0,644191	0,678067	0,743586	0,764669	0,776717	0,783866
B0	0,162572	0,192376	0,208598	0,230858	0,240661	0,248582	0,253107
C0	0,171026	0,19502	0,209913	0,225014	0,238228	0,244643	0,245397
D0	0,234349	0,258576	0,270569	0,28715	0,287527	0,287903	0,287903
A50	0,163194	0,190775	0,200598	0,207771	0,211174	0,211174	0,213815
B50	0,176697	0,197888	0,203943	0,208862	0,210755	0,211134	0,211134
C50	0,151995	0,158407	0,160666	0,160666	0,161422	0,161422	0,161422
D50	0,226607	0,24136	0,246653	0,246653	0,246653	0,246653	0,246653
A100	0,311496	0,371897	0,395831	0,42091	0,421671	0,422812	0,422812
B100	0,15687	0,172024	0,172024	0,172024	0,172024	0,172024	0,172024
C100	0,230405	0,237239	0,237618	0,237618	0,237618	0,237618	0,237618
D100	0,216022	0,224359	0,226255	0,226255	0,226255	0,226255	0,226255

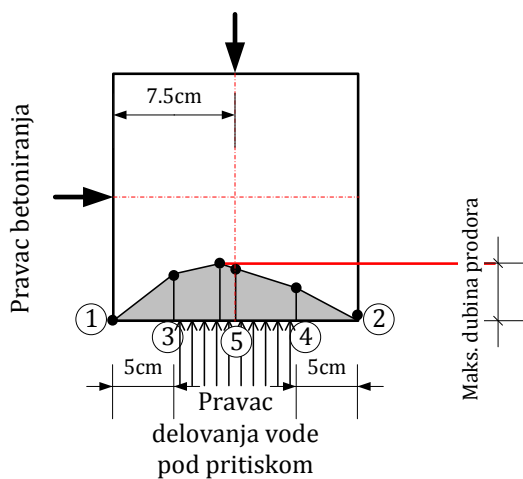
Tabela 180. Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode betona: jednačina upijanja i koeficijent sekundarnog upijanja

	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R^2	R	Ss
A0	$y = 0.0004x + 0.4722$	0,98	0,99	0,0003
B0	$y = 0.0002x + 0.1200$	0,99	0,99	
C0	$y = 0.0001x + 0.1347$	0,98	0,99	
D0	$y = 0.0001x + 0.2146$	0,89	0,94	
A50	$y = 0.0001x + 0.1497$	0,85	0,92	
B50	$y = 0.00006x + 0.1689$	0,81	0,90	
C50	$y = 0.00001x + 0.1507$	0,71	0,84	
D50	$y = 0.00003x + 0.2251$	0,63	0,79	
A100	$y = 0.0002x + 0.28$	0,84	0,92	

B100	$y = 0.00002x + 0.1582$	0,46	0,68
C100	$y = 0.00001x + 0.2308$	0,49	0,70
D100	$y = 0.00001x + 0.2157$	0,58	0,76

PRILOG 15

Određivanje upijanja vode betona pod pritiskom



Dispozicija ispitivanja prodora vode pod pritiskom

Tabela 181. Određivanje dubine prodora vode pod pritiskom

Oznaka uzorka	Masa prije ispitivanja [g]	Masa posle ispitivanja [g]	Pojedinačne dubine prodora vode [mm]					Najveća dubina prodora [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
A0	7874	7881	0	3	17	10	20	20
B0	7756	7759	5	12	16	14	17	17
C0	7713	7720	11	5	6	12	10	12
D0	7697	7702	0	10	19	9	8	19
A50	7682	7685	0	0	9	22	15	22
B50	7625	7636	0	0	5	11	18	18
C50	7469	7661	0	0	9	9	10	10
D50	7583	7597	0	15	6	10	10	15
A100	7570	7580	0	0	0	0	10	10
B100	7545	7552	0	0	5	6	5	6
C100	7503	7504	0	0	0	5	15	15
D100	7464	7648	0	0	3	2	8	8

PRILOG 16

Određivanje otpornosti betona na habanje

Kao indikator otpornosti betona na habanje, određena je širina otiska točka mašine za habanje na uzorcima oblika kvadra, dužine 150mm, dimenzija poprečnog presjeka 75mmx75mm. Širina otiska je izmjerena na tri mjesta i određena je srednja vrijednost za svaku vrstu betona.

A. Beton sa riječnim agregatom

Tabela 182. Određivanje otpornosti na habanje betona AO

Oznaka uzorka	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Δm (g)	Δm _{sr} (g)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d ₃ (mm)	d _{sr} (mm)	Klasa
A0-1	1646	1645.42	0.58		20.29	20.04	21.9		
A0-2	1587.34	1587.17	0.17	0,48	19.45	20.37	20.88	20,22	II
A0-3	1852.18	1851.49	0.69		18.51	20.98	19.55		

Tabela 183. Određivanje otpornosti na habanje betona BO

Oznaka uzorka	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Δm (g)	Δm _{sr} (g)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d ₃ (mm)	d _{sr} (mm)	Klasa
B0-1	1738.78	1737.63	1.15		19.8	20.49	20.47		
B0-2	1756.88	1756.16	0.72	0,883	18.35	20.68	22.32	20,52	II
B0-3	1775.8	1775.02	0.78		21.4	20.84	20.33		

Tabela 184. Određivanje otpornosti na habanje betona CO

Oznaka uzorka	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Δm (g)	Δm _{sr} (g)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d ₃ (mm)	d _{sr} (mm)	Klasa
C0-1	1812.94	1812.46	0.48		20.67	20.11	19.56		
C0-2	1688	1687.5	0.5	0,48	21.4	20.8	20.65	20,54	II
C0-3	1795.97	1795.51	0.46		21.82	20.41	19.47		

Tabela 185. Određivanje otpornosti na habanje betona D0

Oznaka uzorka	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Δm (g)	Δm _{sr} (g)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d ₃ (mm)	d _{sr} (mm)	Klasa
D0-1	1607.34	1606.11	1.23		21.18	21.93	22.89		
D0-2	1837.26	1836.41	0.85	0,953	22.27	20.68	20.35	21.80	II
D0-3	1907.25	1906.47	0.78		22.58	22.4	21.9		

B. Beton sa riječnim sitnim i kombinacijom riječnog i agregata od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 186. Određivanje otpornosti na habanje betona A50

Oznaka uzorka	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Δm (g)	Δm _{sr} (g)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d ₃ (mm)	d _{sr} (mm)	Klasa
A50-1	1618.94	1618.15	0.79		22	21.47	20.49		
A50-2	1686.12	1685.29	0.83	0,76	20.08	21.26	21.49	20,75	II
A50-3	1519.75	1519.09	0.66		21.59	19.61	18.75		

Tabela 187. Određivanje otpornosti na habanje betona B50

Oznaka uzorka	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Δm (g)	Δm _{sr} (g)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d ₃ (mm)	d _{sr} (mm)	Klasa
B50-1	1748.64	1747.55	1.09		22.22	21.38	21.38		
B50-2	1762.61	1761.8	0.81	0,937	22	20.84	20.4	21,29	II
B50-3	1714.91	1714	0.91		21.58	21.12	20.71		

Tabela 188. Određivanje otpornosti na habanje betona C50

Oznaka uzorka	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Δm (g)	Δm _{sr} (g)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d ₃ (mm)	d _{sr} (mm)	Klasa
C50-1	1900.26	1899.66	0.6		21.41	19.32	18.4		
C50-2	1658.25	1656.88	1.37	1,030	23.63	22.76	22.41	21,45	II
C50-3	1661.05	1659.93	1.12		21.96	21.62	21.5		

Tabela 189. Određivanje otpornosti na habanje betona D50

Oznaka uzorka	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	Δm_{sr} (g)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_{sr} (mm)	Klasa
D50-1	1705.48	1704.38	1.1		22.75	22.18	22.02		
D50-2	1698.7	1697.84	0.86	1,073	22.02	21.14	20.56	22,12	II
D50-3	1720.79	1719.53	1.26		22.19	22.45	23.8		

C. Beton sa riječnim sitnim i agregatom od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 190. Određivanje otpornosti na habanje betona A100

Oznaka uzorka	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	Δm_{sr} (g)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_{sr} (mm)	Klasa
A100-1	1503.12	1500.7	2.42		18.93	21.02	22.94		
A100-2	1491.74	1490.81	0.93	1,37	21.54	21.54	20.72	20,66	II
A100-3	1778.75	1777.99	0.76		19.47	19.65	20.17		

Tabela 191. Određivanje otpornosti na habanje betona B100

Oznaka uzorka	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	Δm_{sr} (g)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_{sr} (mm)	Klasa
B100-1	1560.25	1559.49	0.76		20.2	20.8	21.4		
B100-2	1616.69	1615.88	0.81	0,79	20.86	20.17	20.17	20,63	II
B100-3	1776.2	1775.4	0.8		21.37	20.5	20.22		

Tabela 192. Određivanje otpornosti na habanje betona C100

Oznaka uzorka	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	Δm_{sr} (g)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_{sr} (mm)	Klasa
C100-1	1676.2	1675.36	0.84		20.19	20.68	21.27		
C100-2	1658.3	1657.62	0.68	0,81	21.95	20.92	19.71	20,85	II
C100-3	1600.16	1599.25	0.91		20.24	21.04	21.67		

Tabela 193. Određivanje otpornosti na habanje betona D100

Oznaka uzorka	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	Δm_{sr} (g)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_{sr} (mm)	Klasa
D100-1	1610.65	1609.87	0.78		20.9	20.9	21.37		
D100-2	1805.24	1804.17	1.07	0,953	23.4	23.9	22.9	22,24	II
D100-3	1822.68	1821.67	1.01		22.75	22.13	21.88		

PRILOG 17

Određivanje skupljanja pri sušenju betona

A. Skupljanje betona sa riječnim agregatom

Tabela 194. Skupljanje betona A0

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
24.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
25.08.2018.	4	20	65	1	-0.036	-0.072
				2	-0.015	-0.030
				3	-0.013	-0.026
28.08.2018.	7	20	65	1	-0.073	-0.146
				2	-0.068	-0.136
				3	-0.003	0.006
05.09.2018.	14	20	65	1	-0.133	-0.266
				2	-0.111	-0.222
				3	-0.041	-0.082
12.09.2018.	21	20	65	1	-0.162	-0.324
				2	-0.168	-0.336
				3	-0.100	-0.200
19.09.2018.	28	20	65	1	-0.199	-0.398
				2	-0.213	-0.426
				3	-0.140	-0.280
26.09.2018.	35	20	65	1	-0.218	-0.436
				2	-0.228	-0.456
				3	-0.170	-0.340
03.10.2018.	42	20	65	1	-0.233	-0.466
				2	-0.236	-0.472
				3	-0.180	-0.360
10.10.2018.	49	20	65	1	-0.248	-0.496
				2	-0.244	-0.488
				3	-0.193	-0.386
17.10.2018.	56	20	65	1	-0.254	-0.508

				2	-0.260	-0.520
				3	-0.200	-0.400
24.10.2018.	63	20	65	1	-0.261	-0.522
				2	-0.268	-0.536
				3	-0.207	-0.414
31.10.2018.	70	20	65	1	-0.268	-0.536
				2	-0.273	-0.546
				3	-0.212	-0.424
07.11.2018.	77	20	65	1	-0.271	-0.542
				2	-0.276	-0.552
				3	-0.216	-0.432
14.11.2018.	84	20	65	1	-0.274	-0.548
				2	-0.278	-0.556
				3	-0.218	-0.436
21.11.2018.	91	20	65	1	-0.275	-0.550
				2	-0.278	-0.556
				3	-0.219	-0.438

Tabela 195. Skupljanje betona B0

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
12.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
13.08.2018.	4	20	65	1	-0.002	-0.004
				2	-0.011	-0.022
				3	-0.005	-0.010
16.08.2018.	7	20	65	1	-0.042	-0.084
				2	-0.018	-0.036
				3	-0.025	-0.050
23.08.2018.	14	20	65	1	0.002	0.004
				2	-0.038	-0.076
				3	-0.065	-0.130
30.08.2018.	21	20	65	1	-0.082	-0.164
				2	-0.061	-0.122
				3	-0.068	-0.136
06.09.2018.	28	20	65	1	-0.112	-0.224

				2	-0.088	-0.176
				3	-0.110	-0.220
13.09.2018.	35	20	65	1	-0.130	-0.260
				2	-0.123	-0.246
				3	-0.121	-0.242
20.09.2018.	42	20	65	1	-0.137	-0.274
				2	-0.108	-0.216
				3	-0.140	-0.280
27.09.2018.	49	20	65	1	-0.167	-0.334
				2	-0.148	-0.296
				3	-0.160	-0.320
04.10.2018.	56	20	65	1	-0.184	-0.368
				2	-0.162	-0.324
				3	-0.170	-0.340
11.10.2018.	63	20	65	1	-0.204	-0.408
				2	-0.182	-0.364
				3	-0.186	-0.372
18.10.2018.	70	20	65	1	-0.242	-0.484
				2	-0.215	-0.430
				3	-0.211	-0.422
25.10.2018.	77	20	65	1	-0.246	-0.492
				2	-0.232	-0.464
				3	-0.231	-0.462
01.11.2018.	84	20	65	1	-0.266	-0.532
				2	-0.254	-0.508
				3	-0.240	-0.480
08.11.2018.	91	20	65	1	-0.268	-0.536
				2	-0.264	-0.528
				3	-0.245	-0.490

Tabela 196. Skupljanje betona C0

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
				1	0.000	0.000
13.08.2018.	3	20	65	2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
14.08.2018.	4	20	65	1	-0.001	-0.002

				2	-0.001	-0.002
				3	-0.001	-0.002
17.08.2018.	7	20	65	1	-0.002	-0.004
				2	-0.003	-0.006
				3	-0.001	-0.002
24.08.2018.	14	20	65	1	-0.054	-0.108
				2	-0.017	-0.034
				3	-0.038	-0.076
31.08.2018.	21	20	65	1	-0.084	-0.168
				2	-0.035	-0.070
				3	-0.044	-0.088
07.09.2018.	28	20	65	1	-0.099	-0.198
				2	-0.060	-0.120
				3	-0.073	-0.146
14.09.2018.	35	20	65	1	-0.111	-0.222
				2	-0.070	-0.140
				3	-0.086	-0.172
21.09.2018.	42	20	65	1	-0.123	-0.246
				2	-0.097	-0.194
				3	-0.116	-0.232
28.09.2018.	49	20	65	1	-0.144	-0.288
				2	-0.106	-0.212
				3	-0.119	-0.238
05.10.2018.	56	20	65	1	-0.178	-0.356
				2	-0.122	-0.244
				3	-0.141	-0.282
12.10.2018.	63	20	65	1	-0.209	-0.418
				2	-0.148	-0.296
				3	-0.165	-0.330
19.10.2018.	70	20	65	1	-0.231	-0.462
				2	-0.173	-0.346
				3	-0.190	-0.380
26.10.2018.	77	20	65	1	-0.233	-0.466
				2	-0.195	-0.390
				3	-0.194	-0.388
02.11.2018.	84	20	65	1	-0.246	-0.492
				2	-0.222	-0.444
				3	-0.219	-0.438
09.11.2018.		20	65	1	-0.248	-0.496

2	-0.235	-0.470
3	-0.225	-0.450

Tabela 197. Skupljanje betona D0

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
16.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
17.08.2018.	4	20	65	1	-0.001	-0.002
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
20.08.2018.	7	20	65	1	-0.001	-0.002
				2	-0.001	-0.002
				3	-0.001	-0.002
27.08.2018.	14	20	65	1	-0.048	-0.096
				2	-0.047	-0.094
				3	-0.043	-0.086
03.09.2018.	21	20	65	1	-0.056	-0.112
				2	-0.058	-0.116
				3	-0.052	-0.104
10.09.2018.	28	20	65	1	-0.068	-0.136
				2	-0.080	-0.160
				3	-0.080	-0.160
17.09.2018.	35	20	65	1	-0.073	-0.146
				2	-0.109	-0.218
				3	-0.085	-0.170
24.09.2018.	42	20	65	1	-0.099	-0.198
				2	-0.135	-0.270
				3	-0.115	-0.230
01.10.2018.	49	20	65	1	-0.106	-0.212
				2	-0.150	-0.300
				3	-0.139	-0.278
08.10.2018.	56	20	65	1	-0.113	-0.226
				2	-0.158	-0.316
				3	-0.145	-0.290
15.10.2018.	63	20	65	1	-0.145	-0.290

				2	-0.185	-0.370
				3	-0.176	-0.352
22.10.2018.	70	20	65	1	-0.195	-0.390
				2	-0.200	-0.400
				3	-0.185	-0.370
29.10.2018.	77	20	65	1	-0.205	-0.410
				2	-0.210	-0.420
				3	-0.187	-0.374
05.11.2018.	84	20	65	1	-0.208	-0.416
				2	-0.215	-0.430
				3	-0.200	-0.400
12.11.2018.	91	20	65	1	-0.211	-0.422
				2	-0.221	-0.442
				3	-0.203	-0.406

B. Skupljanje betona sa riječnim sitnim i kombinacijom riječnog i agregata od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 198. Skupljanje betona A50

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
17.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
18.08.2018.	4	20	65	1	-0.001	-0.002
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
21.08.2018.	7	20	65	1	-0.013	-0.026
				2	-0.009	-0.018
				3	-0.002	-0.004
28.08.2018.	14	20	65	1	-0.038	-0.076
				2	-0.037	-0.074
				3	-0.020	-0.040
04.09.2018.	21	20	65	1	-0.073	-0.146
				2	-0.059	-0.118
				3	-0.059	-0.118

11.09.2018.	28	20	65	1	-0.093	-0.186
				2	-0.085	-0.170
				3	-0.063	-0.126
18.09.2018.	35	20	65	1	-0.124	-0.248
				2	-0.132	-0.264
				3	-0.120	-0.240
25.09.2018.	42	20	65	1	-0.146	-0.292
				2	-0.151	-0.302
				3	-0.161	-0.322
02.10.2018.	49	20	65	1	-0.163	-0.326
				2	-0.184	-0.368
				3	-0.173	-0.346
09.10.2018.	56	20	65	1	-0.203	-0.406
				2	-0.214	-0.428
				3	-0.194	-0.388
16.10.2018.	63	20	65	1	-0.248	-0.496
				2	-0.252	-0.504
				3	-0.223	-0.446
23.10.2018.	70	20	65	1	-0.255	-0.510
				2	-0.257	-0.514
				3	-0.246	-0.492
30.10.2018.	77	20	65	1	-0.262	-0.524
				2	-0.276	-0.552
				3	-0.263	-0.526
06.11.2018.	84	20	65	1	-0.273	-0.546
				2	-0.289	-0.578
				3	-0.275	-0.550
13.11.2018.	91	20	65	1	-0.274	-0.548
				2	-0.293	-0.586
				3	-0.280	-0.560

Tabela 199. Skupljanje betona B50

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
18.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000

19.08.2018.	4	20	65	1	-0.029	-0.058
				2	-0.023	-0.046
				3	-0.039	-0.078
22.08.2018.	7	20	65	1	-0.176	-0.352
				2	-0.032	-0.064
				3	-0.030	-0.060
29.08.2018.	14	20	65	1	-0.201	-0.402
				2	-0.075	-0.150
				3	-0.055	-0.110
05.09.2018.	21	20	65	1	-0.224	-0.448
				2	-0.101	-0.202
				3	-0.086	-0.172
11.09.2018.	28	20	65	1	-0.241	-0.482
				2	-0.111	-0.222
				3	-0.118	-0.236
18.09.2018.	35	20	65	1	-0.266	-0.532
				2	-0.136	-0.272
				3	-0.121	-0.242
25.09.2018.	42	20	65	1	-0.291	-0.582
				2	-0.152	-0.304
				3	-0.130	-0.260
02.10.2018.	49	20	65	1	-0.316	-0.632
				2	-0.197	-0.394
				3	-0.158	-0.316
09.10.2018.	56	20	65	1	-0.381	-0.762
				2	-0.200	-0.400
				3	-0.184	-0.368
16.10.2018.	63	20	65	1	-0.417	-0.834
				2	-0.236	-0.472
				3	-0.201	-0.402
23.10.2018.	70	20	65	1	-0.425	-0.850
				2	-0.241	-0.482
				3	-0.215	-0.430
30.10.2018.	77	20	65	1	-0.445	-0.890
				2	-0.245	-0.490
				3	-0.229	-0.458
06.11.2018.	84	20	65	1	-0.452	-0.904
				2	-0.247	-0.494
				3	-0.230	-0.460

13.11.2018.	91	20	65	1	-0.461	-0.922
				2	-0.248	-0.496
				3	-0.234	-0.468

Tabela 200. Skupljanje betona C50

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
19.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
20.08.2018.	4	20	65	1	-0.030	-0.060
				2	-0.009	-0.018
				3	-0.086	-0.172
23.08.2018.	7	20	65	1	-0.070	-0.140
				2	-0.020	-0.040
				3	-0.134	-0.268
30.08.2018.	14	20	65	1	-0.077	-0.154
				2	-0.030	-0.060
				3	-0.122	-0.244
06.09.2018.	21	20	65	1	-0.106	-0.212
				2	-0.057	-0.114
				3	-0.176	-0.352
12.09.2018.	28	20	65	1	-0.110	-0.220
				2	-0.059	-0.118
				3	-0.184	-0.368
19.09.2018.	35	20	65	1	-0.130	-0.260
				2	-0.083	-0.166
				3	-0.200	-0.400
26.09.2018.	42	20	65	1	-0.137	-0.274
				2	-0.104	-0.208
				3	-0.225	-0.450
03.10.2018.	49	20	65	1	-0.143	-0.286
				2	-0.109	-0.218
				3	-0.240	-0.480
10.10.2018.	56	20	65	1	-0.163	-0.326
				2	-0.141	-0.282
				3	-0.266	-0.532

17.10.2018.	63	20	65	1	-0.211	-0.422
				2	-0.165	-0.330
				3	-0.306	-0.612
24.10.2018.	70	20	65	1	-0.235	-0.470
				2	-0.184	-0.368
				3	-0.320	-0.640
31.10.2018.	77	20	65	1	-0.247	-0.494
				2	-0.195	-0.390
				3	-0.323	-0.646
07.11.2018.	84	20	65	1	-0.255	-0.510
				2	-0.197	-0.394
				3	-0.325	-0.650
14.11.2018.	91	20	65	1	-0.260	-0.520
				2	-0.200	-0.400
				3	-0.330	-0.660

Tabela 201. Skupljanje betona D50

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
20.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3		
21.08.2018.	4	20	65	1	0.000	0.000
				2	-0.002	-0.001
				3		
24.08.2018.	7	20	65	1	-0.001	-0.002
				2	-0.009	-0.018
				3		
31.08.2018.	14	20	65	1	-0.002	-0.004
				2	-0.018	-0.036
				3		
07.09.2018.	21	20	65	1	-0.019	-0.038
				2	-0.060	-0.120
				3		
13.09.2018.	28	20	65	1	-0.029	-0.058
				2	-0.063	-0.126
				3		

20.09.2018.	35	20	65	1	-0.079	-0.158
				2	-0.109	-0.218
				3		
27.09.2018.	42	20	65	1	-0.087	-0.174
				2	-0.120	-0.240
				3		
04.10.2018.	49	20	65	1	-0.103	-0.206
				2	-0.132	-0.264
				3		
11.10.2018.	56	20	65	1	-0.108	-0.216
				2	-0.137	-0.274
				3		
18.10.2018.	63	20	65	1	-0.144	-0.288
				2	-0.157	-0.314
				3		
25.10.2018.	70	20	65	1	-0.154	-0.308
				2	-0.180	-0.360
				3		
01.10.2018.	77	20	65	1	-0.179	-0.358
				2	-0.193	-0.386
				3		
08.11.2018.	84	20	65	1	-0.183	-0.366
				2	-0.199	-0.398
				3		
15.11.2018.	91	20	65	1	-0.189	-0.378
				2	-0.203	-0.406
				3		

C. Skupljanje betona sa riječnim sitnim i agregatom od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 202. Skupljanje betona A100

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
23.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000

24.08.2018.	4	20	65	1	-0.029	-0.058
				2	-0.052	-0.104
				3	-0.142	-0.284
27.08.2018.	7	20	65	1	-0.060	-0.120
				2	-0.094	-0.188
				3	-0.149	-0.298
03.09.2018.	14	20	65	1	-0.102	-0.204
				2	-0.109	-0.218
				3	-0.148	-0.296
10.09.2018.	21	20	65	1	-0.128	-0.256
				2	-0.158	-0.316
				3	-0.178	-0.356
17.09.2018.	28	20	65	1	-0.140	-0.280
				2	-0.184	-0.368
				3	-0.192	-0.384
23.09.2018.	35	20	65	1	-0.143	-0.286
				2	-0.196	-0.392
				3	-0.207	-0.414
30.09.2018.	42	20	65	1	-0.165	-0.330
				2	-0.226	-0.452
				3	-0.213	-0.426
07.10.2018.	49	20	65	1	-0.197	-0.394
				2	-0.251	-0.502
				3	-0.242	-0.484
14.10.2018.	56	20	65	1	-0.217	-0.434
				2	-0.276	-0.552
				3	-0.302	-0.604
21.10.2018.	63	20	65	1	-0.237	-0.474
				2	-0.299	-0.598
				3	-0.315	-0.630
28.10.2018.	70	20	65	1	-0.257	-0.514
				2	-0.336	-0.672
				3	-0.332	-0.664
04.10.2018.	77	20	65	1	-0.272	-0.544
				2	-0.354	-0.708
				3	-0.333	-0.666
11.11.2018.	84	20	65	1	-0.279	-0.558
				2	-0.374	-0.748
				3	-0.357	-0.714

18.11.2018.	91	20	65	1	-0.283	-0.566
				2	-0.387	-0.774
				3	-0.369	-0.738

Tabela 203. Skupljanje betona B100

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
25.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
26.08.2018.	4	20	65	1	0.000	0.000
				2	-0.015	-0.030
				3	0.000	0.000
29.08.2018.	7	20	65	1	-0.020	-0.040
				2	-0.013	-0.026
				3	-0.044	-0.088
05.09.2018.	14	20	65	1	-0.103	-0.206
				2	-0.093	-0.186
				3	-0.109	-0.218
12.09.2018.	21	20	65	1	-0.133	-0.266
				2	-0.129	-0.258
				3	-0.120	-0.240
19.09.2018.	28	20	65	1	-0.154	-0.308
				2	-0.149	-0.298
				3	-0.130	-0.260
25.09.2018.	35	20	65	1	-0.185	-0.370
				2	-0.176	-0.352
				3	-0.165	-0.330
02.09.2018.	42	20	65	1	-0.235	-0.470
				2	-0.233	-0.466
				3	-0.213	-0.426
09.10.2018.	49	20	65	1	-0.233	-0.466
				2	-0.251	-0.502
				3	-0.237	-0.474
16.10.2018.	56	20	65	1	-0.295	-0.590
				2	-0.264	-0.528
				3	-0.257	-0.514

23.10.2018.	63	20	65	1	-0.305	-0.610
				2	-0.278	-0.556
				3	-0.265	-0.530
30.10.2018.	70	20	65	1	-0.308	-0.616
				2	-0.283	-0.566
				3	-0.287	-0.574
06.10.2018.	77	20	65	1	-0.309	-0.618
				2	-0.281	-0.562
				3	-0.291	-0.582
13.11.2018.	84	20	65	1	-0.309	-0.618
				2	-0.283	-0.566
				3	-0.299	-0.598
20.11.2018.	91	20	65	1	-0.309	-0.618
				2	-0.283	-0.566
				3	-0.300	-0.600

Tabela 204. Skupljanje betona C100

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
26.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
27.08.2018.	4	20	65	1	-0.024	-0.048
				2	-0.055	-0.110
				3	-0.041	-0.082
30.08.2018.	7	20	65	1	-0.036	-0.072
				2	-0.068	-0.136
				3	-0.047	-0.094
06.09.2018.	14	20	65	1	-0.103	-0.206
				2	-0.106	-0.212
				3	-0.056	-0.112
13.09.2018.	21	20	65	1	-0.107	-0.214
				2	-0.110	-0.220
				3	-0.063	-0.126
20.09.2018.	28	20	65	1	-0.141	-0.282
				2	-0.139	-0.278
				3	-0.067	-0.134

27.09.2018.	35	20	65	1	-0.147	-0.294
				2	-0.146	-0.292
				3	-0.083	-0.166
04.09.2018.	42	20	65	1	-0.166	-0.332
				2	-0.172	-0.344
				3	-0.098	-0.196
11.10.2018.	49	20	65	1	-0.190	-0.380
				2	-0.188	-0.376
				3	-0.138	-0.276
18.10.2018.	56	20	65	1	-0.226	-0.452
				2	-0.237	-0.474
				3	-0.176	-0.352
25.10.2018.	63	20	65	1	-0.241	-0.482
				2	-0.247	-0.494
				3	-0.200	-0.400
01.11.2018.	70	20	65	1	-0.253	-0.506
				2	-0.257	-0.514
				3	-0.211	-0.422
08.10.2018.	77	20	65	1	-0.254	-0.508
				2	-0.262	-0.524
				3	-0.219	-0.438
15.11.2018.	84	20	65	1	-0.258	-0.516
				2	-0.267	-0.534
				3	-0.224	-0.448
22.11.2018.	91	20	65	1	-0.259	-0.518
				2	-0.269	-0.538
				3	-0.224	-0.448

Tabela 205. Skupljanje betona D100

Datum ispitivanja	Starost [dani]	Temp. [°C]	Rel. vlažnost [%]	Uzorak	Promjena dužine (mm)	Promjena dužine (%)
27.08.2018.	3	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	0.000	0.000
28.08.2018.	4	20	65	1	0.000	0.000
				2	0.000	0.000
				3	-0.001	-0.002

31.08.2018.	7	20	65	1	-0.028	-0.056
				2	-0.018	-0.036
				3	-0.050	-0.100
07.09.2018.	14	20	65	1	-0.067	-0.134
				2	-0.023	-0.046
				3	-0.054	-0.108
14.09.2018.	21	20	65	1	-0.070	-0.140
				2	-0.029	-0.058
				3	-0.059	-0.118
21.09.2018.	28	20	65	1	-0.074	-0.148
				2	-0.045	-0.090
				3	-0.084	-0.168
28.09.2018.	35	20	65	1	-0.100	-0.200
				2	-0.073	-0.146
				3	-0.104	-0.208
05.09.2018.	42	20	65	1	-0.149	-0.298
				2	-0.126	-0.252
				3	-0.136	-0.272
12.10.2018.	49	20	65	1	-0.157	-0.314
				2	-0.148	-0.296
				3	-0.147	-0.294
19.10.2018.	56	20	65	1	-0.187	-0.374
				2	-0.173	-0.346
				3	-0.161	-0.322
26.10.2018.	63	20	65	1	-0.203	-0.406
				2	-0.204	-0.408
				3	-0.176	-0.352
02.11.2018.	70	20	65	1	-0.210	-0.420
				2	-0.232	-0.464
				3	-0.209	-0.418
09.10.2018.	77	20	65	1	-0.222	-0.444
				2	-0.246	-0.492
				3	-0.214	-0.428
16.11.2018.	84	20	65	1	-0.224	-0.448
				2	-0.247	-0.494
				3	-0.215	-0.430
23.11.2018.	91	20	65	1	-0.224	-0.448
				2	-0.247	-0.494
				3	-0.216	-0.432

PRILOG 18

Određivanje čvrstoće na savijanje betona

A. Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim agregatom

Tabela 206. Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim agregatom

		F (kN)	fzs (MPa)	fzs,sr (MPa)
	A0-1	15,6	7,02	
A0	A0-2	15,5	6,975	6,795
	A0-3	14,2	6,39	
	B0-1	15,3	6,885	
B0	B0-2	15,1	6,795	6,810
	B0-3	15	6,75	
	C0-1	16,9	7,605	
C0	C0-2	14,8	6,66	7,185
	C0-3	16,2	7,29	
	D0-1	13,4	6,03	
D0	D0-2	15,5	6,975	6,510
	D0-3	14,5	6,525	

B. Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim sitnim i kombinacijom riječnog i agregata od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 207. Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim sitnim i kombinacijom riječnog i agregata od starog betona kao krupnim agregatom

		F (kN)	fzs (MPa)	fzs,sr (MPa)
	A50-1	14,2	6,39	
A50	A50-2	16,2	7,29	6,990
	A50-3	16,2	7,29	
B50	B50-1	18	8,1	7,410

	B50-2	15,5	6,975	
	B50-3	15,9	7,155	
	C50-1	15,8	7,11	
C50	C50-2	14,3	6,435	6,915
	C50-3	16	7,2	
	D50-1	13,8	6,21	
D50	D50-2	11,5	5,175	5,700
	D50-3	12,7	5,715	

C. Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim sitnim i agregatom od starog betona kao krupnim agregatom

Tabela 208. Čvrstoća na savijanje betona sa riječnim sitnim i agregatom od starog betona kao krupnim agregatom

		F (kN)	fzs (MPa)	fzs,sr (MPa)
	A100-1	14,8	6,66	
A100	A100-2	15,4	6,93	6,690
	A100-3	14,4	6,48	
	B100-1	15,8	7,11	
B100	B100-2	14,5	6,525	6,855
	B100-3	15,4	6,93	
	C100-1	13,1	5,895	
C100	C100-2	13,4	6,03	6,045
	C100-3	13,8	6,21	
	D100-1	10,9	5,4	
D100	D100-2	12,5	5,625	5,520
	D100-3	12,3	5,535	