



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET SUBOTICA  
STUDIJSKI PROGRAM: GRAĐEVINARSTVO

**ZELENI BETONI VISOKIH  
PERFORMANSI SA VELIKIM  
SADRŽAJEM LETEĆEG PEPELA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:  
Prof. dr Balázs L. György

Kandidat:  
Arpad Čeh

Subotica, 2020.godine



**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET SUBOTICA**

**KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

RBR	Redni broj:	
IBR	Identifikacioni broj:	
TD	Tip dokumentacije:	Monografska dokumentacija
TZ	Tip zapisa:	Tekstualni štampani materijal
VR	Vrsta rada (dipl., mag., dokt.):	Doktorska disertacija
AU	Ime i prezime autora:	Arpad Čeh
MN	Mentor (titula, ime, prezime, zvanje):	Prof.dr György L. Balázs, redovni profesor
NR	Naslov rada:	Zeleni betoni visokih performansi sa velikim sadržajem letećeg pepela
JP	Jezik publikacije:	Srpski
JI	Jezik izvoda:	Srpski / Engleski
ZP	Zemlja publikovanja:	Republika Srbija
UGP	Uže geografsko područje:	Vojvodina
GO	Godina:	2020
IZ	Izdavač:	autorski reprint
MA	Mesto i adresa:	Subotica, Kozaračka 2a
FO	Fizički opis rada:	Broj poglavlja: 9; Broj stranica: 356; Broj slika: 170; Broj tabela: 24; Broj priloga: 48; Broj referenci: 166
NO	Naučna oblast:	Građevinarstvo
ND	Naučna disciplina:	Građevinski materijali
PO	Predmetna odrednica, ključne reči:	Održivi razvoj, zeleni betoni, betoni visokih performansi, leteći pepeo, laki betoni
UDK		666.972.1/.16 :502.131.1(043.3)
ČU	Čuva se:	
VN	Važna napomena:	
IZ	Izvod:	<p>Predmet istraživanja disertacije je razvoj zelenih betona sa visokim sadržajem letećeg pepela uvažavajući aspekte održivosti i trajnosti. Rad je fokusiran na primeni što veće količine letećeg pepela za dobijanje zelenih betona visokih performansi. Paralelno su analizirane specifičnosti implementacije dve, sa fizičkog, hemijskog i ekološkog aspekta različite vrste letećeg pepela: sveži leteći pepeo iz termoelektrane i otpadni pepeo sa pepelišta termoelektrane. Pri razvoju predmetnih betona obe vrste su mehanički aktivirane i uzrokovane promene na karakteristike pepela detaljno analizirane. Tokom ekstenzivnih ispitivanja sa ternarnim sistemom veziva cement-zgura-pepeo su utvrđene optimalne granice za ideo pepela od 30% do 50% u vezivu i dužina trajanja njihove mehaničke aktivacije. Eksperimentalnim istraživanjima na ternarnim sistemima veziva su obuhvaćene i nega na povišenim temperaturama (25°C i 40°C). Na osnovu tih rezultata je predstavljen režim nege kojim se mogu obezbediti zeleni betoni visokih performansi i pri izuzetno niskim količinama cementnog klinkera (&lt; 20% veziva). Dobijeni betoni su podvrgnuti nizu ispitivanja, indikatora trajnosti i analizom rezultata su utvrđeni faktori uticaja i neophodni uslovi za postizanje trajnosti.</p> <p>Rezultati ispitivanja su pokazali da između ternarnih sistema veziva i slane vode za mešanje dolazi do sinergije, proširujući njihov značaj sa aspekta ekologije i održivog razvoja.</p> <p>Primenom čeličnih recikliranih vlakana sa ternarnim sistemima veziva je analizirana mogućnost za postizanje zelenih betona ultravisokih čvrstoća. Daljom racionalizacijom je beton ultravisoke čvrstoće sa nekoliko puta nižom cenom komponentnih materijala.</p> <p>Na kraju je predstavljena i mogućnost optimalizacije svojstava pepela tokom prerade sa ciljem dobijanja lakoagregatnih betona poboljšanih termotehničkim svojstava.</p>
DP	Datum prihvatanja teme od strane Senata:	08.03.2018.
DO	Datum odbrane:	
KO	Članovi komisije:	predsednik: dr Miroslav Bešević član: dr György L. Balázs član: dr Karolj Kasaš član: dr Milan Kekanović član: dr Danijel Kukaras

**UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING SUBOTICA**

**KEY WORD DOCUMENTATION**

ANO	Accession number:	
INO	Identification number:	
DT	Document type:	Monograph documentation
TR	Type of record:	Textual printed material
CC	Contents code:	PhD Thesis
AU	Author:	Arpad Čeh
MN	Mentor:	Prof.dr György L. Balázs
TI	Title:	High performance green concrete embedding high volume of fly ash
LT	Language of text:	Serbian
LA	Language of abstract:	Serbian / English
CP	Country of publication:	Republic of Serbia
LP	Locality of publication:	Vojvodina
PY	Publication year:	2020
PU	Publisher:	Author reprint
PP	Publication place:	Subotica, Kozaračka 2a
PD	Physical description:	Number of chapters: 9; Number of pages: 356; Number of figures: 170; Number of tables: 24; Number of appendices: 48; Number of references: 166
SF	Scientific field:	Civil Engineering
SD	Scientific discipline:	Building materials
SKW	Subject, Key words:	Sustainability, green concrete, high performance concrete, fly ash, lightweight concrete
UC		666.972.1/.16 :502.131.1(043.3)
HD	Holding data:	
N	Note:	
AB	Abstract:	<p>The subject of this dissertation research is the development of green concrete with a high content of fly ash, taking into account the aspects of sustainability and durability. The work is focused on the application of as much fly ash as possible to obtain high performance green concrete. In parallel, the specifics of the implementation of two, from the physical, chemical and ecological aspect, different types of fly ash were analyzed: fresh fly ash from the thermal power plant and fly ash from waste disposal of the thermal power plant. During the development of the concretes with specific compositions and characteristics, both types were mechanically activated and the changes in the characteristics of the ash were analyzed in detail. During an extensive experimental program with the ternary cement-slag-ash binder system, the limits for the ash content of 30% to 50% in the binder and the duration of their mechanical activation were determined. Experimental research on ternary binder systems also includes care at elevated temperatures (25°C and 40°C). Based on these results, a curing regime was presented which can provide high-performance green concrete even with extremely low amounts of cement clinker (&lt;20% binder). The obtained concretes were subjected to a series of tests, durability indicators and the analysis of the results determined the impact factors and the necessary conditions for achieving durability.</p> <p>The test results showed that there is a synergy between ternary binder systems and salt water for mixing, expanding their importance from the aspect of ecology and sustainable development.</p> <p>Using recycled steel fibers with ternary binder systems, the possibility of achieving green ultra-high strength concretes was analyzed. Further rationalization led to an ultrahigh strength concrete with several times lower cost of component materials.</p> <p>Finally, the possibility of optimizing the properties of ash during processing with the aim of obtaining lightweight aggregate concretes with improved thermo-technical properties was presented.</p>
AS	Accepted on Senate on:	08.03.2018.
DE	Defended:	
DB	Thesis Defend Board:	<p>president: dr Miroslav Bešević      member: dr György L. Balázs      member: dr Karolj Kasaš      member: dr Milan Kekanović      member: dr Danijel Kukaras</p>

## REZIME

Predmet istraživanja disertacije je razvoj zelenih betona sa visokim sadržajem letećeg pepela uvažavajući aspekte održivosti i trajnosti. Rad je fokusiran na primeni što veće količine letećeg pepela za dobijanje zelenih betona visokih performansi. Paralelno su analizirane specifičnosti implementacije dve, sa fizičkog, hemijskog i ekološkog aspekta različite vrste letećeg pepela: sveži leteći pepeo iz termoelektrane i otpadni pepeo sa pepelišta termoelektrane. Pri razvoju predmetnih betona obe vrste su mehanički aktivirane i uzrokovane promene na karakteristike pepela detaljno analizirane. Tokom ekstenzivnih ispitivanja sa ternarnim sistemom veziva cement-zgura-pepeo su utvrđene optimalne granice za udio pepela od 30% do 50% u vezivu i dužina trajanja njihove mehaničke aktivacije. Eksperimentalnim istraživanjima na ternarnim sistemima veziva su obuhvaćene i nega na povišenim temperaturama (25°C i 40°C). Na osnovu tih rezultata je predstavljen režim nege kojim se mogu obezbediti zeleni betoni visokih performansi i pri izuzetno niskim količinama cementnog klinkera (< 20% veziva). Dobijeni betoni su podvrgnuti nizu ispitivanja, indikatora trajnosti i analizom rezultata su utvrđeni faktori uticaja i neophodni uslovi za postizanje trajnosti.

Rezultati ispitivanja su pokazali da između ternarnih sistema veziva i slane vode za mešanje dolazi do sinergije, proširujući njihov značaj sa aspekta ekologije i održivog razvoja.

Primenom čeličnih recikliranih vlakana sa ternarnim sistemima veziva je analizirana mogućnost za postizanje zelenih betona ultravisokih čvrstoća. Daljom racionalizacijom je beton ultravisoke čvrstoće sa nekoliko puta nižom cenom komponentnih materijala.

Na kraju je predstavljena i mogućnost optimalizacije svojstava pepela tokom prerade sa ciljem dobijanja lakoagregatnih betona poboljšanih termotehničkih svojstava.

## ABSTRACT

The subject of this dissertation research is the development of green concrete with a high content of fly ash, taking into account the aspects of sustainability and durability. The work is focused on the application of as much fly ash as possible to obtain high performance green concrete. In parallel, the specifics of the implementation of two, from the physical, chemical and ecological aspect, different types of fly ash were analyzed: fresh fly ash from the thermal power plant and fly ash from waste disposal of the thermal power plant. During the development of the concretes with specific compositions and characteristics, both types were mechanically activated and the changes in the characteristics of the ash were analyzed in detail. During an extensive experimental program with the ternary cement-slag-ash binder system, the limits for the ash content of 30% to 50% in the binder and the duration of their mechanical activation were determined. Experimental research on ternary binder systems also includes care at elevated temperatures (25°C and 40°C). Based on these results, a curing regime was presented which can provide high-performance green concrete even with extremely low amounts of cement clinker (<20% binder). The obtained concretes were subjected to a series of tests, durability indicators and the analysis of the results determined the impact factors and the necessary conditions for achieving durability.

The test results showed that there is a synergy between ternary binder systems and salt water for mixing, expanding their importance from the aspect of ecology and sustainable development.

Using recycled steel fibers with ternary binder systems, the possibility of achieving green ultra-high strength concretes was analyzed. Further rationalization led to an ultrahigh strength concrete with several times lower cost of component materials.

Finally, the possibility of optimizing the properties of ash during processing with the aim of obtaining lightweight aggregate concretes with improved thermo-technical properties was presented.

## IZRAZI ZAHVALNOSTI

Mom cenjenom Mentoru, profesoru dr Balázs L. György-u sa Tehničkog i ekonomskog Univerziteta Budimpešta iz Mađarske, dugujem iskrenu zahvalnost na vođenju moje doktorske disertacije, za usmeravanje toka istraživanja pri izradi disertacije, za svu pruženu pomoć i podršku.

Zahvaljujem se profesoru dr Miroslavu Beševiću, Dekanu Građevinskog fakulteta u Subotici, Univerziteta u Novom Sadu, za izuzetnu podršku, razumevanje i pomoć pri izradi moje disertacije.

Zahvaljujem se profesoru dr Karolju Kasašu na svestranoj pomoći i iskrenoj podršci.

Zahvaljujem se profesoru dr Milanu Kekanoviću, šefu Laboratorije za građevinske materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Subotici, Univerziteta u Novom Sadu, na pruženoj pomoći i podršci tokom ispitivanja.

Zahvaljujem se profesorici dr Katalin Kopecskó, sa Tehničkog i ekonomskog Univerziteta Budimpešta iz Mađarske, na svim dragocenim ispitivanjima i analizama.

Zahvaljujem se Rudarskom institutu iz Beograda, pre svega prof. dr Slobodanu Vujiću i dr Svetomiru Maksimoviću na pomoći u nabavci uzoraka pepela i podataka analize pepela iz TE Nikola Tesla Obrenovac. Takođe se zahvaljujem i profesoru emeritus dr Radmilu Todosijeviću na svestranoj pomoći i posredovanju sa TE Morava iz Svilajnca.

Zahvaljujem se na pruženoj pomoći u vidu neophodnih materijala za potrebe istražnih eksperimenata disertacije: Nenadu Bosančiću iz Nexe Srbija, Milutinu Miloševiću iz Sika Srbija, Đuri Bindas iz MC Bauchemie, Danijeli Ostojić iz Lafarge Srbija, Emilijanu Radovanoviću i Đorđu Dautoviću iz Liapor Srbija, Fabrici betona Somborelektro d.o.o., TE Nikola Tesla, TE Morava i Branislavu Kosoviću – Port Express d.o.o. Bačka Topola.

Zahvaljujem se Kolektivu Građevinskog fakulteta u Subotici, Univerziteta u Novom Sadu, za pruženu pomoć i podršku.

Zahvalnost dugujem i filologu, istaknutom srpskom pesniku Milenku Popiću za lektorisanje disertacije.

Najiskreniju zahvalnost dugujem na razumevanju i pomoći mojoj porodici. Posebnu zahvalnost dugujem mojoj dragoj supruzi Klarens na strpljenju i konstantnoj podršci.



## SADRŽAJ

1.	<u>UVOD</u>	3
1.1.	OPIS PREDMETA ISTRAŽIVANJA	3
1.2.	OBRAZLOŽENJE O POTREBAMA ISTRAŽIVANJA	4
1.3.	CILJEVI ISTRAŽIVANJA	5
1.4.	REZULTATI ISTRAŽIVANJA I NJIHOVA PRIMENLJIVOST	5
1.5.	KRATAK SADRŽAJ RADA	6
2.	<u>PREGLED I ANALIZA LITERATURE VEZANE ZA ISTRAŽIVANJA</u>	11
2.1.	ODRŽIVI RAZVOJ BETONA	11
2.2.	SCM – MINERALNI DODACI	12
2.3.	LETEĆI PEPEO	14
2.4.	ZELENI BETONI VISOKIH PERFORMANSI SA VELIKIM SADRŽAJEM LETEĆEG PEPELA	15
2.5.	UPOTREBA HEMIJSKIH ADITIVA – SUPERPLASTIFIKATORA	17
2.6.	NEGA BETONA SA SCM PRI POVIŠENIM TEMPERATURAMA	19
2.7.	TRAJNOST BETONA SA SCM	22
2.8.	SINERGIJA SLANE VODE I TERNARNOG SISTEMA VEZIVA C-Z-P	24
2.9.	LAKOAGREGATNI BETONI I SCM	26
2.10.	BETONA ULTRA VISOKIH PERFORMANSI	29
3.	<u>EKSPERIMENTALNI DEO ISTRAŽIVANJA</u>	35
3.1.	KOMPONENTNI MATERIJALI	35
3.1.1.	CEMENT	35
3.1.2.	PEPEO IZ TE	37
3.1.3.	AGREGATI	39
3.1.3.1.	REČNI AGREGAT	39
3.1.3.2.	DROBLJENI AGREGAT	39

3.1.3.3. LAKI AGREGAT (LIAPOR)	40
3.1.4. VODA	40
3.1.5. ADITIVI	40
3.1.6. MIKRO VLAKNA	45
3.1.7. RECIKLIRANA VLAKNA IZ PNEUMATIKA	45
3.2. IZRADA UZORAKA I METODE ISPITIVANJA	47
3.2.1. IZRADA UZORAKA	47
3.2.2. METODA MEHANIČKE AKTIVACIJE PEPELA	47
3.2.3. SEM ANALIZA MIKROSTRUKTURE PEPELA IZ TE	49
3.2.4. ANALIZA MINERALNOG SASTAVA PREDMETNIH PEPELA METODOM RENDGENSKE DIFRAKCIJE	49
3.2.5. ISPITIVANJE GUSTINE PAKOVANJA PEPELA	50
3.2.6. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA HABANJE	50
3.2.7. KONZISTENCIJA SVEŽEG BETONA	52
3.2.8. ČVRSTOĆA PRI PRITISKU I ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM – MALTERA	52
3.2.9. ČVRSTOĆA PRI PRITISKU I ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM – BETONA	52
3.2.10. KAPILARNOUPIJANJE	53
3.2.11. UKUPNOUPIJANJE	53
3.2.12. ISPITIVANJE DUBINA PENETRACIJE VODE POD PRITISKOM	54
3.2.13. ISPITIVANJE ZAPREMINKE MASE OČVRSLOG BETONA	54
3.2.14. ISPITIVANJE OTPORNOSTI POVRŠINE BETONA NA DEJSTVO MRAZA I SOLI ZA ODMRZAVANJE	54
3.3. PROGRAM ISPITIVANJA	56

4. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA SA TERNARNIM SISTEMIMA VEZIVA	
Cement-Zgura-Pepeo – ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA	61
4.1. PRELIMINARNA ISPITIVANJA OSOBINA MEHANIČKI AKTIVIRANIH PEPELA IZ TE	61
4.1.1. UTICAJ MLEVENJA NA PROMENU SPECIFIČNE MASE PEPELA	61
4.1.2. UTICAJ MLEVENJA NA PROMENU SPECIFIČNE POVRŠINE PEPELA	63
4.1.3. ANALIZA MORFOLOGIJE I STRUKTURE POMOĆU SEM	64
4.1.4. ANALIZA MINERALNOG SASTAVA PEPELA IZ TE METODOM RENDGENSKE DIFRAKCIJE	82
4.1.5. INDEKS AKTIVNOSTI PEPELA	87
4.2. UTICAJ ZAMENE CEM III/B SA SVEŽIM LETEĆIM PEPELOM I OTPADnim PEPELOM SA PEPELIŠTA	88
4.2.1. ZAMENA CEM III/B SA PEPELIMA U IZVORNOM OBLIKU	89
4.2.1.1.ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B	89
4.2.1.2.ZAMENA CEM III/B SA OTPADnim PEPELOM SA DEPONIJE TENT B	92
4.2.1.3.ZAMENA CEM III/B OTPADnim PEPELOM SA PEPELIŠTA TE MORAVA	95
ZAMENA CEM III/B SA PEPELIMA U IZVORNOM OBLIKU	
4.2.2. ZAMENA CEM III/B SA MEHANIČKI AKTIVIRANIM PEPELIMA	98
4.2.2.1.ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 15 MINUTA MLEVENJA	98
4.2.2.2.ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 60	

MINUTA MLEVENJA	102
4.2.2.3.ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 120 MINUTA MLEVENJA	104
4.2.2.4.ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 240 MINUTA MLEVENJA	107
4.2.2.5.ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 15 MINUTA MLEVENJA	110
4.2.2.6.ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 30 MINUTA MLEVENJA	112
4.2.2.7.ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 60 MINUTA MLEVENJA	114
4.2.2.8.ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 120 MINUTA MLEVENJA	116
4.2.2.9.ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 15 MINUTA MLEVENJA	117
4.2.2.10. ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 30 MINUTA MLEVENJA	122
4.2.2.11. ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 30 MINUTA MLEVENJA	124
4.2.2.12. ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 120 MINUTA MLEVENJA	126
4.2.2.13. ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 240 MINUTA MLEVENJA	127
4.2.3. ANALIZA UTICAJA ZAMENE CEM III/B SA PREDMETNIM PEPELIMA I ZAKLJUČAK	131
4.2.4. UTICAJ ZAMENE DELA AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM	134

4.2.4.1. ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B135	
4.2.4.2. ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LP TENTB15	136
4.2.4.3. ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LP TENTB60	137
4.2.4.4. ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LPTENTB120	140
4.2.4.5. ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LPTENTB240	142
4.2.4.6. UTICAJ ZAMENE DELA AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM - ZAKLJUČAK	143
4.3. UTICAJ ZAMENE CEM III/B SA SVEŽIM LETEĆIM PEPELOM I OTPADNIM PEPELOM SA PEPELIŠTA PRI POVIŠENIM TEMPERATURAMA NEGE	145
4.3.1. TERNARNI SISTEM VEZIVA NEGUVANI PRI "LETNJIM USLOVIMA – VANI" (PROSEČNA TEMPERATURA 25°C)	145
4.3.1.1.ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 60 MINUTA MLEVENJA	146
4.3.1.2. ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 120 MINUTA MLEVENJA	150
4.3.1.3.ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 240 MINUTA MLEVENJA	153
4.3.1.4.ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 240 MINUTA MLEVENJA	158
4.3.2. UTICAJ NEGE PRI POVIŠENIM TEMPRATURAMA NA TERNARNI SISTEM VEZIVA	164

4.3.2.1. NEGA BETONA SA CEM III/B NA 40°C	164
4.3.2.2. UTICAJ NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA LP TENTB	168
4.3.2.3. UTICAJ NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA OP TE MORAVA	172
<b>5. ZELENI BETONI VISOKIH PERFORMANSI SA VELIKOM KOLIČINOM LETEĆEG PEPELA</b>	<b>177</b>
5.1. ZBVPP SA SVEŽIM LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B	178
5.2. ZBVPP SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA	184
5.3. OTPORNOST ZBVPP NA HABANJE	193
5.3.1. OTPORNOST NA HABANJE ZBVPP SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA	193
5.3.2. OTPORNOST NA HABANJE ZBVPP SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENTB	197
5.4. DUBINA PENETRACIJE VODE POD PRITISKOM	203
5.4.1. ISPITIVANJE DUBINE PRODORA VODE POD PRITISKOM ZBVPP SA OPTE MORAVA	203
5.4.2. ISPITIVANJE DUBINE PRODORA VODE POD PRITISKOM ZBVPP SA LP TENTB	205
5.5. OTPORNOST NA DEJSTVO MRAZA I SOLI	208
5.5.1. OTPORNOST NA DEJSTVO MRAZA I SOLI ZBVPP SA OTPADnim PEPELOM IZ TE MORAVA	209
5.5.2. OTPORNOST NA DEJSTVO MRAZA I SOLI ZBVPP SA OTPADnim PEPELOM IZ TENTB	213
5.6. UKUPNOUPIJANJE ZBVPP	219
5.7. KAPILARNOUPIJANJE ZBVPP	222

6.	<u>MOGUĆNOSTI I OGRANIČENJA KORIŠĆENJA VODE I AGREGATA</u>	
	<u>KOJI SADRŽE HLORIDE PRI PROIZVODNJI ZBVPP</u>	229
6.1.	UTICAJ KOLIČINE SOLI U VODI ZA PRIPREMU MALTERA SA TERNARNIM SISTEMOM VEZIVA	229
6.2.	BETONI SA TERNARNOM SISTEMOM VEZIVA –UTICAJ SLANE VODE I NEGE NA 40°C	234
6.3.	UTICAJ HLORIDA I NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA OP TE MORAVA	235
6.4.	UTICAJ HLORIDA I NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA LPTENT B	240
6.5.	KONTROLNA ISPITIVANJA UTICAJ HLORIDA I NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA PEPELIMA IZ TE	242
6.6.	POVEZANOST HLORIDA I TERNARNOG SISTEMA VEZIVA NA OTPORNOST PRI HABANJU	245
6.7.	OTPORNOST NA MRAZ U PRISUSTVU SOLI TERNARNOG SISTEMA VEZIVA I HLORIDA U VODI ZA MEŠANJE	248
7.	<u>ZELENI BETONI ULTRAVISOKIH PERFORMANSI</u>	253
8.	<u>TERNARNI SISTEMI VEZIVA POBOLJŠANIH TERMOTEHNIČKIH SVOJSTAVA</u>	265

9.	<u>PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA I ZAKLJUČCI</u>	279
9.1.	<u>PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA</u>	279
9.2.	<u>ZAKLJUČCI</u>	280
10.	<u>LITERATURA</u>	291
	<u>PRILOZI</u>	309

**SPISAK SLIKA**

Slika 2.1 Koncentracija CO <sub>2</sub> u atmosferi tokom vremena [3]	11
Slika 2.2 Šematski prikaz delovanja superplastifikatora sa PCE na deflokulaciju u svežoj cementnoj pasti	18
Slika 2.3. Šematski prikaz „Crossover“-efekat, tj. ukrštanje linija razvoja čvrstoće usled nege na 20°C i pri temperaturama većim od 20°C	23
Slika 2.4 Učinkovitost nege na površini običnih betona i unutrašnje nege kod lakoagregatnih betona	27
 Slika 3.1 Čelična mikrovlakna Spaić	45
Slika 3.2 Reciklirana čelična vlakna dobijena (levo) i prosejana (desno)	46
Slika 3.3 Sastav recikliranog koktela čeličnih vlakana iz pneumatika	46
Slika 3.4 Ispitivanje otpornosti na habanje pomoću Kaponove metode	51
Slika 3.5 Merenje konzistencije svežeg betona	52
Slika 3.6 Ispitivanje čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju savijanjem	53
 Slika 4.1 Promena specifične mase predmetnih pepela pri mlevenju	62
Slika 4.2 Promena specifične površine predmetnih pepela pri mlevenju	63
Slika 4.3 SEM snimak LP TENT 0 pri uvećanju 245x	65
Slika 4.4 SEM snimak LP TENT 0 izgled čestice LP	66
Slika 4.5 SEM snimak LP TENT 30 izgled čestice LP	67
Slika 4.6 SEM snimak LP TENT 120 izgled čestice LP	68
Slika 4.7 SEM snimak LP TENT 240 izgled čestice LP	69
Slika 4.8 SEM snimak LP TENT 240 agregacija LP uvećano 3600X	70
Slika 4.9 SEM snimak LP TENT 240 agregacija LP uvećano 8100X	71
Slika 4.10 SEM snimak OP Morava 0 sa dimenzijama karakterističnih čestica	72
Slika 4.11 SEM snimak OP Morava 0 karakteristična vezikularna čestica pri uvećanju 3400x	73
Slika 4.12 SEM snimak OP Morava 0 klaster čestica pri uvećanju 1000x	74
Slika 4.13 SEM snimak OP Morava 30 karakterističan izgled i veličina čestica	75
Slika 4.14 SEM snimak OP Morava 240 karakterističan izgled i veličina čestica	76

Slika 4.15 SEM čitave čestice sa otvorenim porama	77
Slika 4.16 SEM čitave čestice sa otvorenim porama	78
Slika 4.17 SEM čitave čestice sa otvorenim porama	79
Slika 4.18 SEM čitave čestice sa otvorenim porama	80
Slika 4.19 SEM snimak OP Morava 480 karakterističan izgled čestica sa vidljivom pojavom agregacije	81
Slika 4.20 Difraktogram svežeg letećeg pepela iz TENT-B	82
Slika 4.21 Difraktogram letećeg pepela TENT-B nakon 30 minuta mehaničke aktivacije	83
Slika 4.22 Difraktogram letećeg pepela TENT-B nakon 120 minuta mehaničke aktivacije	83
Slika 4.23 Difraktogram letećeg pepela TENT-B nakon 240 minuta mehaničke aktivacije	84
Slika 4.24 Difraktogram otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava pre mehaničke aktivacije	85
Slika 4.25 Difraktogram otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava nakon 30 minuta mehaničke aktivacije	85
Slika 4.26 Difraktogram otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava nakon 240 minuta mehaničke aktivacije	86
Slika 4.27 Difraktogram otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava nakon 480 minuta mehaničke aktivacije	86
Slika 4.28 Indeks aktivnosti predmetnih pepela nakon 240 minuta mehaničkog aktiviranja	87
Slika 4.29 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom iz TENT B u izvornom obliku, u rasponu od 0 do 80% zapremine veziva	90
Slika 4.30. Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B na čvrstoću maltera	91
Slika 4.31. Uticaj zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom iz TENT B u izvornom obliku, u rasponu od 0 do 80% zapremine veziva	93
Slika 4.32 Uticaj zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom TENT B na čvrstoću maltera	94
Slika 4.33 Uticaj zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom iz TE Morava u	

izvornom obliku, u rasponu od 0 do 80% zapremine veziva	95
Slika 4.34 Uticaj zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom TE Morava na čvrstoću maltera	96
Slika 4.35 Mehanički aktivirani leteći pepeo iz TENT blok B nakon 0, 5, 15, 30, 60, 120, 240 i 480 minuta	98
Slika 4.36 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa letećim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 15 minuta mlevenja	100
Slika 4.37 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa letećim pepelom TENT B 15, na čvrstoću maltera	101
Slika 4.38 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa letećim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 60 minuta mlevenja	102
Slika 4.39. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa letećim pepelom TENT B 60 na čvrstoću maltera	103
Slika 4.40 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa letećim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 120 minuta mlevenja	104
Slika 4.41. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa letećim pepelom TENT B 120 na čvrstoću maltera	106
Slika 4.42 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa letećim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 240 minuta mlevenja	107
Slika 4.43 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa letećim pepelom TENT B 240 na čvrstoću maltera	108
Slika 4.44 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 15 minuta mlevenja	110
Slika 4.45 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa OP TENT B15, na čvrstoću maltera	111
Slika 4.46 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 30 minuta mlevenja	112
Slika 4.47. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TENT B30 na čvrstoću maltera	113
Slika 4.48 Grafički prikaz efekta suptitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 60 minuta mlevenja	114
Slika 4.49. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa OP TENT B60, na čvrstoću maltera	115

Slika 4.50 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 120 minuta mlevenja	116
Slika 4.51 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TENT B120, na čvrstoću maltera	117
Slika 4.52 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava nakon 15 minuta mlevenja	119
Slika 4.53. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 15, na čvrstoću maltera	120
Slika 4.54 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava, nakon 30 minuta mlevenja	122
Slika 4.55. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 30 na čvrstoću maltera	123
Slika 4.56 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava, nakon 60 minuta mlevenja	124
Slika 4.57 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 60 na čvrstoću maltera	125
Slika 4.58 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava, nakon 120 minuta mlevenja	126
Slika 4.59. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 120, na čvrstoću maltera	127
Slika 4.60 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava, nakon 240 minuta mlevenja	128
Slika 4.61 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 240, na čvrstoću maltera	129
Slika 4.62 Grafička ilustracija “aktiviranja” efekta filera (— hemijski aktivnija površina pepela iz TE, — hemijski inertnija površina (novootkrivena usled mlevenja)	132
Slika 4.63 Grafički prikaz zamene dela agregata u mešavini sa LP TENT B bez mlevenja	135
Slika 4.64 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT B bez mlevenja, na čvrstoću maltera	136
Slika 4.65 Grafički prikaz delimične zamene CEM III/B i agregata u mešavini	

sa LPTENT B15	137
Slika 4.66 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-15, na čvrstoču maltera	137
Slika 4.67 Grafički prikaz delimične zamene CEM III/B i agregata u mešavini sa L TENT B60	138
Slika 4.68 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT bez mlevenja, na čvrstoču maltera	139
Slika 4.69 Grafički prikaz delimične zamene CEM III/B i agregata u mešavini sa LPTENT B120	140
Slika 4.70 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-120, na čvrstoču maltera	141
Slika 4.71 Grafički prikaz delimične zamene CEM III/B i agregata u mešavini sa LP TENT B-240	142
Slika 4.72 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-240, na čvrstoču maltera	143
Slika 4.73 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-60, u rasponu od 0 do 60 % m/m na zapreminsku masu maltera	147
Slika 4.74 Prikaz promene čvrstoće pri zatezanju savijanjem usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-60, nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperature	148
Slika 4.75 Prikaz promene čvrstoće pri pritisku usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-60, nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperature	149
Slika 4.76 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-120, u rasponu od 0 do 60 % m/m na zapreminsku masu maltera	151
Slika 4.77 Prikaz promene čvrstoće pri zatezanju savijanjem usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-120 nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperature	152
Slika 4.78 Prikaz promene čvrstoće pri pritisku usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-120, nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperature	153
Slika 4.79 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-240,	

u dijapazonu od 0 do 60 % m/m na zapreminsку masu maltera	155
Slika 4.80 Prikaz promene čvrstoće pri zatezanju savijanjem usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-240 nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperature	156
Slika 4.81 Prikaz promene čvrstoće pri pritisku usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-240, nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperature	157
Slika 4.82 Merenje konzistencije svežeg maltera sa OPTE Morava 240 (0-80% m/m zamene)	159
Slika 4.83 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TE Morava-240, u dijapazonu od 0 do 80 % m/m na zapreminsку masu maltera	160
Slika 4.84 Prikaz promene čvrstoće pri zatezanju savijanjem usled zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom TE Morava-240 nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperature	161
Slika 4.85 Prikaz promene čvrstoće pri pritisku usled zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom TE Morava 240, nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperature	162
Slika 4.86 Razvoj čvrstoće pri pritisku betona sa CEM III/B na 20°C i 40°C tokom prvih 72 sata	165
Slika 4.87 Uticaj dužine inicijalne nege na 40°C na razvoj čvrstoće pri pritisku betona sa CEM III/B	167
Slika 4.88 Uticaj dužine mlevenja LP TENT B na razvoj čvrstoće pri pritisku malterskih mešavina negovanih 3 dana na 40°C	169
Slika 4.89 Izluživanje u šupljinama i porama na površini sveže polomljene prizme mešavine ET25	170
Slika 4.90 Uticaj dužine mlevenja LP TENT B na razvoj čvrstoće pri zatezanju savijanjem malterskih mešavina negovanih 3 dana na 40°C	171
Slika 4.91 Uticaj dužine mlevenja OP TE Morava na razvoj čvrstoće pri pritisku malterskih mešavina negovanih 3 dana na 40°C	173
Slika 4.92 Uticaj dužine mlevenja OP TE Morava na razvoj čvrstoće pri zatezanju savijanjem malterskih mešavina negovanih 3 dana na 40°C	174

Slika 5.1 Čvrstoća pri pritisku betona sa 30 % m/m LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora	179
Slika 5.2 Čvrstoća pri pritisku betona sa 40 % m/m LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora	181
Slika 5.3 Čvrstoća pri pritisku betona sa 50 % m/m LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora	182
Slika 5.4 Veza čvrstoća pri zatezanju savijanjem betona sa 30%, 40% i 50 % m/m LP TENTB-240 i vodovezivnog faktora	183
Slika 5.5 Čvrstoća pri pritisku betona sa 30 % m/m OP TE Morava-240 u funkciji vodovezivnog faktora	185
Slika 5.6 Polomljen uzorak ZBVPP sa 30 % m/m OP TE Morava-240 i $w/b=0,167$ nakon ispitivanja čvrstoće pri pritisku	186
Slika 5.7 Čvrstoća pri pritisku betona sa 40 % m/m OP TE Morava-240 u funkciji vodovezivnog faktora	187
Slika 5.8 Čvrstoća pri pritisku betona sa 50 % m/m OP TE Morava-240 u funkciji vodovezivnog faktora	189
Slika 5.9 Konzistencija svežeg betona sa 50 % pepela u vezivu, sa vodovezivnim faktorom 0,2	189
Slika 5.10 Veza čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona sa 30 %, 40 % i 50 % m/m OP TE Morava-240 i vodovezivnog faktora	191
Slika 5.11 Čvrstoća betona pri pritisku u funkciji vodocementnog faktora i klase cementa i ZBVPP sa 30% pepela (OP TE Morava-240 i LP TENTB-240)	192
Slika 5.12 Otpornost ZBVPP na habanje sa 30% OP TE Morava 240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)	194
Slika 5.13 Otpornost ZBVPP na habanje sa 40% OP TE Morava 240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)	195
Slika 5.14 Otpornost ZBVPP na habanje sa 50% OP TE Morava 240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)	196
Slika 5.15 Otpornost ZBVPP na habanje sa 30% letećeg pepela TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)	197
Slika 5.16 Otpornost ZBVPP na habanje sa 40% letećeg pepela TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)	198

Slika 5.17 Otpornost ZBVPP na habanje sa 50% letećeg pepela TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)	199
Slika 5.18 Korelacija otpornosti ZBVPP na habanje i čvrstoće pri pritisku kod mehanički aktiviranog OPTE Morava240	200
Slika 5.19 Korelacija otpornosti ZBVPP na habanje i čvrstoće pri pritisku kod mehanički aktiviranog letećeg pepela TENTB-240	201
Slika 5.20 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod pritiskom ZBVPP sa 30-50% m/m mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240 i vodovezivnim faktorima od 0,17-0,4	204
Slika 5.21 Ispitivanje prodora vode pod pritiskom uzoraka sa 30% m/m mehanički aktiviranim pepelom OP TE Morava 240, w/b=0,3	205
Slika 5.22 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod pritiskom ZBVPP sa 30-50% m/m mehanički aktiviranog LP TENTB-240 i vodovezivnim faktorima od 0,25-0,4	206
Slika 5.23 Ispitivanje prodora vode pod pritiskom uzoraka sa 30% m/m mehanički aktiviranim LP TENTB-240, w/b=0,25	207
Slika 5.24 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 30% OPTE Morava240 u funkciji vodovezivnog faktora	210
Slika 5.25 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 40% OPTE Morava240 u funkciji vodovezivnog faktora	211
Slika 5.26 Uzorak betona sa 40% OPTE Morava240 pre (levo) i posle (desno) ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli	212
Slika 5.27 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 50% OPTE Morava240 u funkciji vodovezivnog faktora	212
Slika 5.28 Uzorak betona sa 50% OPTE Morava240 nakon 5. ciklusa (levo) i posle 1. ciklusa (desno) ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli	213
Slika 5.29 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 30% LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora	214
Slika 5.30 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 40% LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora	215
Slika 5.31 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 40% LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora	216

Slika 5.32 Uzorci betona sa W/B=0,3 nakon 5. ciklusa sa 50% (levo) i sa 30% (desno) LP TENTB240 u vezivu	217
Slika 5.33 Rezultati ispitivanja ukupnog upijanja ZBVPP sa 30-50% m/m mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240 i vodovezivnim faktorima od 0,17-0,4	220
Slika 5.34 Rezultati ispitivanja ukupnog upijanja ZBVPP sa 30-50% m/m mehanički aktiviranog pepela LP TENTB240 i vodovezivnim faktorima od 0,22-0,4	221
Slika 5.35 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja ZBVPP sa 0-50% m/m mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240 i vodovezivnim faktorima od 0,17-0,4	223
Slika 5.36 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja ZBVPP sa 0-50% m/m mehanički aktiviranog pepela LP TENTB240 i vodovezivnim faktorima od 0,22-0,4	224
Slika 6.1 Uticaj saliniteta vode za pripremu maltera na čvrstoće pri pritisku uzoraka sa 40%V/V mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240	230
Slika 6.2 Uticaj saliniteta vode za pripremu maltera na čvrstoće pri zatezanju savijanjem uzoraka sa 40%V/V mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240	231
Slika 6.3 Uticaj saliniteta vode za pripremu maltera na čvrstoće pri pritisku uzoraka sa 60 %V/V mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240	232
Slika 6.4 Uticaj saliniteta vode za pripremu maltera na čvrstoće pri zatezanju savijanjem uzoraka sa 60%V/V mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240	233
Slika 6.5 Uticaj količine pepela na razvoj čvrstoće pri pritisku betona tokom prvih 72 sata kod betona pravljenih sa slanom vodom	234
Slika 6.6 Unutrašnjost malterskih mešavina nakon 365 dana u vodi, levo CEMIII/B-1C, a sa desne strane CEMIII/B-0C	236
Slika 6.7 Uticaj saliniteta na razvoj čvrstoće pri pritisku ternarnih sistema malterskih mešavina i CEM III/B negovanih 3 dana na 40°C	237
Slika 6.8 Uticaj saliniteta na razvoj čvrstoće pri pritisku ternarnih sistema malterskih mešavina i CEM III/B negovanih 3 dana na 40°C	238
Slika 6.9 Uzorak levo - izluživanje u ponekim porama EM45-1C, uzorak desno - bez izluživanja u porama EM45-3C nakon 365 dana u vodi	239
Slika 6.10 Uticaj saliniteta na razvoj čvrstoće pri pritisku ternarnih sistema mešavina sa LP TENTB-240 i CEM III/B nakon inicijalne nege 3 dana na 40°C	240
Slika 6.11 Uticaj saliniteta na razvoj čvrstoće pri pritisku ternarnih sistema mešavina sa LP TENTB-240 i CEM III/B nakon inicijalne nege 3 dana na 40°C	241

Slika 6.12 Rezultati čvrstoće pri pritisku kontrolnih uzoraka nakon 3 dana inicijalne nege na 40°C i nakon godinu dana	244
Slika 6.13 Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem kontrolnih uzoraka nakon 3 dana inicijalne nege na 40°C i nakon godinu dana	244
Slika 6.14 Uzorci ZBVPP pravljeni sa vodom 3,8% i 11,4% saliniteta pre ispitivanja otpornosti na habanje	246
Slika 6.15 Uzorci ZBVPP pravljeni sa vodom 3,8% i 11,4% saliniteta nakon ispitivanja otpornosti na habanje	246
Slika 6.15 Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje kod uzorka sa 0%, 3,8% i 11,4% saliniteta vode za mešanje	247
Slika 6.16 Uzorci ZBVPP pravljeni sa običnom vodom i slanom vodom pre ispitivanja otpornosti na mraz	249
Slika 6.17 Uzorci ZBVPP pravljeni sa običnom vodom (levo) i slanom vodom (desno) nakon ispitivanja otpornosti na mraz	249
Slika 6.18 Otpornost na dejstvo mraza i soli ternarnog sistema veziva sa 30% OPTE Morava120 proizvedenog sa običnom vodom (oznaka -) i sa salinitetom 3.8% (oznaka +)	250
Slika 7.1 Izmerena gustina pakovanja za predmetne vrste pepela iz TE	254
Slika 7.2 Ispitivanje čvrstoće pri pritisku UHPC sa industrijskim (VCE) i recikliranim vlaknima (VCR)	255
Slika 7.3 Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem UHPC sa industrijskim (VCE) i recikliranim vlaknima (VCR)	255
Slika 7.4 Koincidencija u sastavu različitih vrsta pneumatika prilikom recikliranja koja rezultira povoljnim koktelom vlakana za mikroarmiranje betona	256
Slika 7.5 Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem UHPC sa 50 % m/m LP TENTB240 (T1) i 50 % m/m OPTE Morava240 (V1 i R1)	258
Slika 7.6 Ispitivanje čvrstoće pri pritisku UHPC sa 50 % m/m LP TENTB240 (T1) i 50 % m/m OPTE Morava240 (V1 i R1)	259
Slika 7.7 Uticaj vrste kamenog materijala agregata, fine granulacije na čvrstoće pri zatezanju savijanjem UHPC sa ternarnim sistemom veziva	260
Slika 7.8 Uticaj vrste kamenog materijala agregata, fine granulacije na čvrstoće pri zatezanju savijanjem UHPC sa ternarnim sistemom veziva	261

Slika 8.1 Uticaj trajanja mlevenja pepela i procenta zamene veziva sa otpadnim pepelom iz TE Morava	266
Slika 8.2 Optimalizacija koeficijenta toplotne provodljivosti i čvrstoće maltera sa ternarnim sistemom veziva, u funkciji trajanja mehaničke aktivacije OP TE Morava	267
Slika 8.3 Uticaj zamene 50% veziva sa OPTE Morava-30 na čvrstoću pri pritisku nakon 90 dana	270
Slika 8.4 Potrebna količina Portland cementnog klinkera (PCK) za postizanje 1 MPa čvrstoće pri pritisku lakoagregatnog betona pri starosti 90 dana	271
Slika 8.5 Uzorak lakoagregatnog betona sa ternarnim sistemom veziva C-Z-P	272
Slika 8.6 Potrebna količina Portland cementnog klinkera (PCK) za postizanje 1 MPa čvrstoće pri pritisku lakoagregatnog betona pri starosti 90 dana	273

## SPISAK TABELA

Tabela 2.1 Podela lakih betona prema CEB/RILEM	26
Tabela 3.1 Sastavi cementa korišćenih u istraživanjima	36
Tabela 3.2 Fizička svojstva korišćenih cemenata	36
Tabela 3.3 Hemijski sastav cemenata [%]	37
Tabela 3.4 Hemijski sastav pepela iz TE [%]	38
Tabela 3.5 Tehnički podaci o Sika ViscoCrete 4077	41
Tabela 3.6 Tehnički podaci o Sika ViscoCrete Techno-20 S	41
Tabela 3.7 Tehnički podaci o MC PowerFlow 1102	42
Tabela 3.8 Tehnički podaci o MC PowerFlow 5695	42
Tabela 3.9 Tehnički podaci o MC PowerFlow 3100	43
Tabela 3.10 Tehnički podaci o MC Centrament Stabi VMA2	44
Tabela 3.11 Tehnički podaci o MC Centrament Air 202	44
Tabela 3.12. Podaci o upotrebljenom punjenju mlina pri mehaničkoj aktivaciji	48
Tabela 4.1 Uticaj trajanja mehaničke aktivacije predmetnih pepela na specifičnu masu	61
Tabela 4.2 Potrebne količine vode W za postizanje referentne konzistencije	146
Tabela 4.3 Potrebne količine vode W za postizanje referentne konzistencije	150
Tabela 4.4 Potrebne količine vode za postizanje referentne konzistencije sa LPTENT B240	154
Tabela 4.5 Potrebne količine vode W za postizanje referentne konzistencije	158
Tabela 6.1 Uporedna analiza uticaja saliniteta na habanje ZBVPP sa 50% OPTEMorava240	247
Tabela 8.1 Upotrebljene vrste cementa i udeo PCK	268
Tabela 8.2 Fizičke i mehaničke karakteristike lakoagregatnih betona od cementa	269
Tabela 8.3 Fizičke i mehaničke karakteristike lakoagregatnih betona sa 50% zamene veziva mehanički aktiviranim pepelom OPTE Morava-30	269
Tabela 8.4 Termotehničke karakteristike lakoagregatnih betona bez zamene	

veziva pepelom	272
Tabela 8.5 Termotehničke karakteristike lakoagregatnih betona sa 50% zamene veziva mehanički aktiviranim pepelom OPTE Morava-30	273





UVOD



## 1. UVOD

U 21. veku, povećao se značaj da se beton učini održivim. Vodeće tendencije našeg društva da se očuva priroda, reciklira i energetska efikasnost, postale su i glavne smernice konkretnih istraživanja. Glavni fokus je zamena cementa mineralnim dodacima, što nudi mnoge prednosti održivosti:

zamenom portland cementa mineralnim dodacima, gasovi staklene bašte (posebno CO<sub>2</sub>), takođe; značajno smanjuju;

ako za mineralne dodatke koristimo industrijske otpadne materije, štedimo prirodne sirovine potrebne za proizvodnju cementa;

recikliranjem industrijskog otpada, odlaganje nije potrebno i štedi se prirodni životni prostor;

recikliranjem industrijskog otpada štedimo troškove odlaganja.

Sve to moći ćemo postići, SAMO ako je rezultirajući beton TRAJAN.

### 1.1. OPIS PREDMETA ISTRAŽIVANJA

Istraživanja doktorske disertacije fokusirana su na definisanju fizičko-mehaničkih karakteristika zelenih betona koji sadrže velike količine letećeg pepela ili otpadnog pepela (više od 30% veziva) i značajno smanjenu količinu cementnog klinkera (manje od 20% veziva) u kombinaciji s granulisanom zgurom.

Jedan od zahteva održivog betona (kao i drugih građevinskih materijala) je trajnost. U 21. veku su opravdani samo dugotrajni betoni, koji podnose uticaje sredine izagani. Znajući to, glavni cilj ove doktorske disertacije je odrediti mogućnosti za postizanje Zelenih Betona Visokih Performansi sa velikim sadržajem letećeg Pepela (ZBVPP).

Jedan od preduslova za postizanje ZBVPP je mehaničko aktiviranje letećeg pepela ili otpadnog pepela. Mlevenjem, čestice letećeg pepela razbijaju se na manje delove i na taj način povećava se pucolanska aktivnost i obradivost betona.

S jedne strane, poželjno je povećati količinu mineralnih dodataka u betonu, naročito pomoću ekološki problematičnih materijala poput letećeg pepela; sa druge strane, primenom veće količine mineralnih dodataka, povećava se vreme vezivanja i smanjuju se rane čvrstoće betona.

Disertacija ima još jednu vezu sa održivošću: vodu. Za proizvodnju betona preporučuje se upotreba slatke vode, ne uvek dostupne. Mogućnost korišćenja slane vode za mešanje betona, u nekim slučajevima bi značajno smanjila emisiju gasova staklene bašte, smanjila cenu i sačuvala dragocene rezerve slatke vode. Ova rešenja značajno povećavaju vrednost ZBVPP s aspekta održivosti, proširujući raspon sirovina ne samo na slanu vodu već i na agregate koji sadrže hloride.

## 1.2. OBRAZLOŽENJE O POTREBAMA ISTRAŽIVANJA

Održivost je ključno pitanje za građevinsku industriju. Potrebno je smanjiti efekte staklene bašte i uložiti napore za dugoročni cilj razvoja nulte emisije ugljenika. Rezultati istraživanja pružaju mogućnosti šire upotrebe mineralnih dodataka. Istraživanje je fokusirano na optimalizaciju sastava veziva s izuzetno malom količinom klinkera i efikasnim uslovima nege, kako bi se razvili betoni visokih performansi unapređene trajnosti jer samo trajni betoni ispunjavaju uslove održivog razvoja.

### **1.3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

Glavni ciljevi istraživanja su podrška održivosti (kao i trajnosti) razvijanjem posebnih mešavina betona, uključujući nuzproizvode i otpad koji stvaraju problem i u Srbiji:

1. Razvoj zelenih betona visokih performansi spravljenih od ternarnih mešavina sistema veziva, gde se portland cementni klinker (u količinama većim od 80% veziva) zamenjuje dodatnim (uglavnom otpadnim) materijalima, tendencije da se koriste značajne količine letećeg pepela i otpadnog pepela, podržavajući zahteve trajnosti i održivosti.
2. Eksperimentalno dokazati da su veziva ZBVPP moguća korisna kombinacija mineralnih dodataka ako voda za mešanje ili agregati sadrže hloride. Ova rešenja znatno povećavaju vrednost održivosti ZBVPP.
3. Razvoj betona ultravisokih performansi uz mogućnost korišćenja recikliranih čeličnih vlakana od korišćenih pneumatika. Ove mešavine, takođe, zasnivaju se na upotrebi velikih količina letećeg ili otpadnog pepela.

### **1.4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I NJIHOVA PRIMENLJIVOST**

Rezultati istraživanja trebalo bi da nađu primenu u oblastima primene letećeg pepela i otpadnog pepela kao mineralnim dodacima. Dobijeni rezultati jesu smernice za pravilan izbor vrste i količine doziranja mineralnih dodataka pri projektovanju betonskih mešavina, uzimajući u obzir i druge aspekte održivosti, pre svega, korišćenje vode i agregata koji sadrže hloride i u proizvodima od betona povećane trajnosti.

Rezultati istraživanja doprinos su optimalnijem dimenzionisanju svih vrsta betona ultravisokih čvrstoća i inoviraju primenu čeličnih vlakana recikriranog porekla u funkciji mikroarmature .

## 1.5 KRATAK SADRŽAJ RADA

Prvo poglavlje sadrži uvodne napomene o temi i potrebi istraživanja, njegovim ciljevima i metodologiji, o opravdanosti istraživanja i primenljivosti rezultata, kao kratak opis rada.

Pregled dostupne naučne literature naveden je u drugom poglavlju. Glavne teme su važnost održivosti, uticaj proizvodnje cementa i betona na životnu sredinu, mineralni dodaci, leteći pepeo širom sveta i u Srbiji. U fokusu pažnje su rezultati istraživanja i iskustava uz betone s visokim sadržajem letećeg pepela. Naveden je pregled naučnih radova tematski uticajnih razvouj ZBVPP: Upotreba hemijskih aditiva – superplastifikatora, efekat filera, nega na povišenim temperaturama i trajnost betona s mineralnim dodacima. U radu je pregled do danas poznatih naučnih stavova uz sinergiju između betona napravljenih sa slanom vodom ili izloženi hloridima. Fokusirajući se na mineralne dodatke, izložen je poseban pregled lakoagregatnih betona i betona ultra visokih performansi.

U trećem poglavlju, navedeni su važniji detalji eksperimentalnog dela istraživanja. Predstavljeni su korišćeni materijali, mešavine, uslovi izrade i nege uzoraka, kao i metode ispitivanja. Takođe, navedene su i smernice istraživačkog programa.

Eksperimentalni rezultati ispitivanja sa ternarnim mešavinama cementnog klinkera, zgure i letećeg pepela ili otpadnog pepela iz TE, nalaze se u četvrtom poglavlju. Najpre su predstavljeni rezultati preliminarnih ispitivanja osobina mehanički aktiviranih pepela. Nakon toga, prikazani su rezultati zamene CEM III/B s pepelima

iz TE u širokom dijapazonu zamene (0-80%) i dužine trajanja mlevenja pepela. U istom poglavlju, analizirane su i mogućnosti nege na povišenim temperaturama.

Peto poglavlje, bavi se analizom i diskusijom dobijenih rezultata na ZBVPP s posebnim fokusom na ispitivanja očvrslih betona koji su indikatori trajnosti.

U šestom poglavlju, zloženi su rezultati ispitivanja koja se bave sinergijom ternarnih sistema veziva i slanom vodom.

Zeleni betoni ultravisokih performansi tema su sedmog poglavlja. Prikazani su rezultati ispitivanja uticaja različitih vrsta vlakana, primena ternarnog sistema veziva s različitim vrstama pepela iz TE i uticaja primene lokalnog agregata u cilju smanjenja ekološkog otiska i cene betona ultravisokih čvrstoća.

U osmom poglavlju, predstavljeni su i evaluirani rezultati optimalizacije termotehničkih svojstava implementacijom ternarnog sistema veziva u lakoagregatnih betona.

U devetom poglavlju, navedeni su najznačajniji rezultati i završne napomene, zaključci eksperimentalnih ispitivanja disertacije i predstavljeni pravci daljih istraživanja.

U poslednjem poglavlju, navedena je lista korišćene literature i standard, pa slede prilozi svih rezultata eksperimentalnih ispitivanja i ostalim ulaznim podacima.





PREGLED I ANALIZA  
LITERATURE VEZANE ZA  
ISTRAŽIVANJA



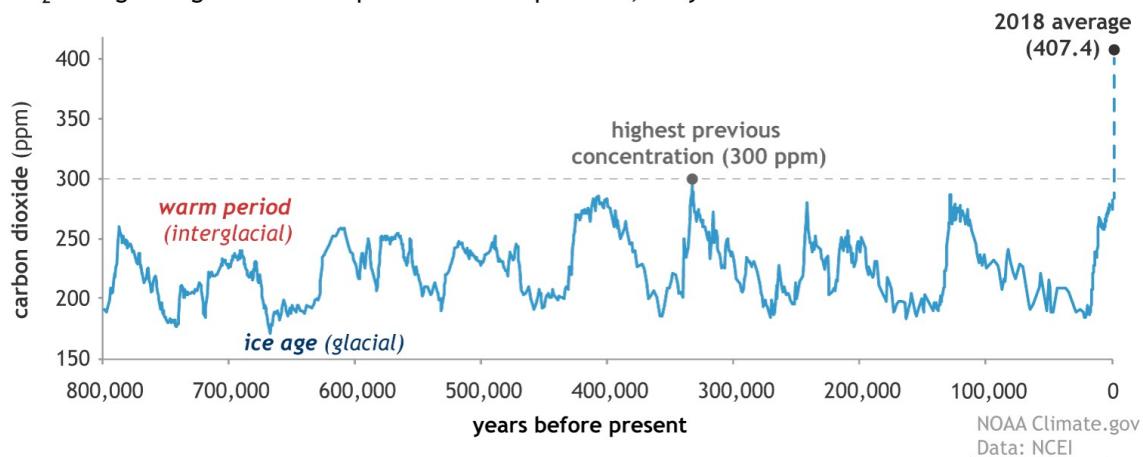
## 2. PREGLED i ANALIZA LITERATURE VEZANE ZA ISTRAŽIVANJA

### 2.1 ODRŽIVI RAZVOJ BETONA

Prema najviše citiranoj definiciji koju je dala Brundtlandska komisija Ujedinjenih nacija: "Održivi razvoj je razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjice bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe" [1]. Koncept održivosti sastoji se od tri stuba: ekonomskog, ekološkog i socijalno, tj. održivi razvoj se zasniva na potrebi da se osigura ravnoteža između ekonomskog razvoja i socijalnog razvoja i zaštite životne sredine [2]. Koja se na jednostavan način opisuje kao težnja da se izbegne dugoročna šteta uzrokovana usredsređivanjem na kratkoročne profite.

U trenutnom fokusu zaštite životne sredine je emisija štetnih gasova koji izazivaju efekat staklene bašte, a to su pre svega ugljen-dioksid, metan, azot-suboksid i hlorofluorokarbonati. Najdominantnija je emisija CO<sub>2</sub> od svih antropogenih gasova koje i dalje imaju tendenciju rasta (Slika 2.1). O važnosti smanjenju emisije štetnih gasova govori i Evropski zeleni sporamum – čiji je cilj da Evropa bude do 2050. godine prvi klimatski neutralan kontinent.

CO<sub>2</sub> during ice ages and warm periods for the past 800,000 years



Slika 2.1 Koncentracija CO<sub>2</sub> u atmosferi tokom vremena [3]

Beton, druga najčešće korišćena supstanca na zemlji (nakon vode), igra veliku ulogu u građevinarstvu kao najrasprostranjeniji građevinski materijal, zbog niske cene, prilagodljivosti upotrebe i dobrih mehaničkih svojstava [4, 5]. Potražnju betona i cementa decenijama opisuje kontinuirana tendencija rasta [6,7,8].

Trenutno je procenjena, ukupna proizvodnja cementa iznad 4 milijarde tona, a proizvodnja betona iznad 20 milijardi tona godišnje, sa tendencijom daljeg rasta od 6% svake godine [9,10]. Na taj način proizvodnja Portland cementa je odgovorna za 7 % svih antropogenih emisija ugljen-dioksida [11]. Polovina te značajne količine potiče od kalcinacije, u kojoj se kalcijum-karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) iz krečnjaka, krede ili drugih materijala bogatih kalcijumom zagreva u peći kako bi se formirao kreč ( $\text{CaO}$ ) oslobođanjem  $\text{CO}_2$  u atmosferu. Drugu polovicu predstavlja ekstremna toplota (1450 °C) koja je potrebna za proizvodnju i transport cementa [12, 13].

U skladu sa ciljevima održivog razvoja u Programu za razvoj Ujedinjenih nacija (januar 2016.), gasove staklene bašte treba smanjiti i nastojati da postignu dugoročni razvoljni cilj nulte emisije ugljenika (eng. zero-carbon development) [14].

Imajući u vidu činjenicu da 90% emisija ugljenika iz betonske industrije proizlazi iz proizvodnje cementa, postoje 3 efikasna načina smanjenja te količine: (1) povećanjem čvrstoće betona kao konstruktivnog materijala koji dovodi do smanjenja potrebnih količina betona, (2) smanjenjem količine cementa u betonskim mešavinama ili (3) zamenom količine cementa u mešavini pomoću mineralnih dodataka (eng. Supplementary Cementing Materials - SCM) [15, 16].

## 2.2 SCM – MINERALNI DODACI

SCM-i danas zamenjuju različite količiname cementa ili dodavanjem u cementari ili tokom proizvodnje betona. Najčešće korišćeni SCM-i su:

granulisana zgura visoke peći (GZVP), leteći pepeo (LP), pepeo pirinčane pleve, prirodni pucolani (vulkanski pepeo, dijatomejska zemlja, opalska breča, i škriljci, prirodni tuf itd.), silikatna čađ, metakaolin itd. [17, 18, 19].

Upotrebom prirodnih pucolana se smanjuje količina cementnog klinkera u betonskoj mešavini, ali je korišćenje industrijskih nusproizvoda, a posebno otpadnih materijala, višestruko korisno. Na taj način, pored smanjenja emisije ugljenika, prirodni resursi se mogu sačuvati i uticaj na životnu sredinu se može smanjiti kako bi se smanjio i ekološki otisak (eng. ecological footprint). Neki industrijski otpadni nuzproizvodi – SCM-i (kao što je granulisana zgura visoke peći) imaju hidraulička svojstva i mogu čak autonomno formirati hidratacione proizvode sa cementnim svojstvima. Ostali mogu reagovati s kalcijum-hidroksidom (proizvod hidratacije portland cementa) kao pucolani, što dovodi do jedinjenja sa cementnim svojstvima. Pucolani doprinose čvrstoći betona na dva načina: pucolanskom reakcijom i kao punioci. [20, 21]

Pri razmatranju uticaja LP kao SCM u betonu pored pucolanskih reakcija je izuzetno važan efekat filera. Prvi primeri primene u praksi dodavanjem inertnog filera u nekim zemljama su se pojavili već posle Drugog svetskog rata. Uglavnom je korišten fino samleveni pesak, krečnjak ili dolomit u količinama od 10-35% [22].

Efekat filera na reakciju veziva sa SCM utiče na 2 načina [23]: efektom razblaživanja (eng. dilution effect) i nukleacijom. Zamenom dela cementnog klinkera sa SCM pri istom vodovezivnom faktoru se povećava odnos vode prema cementu. Pored toga što se na taj način ubrzava hidratacija, povećava se i prostor između čestica cementa za razvoj produkata hidratacije. Pored razblaživanja pornog rastvora sitne čestice SCM u njemu predstavljaju i jezgra za početak razvoja kristala.

Postoje mnogi istraživački radovi koji se fokusiraju na korišćenje otpadnih materijala (kao što su industrijski, poljoprivredni i otpaci iz seoske i gradske

sredine) kao SCM. Neki imaju obećavajući doprinos čvrstoći ili drugim osobinama betona. Čak i oni sa skromnijim indeksom aktivnosti mogu pronaći primenu kada se uzmu u obzir sva tri "stuba održivosti" (ekonomski, ekološki i socijalni) [24].

### 2.3 LETEĆI PEPEO

Leteći pepeo (LP) je jedan od najpristupačnijih SCM-a, industrijskog nusproizvoda termoenergetskih postrojenja, koji predstavlja potencijalni otpadni materijal u velikim količinama na globalnom nivou. Analizirajući činjenicu da se otprilike samo polovina od 750 miliona tona (godišnje proizvedenog širom sveta) koristi; još uvek postoji puno potencijala za upravljanje preostalom, značajnom količinom otpadnog materijala [25, 26, 27, 28].

U Srbiji, trenutno ima preko 200 miliona tona otpadnog pepela (mešavina letećeg pepela i šljake) na deponijama, što zauzima 1.600 hektara plodnog zemljišta i godišnje se proizvede 6,5 miliona tona pepela. Elektroprivreda Srbije (EPS) trenutno izdvaja 50.000.000 evra godišnje za odlaganje pepela i od 2017. godine ima dodatnu obavezu za dodatna plaćanja zbog uskladištenog pepela. Samo termoelektrana "Nikola Tesla" Blok B (TENT B) skladišti 52 miliona tona pepela i blok elektrane "Nikola Tesla" A (TENT A) 80 miliona tona. TENT A i TENT B proizvode između 10.000 i 12.000 tona pepela dnevno [29, 30, 31, 32].

Prema kategorizaciji letećih pepela, koje je dato u standardu ASTM C618, sva elektrofilterska pepela, koje generišu srpske elektrane, spadaju u klasu F (pepeo sa niskim sadržajem kalcijum-oksida) [33]. Klasa F LP ima pretežno pucolanske osobine sa malim ili zanemarljivim hidrauličnim karakteristikama vezivanja [34].

Istraživanja u okviru doktorske disertacije su bila fokusirana na upotrebu dve vrste proizvoda sagorevanja uglja: (1) sveže uskladišteni (ili elektrofilterski pepeo) iz grupe kiselih LP u silosima i (2) stari otpadni pepeo, koji se nalazi na otvorenim

deponijama. LP klase F kao industrijski nusproizvod se već koristi, uglavnom u industriji proizvodnje cementa kao pucolanskog mešanog materijala, ali samo u cementima sa većom količinom Portland cementnog klinkera [35, 36]. Otpadni pepeo- sa deponije je mešavina LP i šljake, koja se skladišti u vlažnim uslovima u otvorenom prostoru - još uvek se retko koristi, jedino kao materijal nasipa [37, 38].

Pored toga što je LP sa pepelišta hemijski inertniji od LP koji je skladišten u silosima, postoji velika razlika u njihovom uticaju na životnu sredinu. Leteći pepeo kao sekundarna sirovina, zamenjujući npr. određenu količinu cementa, neće se pojaviti kao industrijski otpad (smanjen uticaj na životnu sredinu u vidu smanjene emisije štetnih agensa i očuvanje životnog prostora), smanjuje karbonski otisak pri proizvodnji cementa, umanjuje eksploataciju sirovina za proizvodnju cementa. Korišćenje otpadnog pepela sa već postojećih deponija, ima sve prethodno navedene prednosti sa aspekta održivog razvoja i još veći pozitivan ekološki i ekonomski bilans zbog uklanjanja industrijskog otpada iz životnog prostora.

## 2.4 ZELENI BETONI VISOKIH PERFORMANSI SA VELIKIM SADRŽAJEM LETEĆEG PEPELA

Važnost održivog razvoja betona podržava njegova velika količina proizvedena širom sveta što stvara visoke zahteve za proizvodnju betona. Sadašnje istraživanje je važan doprinos za održiva rešenja. Održivi beton ili "zeleni beton" se jednostavno mogu definisati kao betoni sa nižim uticajima na životnu sredinu od konvencionalnog betona [39, 40]. Predmet istraživanja doktorske disertacije su fizičko-mehaničke karakteristike zelenih betona, koji se sastoje od:

- velike količine letećeg pepela ili otpadnog pepela (više od 30%),
- značajno smanjene količine portland cementnog klinkera (manje od 20%) i
- od granulisane zgure iz visoke peći.

Zeleni betoni u ovim granicama pripadaju grupi "betona sa visokim sadržajem letećeg pepela" ( eng. high-volume fly ash concrete –skr. HVFAC). Ne postoji jasne granice u količini pepela za okarakterisanje betona da pripada grupi sa "visokim sadržajem pepela", no svakako treba naglasiti da se ne radi o cementima sa udelom 15-25% letećeg pepela, koji su u svakodnevnoj primeni. Imajući u vidu ogromne razlike u fizičkim i hemijskim karakteristikama različitih letećih pepela, količina zamene cementa sa pepelom se kreće od 30-70%. Karbonatni leteći pepeli, koji pored pucolanskih svojstava poseduju i hidraulična svojstva se mogu koristiti u većim (do 70%), dok koji pripadaju grupi kiselih LP samo u nešto manjim (do 50%) količinama u dela u vezivu. Ono što je veoma jasno u toj grupi zelenih betona jeste namera, težnja da se LP koristi u što većem obimu. Ta pretenzija je opravdana istovremeno sa ekonomskog, ekološkog ali i socijalnog aspekta.

Jedan od zahteva održivog betona (kao i kod drugih građevinskih materijala) je i trajnost [41, 42]. U XXI. veku opravdani su samo dugotrajni betoni, koji podnose uticaje sredine kojima su izloženi. Poštujući ovu činjenicu, glavni cilj ove doktorske disertacije je odrediti mogućnosti za postizanje *Zelenih Betona Visokih Performansi sa velikim sadržajem letećeg Pepela* (ZBVPP).

Ključna razlika, na koju se ova disertacija fokusira je pokušaj da se umesto Portland cementa, koristi metalurški cement kao vezivo. Pri čemu se udeo cementnog klinkera u betonu smanjuje na trećinu, još pre zamene sa pepelom iz TE. Metalurški cement je vezivo sa dominantnom količinom GZVP pored cementnog klinkera i gipsa u svom sastavu.

Prvi korak u postizanju ZBVPP je mehaničko aktiviranje letećeg pepela ili otpadnog pepela. Mlevenjem čestice LP (posebno šupljih zrna - eng.cenospheres) se razbijaju na manje delove i na taj način se povećava pucolanska aktivnost i obradivost betona [43, 44, 45]. Otpadni pepeo je generalno grublji od LP, ali pošto je odležao u vlažnom stanju, njegova hemijska aktivnost je značajno smanjena i zamenujući vezivo, može povećati obradivost betona. GZVP je hidraulični SCM bez

$C_3A$  (trikalcijum-aluminata) [46]. Razlog da se LP koristi u kombinaciji sa GZVP, jeste dodatno povećanje ugradljivosti. Pored navedenih, vodovezivni faktor može biti još dodatno, znatno smanjen korišćenjem adekvatnog hemijskog dodatka (superplastifikatora), što omogućava da usled značajnog smanjenja cementnog klinkera rezultat bude beton visoke čvrstoće (čvrstoća pri pritisku iznad 50 MPa).

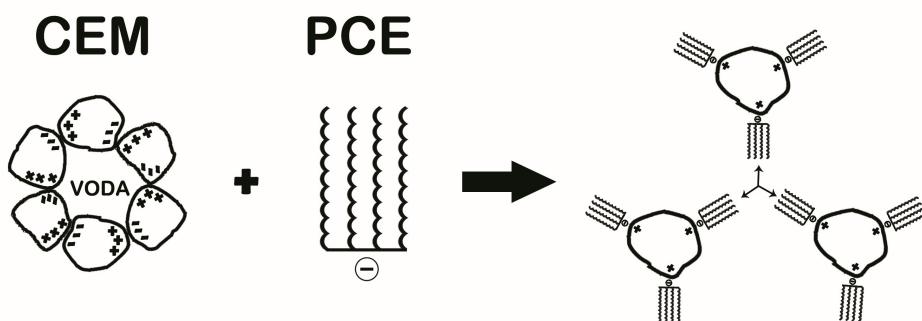
## 2.5 UPOTREBA HEMIJSKIH ADITIVA – SUPERPLASTIFIKATORA

Plastifikatori (ili reduktori vode) su hemijski dodaci pomoću kojih se poboljšava ugradljivost svežeg betona pri nepromenjenoj količini vode u mešavini ili omogućavaju redukciju vode u betonskoj mešavini pri nepromenjenoj ugradljivosti [47].

Plastifikatori od lignosulfonata i hidroksi karboksilne kiseline su u primeni već više od 50 godina i imaju moć redukcija količine vode za 8-12 % pri nepromenjenom konzistencijom. 70-tih godina se već primenjivala druga generacija aditiva na bazi sulfoniranih naftalen-formaldehidnih kondenzata (eng. sulphonated naphthalene formaldehyde – skr. SNF, Japan 1963) i sulfoniranih melamin-formaldehidnih kondenzata (eng. sulphonated melamine formaldehyde –skr. SMF, Nemačka 1964). SNF i SMF imaju značajno povećanu redukciju vode i do 30%, pa se nazivaju superplastifikatorima [48].

1981. se pojavila treća generacija plastifikatora sa još jačim višnjim stepenom redukcije vode (eng. High Range Water Reducing Admixture, skr. HRWRA) koji se spominje i kao hiperplastifikator. Treću generaciju čine hemijski dodaci na bazi polikarboksilat etara, tj. modifikovanih polikarboksilata (eng. polycarboxylate ether ili skr.PCE). PCE se razlikuju od ostalih plastifikatora po nekim specifičnostima. Sastoje se od jednog hidrofobnog dela sa dugim lancem ugljenika (anjon) i jednog hidrofilnog dela tipa karboksilata ili tipa sulfonata (katjon) [49]. Prilikom mešanja bez prisustva PCE, cement se u vodi brzo rastvara i počinje rana hidratacija usled

koje silikatna površina zrna cementa biva negativno, dok aluminatni deo površine pozitivno najelektrisana. Zbog različitog najelektrisanja dolazi do privlačenja i flokulacije (grupisanja, agregacije) čestica cementa usled koje određena količina slobodne vode postane zarobljena, na taj način smanjujući efektivni vodocementni faktor u mešavini [50]. PCE ima dvojno dejstvo plastifikatora u svežem betonu: pomoću stornog ometanja i disperzijskim uticajem, za razliku od tipa SNF i SMF, koji utiču samo na bolju disperziju. Naime, u sistemu voda-cement anjonski deo PCE koji se nalazi na glavnom lancu se adsorbuje na katjonskom delu površine čestica cementa, tj. sa delom sa  $\text{Ca}^{2+}$  jonima ili deo sa aluminatnom fazom [51, 52]. Pri tome slobodni, bočni lanci u sistemu prave sterno ometanja i na taj način sprečavaju da dođe do flokulacije (Slika 2.2).



Slika 2.2 Šematski prikaz delovanja superplastifikatora sa PCE na deflokulaciju u svežoj cementnoj pasti (na osnovu [50] i [53])

U kojoj meri, tj. koliko efikasno će glavni lanac PCE da se adsorbuje na delu površine čestica cementa ili čestica SCM-a je od krucijalne važnosti i naziva se kompatibilnost. Ono što je važno spomenuti kod superplastifikatora na bazi PCE postoji mogućnost da se glavni lanci dizajniraju kako bi bili što je moguće kompatibilniji sa česticama cementa. Iz te osobine proizilaze i superiorne mogućnosti ali i potencijalne mane PCE. Naime, što je veća kompatibilnost sa određenom vrstom cementa, to ujedno znači i nekompatibilnost sa značajno različitim vrstama. Pošto molekularno strukturiranje, tj. dizajniranje na

molekularnom nivou je ipak dosta složeno, proizvođači se trude da superplastifikatori na bazi PCE budu kompatibilni sa što je moguće više vrsta cementa. Statistički gledano i dalje se najviše koriste čist portland cement i cementi sa manjom količinom (do 80% veziva) zamene sa mineralnim dodacima, tj. CEM I i CEM II. Upravo zbog toga često su PCE superplastifikatori u opštem slučaju manje delotvorni npr. sa CEM III [54]. S druge strane kao što su rezultati u [55] pokazali, različite vrste zgure pokazuju kompatibilnost sa različitim vrstama PCE superplastifikatora, pa za zahtevanu konzistenciju razlika u potrebnoj količini superplastifikatora može da bude i tri puta veća.

## 2.6 NEGA BETONA SA SCM PRI POVIŠENIM TEMPERATURAMA

S jedne strane, poželjno je povećati količinu SCM-a u betonu, naročito pomoću ekološki problematičnih materijala (kao što je LP). S druge strane, značajno smanjenje količine cementnog klinkera sa GZVP, a posebno sa LP, značajno utiče na mehaničke osobine betona. Poznato je da većina SCM usporava rani razvoj čvrstoće u betonima. Ta osobina može biti neželjena, a takođe utiče na maksimalnu zamenjujuću količinu SCM u betonu i povećava potrebno trajanje nege betona; istovremeno zahteva i veću pažnju prilikom nege. Zamenom veće količine cementnog klinkera sa SCM u betonu, smanjuju se rane čvrstoće betona (pri starosti betona manje od 28 dana) i vreme vezivanja. Postoje brojne naučne publikacije posvećene ovoj temi [56, 57, 58, 59, 60, 61], dokazujući da u kasnijim periodu (90 dana umesto 28) betoni sa SCM mogu imati jednaku čvrstoću ili čak i veće od Portland cement betona, ali u primeni, u praksi to predstavlja potencijalni rizik. Zbog toga je velika pažnja posvećena razvoju efikasnog i prihvatljivog načina ubrzanja razvoja rane čvrstoće kod betona sa SCM [62, 63, 64, 65].

Veliki broj naučnih radova se bavi istraživanjem uticaja nege pri povišenim temperaturama na osobine očvrslog betona sa SCM – trenutno jednoj od

najefikasnijeg i racionalnijeg postupka za ubrzanje procesa hidratacije i pucolanskih reakcija.

Poznato je da silikati u amorfnom stanju poseduju povoljna pucolanska svojstva. Kristalasti silikati kao što je kvarc sjedinjuju sa  $\text{Ca(OH)}_2$  veoma sporo, međutim pri povišenim temperaturama taj proces je brži [66].

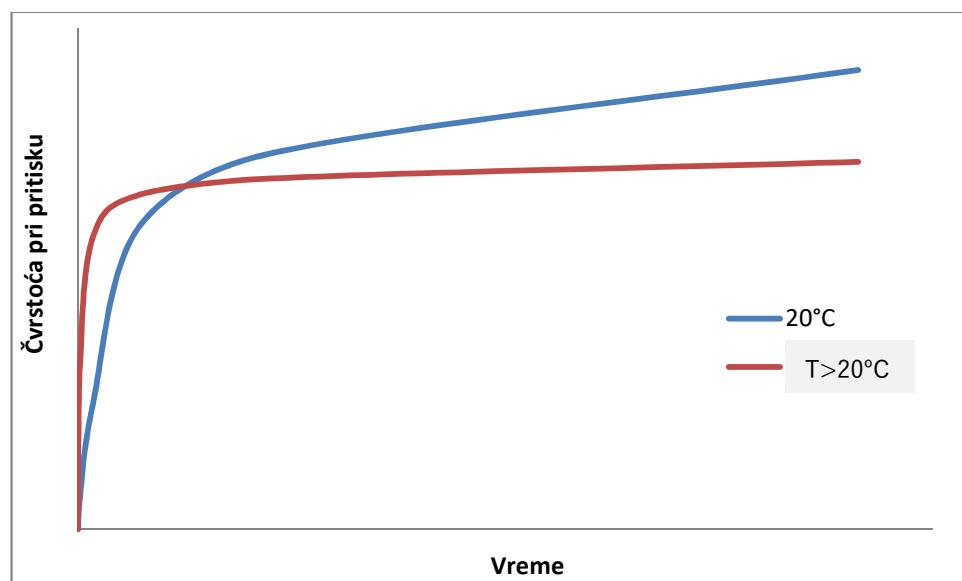
Hamzah i Aprianti su ustanovili da pri zameni cementa od 50 % u mešavini sa SCM, pre svega sa zgurom ili letećim pepelom, značajan pad jednodnevne čvrstoće se do izvesne mere može kompenzovati ako su uzorci izloženi kratkotrajnom dejству (2,5 ili 5 sati) povišenih temperatura do 60°C [67] .

U radu [68] su prikazani rezultati ispitivanja uticaja različitih načina nege. Betoni sa različitim udelom zgure (0-75%) u vezivu su negovani zaporivanjem na 80°C, pod autoklavnim uslovima (175°C, 0.5 MPa) i pod normalnim uslovima nege (28 dana, 20°C i 100% RH). Na osnovu rezultata se može zaključiti da pri zameni cementa sa 50% zgure, po svim ispitanim uslovima nege su postignuti isti rezultati čvrstoće pri pritisku kao i kod referentne mešavine sa čistim portland cementom. Pri 25% zamene sa zgurom rezultati uzorka koji su negovani pod normalnim uslovima i zaporivanjem na 80°C postigli su za 20% veću čvrstoću od čistog portland cementa, dok pod autoklavnim uslovima rezultati su bili isti. Rezultati uzorka sa većom količinom zgure su pod svim uslovima nege bili manji od referentnog.

U studiji koja se bavi održivim razvojem materijala za prefabrikaciju [69] 50% m/m cementa je bilo zamenjeno sa zgurom, letećim pepelom, pepelom pirinčane pleve ili njihovom kombinacijom. Opitni kompozitni materijali su bili negovani u vodi na  $23 \pm 3^\circ\text{C}$ , na vazduhu pri temperaturi  $27 \pm 3^\circ\text{C}$ , a takođe su negovani i u vodi 24 sata na 60, nakon čega bi još 27 dana bili negovani u vodi na  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  ili na vazduhu pri temperaturi  $27 \pm 3^\circ\text{C}$ . Studija je pokazala da svi predmetni SCM su imali značajno bolje rezultate nakon 24 sata nege u vodi na 60°C. Uzorci sa zgurom su imali bolje rezultate od referentnih, a leteći pepeo je pokazao bolje rezultate u ternarnim

mešavinama od kombinacije samo sa portland cementom. Jedan od najvažnijih zaključaka je i da nakon kratkotrajne nege u vodi na  $60^{\circ}\text{C}$  za SCM materijale mnogo je efikasnija nega na toplova vlažnom vazduhu od nege u vodi.

Prilikom nege betona pri povišenim temperaturama dolazi do pojave tzv. „crossover“ efekta. Naime, rane čvrstoće pri negovanju betona na temperaturama većim od  $20^{\circ}\text{C}$  su veće, ali pri tome konačne čvrstoće na povišenim temperaturama će ostati manje upoređujući sa betonom koji je negovan na  $20^{\circ}\text{C}$ , tj. linije razvoja čvrstoće se ukrštaju kao što je prikazano na Slici 2.3:



Slika 2.3. Šematski prikaz „Crossover“-efekat, tj. ukrštanje linija razvoja čvrstoće usled nege na  $20^{\circ}\text{C}$  i pri temperaturama većim od  $20^{\circ}\text{C}$

U radu [70] dat je bogat pregled naučnih radova koji se bave „crossover“-efektom.

Za eksperimentalna istraživanja je posebno interesantan naučni rad [71] koji se bavi uticajem vodovezivnog faktora i temperature na hidrataciju i čvrstoću betona sa metalurškim cementom. U radu su dati rezultati čvrstoća nakon 2, 7, 28, 90 i 365 dana usled varijacije vodovezivnog faktora od 0,3 -0,5, količine zgure u vezivu od 0-80% m/m i temperature nege betona od  $20\text{-}60^{\circ}\text{C}$ . Rezultati rada ukazuju da kako se povećava količina zgure u vezivu, opravdano je povećavati i temperaturu nege,

što će rezultirati većim postignutim stepenom hidratacije, pa i čvrstoćama, istovremeno smanjujući „crossover“-efekat.

## 2.7 TRAJNOST BETONA SA SCM

Trajinost betona koji sadrže SCM je takođe aktuelna tema istraživanja. Dok zamena cementa sa SCM-om povećava hemijsku otpornost, smanjuje permeabilnost, smanjuje toplotu hidratacije i skupljanje, s druge strane otpornost na abraziju i otpornost na smrzavanje i odmrzavanje u prisustvu hlorida je upitna i takođe povećava karbonatizaciju [72, 73, 74, 75, 76]. Sva ova svojstva zavise od starosti betona; stoga je povećanje ranih čvrstoća ZBVPP važno i sa aspekta trajnosti.

Otpornost betona prema habanju je veoma važna karakteristika svih betona koji su na neki način izloženi mehaničkim uticajima. Naime, deterioracija izložene površine betona erozijom, kavitacijom ili abrazijom se često dešava istovremeno sa drugim štetnim uticajim (mraz, hemijska agresija, biološka agresija, itd...). Na taj način, kombinacijom tih štetnih uticaja površina betona mnogo brže propada, nego pojedinačnim delovanjem istih.

Posmatrajući preporuke postojećih standarda [77, 78], betoni izloženi abraziji ne bi trebali da se prave sa pucolanskim cementima (CEM IV), kompozitnim cementima (CEM V), kao ni metalurškim cementima, gde je sadržaj cementnog klinkera manji od 20%.

Fernandez i Malhotra su u opširnoj studiji [79] već 1990.godine istražili uticaj vodocementnog faktora i količine zamene cementa sa granulisanom zgurom do 50%. Pored drugih, povoljnih osobina betoni sa udelom zgure u vezivu su imali umanjenu otpornost na habanje. Pored toga što povećana količina pepela u betonima smanjuje otpornost na habanje, u radu [80] ispitivanja na betonima sa

visokim sadržajem pepela su pokazala da je dodatak GZVP značajno smanjio otpornost prema habanju.

Dakle, ZBVPP na osnovu svog sastava sa minimalno 80% SCM-a u vezivu pripadaju kritičnoj grupi betona sa aspekta otpornosti na habanje, stoga je ovom ispitivanju bila posvećena posebna pažnja.

Druga kritična osobina sa aspekta trajnosti ZBVVP-om je otpornost na dejstvo mraza u prisustvu soli za odmrzavanje. Prema gore već pomenutim, postojećim standardima [77, 78], betoni izloženi dejstvu mraza u prisustvu soli ne bi trebali da se prave sa pucolanskim cementima (CEM IV), kompozitnim cementima (CEM V), kao ni metalurškim cementima, gde je sadržaj cementnog klinkera manji od 20%. To se odnosi i na klasu izloženosti iz grupe XD – kada je reč o solima za odmrzavanje, ali je identičan zahtev i kada je reč o solima iz morske vode – klasa izloženosti grupe XS.

Pored toga postoje i studije sa bogatim iskustvom uticaja morske vode pri niskim temperaturama na betone pravljene metalurškim cementima, koje svedoče da se ovakvi betoni mogu smatrati otpornima jedino sa ako se koriste i aeranti [81].

Leteći pepeo je mineralni dodatak, koji pri većim količinama u betonu značajno ugrožava otpornost betona na dejstvo mraza u prisustvu soli za odmrzavanje [82, 83, 84, 85], a već i pri manjih količinama (CEM II) pokazuje pad otpornosti [86]. Pored količine i vrsta pepela, ali i vodovezivni faktor bitno utiču otpornost prema dejstvu mraza [87]. Aerantima je moguće značajno poboljšati mrazootpornost, ali je kod betona letećim pepelom to mnogo složeniji zadatak.

Pored ispitivanja otpornosti na habanje i na dejstvo mraza u prisustvu soli za odmrzavanje, su ispitana je i vodonepropustljivost ZBVPP, na osnovu koji se može generalno okarakterisati i otpornost betona prema difuziji različitih gasova i otpornost prema hemijski agresivnim uticajima generalno [88, 89, 90, 91, 92].

## 2.8 SINERGIJA SLANE VODE I TERNARNOG SISTEMA VEZIVA C-Z-P

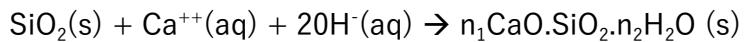
Voda je najveći prirodni resurs, ali samo 2,5% od toga je slatka vodna, a 2/3 je zamrznuto u ledu ili skriveno duboko pod zemljom [93]. Vrednost sveže vode se povećava s obzirom na povećanje potražnje za vodom, a sa aspekta održivog razvoja već je prisutno efikasnije upravljanje vodama. Prema važećem standardu EN 1008 za vodu za mešanje betona: "Slana voda se može koristiti za beton bez armature ili drugih ugrađenih metala, ali uopšte nije pogodna za proizvodnju armiranog ili prednapregnutog betona" [94]. Dakle, u nedostatku pijače, slatke vode u nekim slučajevima je neibežno korišćenje slane vode ili agregata koji sadrži hloride. To se naravno odnosi prvenstveno na nearmirani beton ili beton armiran nemetalnom armaturom, pri čemu podrazumeva ubrzano očvršćavanje (zbog prisustva hlorida), ali i pad 28-dnevne čvrstoće betona od 10-20% [95].

Korišćenje pijače vode za betoniranje u nekim slučajevima predstavlja velike dodatne troškove. Umesto slatke, korišćenje slane vode, a pogotovo agregata poreklom iz mora znači u mnogim situacijama ne samo manje transportne troškove i uštedu u preradi/desalinaciji, već i mnogo prihvatljivije rešenje sa aspekta održivog razvoja. Eventualna mogućnost iskorišćenja koncentrisanog rasola - otpadne vode koja nastaje prilikom odsoljavanja morske vode – imala bi dodatan ekološki značaj imajući u vidu njen štetan uticaj [96].

Dobro je poznata činjenica da se SCM materijali koriste upravo za kontrolu alkalno-silikatne reakcije zahvaljujući sposobnosti da smanje alkalnost u gelskim porama. Ta osobina je povezana njihovim uticajem na sastav C-S-H gel i sposobnošću vezivanja alkalija [97, 98, 99].

Stanton prilikom proučavanja alkalno-silikatne reakcije (ASR) je već 1940. godine primetio da SCM materijali reaguju sa alkalijama iz cementa u betonu [100]. 1953. godine Buck i dr. su objavili rad u kojem su rezultati ukazali da leteći pepeo, pored drugih SCM materijala poseduje povoljna svojstva za kontrolu ASR [101]. Od tada do danas leteći pepeo, pogotovo tip F - prema ASTM podeli, se već uspešno koristi u praksi za kontrolu ASR i postoji veoma bogata literatura publikovanih naučnih radova letećim pepelom i ASR. Bez ambicije da se navede iscrpan pregled i analiza tih radova, na osnovu [102], može se rezimirati da je danas već dokazana osobina

letećeg pepela da veže alkalije u pornom rastvoru C-S-H. To se dešava putem pucolanske [103]:



i alkalno-silikatne reakcije [103]:



Međutim, kao što je u radu [104] objašnjeno, i u pucolanskoj reakciji postoji mogućnost da joni alkalnih metala budu vezani u sekundarnim CSH hidratima. Na taj način leteći pepeo i pomoću pucolanske i alkalno-silikatne reakcije reaguje sa alkalijama u pornom rastvoru.

Geopolimer sistemi veziva i hibridni sistemi veziva takođe uspešno koriste alkalije poput Na, K koji su vezani hemijskom reakcijom sa SiO<sub>2</sub> koji je prisutan u velikim količinama u LP klase F [105, 106, 107].

Poznato je da implementacijom mineralnih dodataka može značajno da se smanji prodror jona hlorida u betonu. To je rezultat hemijske reakcije između hlorida i C<sub>3</sub>A kao i C<sub>4</sub>AF, a rezultirajući materijali su kalcijum hloro-hidrat (C<sub>3</sub>A/F · CaCl<sub>2</sub> · H<sub>10</sub>), poznatiji kao Fridelova so i C<sub>3</sub>A/F · 1/2CaSO<sub>4</sub> · 1/2CaCl<sub>2</sub> · H<sub>12</sub>, tj. Kuzelova so. Kuzelova so nije praćena sekundarnom pojавom etringita i pored Fridelove soli se pojavljuje pri manjim količinama gipsa u odnosu na C<sub>3</sub>A [108]. Hloridi vezani na taj način čine relativno trajna jedinjenja. Pored drugih mineralnih dodataka, pogotovo leteći pepeo i granulisana zgura imaju značajnu osobinu vezanja hlorida [98,99]. Među trenutno postojećim vrstama cemenata prema EN 197-1, u opsežnom naučnom radu [97], koji se bavi SCM materijalima u cementu i ocenom sposobnosti vezanja slobodnih hlorida, upravo je CEM III/B pokazao najbolje rezultate.

Rastvor soli NaCl u vodi je pH neutralan, ali u prisustvu cementa hloridi – anjoni reaguju sa cementnom pastom i postaju hloroaluminati. U isto vreme cementna pasta se ponaša kao anjonski izmenjivač i pri vezanju hlorida iz pornog rastvora istovremeno oslobađa OH<sup>-</sup>. Na taj način rastvori soli u pornoj vodi povećavaju pH vrednost [109].

U radu [110] su betoni pravljeni sa ternarnim sistemom veziva (uključujući leteći pepeo i cementni klinker) pokazali povećanu trajnost prilikom uticaja morske vode, što je objašnjeno sinergijom jona hlorida i sulfata.

## 2.9 LAKOAGREGATNI BETONI I SCM

Lakim betonima se smatraju betoni sa suvom zapreminskom masom manjom od  $2000 \text{ kg/m}^3$  [77]. Prema načinu proizvodnje lake betone možemo svrstati u tri grupe [111]:

- lakoagregatne
- čelijaste, peno-betone, aerirane ili gas-betone
- jednozrne, betone bez finih čestica agregata, tkzv. kaverozne betone.

Prema nameni lakih betona najčešće se navodi podela prema CEB/RILEM-ovoj klasifikaciji datoј u Tabeli 2-1 [112]:

*Tabela 2-1. Podela lakih betona prema CEB/RILEM*

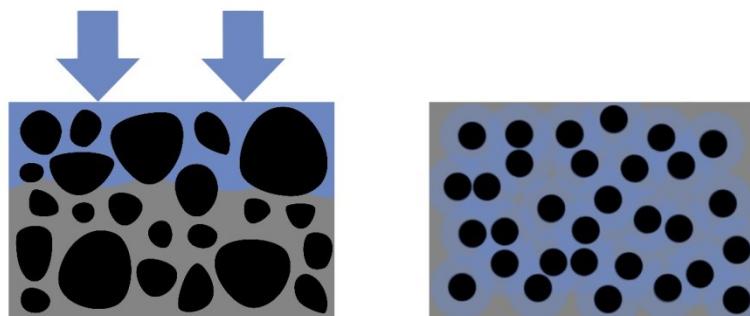
Tip lakoog betona	Konstrukcijski	Konstrukcijsko-termoizolacioni	Terмоизолациони
Čvrstoća pri pritisku [MPa]	> 15,0	>3,5	>0,5
Koeficijent topotne provodljivosti [W/m° K]	-*	<0,75	<0,3
Orijentaciona zapreminska masa [kg/m³]	1600-2000	<1600	<<1450

\* nije definisana

Laki betoni se koriste pre svega zbog preimcuštva naspram betona normalne težine u vidu smanjenja sopstvene težine konstrukcije, ali i zbog termoizolacionih svojstava. Kada se koriste kao konstrukcijski laki betoni, prednosti u vidu uštede

armature, smanjenih troškova fundiranja, brže gradnje, manjeg habanja opreme itd. su često veće od njegovih mana, što su pre svega skuplja cena lakog agregata u odnosu na običan kameni agregat i veća količina cementa. Kod lakoagregatnih betona da se postigne ista čvrstoća pri pritisku, za razliku od običnih betona u proseku treba 15-20% veća količina **veziva**. To je bio jedan od razloga da se lakoagregatni betoni uključe u predmet istraživanja.

Drugi razlog je specifičnost koju lakoagregatni betoni poseduju u vidu mogućnosti tzv.unutrašnje nege (eng. internal curing). Naime, laki agregati su porozni materijali koji mogu imati značajno upijanje vode. Pri mešanju dakle laki agregat upija vodu iz sveže mešavine, koja mora da se predviđa i da se pored predviđene količine vode, (neophodne za projektovani vodocementni faktor) doda pri mešanju. Uglavnom u praksi preovladava stav da ukoliko je upijanje (ukupno) lakog agregata veće od 10 %m/m, preporučljivo je pre mešanja betona čak prethodno pokvasiti laki agregat, kako bi se prethodno u izvesnoj meri zasitio i sprečio upijanje vode iz sveže mešavine betona. Prilikom očvršćavanja lakih betona u porama lakih agregata postoji na taj način određena količina slobodne vode pomoću koje unutar očvrsle strukture lako betona dolazi do unutrašnje nege. Za razliku od uobičajene nege kvašenjem gornje površine betona, kao što je na Slici 2.4 prikazano, dolazi do mnogo efikasnije nege unutrašnjosti betona u ranoj fazi očvršćavanja.



Slika 2.4 Učinkovitost nege na površini običnih betona i unutrašnje nege kod lakoagregatnih betona

Unutrašnja nega pomoću lakih, poroznih agregata nudi mnoge prednosti. Kao što je u [113], pomoću 3D rendgenskog mikrotomografa ustanovljeno, unutrašnja nega je najizraženija tokom prvih 24 sata, kada je i najvažnije. U istom radu su autori naveli i da pomoću unutrašnje nege dolazi i do većeg stepena hidratacije, a nakon tri dana i do povećanja čvrstoće pri pritisku. Pri određenim mešavinama, pre svega u funkciji cementa koji se koristi, moguće je značajno smanjiti hidrauličko skupljanje betona kao što je pokazano u radovima [114, 115], dok na autogeno skupljanje betona je jedino moguće uticati unutrašnjom negom [116].

Vodocementni faktor je takođe važan pri razmatranju efekasnosti unutrašnje nege. Kao što je u [117] dokazano, pri snižavanju vodocementnog faktora zapažen je veći stepen hidratacije usled doprinosa unutrašnje nege.

Sistemi veziva sa mineralnim dodacima (SCM) mogu imati takođe povoljnije uslove za sporije pucolanske reakcije usled unutrašnje nege. U radu [118] čvrstoća pri pritisku lakoagregatnih mešavina nakon 56 dana kod uzorka sa 8% m/m mikrosilike, 20% m/m zgure i 25% m/m letećeg pepela u vezivu je bila veća usled unutrašnje nege za 7,7%, 12,2% i 6,1%, respektivno. Povoljan uticaj unutrašnje nege u betonu sa zasićenim lakisim agregatom je izložen i u radu [119] koji se bavi uticajem zamene cementa sa 40% i 60% m/m letećeg pepela. Nakon godinu dana uzorci sa 40% i 60% letećeg pepela imali su 55% i 49% veću čvrstoću pri pritisku usled unutrašnje nege.

SCM imaju važan uticaj na razvoj lakoagregatnih betona. Pomoću SCM materijala danas je već moguće značajno unaprediti svojstva maltera – matrice. A na taj način uticati i na svojstva očvrslog lakoog betona pravljenih sa postojećim lakisim agregatima. U radu [120] je analizirana mogućnost primene cementnih matrica za lakoagregatne betone visokih performansi, sa smanjenjem emisijama CO<sub>2</sub> – primenjujući SCM materijale i usavršavanjem pakovanja čestica. Mehanička svojstva matrice su SCM materijalima značajno poboljšana, pri smanjenju karbonskog otiska i za 43%. Druga mogućnost koju SCM materijali nude prilikom

primene u lakoagregatnim betonima je unapređenje termotehničkih svojstava . Kao što je u radu [121] pokazano, izborom cementa sa mineralnim dodacima (CEM II/A-M (S-L), CEM II/A-M (V-L) ili CEM III/B) moguće je smanjiti koeficijent toplotne provodljivosti i na taj način smanjiti energetske gubitke objekta. Dok sa nekim SCM kao što je mikrosilika, istovremeno je moguće postići i bolje mehaničke osobine i smanjiti njegov koeficijent toplotne provodljivosti u betonu.

## 2.10 BETONA ULTRA VISOKIH PERFORMANSI

Devedesetih godina prošlog veka počeo je razvoj nove vrste betona progresivno usavršenih svojstava, tzv. Betona ultravisokih performansi ili betona ultravisokih svojstava (eng. Ultrahigh performance concrete). Prvenstveno se radi o betonima koji imaju ultravisoke čvrstoće, ali posledica njihovih izuzetno malih vodovezivnih faktora (često manje od 0,2) je i izvanredna kompaktnost usled koje poseduju značajno poboljšanu zaptivenost, žilavost i trajnost [122, 123, 124, 125, 126]. Njihova čvrstoća pri pritisku se kreće uglavnom 120-250 MPa, pri čemu su postignute i značajno veće vrednosti, ali pomoću specijalnih materijala, tehnologije ugradnje i nege na 400° C. Fokusirajući se na UHPC koji su našli primenu, to su visokokvalitetni betoni sa čvrstoćom pri pritisku većom od 150 MPa, koji su skoro potpuno nepropusni za CO<sub>2</sub>, hloride, sulfate i druge štetne agense, neretko i 300 puta duktilniji od betona (mikroarmirani) [124].

Nasuprot ovog niza izvanrednih osobina UHPC stoji samo jedna prepreka ka njihovoј širokoj, svakodnevnoj primeni: njihova cena. Trostruka količina cementa po m<sup>3</sup> betona, skupi mineralni dodaci, 10-15 puta veća količina hemijskih aditiva i specijalnih čeličnih vlakana, u poređenju sa običnim ili mikroarmiranim betonima, rezultira neretko 10-15 puta skupljom cenom UHPC.

Prilikom analize ekološkog otiska UHPC s jedne treba uzeti u obzir da rezultirajući materijal će očekivano imati znatno duži eksploracioni vek (sigurno 10 puta duže

od običnog betona) koji opravdava povećane količine emisije štetnih gasova po jedinici UHPC.

S druge strane, računajući sa procenjenom emisijom CO<sub>2</sub> od 1 t/t cementa i 1,9 t/t proizvedenog čelika, može se aproksimirati da je ekološki otisak UHPC u opštem slučaju 3-4 puta veći od običnog betona m<sup>3</sup>.

Navedene mane su podstakle mnoge istraživače da UHPC učine i zelenijim, ali i jeftinijim [127, 128, 129, 130].

Pri razvoju zelenijeg i jeftinijeg UHPC-a važna je i istovremena dosledna primena njegovih osnovnih principa [131]:

- smanjenje poroznosti, koji je najvažniji preduslov visokih pritisnih čvrstoća a postiže se povećanjem gustine pakovanja tj. optimalnom pakovanjem zrna i smanjenjem količine vode u mešavini pomoću HRWRA,
- poboljšana mikrostruktura, tranzitna zona između agregata i veziva, pre svega kada su u vezivu prisutni i pucolani,
- unapređena homogenost, koja smanjuje pojavu mikoprslina tokom očvršćavanja i
- povećanje žilavosti, pre svega primenom čeličnih ili karbonskih vlakana tj. mikroarmiranjem.

Povećanje gustine pakovanja je i trenutno veoma aktivna tema mnogih istraživanja. Postizanjem optimalne gustine pakovanja, tj. supremuma vrednosti gustine je posvećena velika pažnja u oblasti razvoja UHPC. Postoji veliki broj raznih numeričkih modela [132, 133, 134, 135] za proračun optimalne gustine pakovanja. Ipak, u okviru razvoja ZBVPP, ona je utvrđena eksperimentalnim putem, sa ciljem postizanja što veće čvrstoće pri pritisku na uzorima maltera – u delu 4.2 - paralelno sa istraživanjem ugradljivosti, tj. smanjenja količine vode u mešavini.

Sa ciljem poboljšanja mikrostrukture u većini UHPC se koriste SCM-i koji povećavaju njegovu čvrstoću, kao što su mikrosilika, nanosilika i metakaolin. Pored

ovih (skupih) SCM-a u cilju poboljšanja mikrostrukture urađena su mnoga ispitivanja i sa drugim, jeftinijim, ali istovremeno i ekološki opravdanijim materijalima[127, 128, 129, 130]. U naučnim publikacijama granulisana zgura [136] i leteći pepeo [137, 138, 139](pre svega karbonatni) su najčešće korišćeni SCM, ali se koriste i kamenno brašno [140, 141](filer krečnjaka) i pepeo od pirinčane pleve [142] i naravno njihove kombinacije za UHPC. U pomenutim radovima ukupna količina SCM je 10 – 50 % m/m od ukupne količine veziva, a količina portland cementnog klinkera od 380-900 kg/m<sup>3</sup>.

Povećanje žilavosti UHPC se postiže uglavnom čeličnim vlaknima. Pretežno se koriste ravna vlakna, dužine 3 - 15 mm (kako bi se smanjio nepovoljan uticaj na ugradljivost), prečnika 0.1-0.25 mm, na površini obavijeni mesingom (eng. brass-coated), čija čvrstoća pri zatezanju se kreće između 2000-3000 MPa, u količinama 200-400 kg. Žice veoma sličnih karakteristika se koriste i za armiranje pneumatika. Prilikom reciklaže tih, istrošenih pneumatika postoji mogućnost da se ta čelična vlakna ekstraktuju i separišu. Na taj način reciklirana čelična vlakna su naravno mnogo jeftinija i podstakla su mnoga istraživanja iz oblasti mikroarmiranih betona. U većini, publikovani rezultati su pokazali da se na taj način reciklirana vlakna mogu koristiti kao zamena za industrijska vlakna, ali je primetna velika disperzija u rezultatima. Problemi koje se javljaju: stepen oštećenja vlakna tokom reciklaže, stepen nečistoće (guma, filc), stepen smanjenja čvrstoće (npr. ako se koristi spaljivanje za ekstrakciju), stepen izdeformisanosti i koliko su zamrsena vlakna. Dalje, dominantna ili reprezentativna dužina vlakna ima takođe značaj, kao i odnos dužina/prečnik vlakna. I pored puno faktora koji mogu nepovoljno da utiču reciklirana vlakna danas su već u primeni, pre svega za izradu mikroarmiranih podova.

Iako trenutno UHPC se još uvek relativno retko koriste, kao što Aitcyn navodi: "Izvođači i investitori će morati shvatiti da nije važna cena 1m<sup>3</sup> betona, nego cena koštanja 1 MPa ili 1 godine eksploracije konstrukcije"[143].





EKSPERIMENTALNI DEO  
ISTRAŽIVANJA



### 3. EKSPERIMENTALNI DEO ISTRAŽIVANJA

#### 3.1 KOMPONENTNI MATERIJALI

##### 3.1.1. CEMENT

U fokusu svih istraživanja su zeleni betoni bazirani na trokomponentnom (ternarnom) vezivu, gde je udeo mineralnih dodataka cementu (SCM) veći od 80%. Cementni klinker se zamenjuje sa otpadnim materijalima – industrijskim nuzproizvodima (otpadni pepeo iz TE i granulisana zgura i zvisoke peći), čije hemijske i fizičke karakteristike dosta variraju. Sa namerom da se smanji uticaj oscilacije u kvalitetu mineralnih dodataka, umesto da se CEM I - čist Portland cement - meša sa pepelom iz TE i granulisanom zgurom, izabran je cement CEM III/B 32,5N LH/SR (koji se sastoji od Portland cementnog klinkera i granulisane zgure iz visoke peći). Na taj način jedina promenljiva komponenta u vezivu je pepeo iz TE, koji se i nalazi u fokusu istraživanja. Pošto je veza zgure i pepela iz TE u mešavini od krucijalne važnosti, sa namerom da bi se dodatno opravdali/proverili rezultati, korišćeni su sulfatnootporni metalurški cementi oznake CEM III/B 32,5N LH/SR od dva proizvođača: "Lafarge" Beočinska fabrika cementa i NAŠICECEMENT d.d.iz Našica (Rep. Hrvatska). Važan argument za izbor mešavine veziva CEM III/B – leteći pepeo je i laka dostupnost metalurškog sulfatnootponog cementa, koja pojednostavljuje primenu ZBVPP.

Na manjem broju opita korišćeni su i cementi CEM I 52,5 N, CEM I 42,5 R, CEM II/A/S 42,5R, CEM II/A-M (S-V) 42,5 R i CEM II/B-M (P-S) 32,5R od proizvođača NAŠICECEMENT d.d.iz Našica (Rep. Hrvatska).

Sastavi cementa su navedeni u Tabeli 3.1 prema standardu SRPS EN 197-1 [153]:

*Tabela 3.1 Sastavi cementa korišćenih u istraživanjima*

R.b.	Vrsta cementa	Klinker	Prirodni pucolani	Zgura iz visoke peći	Silikatni leteći pepeo	Sporedni dodatni sastojci
1.	CEM I 52.5 N	95-100	-	-	-	0-5
2.	CEM I 42.5 R	95-100	-	-	-	0-5
3.	CEM III/B 32.5	20-34	-	66-80	-	0-5
4.	CEM II/A-S 42.5 R	80-94	-	6-20	-	0-5
5.	CEM II/A-M (S-V) 42.5 R	80-88	-	12-20*	-	0-5
6.	CEM II/B-M (P-S) 32.5R	65-79	21-35**		-	0-5

\* Udeo zgure iz visoke peći i silikatnog letećeg pepela

\*\* Udeo zgure iz visoke peći i prirodnog pucolana

Najvažnije fizičke osobine su prikazane u Tabeli 3.2. :

*Tabela 3.2 Fizička svojstva korišćenih cemenata*

R.b.	Vrsta cementa	Specifična masa	Specifična površina*	Čvrstoća pritisku nakon 28 dana [MPa]*
1.	CEM I 52.5 N	3.1	4500	62
2.	CEM I 42.5 R	3.09	4500	60
3.	CEM III/B	3.04	4000	40
4.	CEM II/A-S	3.02	3500	55
5.	CEM II/A-M (S-V)	3.06	3500	55
6.	CEM II/B-M (P-S) 32,5R	2.94	3500	42

\* podaci dobijeni od proizvođača cementa

Hemijski sastav cemenata je takođe dobijen od strane proizvođača cementa i dat je u Tabeli 3.3:

Tabela 3.3 Hemski sastav cemenata [%]

Sastav	CEMI 52.5N	CEMI 42.5R	CEMIII/B 32.5N SR-LH	CEMII/A-S 42.5R	CEMII/A-M (S-V) 42.5N	CEMII/B-M (P-S) 32.5R
CaO	61.8	61.9	45.0	59.3	57.2	52.5
MgO	2.9	2.7	6.5	2.8	2.6	3.5
SiO <sub>2</sub>	19.2	19.8	31.2	21.9	21.9	23.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.4	2.4	1.3	2.3	2.7	2.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.2	5.3	9.0	5.5	6.1	7.1
MnO	0.2	0.2	1.3	0.8	0.5	0.7
Na <sub>2</sub> O	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.8
K <sub>2</sub> O	0.7	0.8	1.0	0.7	0.8	1.1
SO <sub>3</sub>	3.6	3.3	1.8	3.5	3.1	2.9
CO <sub>2</sub>	1.7	1.6	1.0	0.6	1.9	1.0

### 3.1.2. PEPEO IZ TE

U fokusu istraživanja su bile dve vrste pepela iz TE:

- sveže uzorkovan leteći pepeo iz B bloka TE Nikola Tesla i (LP TENT B)
- uzorak deponovanog pepela sa pepelišta TE Morava (OP TE Morava).

U manjem obimu ispitivanja uključen je i otpadni pepeo sa pepelišta bloka B Termoelektrane Nikola Tesla (OP TENTB), kako bi pomogao u tumačenju rezultata ispitivanja sa 2 predmetna pepela.

Hemijski sastavi letećeg pepela iz B bloka TE Nikola Tesla i TE Morava su dati u Tabeli 3.4 :

*Tabela 3.4 Hemski sastav pepela iz TE [%]*

Sastav	TE Morava	TE Nikola Tesla B
CaO	12.48	4.50
MgO	1.89	1.72
SiO <sub>2</sub>	51.32	59.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.33	5.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.60	21.65
TiO <sub>2</sub>	0.83	0.78
Na <sub>2</sub> O	0.31	0.99
K <sub>2</sub> O	1.22	1.47
SO <sub>3</sub>	1.22	0.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.05
LOI	1.93	2.80

### **3.1.3. AGREGATI**

#### **3.1.3.1. REČNI AGREGAT**

Rečni agregat koji je upotrebljen je Moravac, separisan u pogonima firme Somborelektra iz Sombora, koji odgovara trenutno važećim propisima i zahtevima. Korištene su frakcije 0/4, 4/8 i 8/16. Zapreminska masa zrna je  $2.62 \text{ g/cm}^3$ .

#### **3.1.3.2 DROBLJENI AGREGAT**

Za potrebe izrade zelenih UHPC upotrebljen je granodiorit "Radalj", zapreminske mase zrna:  $2.71 \text{ g/cm}^3$ . Frakcija 0/4 je prosejana za dobijanje granulacije 0,3/0,8 mm – za potrebe izrade UHPC.

Dijabaz (Divčibare) je takođe upotrebljen u prosejanoj granulaciji 0,3/0,8 mm, zapreminske mase  $2.78 \text{ g/cm}^3$  za potrebe zelenih UHPC.

Za isti opit upotrebljen je i kvarc iz Nemačke proizvodjača Sika Quartz granulacije 0,3/0,8 zapreminske mase  $2.65 \text{ g/cm}^3$  sa  $\text{SiO}_2 > 99\%$  i kvarčni pesak proizvođača Jugokaolin iz Srbije, kopovi Ub, granulacije 0,3/1,2 koji je prosejan za dobijanje 0,3/0,8 sa  $\text{SiO}_2 > 98.5\%$  i zapreminske mase  $2.65 \text{ g/cm}^3$ .

Za potrebe izrade ZBVPP pored granodiorita "Radalj" frakcije 4/8 i 8/16, upotrebljen je i dacit iz Ljiga frakcije 4/8 i zapreminske mase  $2.61 \text{ g/cm}^3$ .

#### **3.1.3.3 LAKI AGREGAT (LIAPOR)**

Za eksperimentalni deo ispitivanja na laki betonima sa ternarnim mešavinama C-Z-P upotrebljen je laki agregat Liapor proizvođača Lias Austria GesmbH frakcije 4/8 mm sa sledećim parametrima: zapremeniska masa nasuta  $359 \text{ kg/m}^3$ , specifična masa materijala  $2620 \text{ kg/m}^3$ , zapreminska masa zrna  $650 \text{ kg/m}^3$ , upijanje 18,3% i čvrstoće zrna  $2.0 \text{ MPa}$ .

### 3.1.4. VODA

Pri spravljanju betonskih mešavina korišćena je pijača voda iz Vodovoda Subotica, koja prema specifikacijama standarda SRPS EN 1008:2010 pogodna za pripremu betona.

Pored pijače vode korišćena je i morska voda iz Jadranskog i Egejskog mora – na manjem broju kontrolnih opita.

### 3.1.5. ADITIVI

Pri izradi betonskih mešavina upotrebljena je nekoliko vrsta hemijskih dodataka-aditiva. Najvažnija su bila upotreba superplastifikatora, tzv. HRWRA, kako bi se smanjio vodovezivni faktor ( $w/b$ ) i postigla adekvatna ugradljivost betona. Treba imati u vidu da plastifikatori, koji se trenutno mogu naći na tržištu, predviđeni su za cemente sa dominantnim udelom portland cementnog klinkera i manjom količinom mineralnih dodataka (SCM). Tokom prvih preliminarnih – probnih mešavina većina superplastifikatora nije pokazala značajne efekte u smislu redukcije količine vode, dok su neki (npr. na bazi naftalen-sulfonata) čak imali i suprotan efekat. Kako je pri eksperimentalnim opitima upotrebljeno više vrsta cementa i više vrsta pepela, potrebna je bila stalna provera i izbor kompatibilnog aditiva za date uslove. Korišćeni su sledeći superplastifikatori na bazi modifikovanih polikarboksilata:

Sika® ViscoCrete® 4077 (proizvođač: Sika, Švajcarska):

Superplastifikator koji se koristi kod visokokvalitetnih betona, pre svega kod betoniranja pri visokim temperaturama i pri potrebama za produženom ugradljivošću. Aditiv visoke sposobnosti redukcije vode poseduje izuzetno dobro svojstvo plastičnosti i osobinu redukcije skupljanja i puzanja betona. Važniji tehnički podaci su dati u Tabeli 3.5.

*Tabela 3.5 Tehnički podaci o Sika® ViscoCrete® 4077*

Gustina	1,06 kg/dm <sup>3</sup>
Doziranje:	0,4-2,0 % prema masi cementa
pH vrednost	3,5 – 5,5 (na +20° C)
Boja	zamućena žućkasta
Suva materija	29%

Sika® ViscoCrete® Techno-20 S (proizvođač: Sika, Švajcarska):

Superplastifikator koji se bazira na tehnologiji polikarboksilatnih polimera i koristi se pri visokim zahtevima za sleganje svežeg betona (S4 i S5) čak i pri niskim vodocementnim faktorima. Koristi se za prefabrikovane betonske elemente, jer pored značajne redukcije vode povećava i početne i krajnje čvrstoće betona, kao i zaptivenost. Važniji tehnički podaci su dati u Tabeli 3.6.

*Tabela 3.6 Tehnički podaci o Sika® ViscoCrete® Techno-20 S*

Gustina	1,08 kg/dm <sup>3</sup>
Doziranje:	0,2-2,0 % prema masi cementa
pH vrednost	4,3
Boja	Svetlo braonkasta
Suva materija	29%

MC PowerFlow 1102 (proizvođač MC Bauchemie, Nemačka)

Sintetički superplastifikator visokih performansi sa nadprosečnom redukcijom vode.

Pored odlične ugradljivosti svežeg betona, zahvaljujući visokim inicijalnim čvrstoćama koristi se pre svega u prafabrikaciji. Važniji podaci su dati u Tabeli 3.7.

*Tabela 3.7 Tehnički podaci o MC PowerFlow 1102*

Gustina	1,06 kg/dm <sup>3</sup>
Doziranje:	0,2-5,0 % prema masi cementa
pH vrednost	5
Boja	Žućkasta
Suva materija	32 %

MC PowerFlow 5695 (proizvođač MC Bauchemie, Nemačka)

Vrsta aditiva koja takođe pripada grupi za redukciju vode široke namene/superplastifikatora prema T 3.1 i T3.2 standarda SRPS EN 934-2:2014 [154]. Zahvaljujući produženom vremenu ugradljivosti koristi se pre svega kod transportnih betona. Specijalnom kombinacijom aktivnih agenata omogućuje proizvodnju homogenog betona svih klasa konzistencije. Važniji tehnički podaci su dati u Tabeli 3.8.

*Tabela 3.8 Tehnički podaci o MC PowerFlow 5695*

Gustina	1,03 kg/dm <sup>3</sup>
Doziranje:	0,2-5,0 % prema masi cementa
pH vrednost	6
Boja	Tamno braon
Suva materija	26 %

**MC PowerFlow 3100 (proizvođač MC Bauchemie, Nemačka)**

Sintetički superplastifikator visokih performansi baziran na polikarboksilatnoj tehnologiji. Zahvaljujući visokoj redukciji vode pre svega koristi se u prefabrikaciji i za visokokvalitetne betonske površine. Važniji tehnički podaci su dati u Tabeli 3.9.

*Tabela 3.9 Tehnički podaci o MC PowerFlow 3100*

Gustina	1,07 kg/dm <sup>3</sup>
Doziranje:	0,1-5,0 % prema masi cementa
pH vrednost	7
Boja	Braon
Suva materija	31 %

Pored gore navedenih superplastifikatora korišćeni su još i aditivi tipa stabilizator i aerant:

**MC Centrament Stabi VMA2 (proizvođač MC Bauchemie, Nemačka)**

Aditiv tipa modifikator viskoznosti (eng. viscosity modifying agent – skr. VMA) ili stabilizator koji povećava koheziju svežeg betona ili maltera pri čemu smanjuje mogućnost segregacije i krvarenja. Važniji tehnički podaci su dati u Tabeli 3.10.

*Tabela 3.10 Tehnički podaci o MC Centrament Stabi VMA2*

Gustina	1,01 kg/dm <sup>3</sup>
Doziranje:	0,2-5,0 % prema masi cementa
pH vrednost	9
Boja	Žuta
Suva materija	-

Centrament Air 202 (proizvođač MC Bauchemie, Nemačka)

Sintetički aerant koji uvlačenjem vazduha u beton stvara vrlo fino raspoređenje mikro-pore (<0,3 mm). Koristi se kako bi se povećala otpornost betona na dejstvo mraza, pogotovo pri izloženosti destruktivnom dejstvu soli za odmrzavanje (XF2 i XF4 prema [77]). Važniji tehnički podaci su dati u Tabeli 3.11.

*Tabela 3.11 Tehnički podaci o MC Centrament Air 202*

Gustina	1,00 kg/dm <sup>3</sup>
Doziranje:	0,2-1,5 % prema masi cementa
pH vrednost	11
Boja	Transparentan
Suva materija	-

### 3.1.6. MIKRO VLAKNA

Upotrebljena su čelična vlakna obložena mesingom (eng.brass coated) dužine 6 mm i prečnika 0.15 mm) sa zateznom čvrstoćom > 2100 MPa. Proizvođač: Spaić – Negotin - Slika 3.1



Slika 3.1 Čelična mikrovlakna Spaić

### 3.1.7. RECIKLIRANA VLAKNA IZ PNEUMATIKA

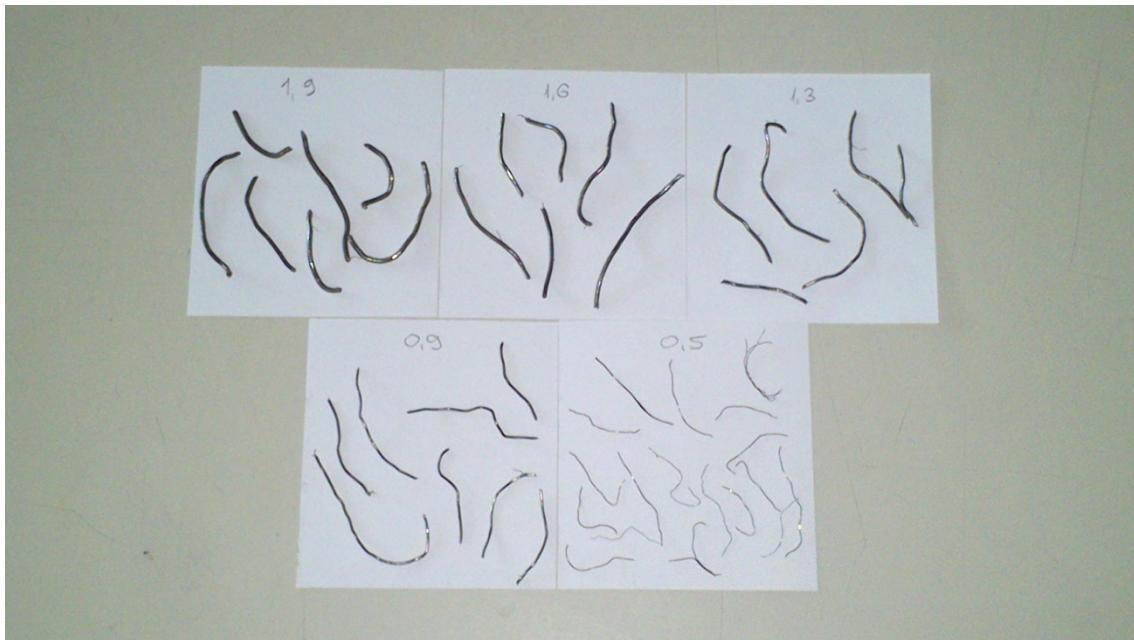
Reciklirana vlakna koja su korišćena su proizvedena/reciklirana u ECO-RECYCLING d.o.o. sa sedištem u Novom Sadu, koja se bavi reciklažom otpadnih auto i teretnih guma kao i ostalog gumenog otpada.

Dobijena riciklirana čelična vlakna imaju nečistoću u vidu ostataka gume i tkanine 1% m/m, što zapreminske predstavlja 8 % (Slika 3.2 levo). Stoga je reciklirani, dobijeni materijal prosejan kako bi se uklonile nečistoće (Slika 3.2 desno) i nakon toga upotrebljen.



Slika 3.2 Reciklirana čelična vlakna dobijena (levo) i prosejana (desno)

Karakteristični prečnici i oblici recikliranih čeličnih vlakana su prikazani na Slici 3.3:



Slika 3.3 Sastav recikliranog koktela čeličnih vlakana iz pneumatika

### **3.2. IZRADA UZORAKA I METODE ISPITIVANJA**

#### **3.2.1. IZRADA UZORAKA**

Za potrebe ispitivanja su pravljeni uzorci ternarnih sistema veziva maltera i betona. Uzorci maltera su spravljeni u standardnom mikseru prema [146] koji se koristi i pri izradi standardnih uzoraka za ispitivanje cementa. Postupak mešanja odstupa od opisa u [146] u 2 detalja. Dužina mešanja pri sporoj brzini produžena za 30 s zbog većeg udela pepela, pogotovo veće finoće. Sem ispitivanja u delu 4.3.1. i 4.1.5. upotrebljena je frakcija 0/4 rečnog peska umesto standardnog kvarcnog peska.

Metoda ugradnje uzoraka 4x4x16 cm u standardne kalupe je kod ispitivanja opisanih u delu 4.2. bila ručna, dok je kod svih ostalih ispitivanja korišćen standardni uređaj – vibro postolje prema standardu [146].

Za izradu uzoraka betona korišćena je protivstrujna laboratorijska mešalica za beton zapremine 50 litara. Pri mešanju je merena konzistencija svežeg betona i nakon postizanja zahtevne konzistencije uzorci su ugrađivani u metalne kalupe za izradu uzoraka dimenzija 15x15x15, 10x10x40 i 10x10x10 – pomoću laboratorijskog vibrostola. Nakon ugradnje uzoraka na vibro stolu, kalupi su zapakovani sa streč-folijom, kako bi se spriječio gubitak vode u sušnici, tokom nege.

#### **3.2.2. METODA MEHANIČKE AKTIVACIJE PEPELA**

Pri mlevenju kada se koristi kuglični mlin, kakav je i tokom ovih istraživanja korišten, učinak usitnjavanja nije linearno zavisao od vremena trajanja mlevenja. Upravo zbog toga je prvenstveno postulirano da će se ispitati uticaj mehaničke aktivacije pepela u mlinu pri trajanju od 5, 15, 30, 60, 120, 240 i 480 minuta. Na osnovu prvih rezultata povećanja finoće pepela i čvrstoće na ternarnim mešavinama delimično je modifikovan plan:

- ustanovljeno je da nakon 5 minuta nisu se značajnije promenile čvrstoće uzoraka, pa je ta dužina trajanja izostavljena iz daljih razmatranja,
- takođe, 30 minuta mlevenja u odnosu na 15 minuta nije značilo značajne promene za leteći pepeo iz TENT B, međutim pri ispitivanju uticaja na lake betone, pepeo iz TE Morava nakon 30 minuta mlevenja je imala optimalne osobine, pa su iz tog razloga rezultati sa otpadnim pepelima nakon 30 minuta uključeni i u prikaz rezultata sa ternarnim mešavinama maltera.
- Na otpadnom pepelu iz TENT B nakon 240 minuta je došlo do agregacije pepela, pa je isključeno iz daljih razmatranja
- nakon 480 minuta mlevenja specifična površina mliva je bila manja upoređujući sa rezultatom nakon 240 minuta, stoga su pepeli sa 480 minuta mlevenja isključeni iz značajnijeg dela daljih ispitivanja.

Za mehaničku aktivaciju pepela je upotrebljen laboratorijski kuglični mlin sa unutrašnjim prečnikom 710 mm i unutrašnjom dužinom 510mm. Brzina obrtaja cilindra je 32 obrtaja i minuti. Sastav upotrebljenog punjenja čeličnim kuglama je dat u Tabeli 3.12:

*Tabela 3.12. Podaci o upotrebljenom punjenju mlina pri mehaničkoj aktivaciji*

Prečnik kugle [mm]	Masa kugle [g]	Komada
24	59	24
28	90	40
30	119	109
40	253	54
50	532	30
60	827	18

### 3.2.3. SEM ANALIZA MIKROSTRUKTURE PEPELA IZ TE

Morfološka i strukturalna analiza uzorka pepela iz TE je urađena pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa (eng. scanning electron microscope – skr. SEM) tipa Phenom XL. Tokom pripreme, površina uzorka je prekrivena tankim slojem zlata/paladijuma (Au/Pd) koja je naneta isparavanjem u vakumu.

Pomoću SEM snimaka su analizirani uzorci letećeg pepela iz TENT-B i otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava. Strukturalne promene usled mehaničke aktivacije su takođe analizirane pomoću SEM. Za OP TE Morava pored morfološke analize prvenstvenog stanja važno je bilo uraditi detaljnu SEM analizu za uzorce mehanički aktiviranog pepela pri 30, 240 i 480 minuta. Za LP TENT-B pored morfološke analize prvenstvenog analizirani su uzorce mehanički aktiviranog pepela pri 30, 120 i 240 minuta.

### 3.2.4. ANALIZA MINERALNOG SASTAVA PREDMETNIH PEPELA METODOM RENDGENSKE DIFRAKCIJE

Eksperimentalna analiza mineralnog sastava predmetnih pepela je sprovedena metodom rendgenske difrakcije. Analiza je urađena pomoću stonog rendgenskog difraktometra za analizu praškastih materijala tipa PANalytical Xpert Pro MPD, Cu anodom, sa  $K\alpha 1$  (talasne dužine 1.540598) i  $K\alpha 2$  (talasne dužine 1.544426) i odnosom  $K\alpha 2 / K\alpha 1 = 0,5$ . Analiza je izvršena brzinom od  $0,5^\circ/\text{min}$ , sa korakom od  $0,0167^\circ$ , u interval pod uglom  $2\theta$  od  $4.00^\circ$  do  $84.00^\circ$ . Upotrebljeni napon i struja za analizu su bili konstantni 40 kV, odnosno 30 mA.

Evaluacija dobijenih podataka je pomoću sledećih baza podataka: neorganski prah (ICDD PDF-2 Release 2010), organski prah (ICDD PDF-4/Organics 2010), neorganski monokristal (Inorganic Crystal Structure Database ICSD 2010, Karlsruhe, NIST), organski monokristal (Crystal Structure Database CSD 2010,

Cambridge). Detekcija: jednodimenzionalnim XCelerator detektorom i klasičnim proporcionalnim brojačem pomoću tačkastog detektora.

### **3.2.5. ISPITIVANJE GUSTINE PAKOVANJA PEPELA**

Ispitivanje gustine pakovanja zrna pepela je ispitano prema metodi koja je opisana u [163], gde je primenjena za UHPC. Za ispitivanje je upotrebljena metalna posuda zapremine 1l, u kojoj je izmerena zbijena masa predmetnih pepela nakon 2 minuta kompaktiranja na vibro stolu. Rezultat je izražen u odnosu prema specičnoj masi ispitanih pepela.

### **3.2.6. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA HABANJE ZBVPP**

Kao što je već u Poglavlju 2 navedeno, jedno od krucijalnih ispitivanja sa aspekta ocenjivanja trajnosti betona sa visokim sadržajem pepela u vezivu je ispitivanje otpornosti na habanje. Za ovo ispitivanje je korišćena metoda širokog točka (eng. wide wheel test) koja se takođe zove i Kaponova (eng. Capon test) metoda ispitivanja otpornosti pri abraziji. Ova metoda se koristi prvenstveno za ocenjivanje otpornosti na habanje prirodnog kamena i betonskih prefabrikata (betonskih blokova, betonskih ploča i ivičnjaka), paralelno sa Bemeovom metodom (eng. Böhme abrasion test).

Za ovo ispitivanja je upotrebljen Controlsov uređaj koji se sastoji od čeličnog točka tvrdoće po Brinelu između 203HB do 245HB, širine 70 mm i prečnika 200 mm, koji se okreće brzinom 75 okretaja/min (Slika 3.4).



Slika 3.4 Ispitivanje otpornosti na habanje pomoću Kaponove metode

Kao što se na Slici 3.4 vidi, iznad točka se nalazi koš za skladištenje abrazivnog materijala (korund veličine zrna F80), koji pada preko levka i vrši se habanje uzorka, pritisnutog kontrategom za točak. Ispitivanja su urađena prema [156]. Uzorci betona ZBVPP su pravljeni pomoću kalupa za kocke 15x15x15 cm koji se punio do visine  $6 \pm 1$  cm ili pomoću trodelnog kalupa za standardne prizme, tako što su srednje dve pregrade izvađene. Važno je da strana koja će ispitati i suprotna strana budu paralelne. Pri ispitivanju, habanju je bila izložena donja, glatka strana uzorka. Uzorci pri ispitivanju su bili stari 30-35 dana, od kojih 3 dana su zapakovani u foliji bili negovani na  $40^\circ C$ , a posle bili na vazduhu na  $20 \pm 3^\circ C$  do ispitivanja. Pre ispitivanja strana koja će se ispitati je markerom prekrivena zbog lakšeg merenja traga nakon habanja. Evaluacija rezultata je urađena prema izvornoj Koponovoj metodi, tj. rezultat je **aritmetička sredina** tri merenja širine traga koja ostaje od širokog točka nakon habanja, umesto **maksimalne vrednosti**, koja se koristi za proveru kvaliteta betonskih prefabrikata.

### 3.2.7. KONZISTENCIJA SVEŽEG BETONA

Konzistencija svežeg betona je merena metodom sleganja (eng. Slump-test) u skladu sa standardom SRPS EN 12350-2 [164] prikazanoj i na Slici 3.5.



Slika 3.5 Merenje konzistencije svežeg betona

### 3.2.8. ČVRSTOĆA PRI PRITISKU I ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM - MALTER

Na svim uzorcima oblika standardne prizme, dimenzija 4x4x16 ispitana je prvo njihova čvrstoća pri zatezanju savijanjem, a nakon toga na poluprizmama njihova čvrstoća pri pritisku prema [146].

### 3.2.9. ČVRSTOĆA PRI PRITISKU I ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM - BETONA

Čvrstoća betona pri pritisku je određena prema [165] na uzorcima oblika kocke dimenzija 15x15x15 ili 10x10x10 (Slika 3.6). Za ZBVPP je utvrđeno da za čvrstoće pri pritisku veće od 60MPa razlike u merenjima na uzorcima različitih dimenzija (15x15x15 ili 10x10x10cm) praktično nema.

Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem je određena prema [166] na uzorcima oblika prizme dimenzija 10x10x40 cm, apliciranom silom u sredini raspona Slika 3.6.



Slika 3.6 Ispitivanje čvrstoće pri pritisku i pri zatezaju savijanjem

### 3.2.10. KAPILARNOUPIJANJE

Ispitivanje kapilarnog upijanja je ispitano prema standardu SRPS EN 480-5 [162] na uzorcima dimenzija 4x4x16. Ispitivanje kapilarnog upijanja vode ZBVPP je sprovedeno na uzorcima nakon inicialne nege betona od 3 dana na 40°C i kondicioniranja (sušenja) na vazduhu na 20°C 2 meseca. Epruvete su postavljene u posudi sa poklopcem prema [162], u vertikalnom položaju na rabic mrežu, kako bi imale kontakt sa vodom preko donje površine.

### 3.2.11. UKUPNOUPIJANJE

Ispitivanje ukupnog upijanja ZBVPP je sprovedeno prema Aneksu E standarda SRPS EN 1340 [157]. Uzorci ZBVPP na kojima je mereno upijanje su bili dimenzija 10x10x10 cm i pravljeni su prema recepturama betona na kojima su utvrđena i čvrstoće pri pritisku i pri zatezaju savijanjem u delu 5.1 i 5.2.

### **3.2.12. ISPITIVANJE DUBINE PENETRACIJE VODE POD PRITISKOM**

Ispitivanje dubine prodora vode pod pritiskom na ZBVPP je urađeno prema SRPS EN 12390-8 [160], 4 dana nakon inicijalne nege betona od 3 dana na 40° C. Pritisak od 0,5 MPa u trajanju od 72 sata je uvek apliciran na bočnu stranu uzorka, upravno na pravac ugradnje betona.

### **3.2.13. ISPITIVANJE ZAPREMISNKE MASE OČVRSLOG BETONA**

Zapreminska masa očvrslih uzoraka betona je utvrđena prema standardu SRPS EN 12390-7 [dens] nakon inicijalne nege od 3 dana na 40°, merenjem dimenzija i mase betona.

### **3.2.14. ISPITIVANJE OTPORNOSTI POVRŠINE BETONA NA DEJSTVO MRAZA I SOLI ZA ODMRZAVANJE**

Ispitivanje mrazootpornosti ZBVPP je jedno od ključnih osobina pri razmatranju njihove primene – sa aspekta trajnosti. Pored toga shodno izloženom u Poglavlju 2, postoji osnovana sumnja u mrazootpornost ZBVPP. S jedne strane zbog ekstremno male količine cementnog klinkera, s druge strane zbog velike količine letećeg pepela (ali i zture) koja smanjuje mrazootpornost betona. Betoni sa visokim sadržajem letećeg pepela (HVFA) se uglavnom ispituju na mraz pri starosti od 90 dana, zbog značajnog doprinosa čvrstoći pucolanskih reakcija. Imajući u vidu specifičan režim nege ZBVPP od 3 dana na 40°C i zamisao da nakon toga nega nije neophodna, uzorci su tretirani na mraz već pri starosti od 10 dana.

Ispitivanje je sprovedeno prema standardu SRPS U.M1.055 iz 1984. godine [161]. Uzorci ZBVPP su pravljeni zamenjujući CEMIII/B sa OPTE Morava240 i LP TENTB240, od istih mešavina betona koja su korišćena i za ispitivanje čvrstoće.

Uzorci su urađeni u metalne kalupe za standardne kocke 15x15x15, ali su punjeni samo do visine 4-7cm. Nakon inicijalne nege na donju, ravnu stranu uzorka je zapepljen plastični okvir visine 15 mm, koji služi kao rezervoar za rastvor soli tokom ispitivanja. Nakon 7 dana kondicioniranja 3%-nim rastvorom soli NaCl na 20°C počelo je ispitivanje mrazootpornosti. Svaki ciklus smrzavanja je trajao 18 h na -20°C i komori za ispitivanje mrazootpornosti, nakon kojeg sledio je ciklus odmrzavanja u trajanju od 6 sati na +20°C. Ukoliko je bilo potrebno rastvor soli je doliven do visine od 3mm na površini uzorka. Nakon svakih 5 ciklusa rastvor je zajedno sa otvojenim materijalom sakupljen, filtriran i osušen do stalne mase, nakon koje je izmeren gubitak mase. Rezultat je izražen  $\text{mg}/\text{mm}^2$ . Postoji i drugi kriterijum koji se koristi kod ocene mrazootpornosti prema istom standardu, dubina oštećenja. Međutim, pošto je u ovom slučaju reč bio samo o evaluaciji osobine mrazootpornosti ZBVPP, a ne i o ocenjivanju, taj drugi kriterijum nije korišten.

### 3.3. PROGRAM ISPITIVANJA

Kao što je u Poglavlju 1 i 2 navedeno, **glavni cilj** ove doktorske disertacije je razvoj *Zelenih Betona Visokih Performansi sa velikim sadržajem letećeg Pepela* sa aspekta održivog razvoja. U vezivu je cilj da se udeo cementnog klinkera smanji ispod 20%. Na taj način, predloženim ternatnim sistemom veziva Cement-Zgura-Pepeo udeo implementacije industrijskih nuzproizvoda i otpadnih materijala je  $> 80\%$  veziva. Drugi važan zahtev održivog razvoja je trajnost je ujedno i drugi važan cilj pri razvoju ovih betona.

**Sekundarni ciljevi** doktorske disertacije uključuju razvoj 3 vrste specifičnih betona koji se baziraju na razvijenom ternarnom sistemu veziva:

- betoni spravljeni sa vodom i/ili sa agregatima koji sadrže soli (hloride)
- zeleni betoni ultravisokih performansi
- lakoagregatni betoni poboljšanih termotehničkih svojstava.

Istraživanja se mogu podeliti u **3 faze**:

- A. **preliminarna** ili prethodna ispitivanja osobina predmetnih pepela tokom mehaničke aktivacije
- B. **osnovna** ili bazna ispitivanja fokusirana na razvoju ternarnih sistema veziva
- C. ispitivanja **primene** ternarnih sistema veziva

**A. Preliminarna ispitivanja osobina mehanički aktiviranih pepela iz TE (Potpoglavlje 4.1):**

Prvu fazu predstavlja mehaničko aktiviranje pepela i analiza uticaja postupka mlevenja na promene osobine pepela iz TE:

- merenjem promene gustine pepela
- merenjem promene specifične površine
- analizom SEM (skenirajući elektronski mikroskop)- snimaka
- rendgenskom difrakcionom analizom strukture pepela

Uloga ovih rezultata je u analizi rezultata iz faze B. tj. na njihovoj simultanoj analizi je baziran razvoj ZBVPP.

**B. Osnovna ili bazna ispitivanja fokusirana na razvoju ternarnih sistema veziva**

Bazna ispitivanja predstavljaju sam razvoj ternarnih sistema mešavina koju su fokusirana na povećanju količine udela pepela u vezivu. Ova ispitivanja su podeljena na 2 dela:

- razvoj sastava ternatnih sistema veziva (Potpoglavlje 4.2)
- ispitivanje uticaja povišenih temperatura na ternarne sisteme (Potpoglavlje 4.3)

**C. Ispitivanja primene ternarnih sistema veziva**

Ispitivanja faze 3 predstavljaju analizu fizičkih karakteristika postignutih ternarnih sistema i njihove specifičnih mogućnosti. Sastoje se od:

- analize postignutih mehaničkih parametara i trajnosti ZBVPP
- ispitivanja uticaja hlorida na osobine ternarnih sistema veziva
- razvoj zelenih betona ultravisokih čvrstoća primenom recikliranih vlakana
- primenu ternarnih sistema veziva unapređenih termotehničkih svojstava.





EKSPERIMENTALNA  
ISPITIVANJA SA TERNARNIM  
SISTEMIMA VEZIVA  
cement-zgura-pepeo  
ANALIZA REZULTATA I  
DISKUSIJA



## 4. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA SA TERNARNIM SISTEMIMA VEZIVA Cement-Zgura-Pepeo – ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

### 4.1 PRELIMINARNA ISPITIVANJA OSOBINA MEHANIČKI AKTIVIRANIH PEPELA IZ TE

Uticaj postupka mlevenja na promene osobine pepela iz TE je analiziran:

- merenjem promene gustine pepela
- merenjem promene specifične površine
- analizom SEM (skenirajući elektronski mikroskop) - snimaka
- Rendgenskom difrakcionom analizom strukture pepela
- određivanjem indeksa aktivnosti

#### 4.1.1. UTICAJ MLEVENJA NA PROMENU SPECIFIČNE MASE PEPELA

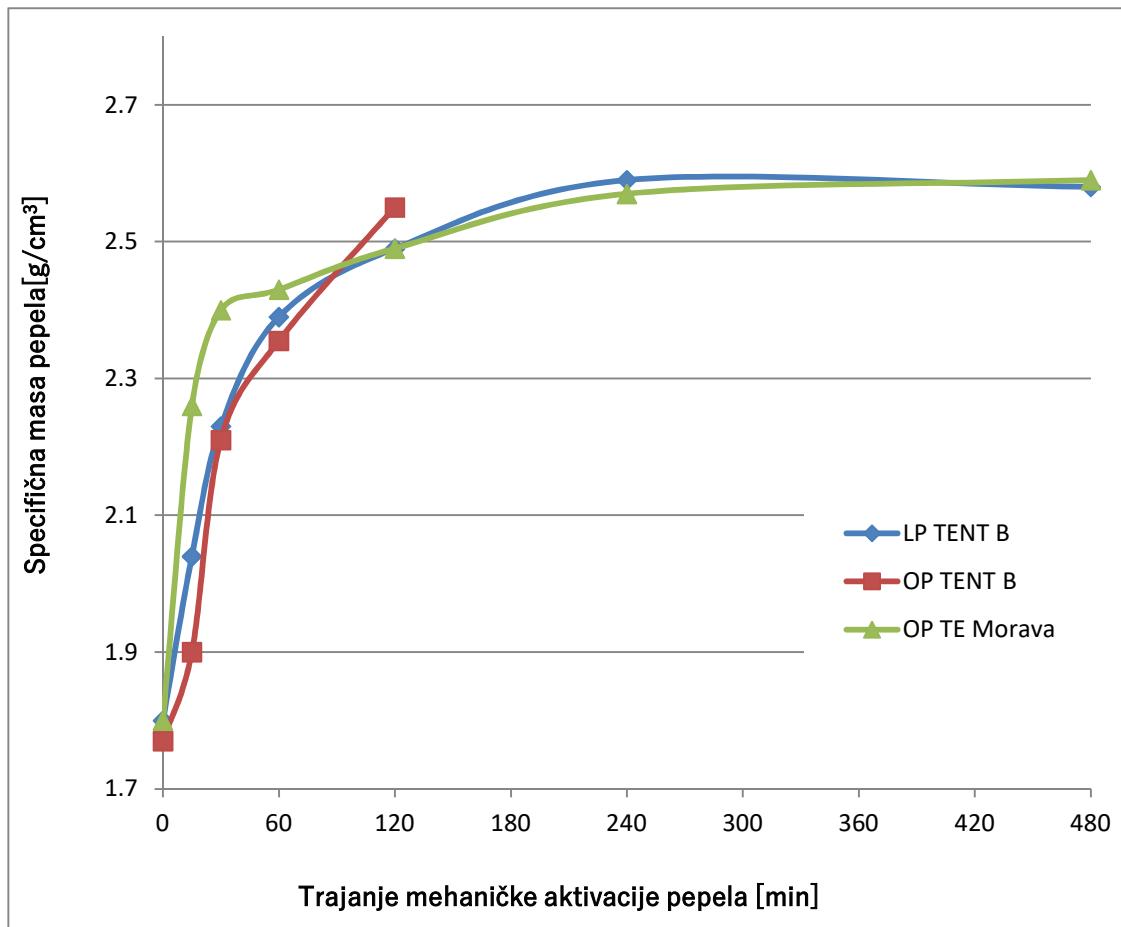
Izmerene specifične mase uzoraka pepela u izvornom stanju i nakon mehaničke aktivacije u određenom trajanju su navedeni u Tabeli 4.1.

*Tabela 4.1 Uticaj trajanja mehaničke aktivacije predmetnih pepela na specifičnu masu*

Trajanje mehaničke aktivacije [min]	Specifična masa [g/cm <sup>3</sup> ]						
	0	15	30	60	120	240	480
LP TENT B	1.8	2.04	2.23	2.39	2.49	2.59	2.58
OP TENT B	1.77	1.9	2.21	2.355	2.55	-	-
OP TE Morava	1.8	2.26	2.4	2.43	2.49	2.57	2.59

Pri ispitivanju sve tri vrste pepela iz TE pre mlevenja, specifične mase su utvrđene na česticama < 0,2 mm, koje su odvojene prosejanjem. Vrednosti navedeni u Tabeli 4.1 predstavljaju prosečnu vrednost tri merenja. Kod OP TENT B je već nakon 240

minuta primećena agregacija pri mlevenju, pa je izostavljen iz merenja. Kod pepela LP TENT B na osnovu rezultata specifične mase nakon 480 minuta mlevenja postoji sumnja da se pojavila agregacija. Kod treće vrste pepela nakon 480 minuta mlevenja se takođe vizuelno moglo uočiti početak agregacije. Tendenciji efekta mlevenja na specifičnu masu je grafički prikazana na Slici 4.1.

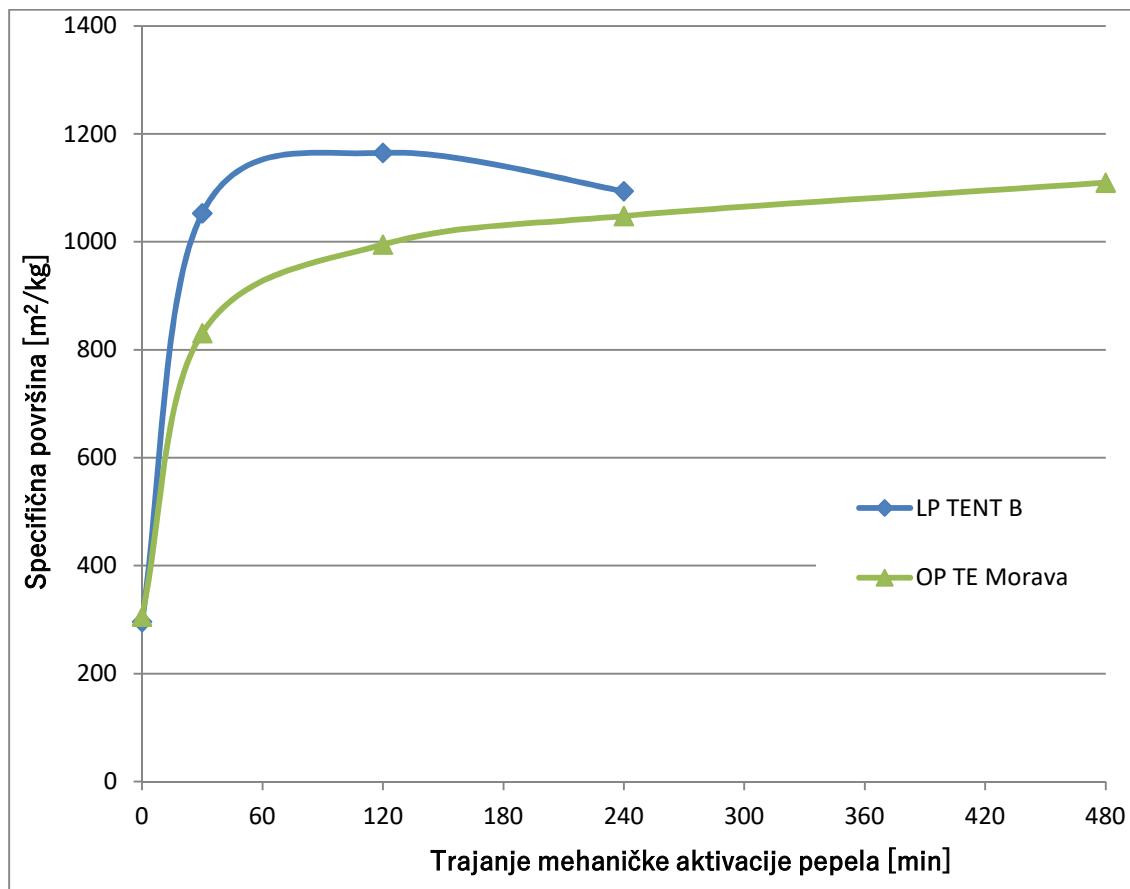


Slika 4.1 Promena specifične mase predmetnih pepela pri mlevenju

Kao što se na Slici 4.1 može videti, granica efektivnog usitnjavanja tri vrste pepela je značajno različita. Pored toga velika je razlika u tendenciji povećanja specifične mase između pepela iz TE Morava i druge dve. Specifična masa otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava se tokom prvih 30 minuta znatno brže povećava, ali nakon toga mlevenje je manje efikasno uporedo sa druge dve vrste pepela.

#### 4.1.2. UTICAJ MLEVENJA NA PROMENU SPECIFIČNE POVRŠINE PEPELA

Izmerene specifične mase uzoraka pepela u izvornom stanju i nakon mehaničke aktivacije u određenom trajanju su prikazani na Slici 4.2.



Slika 4.2 Promena specifične površine predmetnih pepela pri mlevenju

Između 2 vrste pepela uočljiva je različita tendencija promene finoće mliva. Leteći pepeo mnogo efikasnije se usitnjava i njegova specifična površina već nakon 2 sata mlevenja dostiže maksimalnu vrednost. Nakon toga specifična površina se smanjuje usled agregacije samlevenih čestica pepela. Specifična površina otpadnog pepela TE Morava se takođe značajno poveća nakon 30 minuta mlevenja (skoro 3x je veća od izvorne), ali posle toga raste sve do 480 minuta mlevenja. Ova razlika je posledica morfologije i strukture zrna dve vrste pepela. Naime između nepravilnih čestica u letećem pepelu iz TENTB javlja se mnogo veće trenje usled

koje se mnogo efikasnije drobe i mrve. Nasuprot tome, OPTE Morava ima glatke vezikularne i sferične čestice, koje je mnogo teže samleti ovom metodom. To se može i videti u delu 4.1.3. Interesantno je konstatovati da promena povećanja specifične gustine ne mora nužno biti povezana sa dinamikom rasta specifične površina, kao što se to može videti na Slikama 4.1 i 4.2, posmatrajući LPTENTB i OPTE Morava.

#### **4.1.3. ANALIZA MORFOLOGIJE I STRUKTURE POMOĆU SEM**

Analiza morfoloških razlika i promena je bila jedna od krucijalnih ispitivanja tokom eksperimentalnog dela istraživanja.

Analizirane su obe vrste predmetnog pepela pri karakterističnim etapama mehaničke aktivacije. Na Slici 4.3 je prikazan LP iz TENTB u svežem stanju, bez mlevenja.

Slika 4.3 SEM snimak LP TENT 0 pri uvećanju 245x

Slika 4.4 SEM snimak LP TENT 0 izgled čestice LP

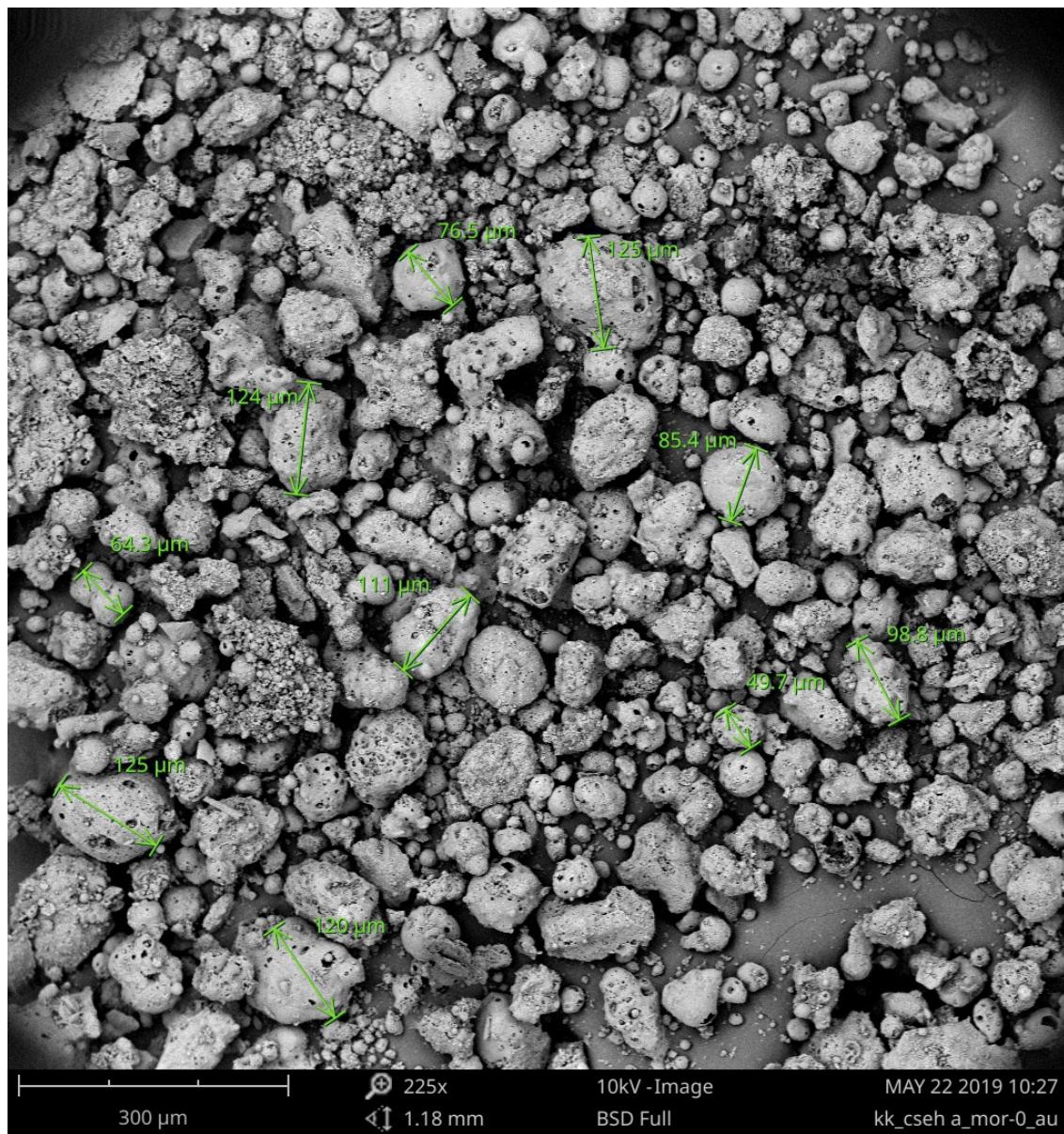
Slika 4.5 SEM snimak LP TENT 30 izgled čestice LP

Slika 4.6 SEM snimak LP TENT 120 izgled čestice LP

Slika 4.7 SEM snimak LP TENT 240 izgled čestice LP

Slika 4.8 SEM snimak LP TENT 240 agregacija LP uvećano 3600X

Slika 4.9 SEM snimak LP TENT 240 agregacija LP uvećano 8100x

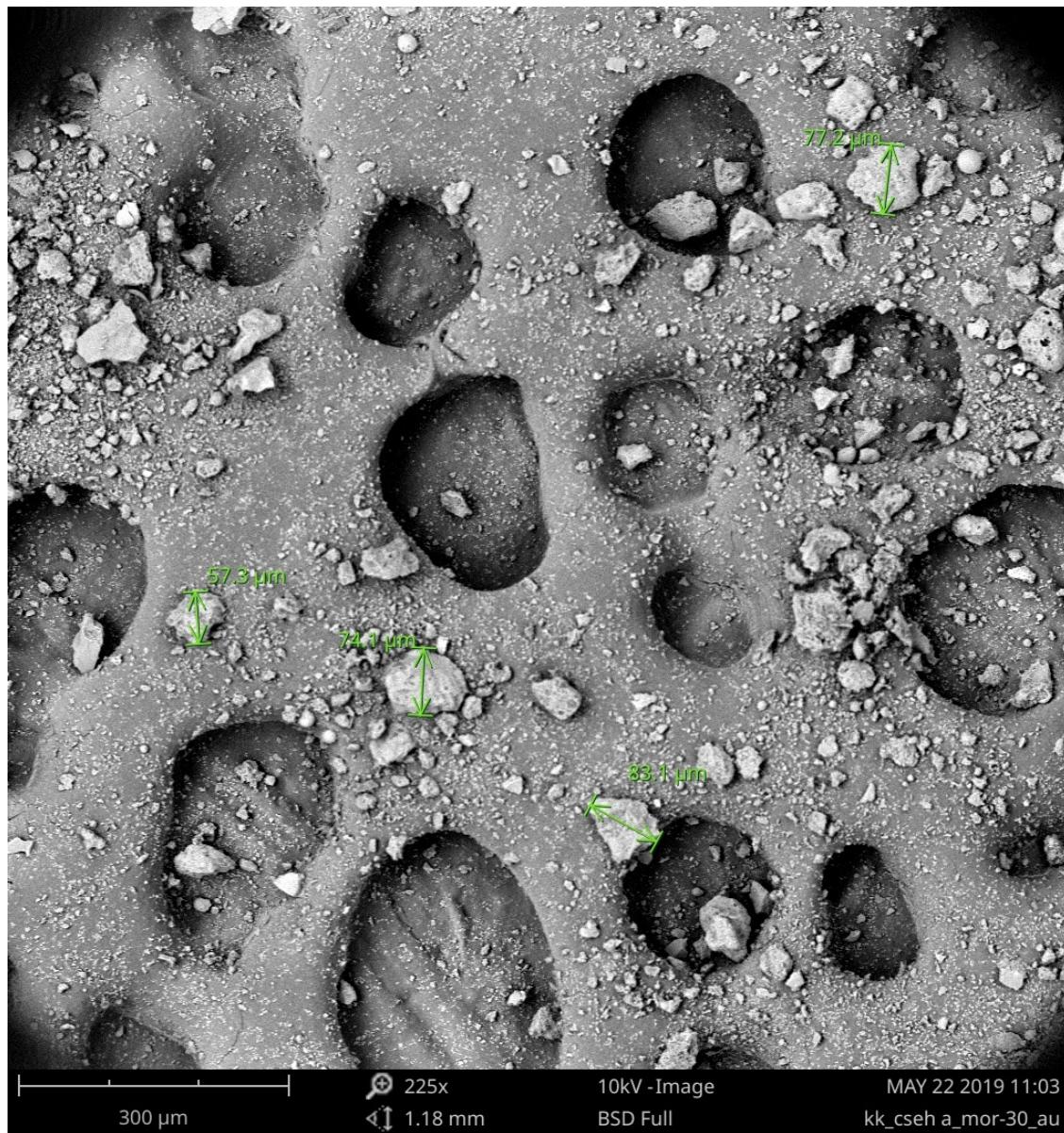


Slika 4.10 SEM snimak OP Morava 0 sa dimenzijama karakterističnih čestica

Slika 4.11 SEM snimak OP Morava 0 karakteristična vezikularna čestica pri uvećanju 3400x

Tipična vezikularna čestica karakteristične veličine sa otvorenim porama većih dimenzija , gde se mogu uočiti cenosfere (eng. cenosphere) i fosilija silikatne ljeske alge (Diatomaceae) iz uglja (eng. diatomite). Površina karakteristične čestice je glatka sa relativno malim brojem otvora većih dimenzija. Takođe se može primetiti pojava naknadne formacije kristalne faze na površini čestice letećeg pepela.

Slika 4.12 SEM snimak OP Morava 0 klaster čestica pri uvećanju 1000x



Slika 4.13 SEM snimak OP Morava 30 karakterističan izgled i veličina čestica

Slika 4.14 SEM snimak OP Morava 240 karakterističan izgled i veličina čestica

Slika 4.15 SEM čitave čestice sa otvorenim porama

Slika 4.16 SEM čitave čestice sa otvorenim porama

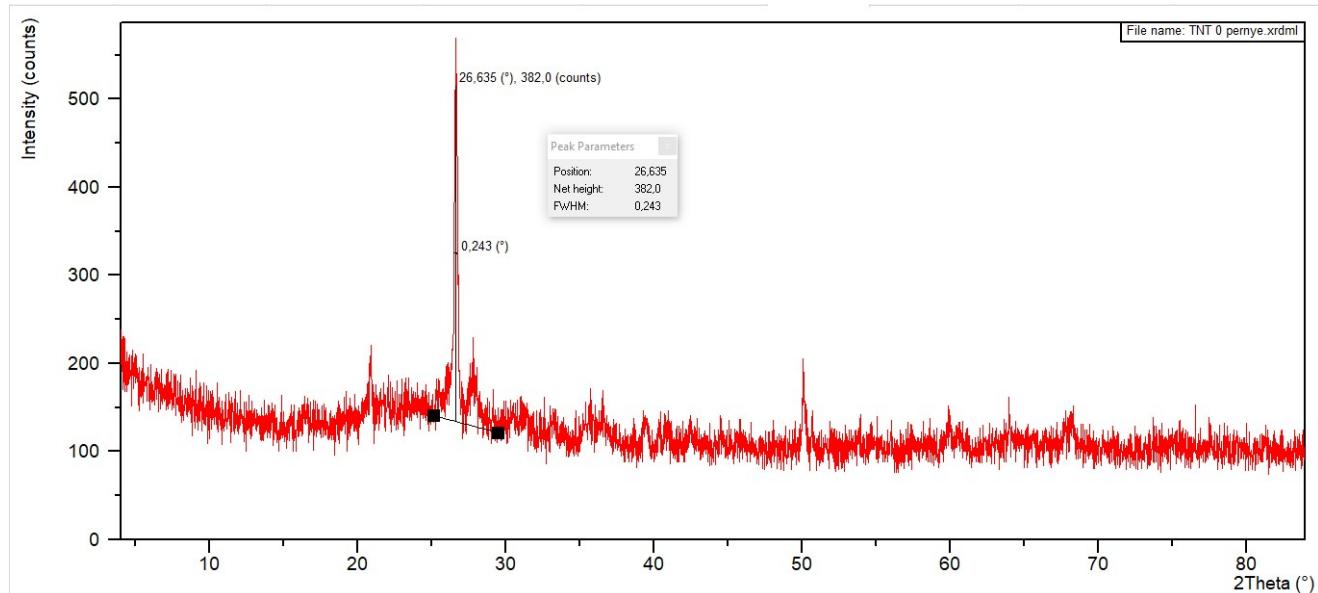
Slika 4.17 SEM čitave čestice sa otvorenim porama

Slika 4.18 SEM čitave čestice sa otvorenim porama

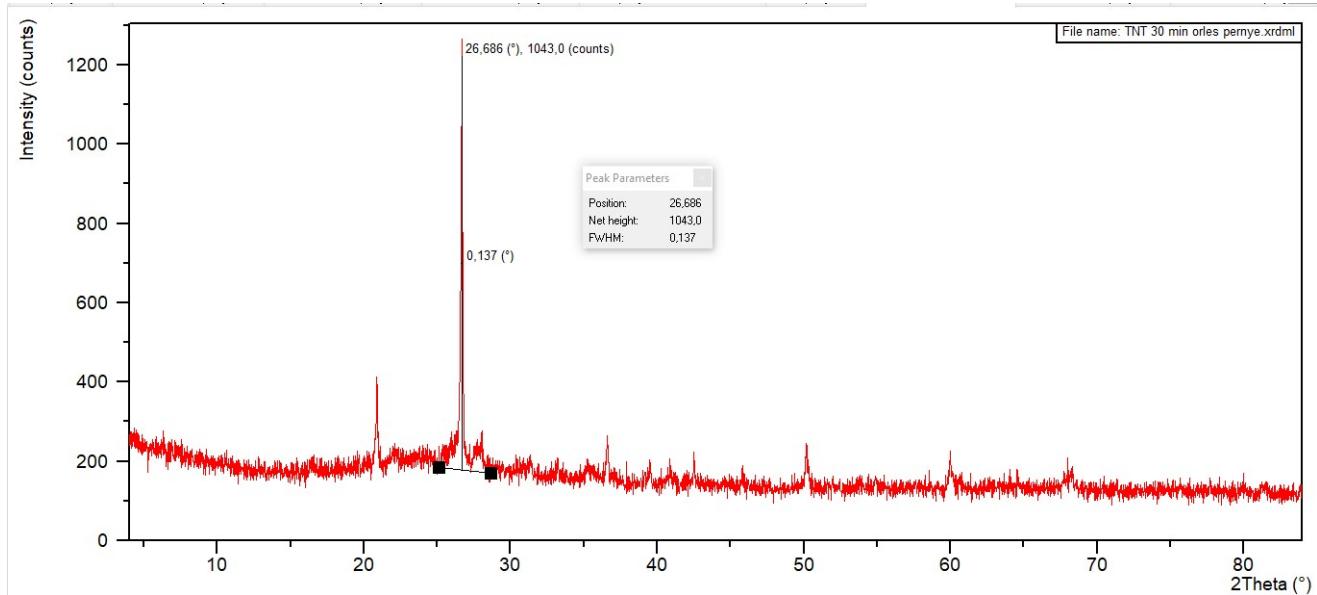
Slika 4.19 SEM snimak OP Morava 480 karakterističan izgled čestica sa vidljivom pojavom  
agregacije

#### 4.1.4. ANALIZA MINERALNOG SASTAVA PEPELA IZ TE METODOM RENDGENSKE DIFRAKCIJE

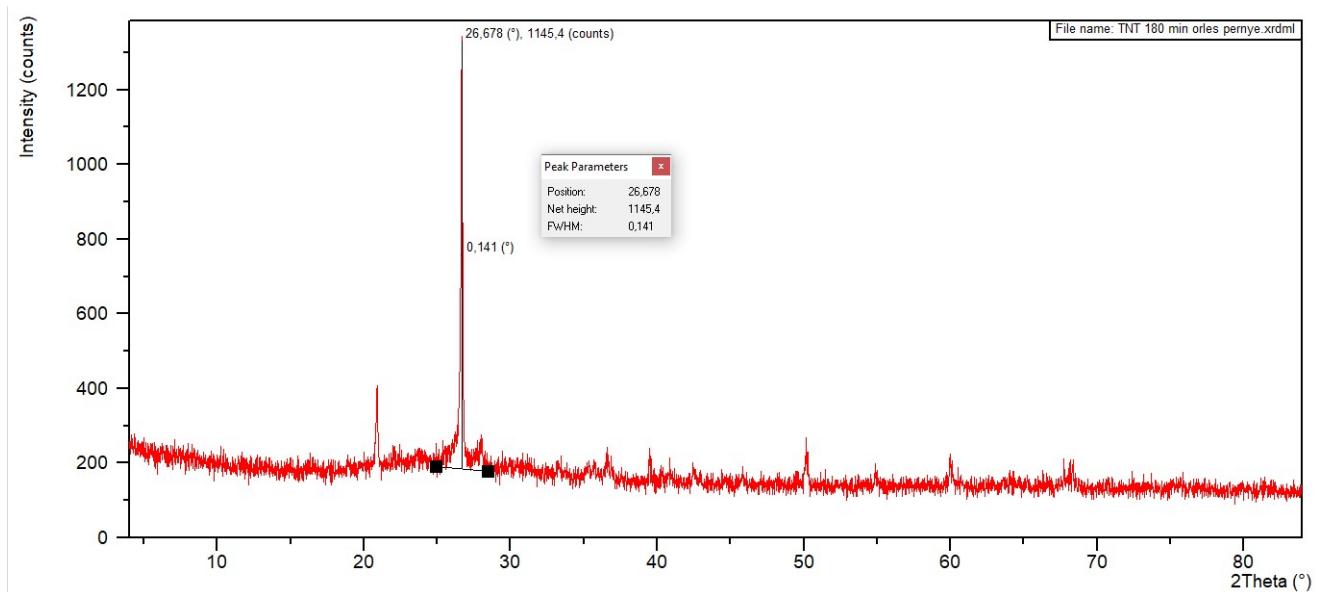
Rezultati mineraloške analize uzorka letećeg pepela iz TENT – B su dati na difraktogramima (Slika 4.20 do Slike 4.23) prikazom položaja difrakcionih maksimuma ( $2\theta$ ) i odgovarajućih intenziteta. Na difraktogramu svežeg LP TENT B pre mlevenja (Slika 4.20) uočljiva je značajana količina amorfne faze, a od kristalne najzastupljeniji je kvarc i feldspat uz malo prisustvo mulita i anhidrita. Usled mehaničke aktivacije najznačajnija promena je uočljiva u povećanju intenziteta kvarca, praćena smanjenjem ostalih kristalnih faza. Intenzitet kvarca se povećava i do tri puta nakon 240 minuta mlevenja.



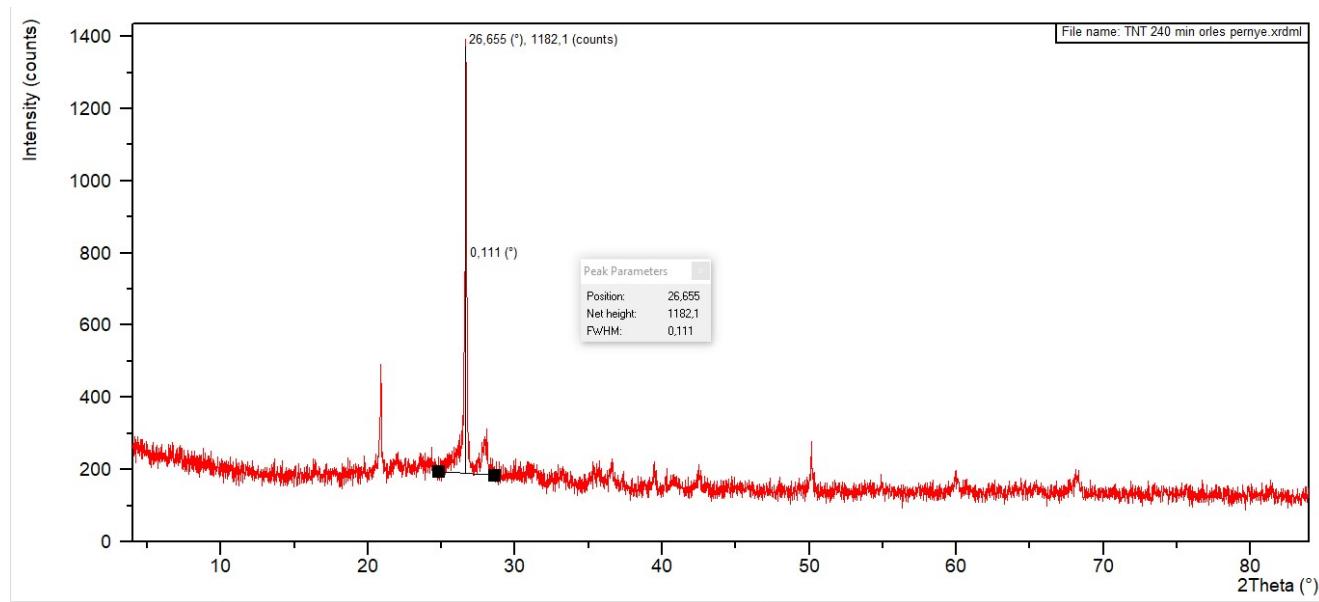
Slika 4.20 Difraktogram svežeg letećeg pepela iz TENT-B



Slika 4.21 Difraktogram letećeg pepela TENT-B nakon 30 minuta mehaničke aktivacije

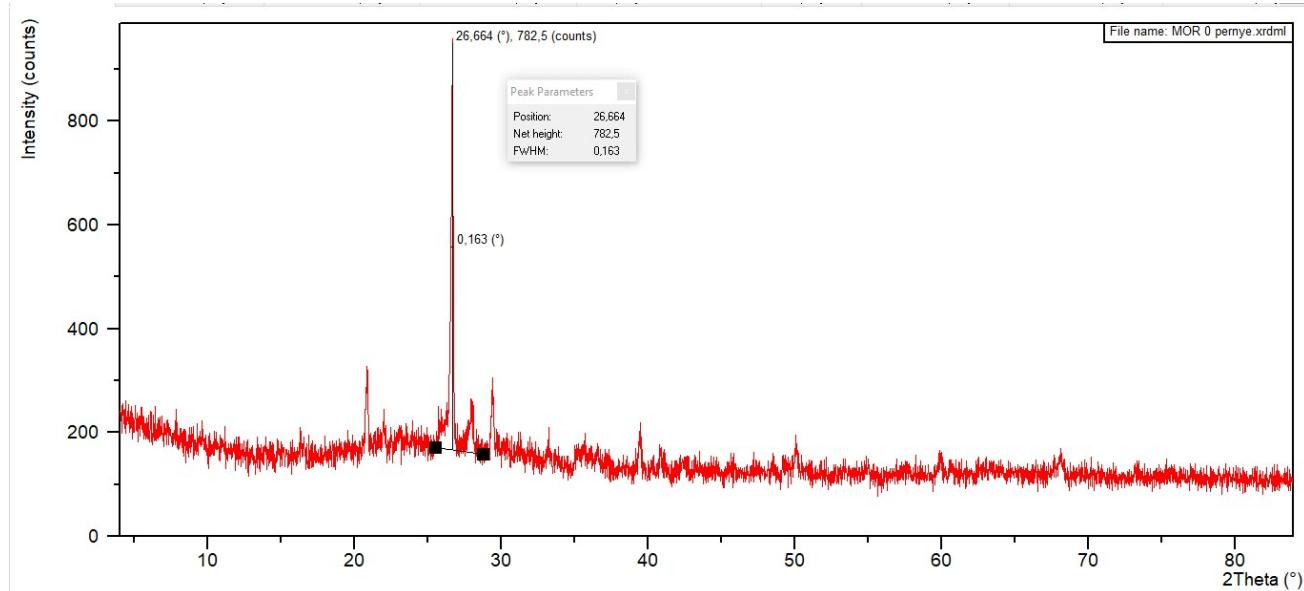


Slika 4.22 Difraktogram letećeg pepela TENT-B nakon 120 minuta mehaničke aktivacije

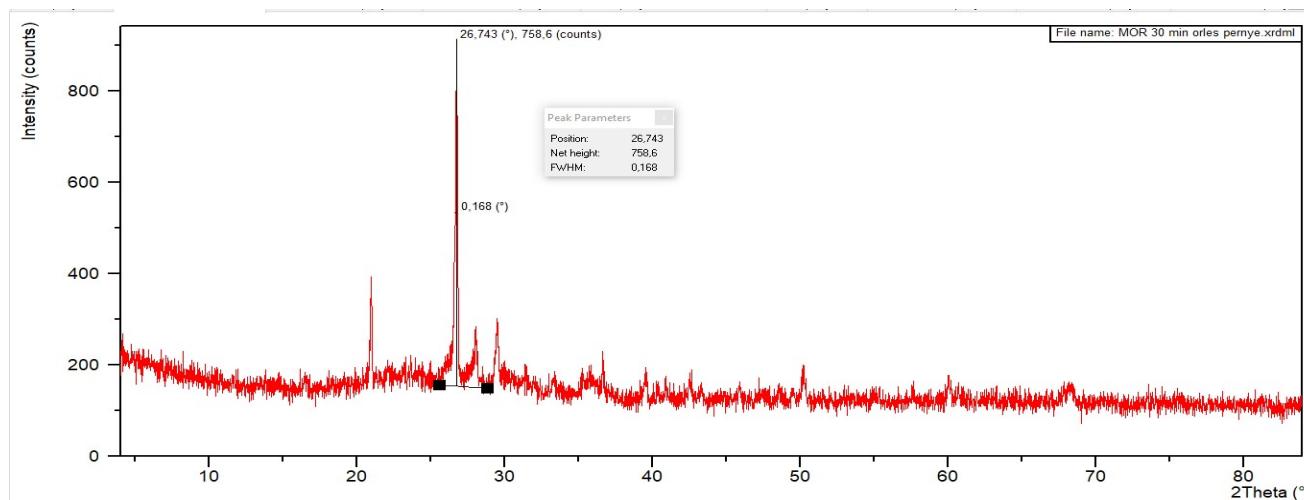


Slika 4.23 Difraktogram letećeg pepela TENT-B nakon 240 minuta mehaničke aktivacije

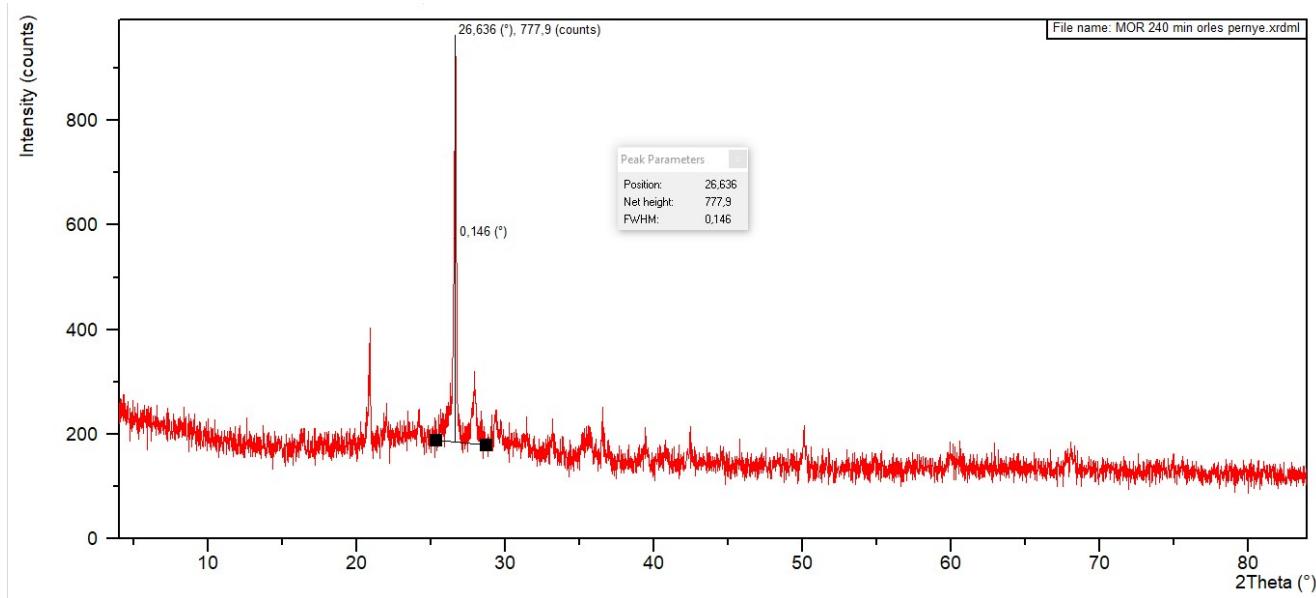
Rezultati mineraloške analize uzorka otpadnog pepela iz TE Morava su dani na difraktogramu (Slika 4.20 do Slike 4.23) prikazom položaja difrakcionih maksimuma i odgovarajućih intenziteta. Na difraktogramu svežeg OP TE Morava pre mlevenja (Slika 4.24) uočljiva je takođe značajana količina amorfne faze, a od kristalne faze i ovde je najzastupljeniji kvarc uz prisustvo feldspata, mulita, hematita i anhidrita. Usled mehanička aktivacija promene u intenzitetima su mnogo manje za razliku od letećeg pepela TENTB. Na sličan način i u ovom slučaju se povećava intenzitet kvarca i smanjuju se ostalih kristalnih faza do 240 minuta trajanja. Nakon toga, pri 480 minuta mlevenja intenziteti svih faza se smanjuju.



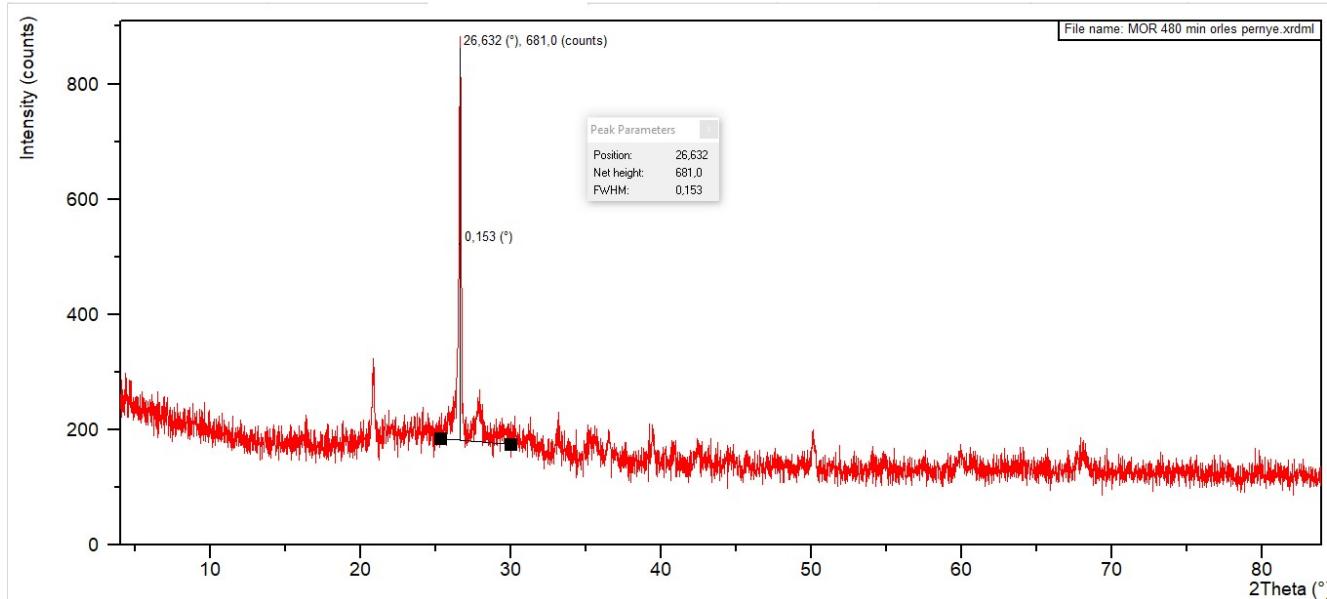
Slika 4.24 Difraktogram otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava pre mehaničke aktivacije



Slika 4.25 Difraktogram otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava nakon 30 minuta  
mehaničke aktivacije



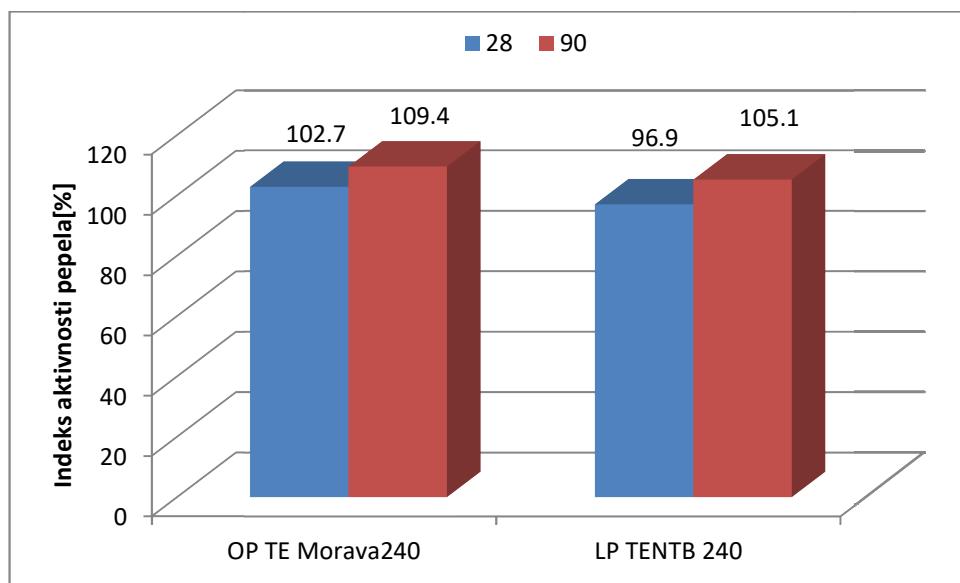
Slika 4.26 Difraktogram otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava nakon 240 minuta mehaničke aktivacije



Slika 4.27 Difraktogram otpadnog pepela sa pepelišta TE Morava nakon 480 minuta mehaničke aktivacije

#### 4.1.5. INDEKS AKTIVNOSTI PEPELA

Jedan od važnih parametara prilikom primene letećeg pepela prema standardu SRPS EN 450-1 je indeks aktivnosti. Ovaj parametar je utvrđen samo kako bi se predmetni pepeli iz TE mogli uporediti sa drugim letećim pepelima. Za ovo ispitivanje je korišćen CEM I 52,5N. Sastav mešavina je dat u delu 3.2. Rezultati ispitivanja indeksa aktivnosti LP TENTB240 i OP TE Morava 240, nakon 28 i 90 dana su prikazani na Slici 4.28.



Slika 4.28 Indeks aktivnosti predmetnih pepela nakon 240 minuta mehaničkog aktiviranja

Rezultati su pokazali da prema standardu SRPS EN 450-1 nakon 240 minuta mehaničke aktivacije dve predmetne vrste pepela imaju zadovoljavajući indeks aktivnosti, na osnovu koje mogu da se koriste kao mineralni dodaci za betone.

## 4.2 UTICAJ ZAMENE CEM III/B SA SVEŽIM LETEĆIM PEPELOM I OTPADNIM PEPELOM SA PEPELIŠTA

U ovom poglavlju su prikazani i analizirani rezultati ispitivanja kompozitnih materijala sa ternarnim sistemima veziva cementni klinker-granulisana zgura-leteći pepeo ili cementni klinker-granulisana zgura-otpadni pepeo iz TE. Ova, primarna ispitivanja su urađena sa ciljem da se:

- analizira uticaj zamene metalurškog cementa CEM III/B (mešavine cementnog klinkera i granulisane zgure) sa različitim vrstama pepela iz TE, pre mehaničke aktivacije
- utvrdi uticaj mehaničkog aktiviranja otpadnog i letećeg pepela zamenjujući metalurškog cementa CEM III/B (varirajući dužinu mlevenja od 0 do 240 minuta)
- proučavanjem fizičko-mehaničkih karakteristika uzoraka maltera sa ternarnim sistemima veziva, napravi uži izbor vrste pepela, dužine mlevenja i količine zamene CEM III/B, i to sa aspekta ekološkog značaja, uvažavajući principe održivog razvoja.

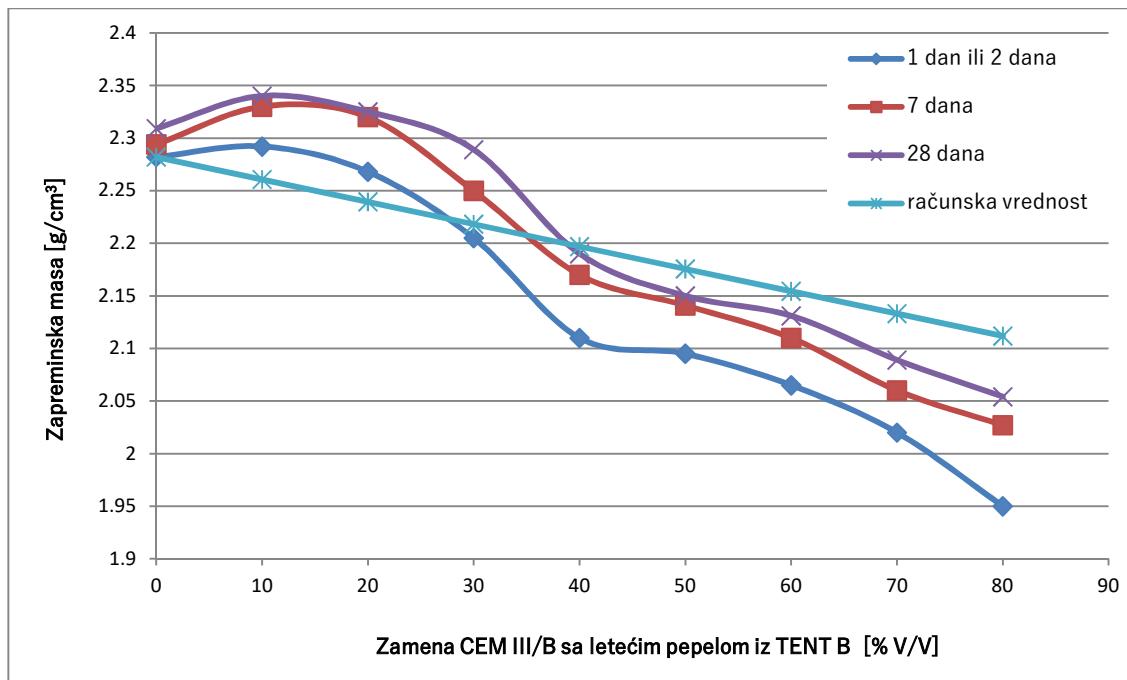
Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem su prikazani na slikama, gde naznačeni rezultati predstavljaju srednju vrednost 3 rezultata, dok navedeni vrednosti čvrstoće pri pritisku su utvrđene srednje vrednosti 5 rezultata, takođe nakon 24 sata, 7 dana i 28 dana. Da bi se bolje predstavio uticaj predmetnih pepela, prikazane su i čvrstoće pri zatezanju savijanjem i pri pritisku, kao linearna funkcija udela cementa CEM III/B u vezivu. Na taj način očigledan je pozitivan doprinos ili negativan efekat zamenjujućeg pepela. Zapreminske mase uzoraka su takođe predstavljene pri starostim 1, 7 i 28 dana u vidu srednje vrednosti 3 merena rezultata. Na slikama pored promene zapreminske mase je dodata linija računske zapreminske mase (izražena proporcionalnu u odnosu na rezultat mešavine bez zamene sa pepelom), koja se odnosi na starosti nakon 24 sata.

#### 4.2.1. ZAMENA CEM III/B SA PEPELIMA U IZVORNOM OBLIKU

Leteći pepeo i otpadni pepeo sa deponije u izvornom obliku, kako se i na snimcima SEM može videti su veoma porozni, što sa jedne strane u svežoj mešavini znači veću potrebu vode, usled upijanja zrna pepela, a sa druge strane smanjenje mehaničkih karakteristika betona. Dalje smanjenje ionako male količine Portland cementnog klinkera u malteru, paralelno sa prisustvom neprerađenog pepela dovodi do drastičnog smanjenja čvstoće. Stoga, ispitivanja uticaja zamene, određene količine metalurškog cementa u mešavini maltera, sa letećim ili otpadnim pepelom pre mlevenja su važna samo da bi poslužila kao status quo ili reper za evaluaciju rezultata sa prerađenim pepelima.

##### 4.2.1.1 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B

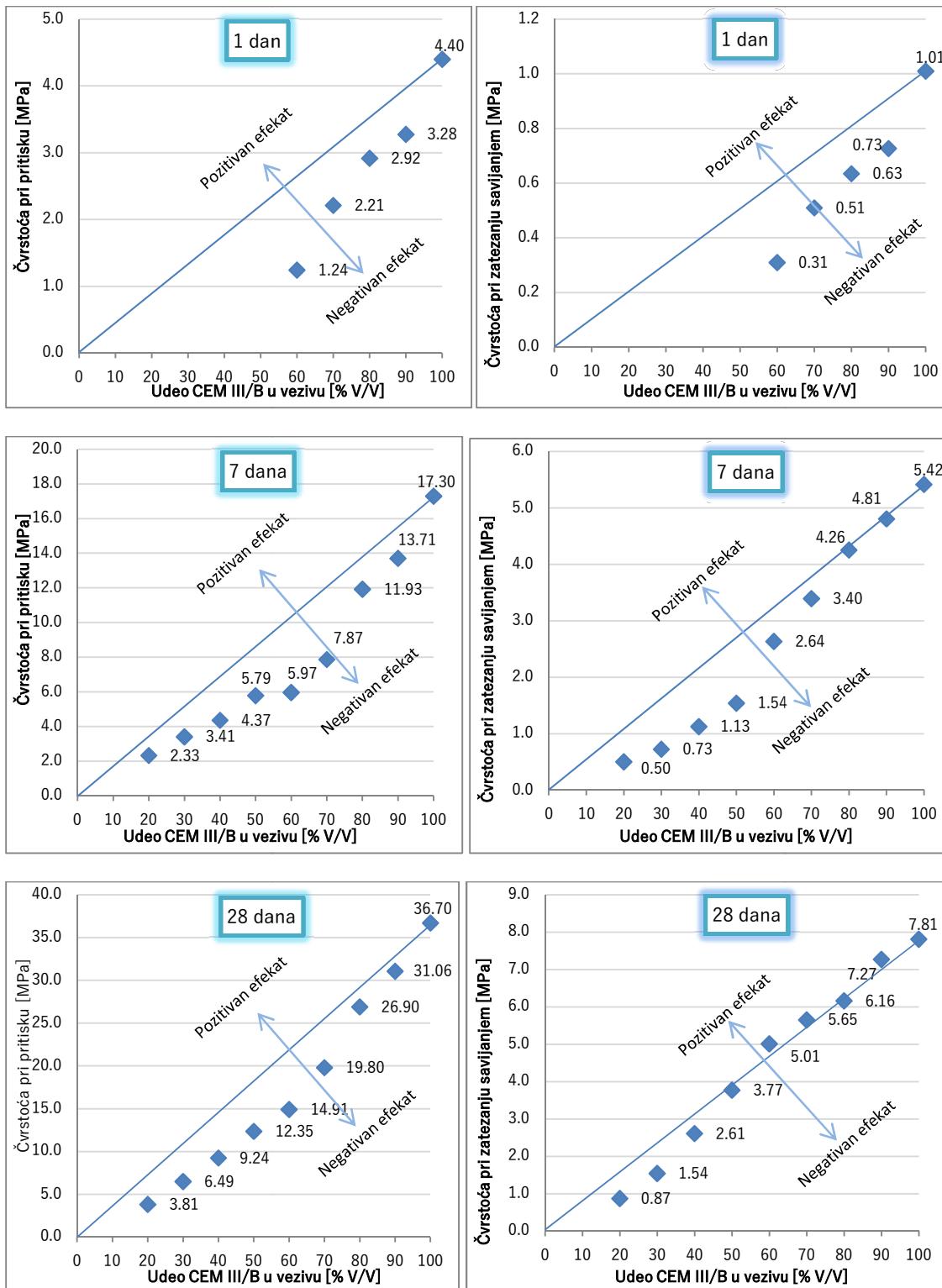
Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.29, a dati su u Prilogu 4-1 zajedno sa recepturama mešavina. Uzorci sa vezivom, gde je CEM III/B zamjenjen sa 50 % V/V ili većom količinom letećeg pepela, nakon 24 sata nisu još uvek nisu bili očvrsli, pa su izvađeni tek nakon 48 sati iz kalupa. Rezultati zapreminske mase uzorka su izmereni odmah nakon vađenja iz kalupa (1 dan ili 2 dana), dok pri starostima od 7 i 28 dana podrazumevaju merenja na vlažnim uzorcima, nakon vađenja iz vode i uklanjanja površinske vlage.



Slika 4.29 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom iz TENT B u izvornom obliku, u rasponu od 0 do 80% zapremine veziva

Zamena sa neprerađenim letećim pepelom je vidno smanjila konzistenciju svežeg maltera već i pri 10 %V/V, zbog upijanja čestica pepela. Na taj način efektivni vodo-vezivni faktor u mešavini se smanjuje, pa su zapreminske mase sa 10 i 20 %V/V pepela veće od računskih, tj. njihova kompaktnost je veća od računskog. Sa 30 %V/V ili više rezultati pokazuju već niže vrednosti od računskih, pošto je upijanja dovelo do nedovoljne količine slobodne vode u mešavini za adekvatno kompaktiranje, čak i ručnom metodom.

Rezultati ispitivanja čvrstoće uzorka su prikazani na Slici 4.30



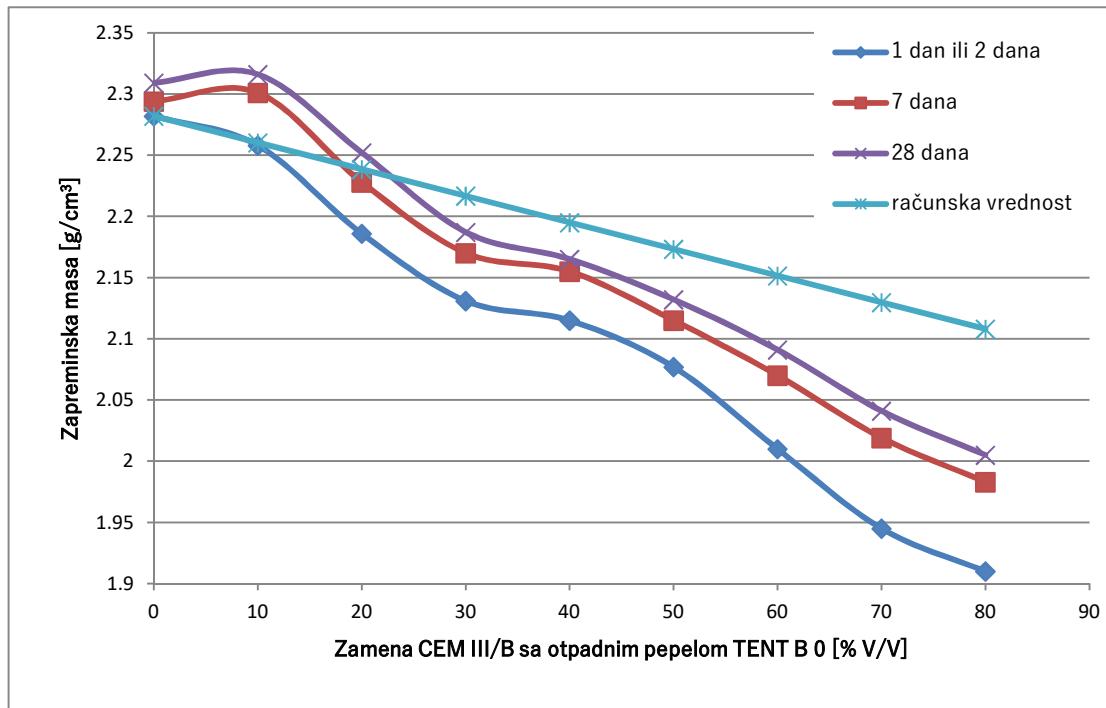
Slika 4.30. Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B na čvrstoću maltera

Na Slici 4.30 posmatrajući liniju proporcionalnosti između udela CEMIII/B u vezivu i čvrstoće (pri pritisku ili zatezanju savijanjem) jasno je vidljiv negativan efekat zamene CEM III/B sa LP TENT B, pre svega na rane čvrstoće maltera. Nakon 24 sati npr. zamena 10% V/V CEM III/B smanjuje čvrstoću na pritisak za 25 %, dok zamena sa 40% V/V uzrokuje pad od 72%. Uzorak sa 50%-50% V/V nije još bio ni vezao. Sličan je uticaj zamene i na jednodnevnu čvrstoću pri zatezanju savijanjem. Rezultati čvrstoće pri pritisku uzorka sa letećim pepelom su zaostali iza linije proporcionalnosti i nakon 7 i 28 dana nege u vodi. Štetan je uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom i na čvrstoću na zatezanje pri savijanju, ali nešto manjoj meri; sedmodnevne čvrstoće pokazuju približno neutralan efekat do 20 % V/V zamene, a pri starosti od 28 dana do 50 % V/V. U svakom slučaju se može zaključiti da zamena CEM III/B sa letećim pepelom iz TENT B pre mlevenja ima negativan efekat na fizičko-mehaničke osobine maltera.

#### 4.2.1.2 ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM SA DEPONIJE TENT B

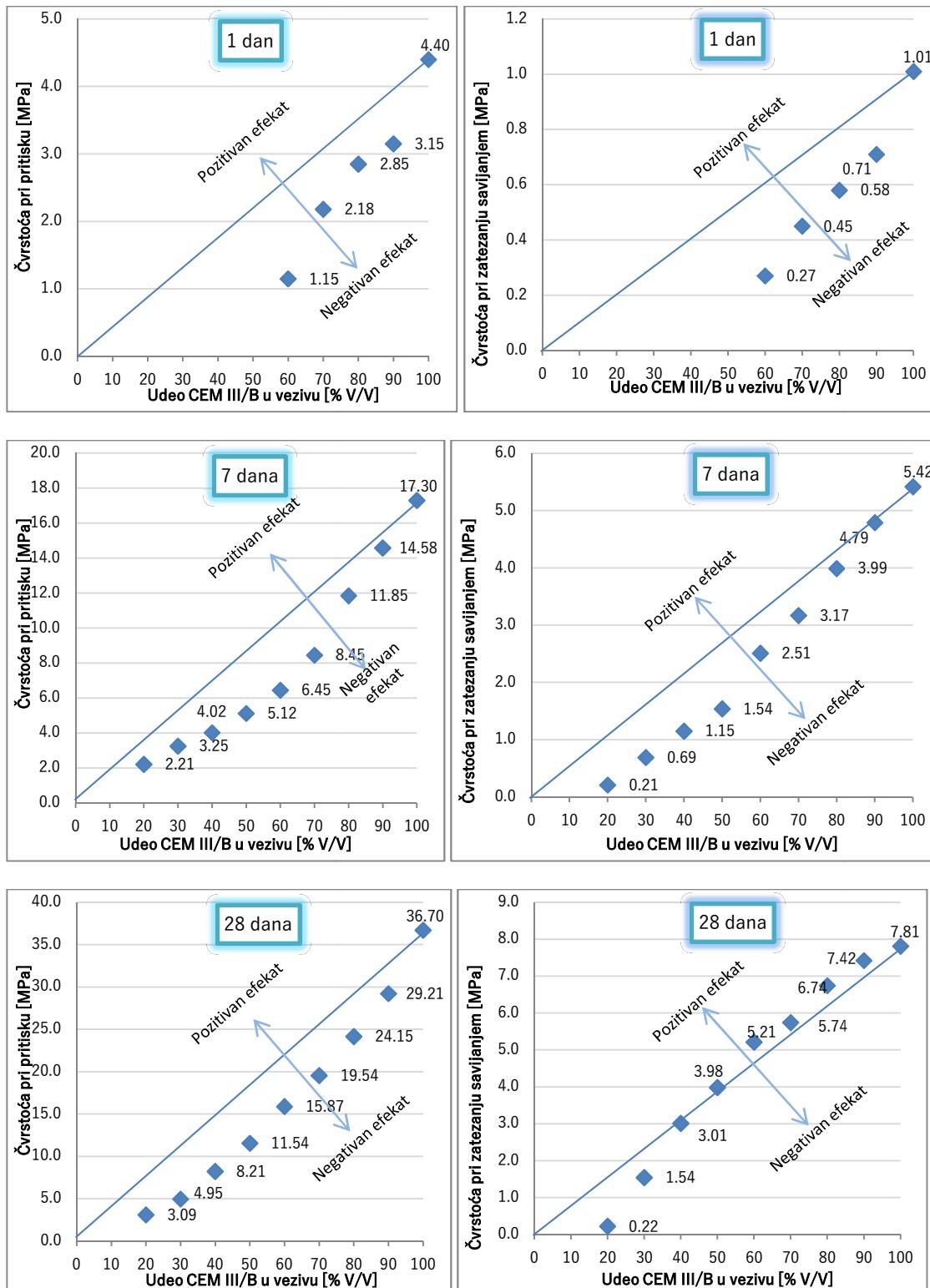
Prilikom istraživanja uticaja zamene CEM III/B sa OP iz TENT B upotrebljavan je osušen pepeo do konstantne mase, u izvornom obliku, pri čemu se vodilo računa da se pre mešanja izdrobe grudve koje su nastale sušenjem. Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.31, a vrednosti su dati u Prilogu 4-2 zajedno sa ostalim rezultatima čvrstoće i recepturama mešavina. Kao i kod letećeg pepela, uzorci sa 50 % V/V ili većom količinom letećeg pepela u vezivu su izvađeni tek nakon 48 sati iz kalupa. Rezultati zapreminske mase uzorka su izmereni odmah nakon vađenja iz kalupa, dok pri starostima od 7 i 28 dana podrazumevaju merenja na vlažnim uzorcima, nakon vađenja iz vode i uklanjanja površinske vlage. Zamena sa neprerađenim otpadnim pepelom je smanjila konzistenciju svežeg maltera i u ovom slučaju, ali ne u toj meri kao sa letećim pepelom iz TENT B. Razlog je krupnija granulacija otpadnog pepela, što potvrđuje i činjenica da zamenom čak i 10% V/V CEM III/B sa ovim pepelom u mešavini se ne povećava zapreminska masa (kao kod letećeg pepela), a u isto vreme mnogo je veći

priroštaj zapreminske mase nakon 7 dana upoređujući sa rezultatom bez pepela. Generalno posmatrajući, prikaz na Slici 4.31 ima puno sličnosti sa tendencijom promene na Slici 4.29, pošto u otpadnom pepelu preovladava leteći pepeo.



Slika 4.31. Uticaj zamene CEM III/B sa otpadim pepelom iz TENT B u izvornom obliku, u rasponu od 0 do 80% zapremine veziva

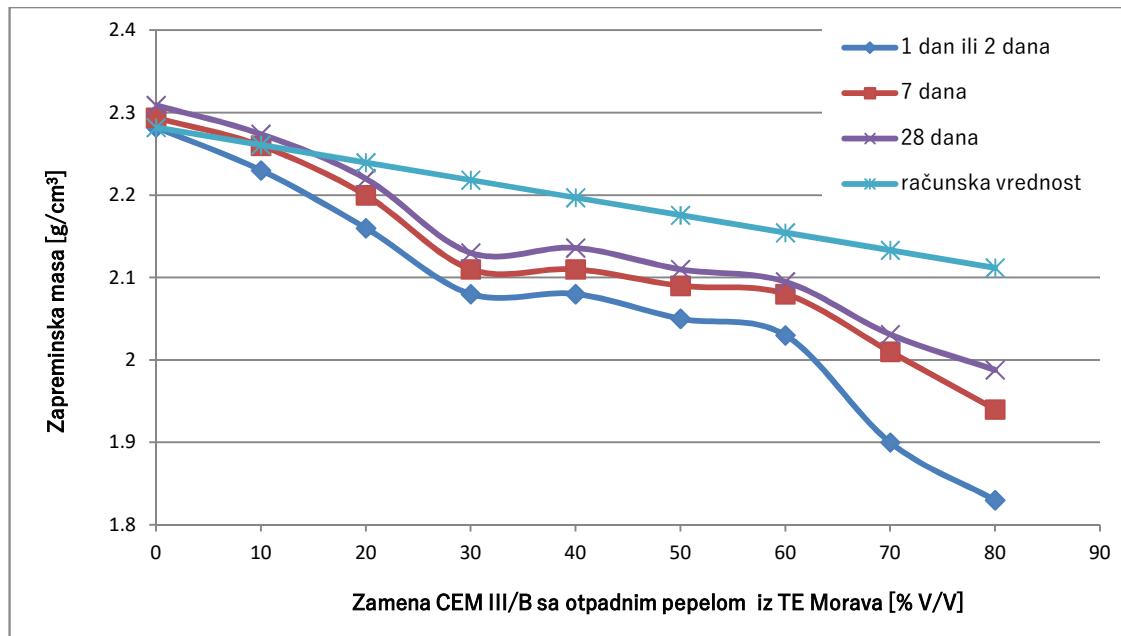
Rezultati ispitivanja čvrstoće uzoraka su prikazani na Slici 4.32. Zamena CEM III/B i sa OP TENTB ima veoma negativan efekat na rane čvrstoće uzoraka. Uzorci sa 50% V/V udela pepela ili više nisu mogli takođe da se izvade iz kalupa samo nakon 48 sati. Upoređujući sa rezultatima na Slici 4.30 veoma je slična tendencija. Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem nakon 28 dana su imali mali (do 8%) pozitivan efekat u odnosu na liniju proporcionalnosti. To se takođe može objasniti grubljom granulacijom otpadnog pepela. Čvrstoće pri pritisku su i pri starosti od 28 dana ostale značajno umanjene zamenom CEM III/B sa OP TENT B, upoređujući i sa linijom proporcionalnosti, pa se može zaključiti da se je ova zamena takođe bez preimุćstava.



Slika 4.32 Uticaj zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom TENT B na čvrstoću maltera

#### 4.2.1.3 ZAMENA CEM III/B OTPADNIM PEPELOM SA PEPELIŠTA TE MORAVA

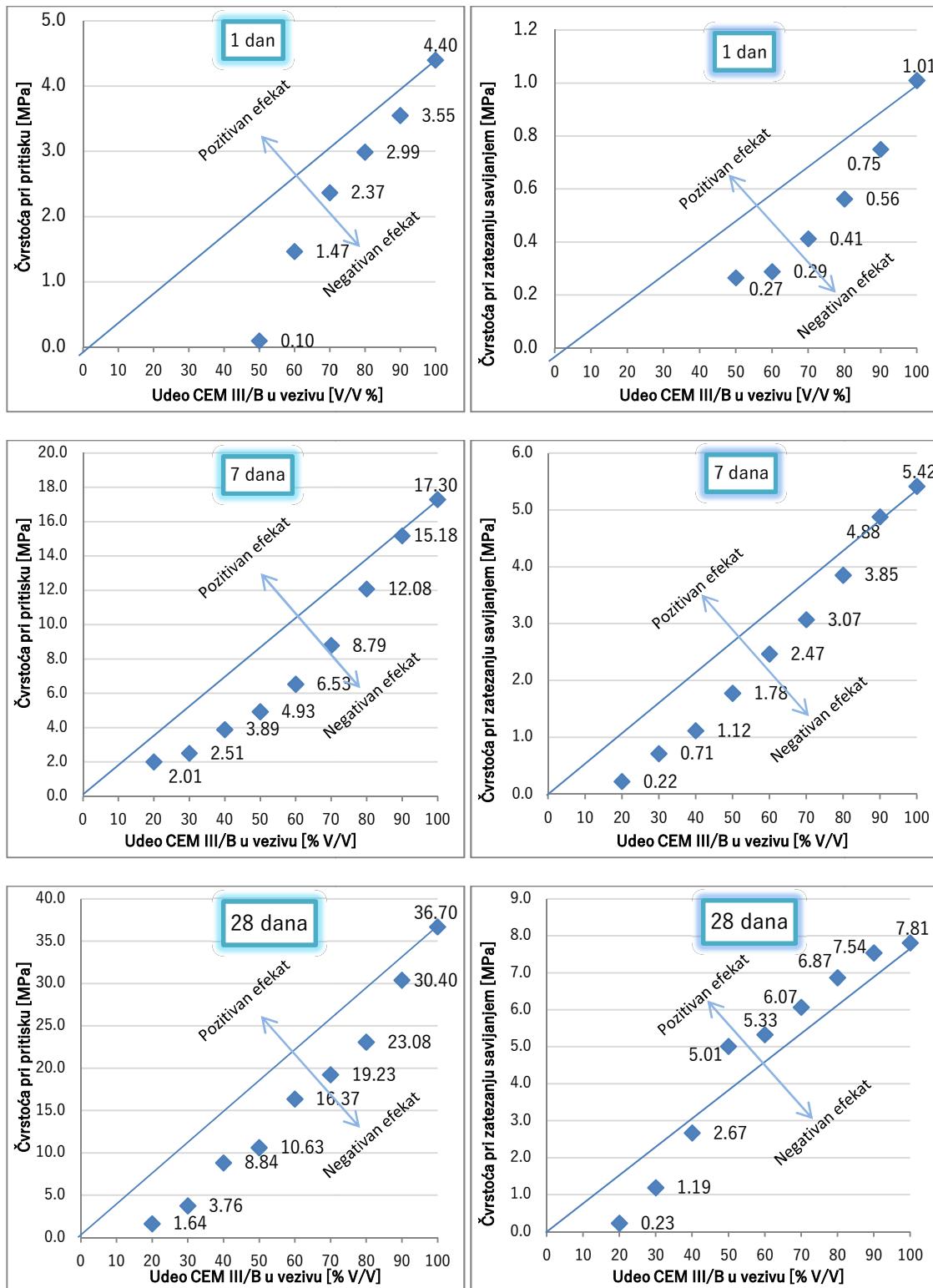
Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.33, a dati su u Prilogu 4-3 zajedno sa recepturama mešavina. U ovom setu mešavina, uzorci gde je udeo otpadnog pepela 60 % V/V ili više su izvađeni tek nakon 48 sati iz kalupa.



Slika 4.33 Uticaj zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom iz TE Morava u izvornom obliku, u rasponu od 0 do 80% zapremine veziva

Zamena sa ovim neprerađenim otpadnim pepelom je imala naznačniji nepovoljan efekat na konzistenciju svežeg maltera od sve 3 vrste. Imajući u vidu strukturu pepela (SEM snimci), to se može objasniti prvenstveno upijanjem čestica pepela, kojim se smanjuje efektivni vodo-vezivni faktor u mešavini.

Uočljiva je velika razlika u tendenciji promene zapreminske mase uzrokovane zamenom sa otpadnim pepelima iz TENT B i TE Morava, merenog prvog dana. Na osnovu SEM prikaza dve različite vrste pepela u delu 4.1.3, ta pojava se može objasniti njihovom razlikom u strukturi zrna koja je dovela do razlike i u pakovanju zrna. Rezultati ispitivanja čvrstoće uzorka su prikazani na Slici 4.34



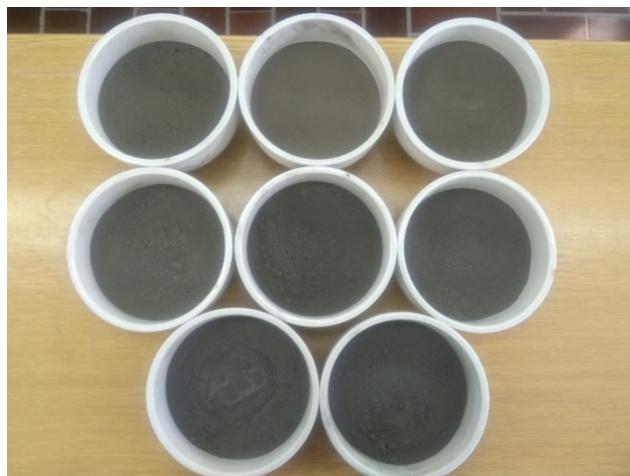
Slika 4.34 Uticaj zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom TE Morava na čvrstoću maltera

Rezultati uzoraka sa 60% V/V udela pepela ili više, koji su ispitani takođe tek posle 48 sati, nalaze se u Prilogu 4-3. Na osnovu rezultata, prikazanih na Slici 4.34, uopšteno i o zameni CEM III/B sa otpadnim pepelom sa pepelišta TE Morava se zaključiti da nije pružilo nikakve povoljnosti u smislu doprinosa fizičko-mahaničkim karakteristikama. Pozitivan efekat na čvrstoću pri zatezanju savijanjem, nakon 28 dana je posledica ručne ugradnje usled smanjene konzistencije sveže mešavine maltera, tj. efektivno smanjenog vodovezivnog faktora u mešavini.

Rezultati ispitivanja sa ternarnim mešavinama C-Z-P sa letećim pepelom, kao i sa 2 vrste otpadnog pepela su slični rezultatima koji se mogu naći u naučnim publikacijama, a bave se ispitivanjem mešavina cement - domaći pepeli iz TE [145].

#### 4.2.2. ZAMENA CEM III/B SA MEHANIČKI AKTIVIRANIM PEPELIMA

Finoća sva 3 predmetna pepela iz TE u izvornom obliku je bila manja od preporučenih vrednosti navedenim u standardima [145] i [33]. Nedovoljna finoća je svakako jedna prepreka pri korišćenju letećeg pepela kao punioca prema EN 206-1 [77]. Mlevenje je postupak usitnjavanja čestica, ali kao što je u delu 4.1.4 dokazano i metoda mehaničke aktivacije pepela. Tokom priprema pepela za eksperimentalna ispitivanja uticaja mehaničke aktivacije velika pažnja je posvećena da uslovi mlevenja uvek budu konstantni (količina materijala za mlevenje, vreme mlevenja, vreme pražnjenja mlina, vreme između sušenja i mlevenja, itd...). Ovaj način mehaničke aktivacije nije najoptimalniji način prerađe pepela. Za određeni granulometrijski i hemijski sastav pepela postoje mnogo efikasnije metode mlevenja do željene finoće. Ovaj način je izabran sa razlogom da pri konstantnim uslovima jedina promenljiva bude vreme mlevenja.



Slika 4.35 Mehanički aktivirani leteći pepeo iz TENT blok B nakon 0, 5, 15, 30, 60, 120, 240 i 480 minuta

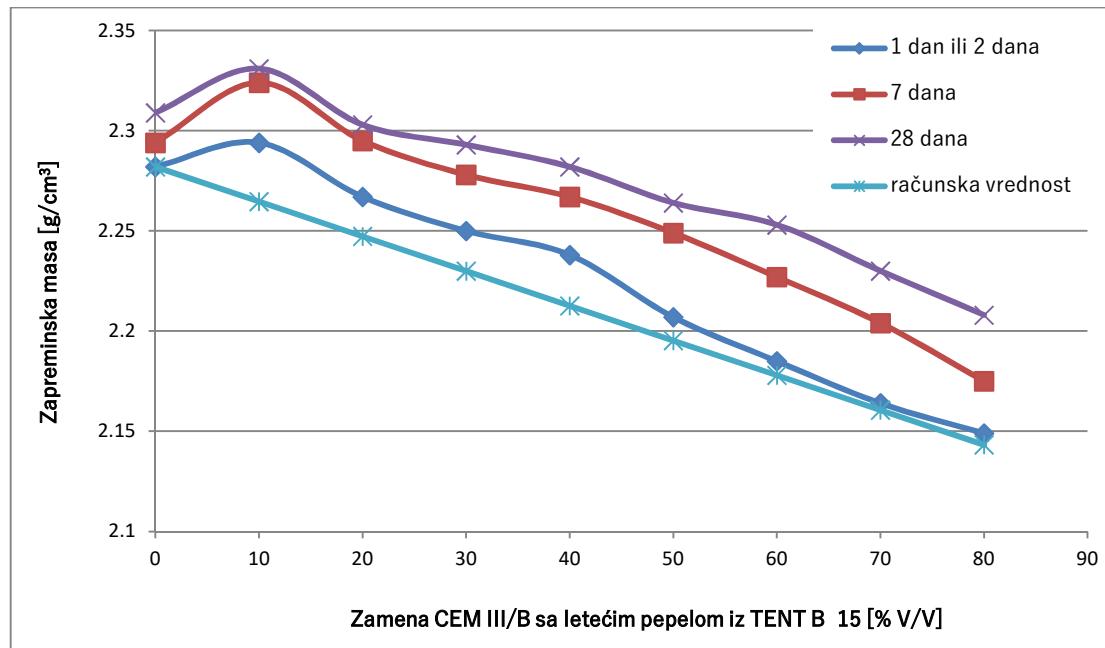
Dužine trajanja mlevenja su iznosile 15, 30, 60, 120 i 240 minuta. Pri 480 minuta je primećeno da dolazi do agregacije već samlevenog pepela, pa u ovom delu ispitivanja su bili isključeni. Kod otpadnog pepela TENT B se agregacija usled

mlevenja pojavila već pri trajanju mlevenja od 240 minuta, stoga je gornja granica trajanja mlevenja za taj pepeo 120 minuta.

#### 4.2.2.1 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 15 MINUTA MLEVENJA

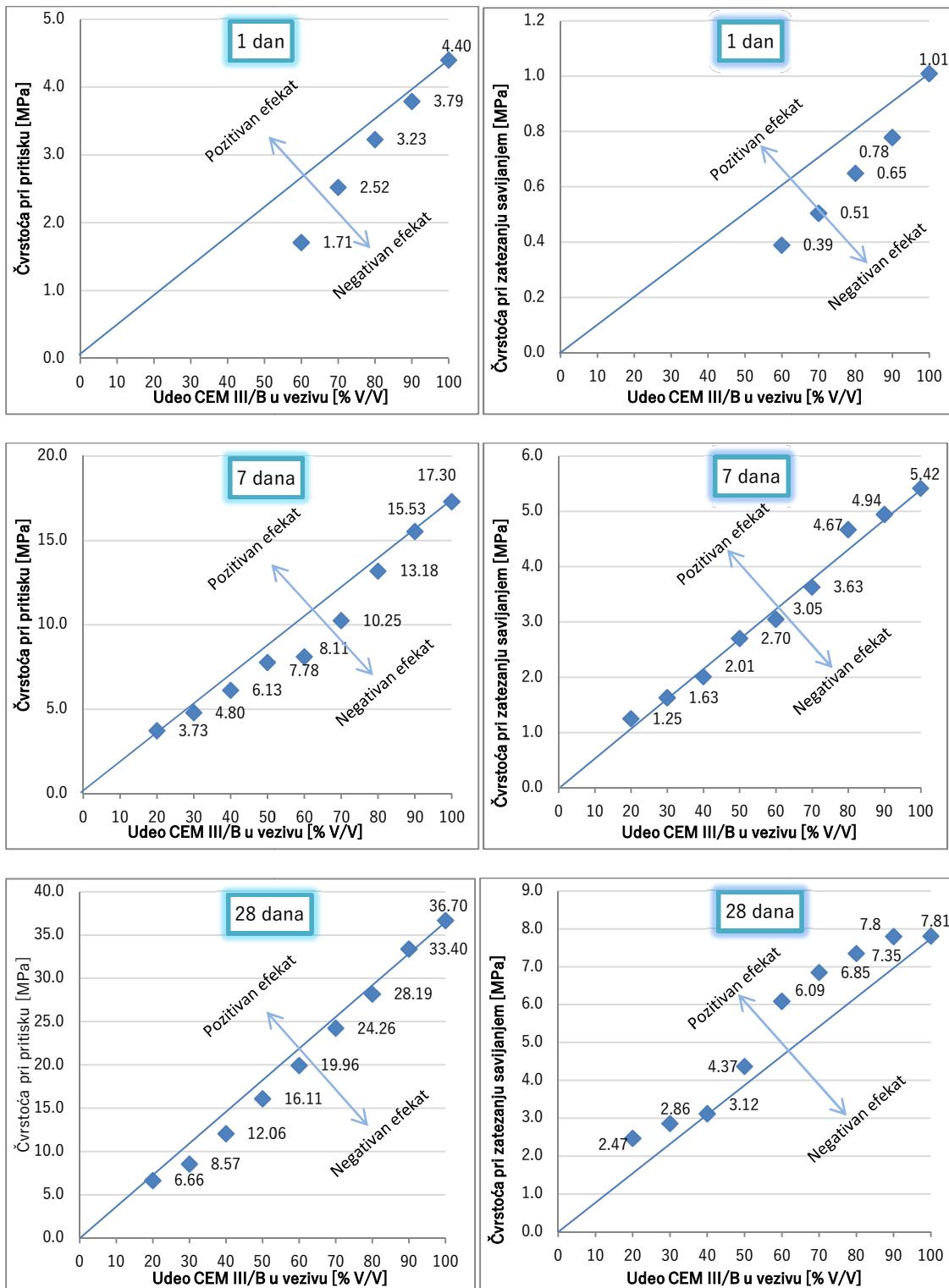
Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.36 Posmatrajući tendenciju promene finoće i strukture čestica pepela usled mlevenja može se ustanoviti da usled 15 min mlevenja dolazi do značajnih promena kod letećeg pepela iz TENT B. Pri ugrađivanju uzoraka sa ovom vrstom zamenjujućeg materijala osetno se poboljšala ugradljivost. Ta poboljšana ugradljivost se odrazila i poboljšano pakovanje zrna u mešavini, stoga kao što se i na Slici 4.36 može videti, u odnosu na liniju proporcionalnosti postignuta je veća gustina po svim procentima zamene. Dakle, već nakon 15 minuta prerade ova vrsta pepela pokazuje efekat punioca. Interesantno je da sa 10% V/V zamene dobija se veća zapreminska masa i od referentnog maltera iako je gustina pepela TENT B15 30% manja od CEM III/B. Primetan rast promene zapreminske mase usled upijanja vode (razlika između merenja nakon 1, 7 i 28 dana) je uočljiv pri zamenama od 50% V/V i više sa pepelom, što pokazuje granicu poboljšanja ili efekta filera pri ovoj finoći. Takođe od te vrednosti rezultati se približavaju liniji proporcionalnosti.

Rezultati ispitivanja čvrstoće uzoraka sa vezivom, gde je CEM III/B zamenjen sa TENT B 15 su prikazani na Slici 4.37, a dati su u Prilogu 4-4 zajedno sa rezultatima ispitivanja zapreminske mase i recepturama mešavina.



Slika 4.36 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa letećim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 15 minuta mlevenja

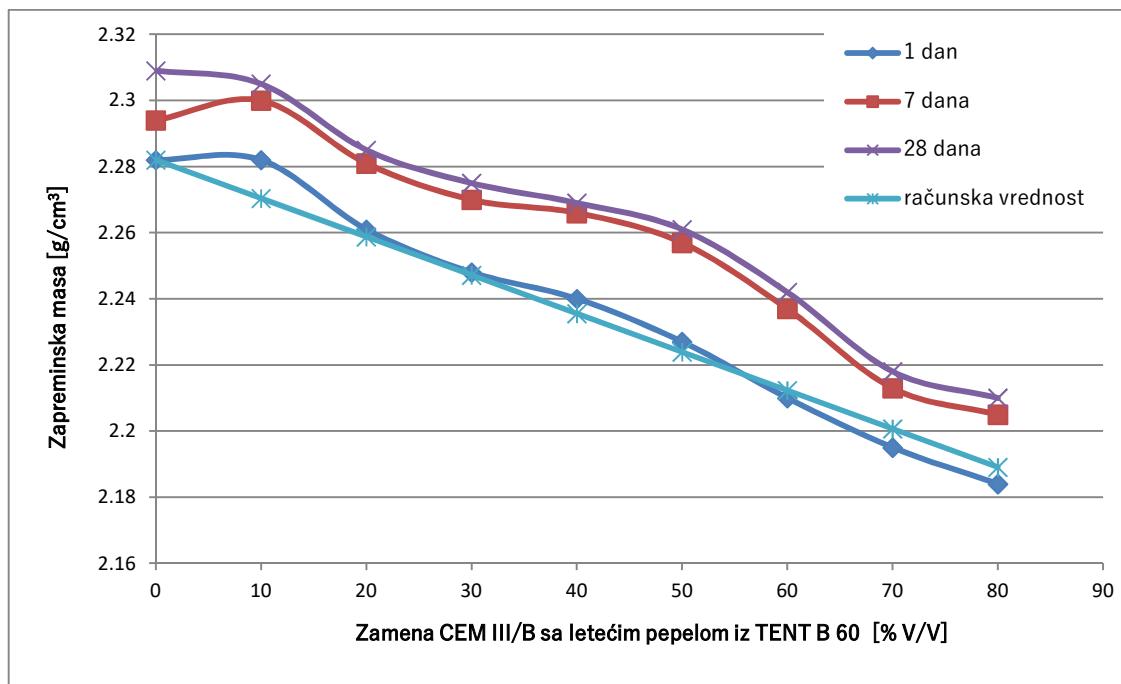
Vrednosti jednodnevne čvrstoće pri zameni CEM III/B sa pepelom od 50 % V/V ili više nisu prikazani, jer i kod ovog seta uzorka nakon 24 sata ti malteri još nisu bili očvrslji. Jednodnevne čvrstoće pri pritisku i zatezanju savijanjem su zaostale od relativno očekivanih, tj. i ova vrsta prerađenog pepela u većoj meri umanjuje čvrstoću nego što zamenjen. Međutim za razliku od neprerađenog pepela, u mnogo manjoj meri i u ovom slučaju već pri starosti od 7 dana rezultati obe vrste čvrstoće su se približile liniji proporcionalnosti. Nakon 28 dana primetna je promena u odnosu na neprerađen pepeo. Čvrstoće pri zatezanju savijanjem su relativno veće od računskih u odnosu na procenat umanjenja CEM III/B u vezivu. Pri zameni sa 10 % V/V pepela TENT B15 čvrstoća pri zatezanju savijanjem se izjednačila sa referentnim rezultatom nakon 28 dana. Čvrstoće pri pritisku su u dobroj korelaciji sa računskim vrednostima u odnosu na umanjenje CEM III/B u vezivu, tj. nema nikakvog relativnog doprinosa nakon 28 dana.



Slika 4.37 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa letećim pepelom TENT B 15, na čvrstoću maltera

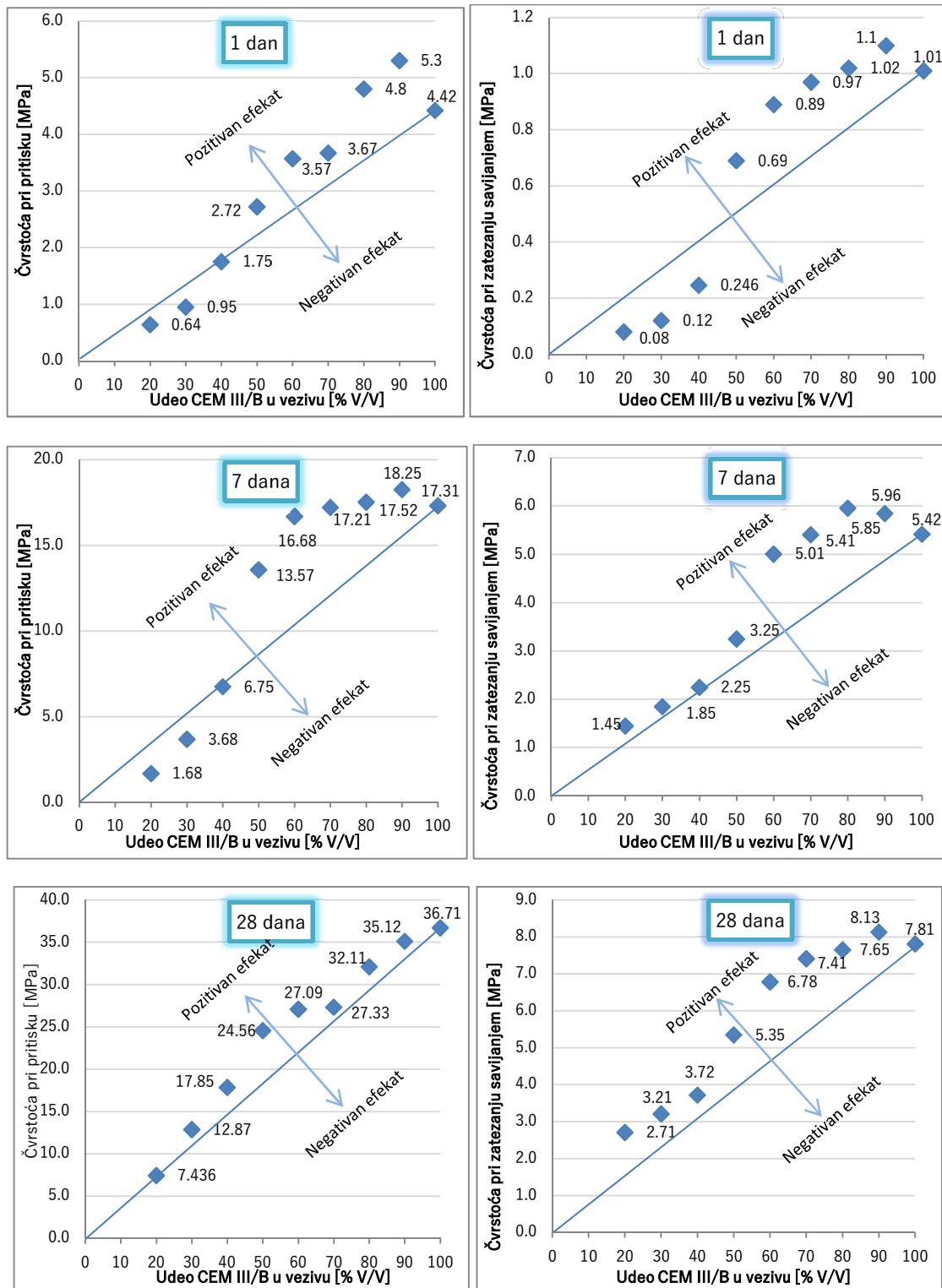
#### 4.2.2.2 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 60 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.38. Uzorci pravljeni sa ovim pepelom su imali značajno poboljšanje ugradljivosti do 30% V/V zamene CEM III/B, tj. konzistencija svežeg maltera je bila plastičnija od referentne. Pri većim količinama zamene je takođe ugradnja bila značajno lakša, pa su i mereni rezultati zapreminske mase nakon 24 sata pokazali veoma dobru korelaciju sa računskim vrednostima.



Slika 4.38 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa letećim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 60 minuta mlevenja

Rezultati ispitivanja čvrstoće, gde je CEM III/B zamjenjen sa TENT B 60 su prikazani na Slici 4.39, a dati su u Prilogu 4-5, zajedno sa rezultatima ispitivanja zapreminske mase i primenjenim recepturama mešavina. Kod ovog seta uzorka je prvi put postignuta dovoljna čvrstoća kod svih uzoraka u celom dijapazonu zamene pepela (od 0 do 80 %V/V) nakon 24 sata, da su se mogli izvaditi i ispitati.

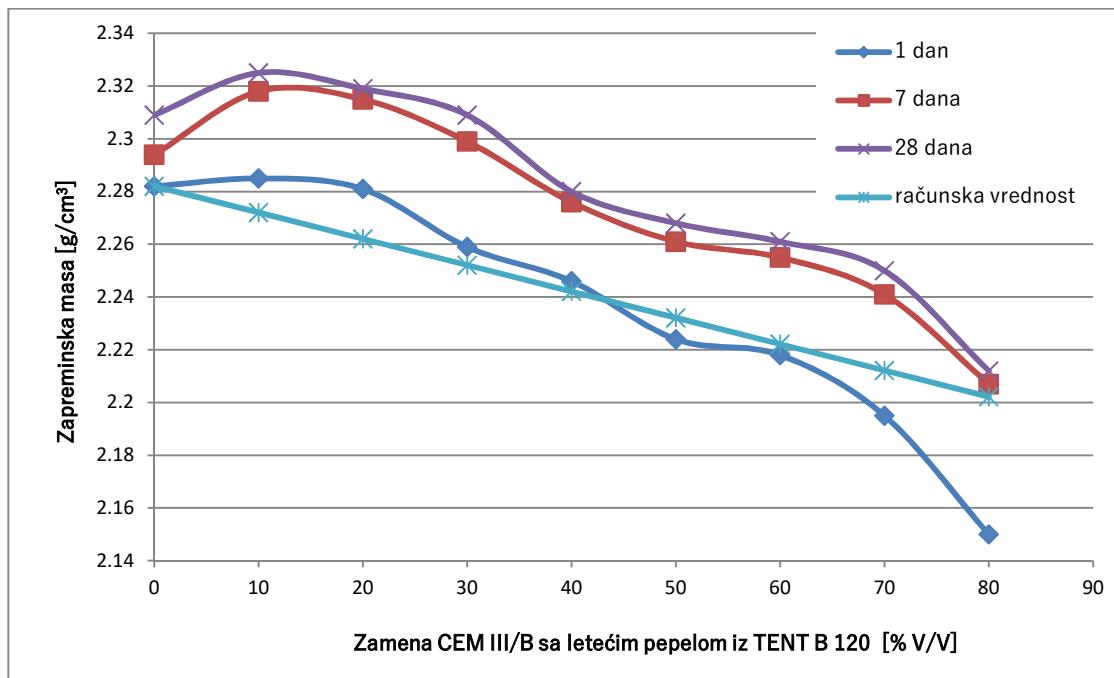


Slika 4.39. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa letećim pepelom TENT B 60 na čvrstoću maltera

Značajna promena u odnosu na prethodni set je bila pojava da pri udelu LPTENT B 60 u vezivu od 10 % V/V i 20 %V/V, da rane čvrstoće i pri pritisku i pri zatezanju savijanjem su bile veće i od absolutne vrednosti referentne mešavine za 20 % i 10 %, respektivno. Ovo povećanje rane čvrstoće je dokaz pojave efekta filera pomoću mehanički aktiviranog pepela. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem nakon 28 dana je kod svih uzoraka iznad linije porporcionalnosti, dakle pozitivan je efekat zamene sa pepelom u odnosu na relativne vrednosti. Takođe su i čvrstoće pri pritisku nakon 28 dana veće, tj. primetan je pozitivan efekat mehaničke aktivacije. Pri zameni od 50 % V/V je najznačajnije relativno povećanje od 33,8 % u odnosu na liniju proporcionalnosti.

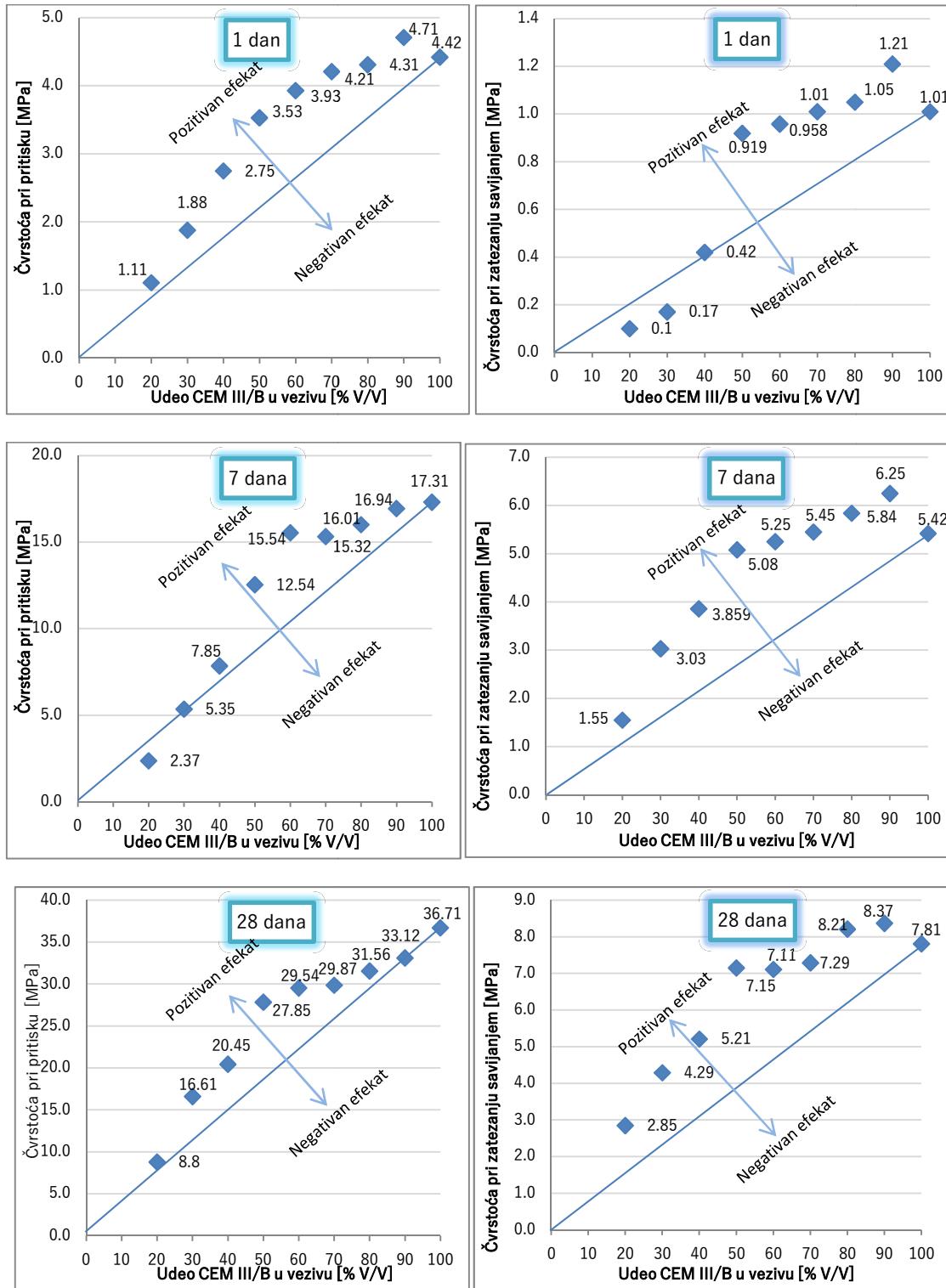
#### 4.2.2.3 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 120 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.40.



Slika 4.40 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa letećim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 120 minuta mlevenja

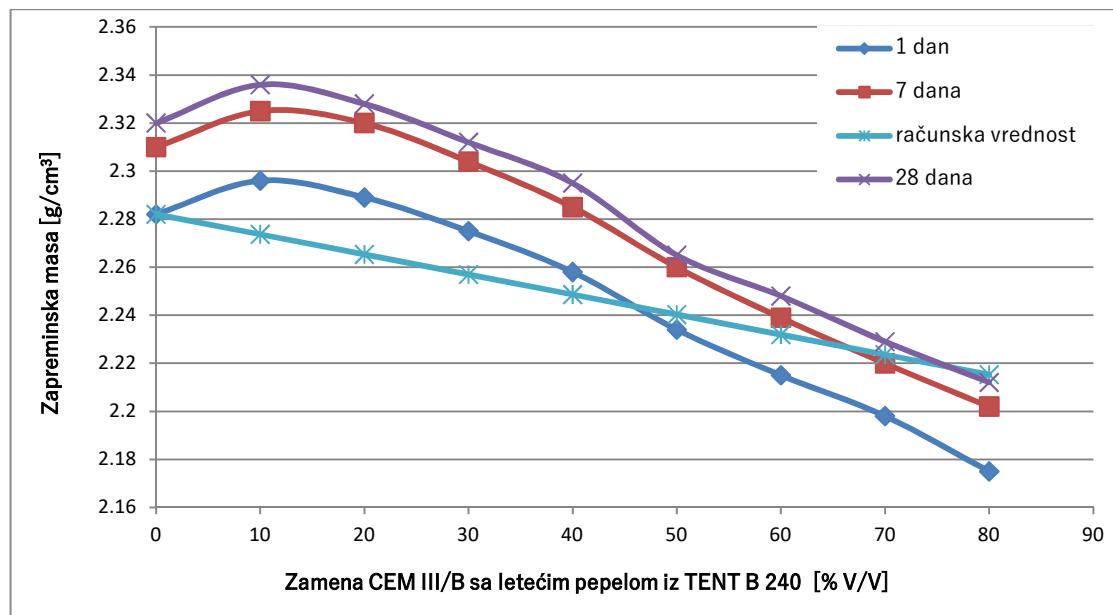
Pri količinama zamene pepela 60 % V/V i više, konzistencija svežeg maltera se osetno smanjivala. Posledica toga je postepeni pad zapreminske mase u odnosu na računske vednosti, tj. smanjenje kompaktnosti ugrađenih uzoraka pri zameni CEM III/B sa LPTENT B 120 od 50% V/V ili više. Ovo je bila očekivana pojava usled istovremenog smanjenja CEM III/B i postepenog povećanja finoće punioca u mešavini. Dakle, može se zaključiti da pri većim finoćama pepela, ako se količina CEM III/B smanji preko određene granice (<40 % V/V) adekvatno kompaktiranje se ne može postići. Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 4.40, može se konstatovati i da je povećanje zapreminske mase pri starostima od 7 ili 28 dana, nakon prvog merenja, manje u odnosu na prethodne varijante letećeg pepela TENT B. To je takođe posledica povećane finoće i dokaz boljeg pakovanja zrna u uzorcima maltera. Rezultati ispitivanja čvrstoće uzoraka sa udelom mehanički aktiviranog pepela TENT B 120 od 0 do 80% V/V su prikazani na Slici 4.41, a vrednosti su navedeni u Prilogu 4-6, zajedno sa rezultatima ispitivanja zapreminske mase i korištenim recepturama mešavina. Istovetno sa prethodnom grupom uzoraka, već nakon 24 sata je postignuta dovoljna čvrstoća da se izvade iz kalupa svi uzorci, u celom dijapazonu zamene pepela od 0 do 80 % V/V. Tendencija povećanje ranih čvrstoća i pri većim udelom mehanički aktiviranog pepela TENT B 120 je implikacija povećanja efekta filera pri povećanju specifične površine. Jednodnevna čvrstoća pri zatezanju savijanjem, čak i pri 50% V/V supstitucije CEM III/B, je bliska referentnoj vrednosti. Pri daljem povećanju udela pepela evidentan je pad čvrstoće (samo) pri zatezanju savijanjem, što je još jedna potvrda nedostatka dovoljne količine cementa za tu finoću pepela. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem nakon 28 dana je kod svih uzoraka iznad linije porporcionalnosti, dakle pozitivan je efekat zamene sa pepelom u odnosu na relativne vrednosti. Čvrstoće pri pritisku nakon 28 dana su iznad linije proporcionalnosti, tj. primetan je pozitivan efekat mehaničke aktivacije. Manje vrednosti 28-dnevne čvrstoće pri pritisku kod uzoraka sa 10 i 20 %V/V pepela TENT B 120 u odnosu na rezultate sa TENT B 60 je takođe posledica veće finoće, usled previše retke konzistencije.



Slika 4.41. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa letećim pepelom TENT B 120 na čvrstoću maltera

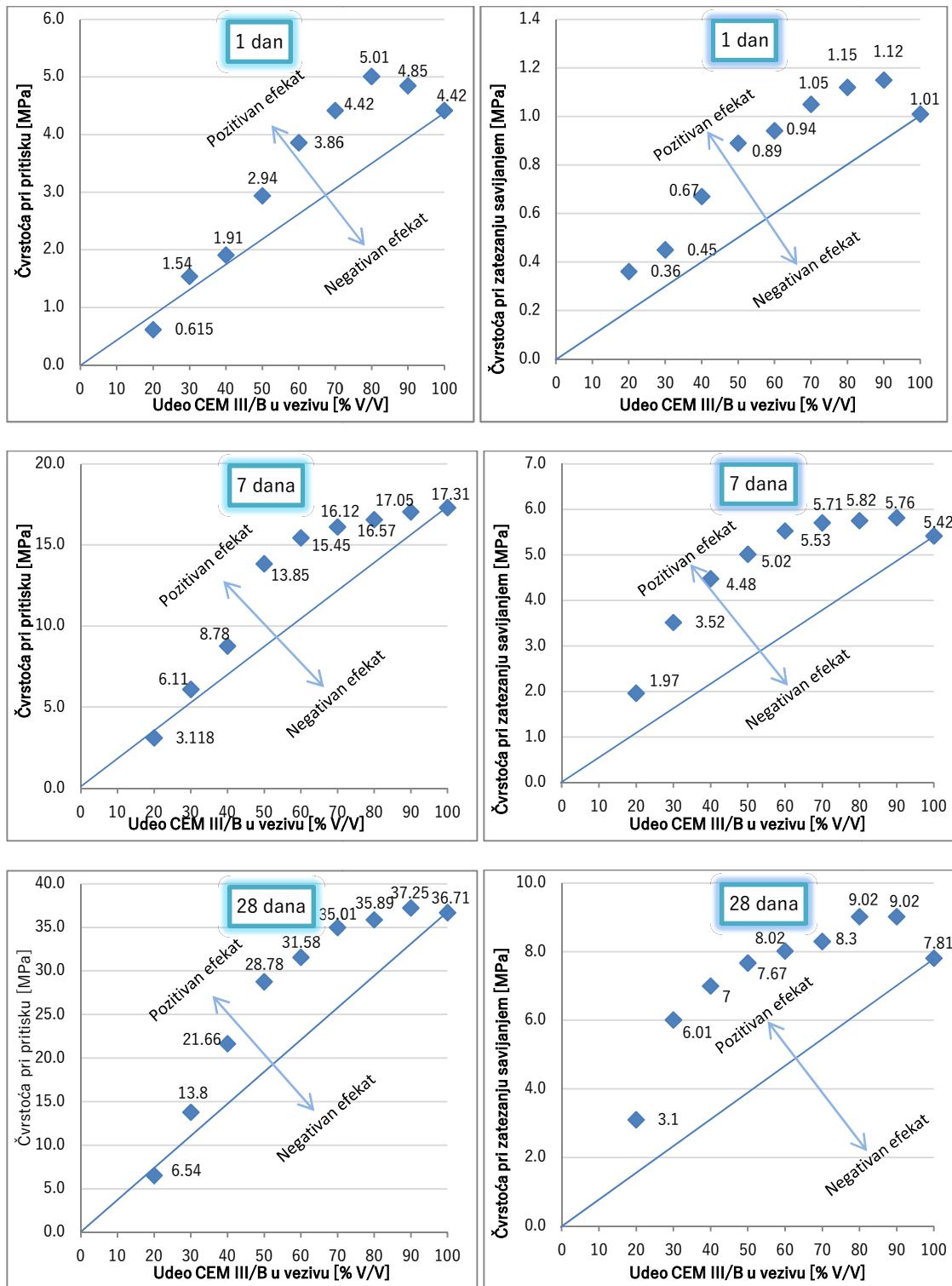
#### 4.2.2.4 ZAMENA CEM III/B SA LP IZ TENT B NAKON 240 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.42. Dualan efekat zamene CEM III/B u mešavini sa LP TENTB 240 je još izraženiji nego na prethodnom pepelu. S jedne strane do 40% V/V zamene CEM III/B je primetan pozitivan doprinos na zbijenost uzorka, s druge strane pri većem udelu pepela smanjena je zapreminska masa u odnosu na računske vrednosti kao posledica nedovoljne količine cementa za tu finoću pepela. Rezultati na Slici 4.42 pokazuju najmanje povećanje zapreminske mase pri starostima od 7 ili 28 dana. Zbog ovog dokaza najboljeg pakovanja zrna u mešavinama je LP TENT B koji je mleven 240 minuta izabran za dalja ispitivanja na betonima. Ovde je najuočljivija pojava da povećanjem finoće u isto vreme se smanjuje i granica opravdane zamene CEM III/B.



Slika 4.42 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa lетеćim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 240 minuta mlevenja

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju savijanjem očvrslih uzorka od mešavina sa mehanički aktiviranim LP TENT B 240 su prikazani na Slici 4.43, a vrednosti su navedeni zajedno sa rezultatima ispitivanja zapreminske mase i korištenim recepturama mešavina u Prilogu 4-7.



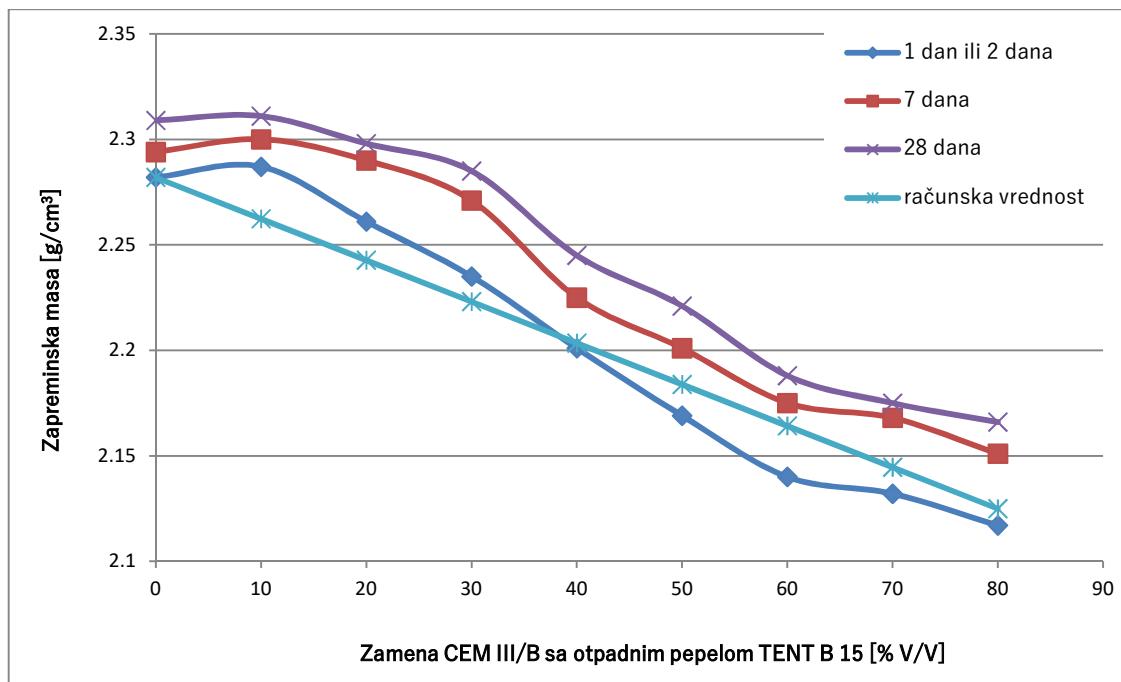
Slika 4.43 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa letećim pepelom TENT B 240 na čvrstoću maltera

Pomoću zamene CEM III/B sa mehanički aktiviranim pepelom TENT B 240 je postignuta najuspešnija supstitucija. Jednodnevne čvrstoće su veće od absolutne vrednosti referentne mešavine do 30 % V/V zamene sa pepelom zahvaljujući efektu punioca. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem nakon 28 dana je pri 20 % V/V zamene sa pepelom 15% veća od rezultata mešavine bez pepela. 28-dnevna čvrstoća pri pritisku je pri 10 % V/V takođe veća od čvrstoće referentne mešavine. Najveći pozitivan uticaj na čvrstoću pri pritisku je imala mešavina sa 50 % V/V zamene sa pepelom računajući od linije proporcionalnosti iznosi povećanje od 56,8 %.

Relativno je mala razlika u priraštaju specifične površine pri mlevenju, ali je velika razlika u intenzitetu kvarca kod mehanički aktiviranog letećeg pepela TENT B. Na osnovu rasta mehaničkih karakteristika pri mlevenju, može se zaključiti da je u tom slučaju značajniji uticaj mehaničke aktivacije pepela od samog povećanja finoće. Takođe povećanje čvrstoće pepela nije proporcionalno rastu finoće pepela.

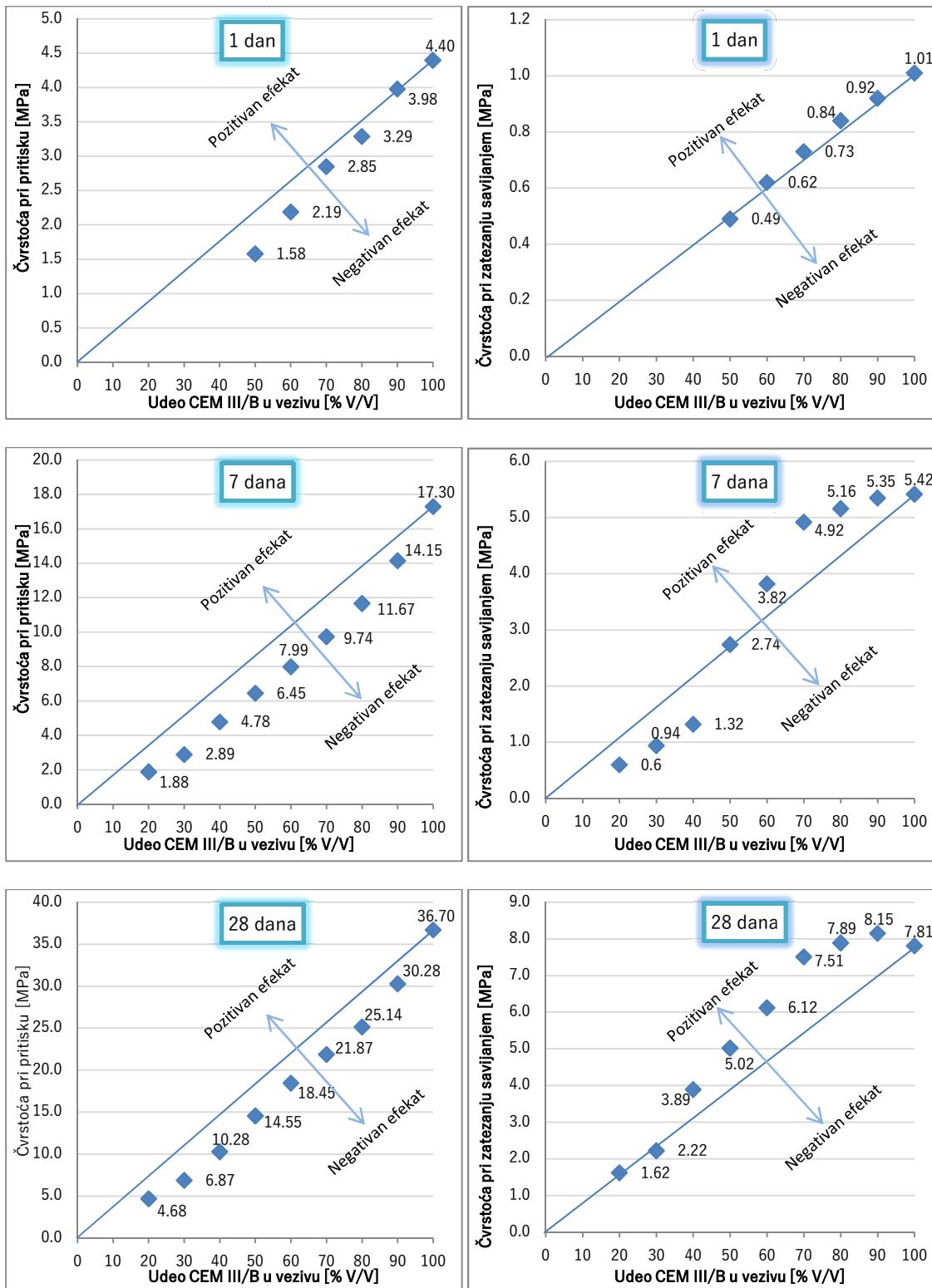
#### 4.2.2.5 ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 15 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.44. Upoređujući sa rezultatima otpadnog pepela pre mlevenja, nakon 15 minuta mehaničke aktivacije, može se konstatovati da i ova vrsta pepela pokazuje efekat punioca. Pri zameni pepela sa CEM III/B do 30% V/V povećava se zbijenost pri ugradnji uzorka, čak i u odnosu na računske vrednosti. Pored toga, po celom dijapazonu zamene je postignuta veća kompaktnost u odnosu na pepeo pre mlevenja. Konzistencija svežih mešavina je bila slična ili bolja upoređujući sa konzistencijama uzorka sa LP TENT B 15. Na Slici 4.44 se može videti da u odnosu na liniju proporcionalnosti je postignuta veća gustina samo do 30 %V/V zamene pepela, za razliku sa LP TENT B 15 (Slika 4.36), gde je postignuto bolje pakovanje zrna do 80 % V/V zamene.



Slika 4.44 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 15 minuta mlevenja

Rezultati ispitivanja čvrstoće uzorka sa vezivom, gde je CEM III/B zamenjen sa TENT B 15 su prikazani na Slici 4.45, a dati su u Prilogu 4-8.

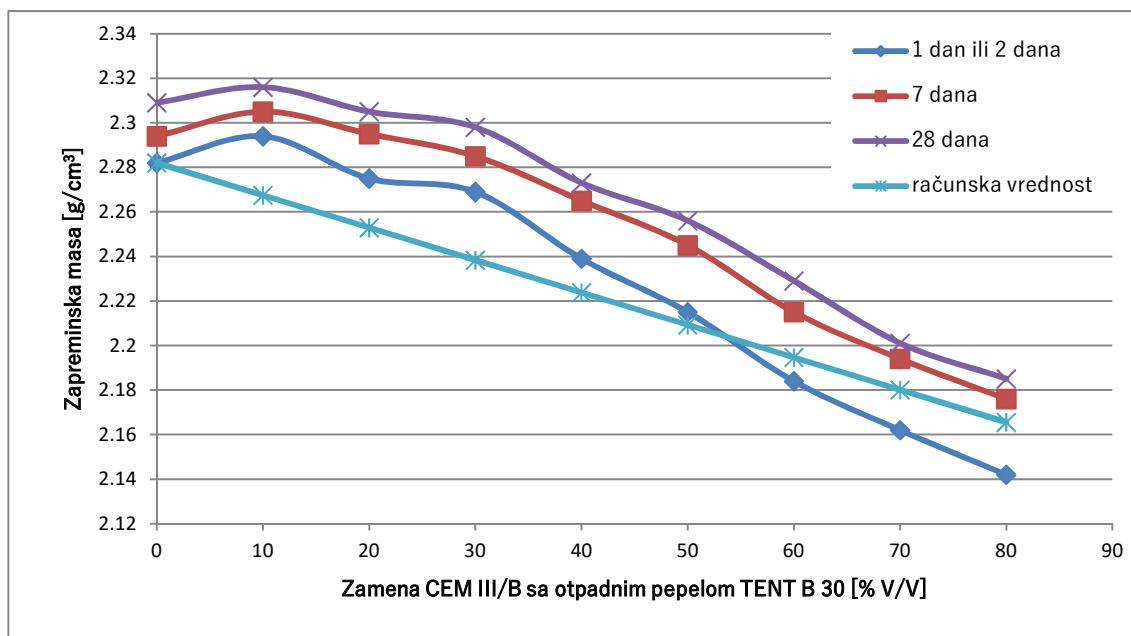


Slika 4.45 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa OP TENT B15, na čvrstoću maltera

Mešavine sa 50 % V/V ili više pepela nisu očvrslji nakon 24 sata, pa su umesto njih u Prilogu 4-8 date čvrstoće nakon 48 sati. Jednodnevne čvrstoće su relativno veće u odnosu na LP TENT B 15 iako je suprotan odnos njihovih zapreminske masa. To se može objasniti boljom ugradljivošću OP, što se pokazalo i na većim jednodnevnim čvrstoćama. Čvrstoće pri zatezanju savijanjem nakon 7 dana su iznad linije proporcionalnosti do 50 % V/V zamene pepela, a nakon 28 dana do 60 % V/V zamene, pri čemu do 20 % V/V zamene sa pepelom rezultat veći i od referentnog maltera. Čvrstoće pri pritisku su zaostale od linije proporcionalnosti.

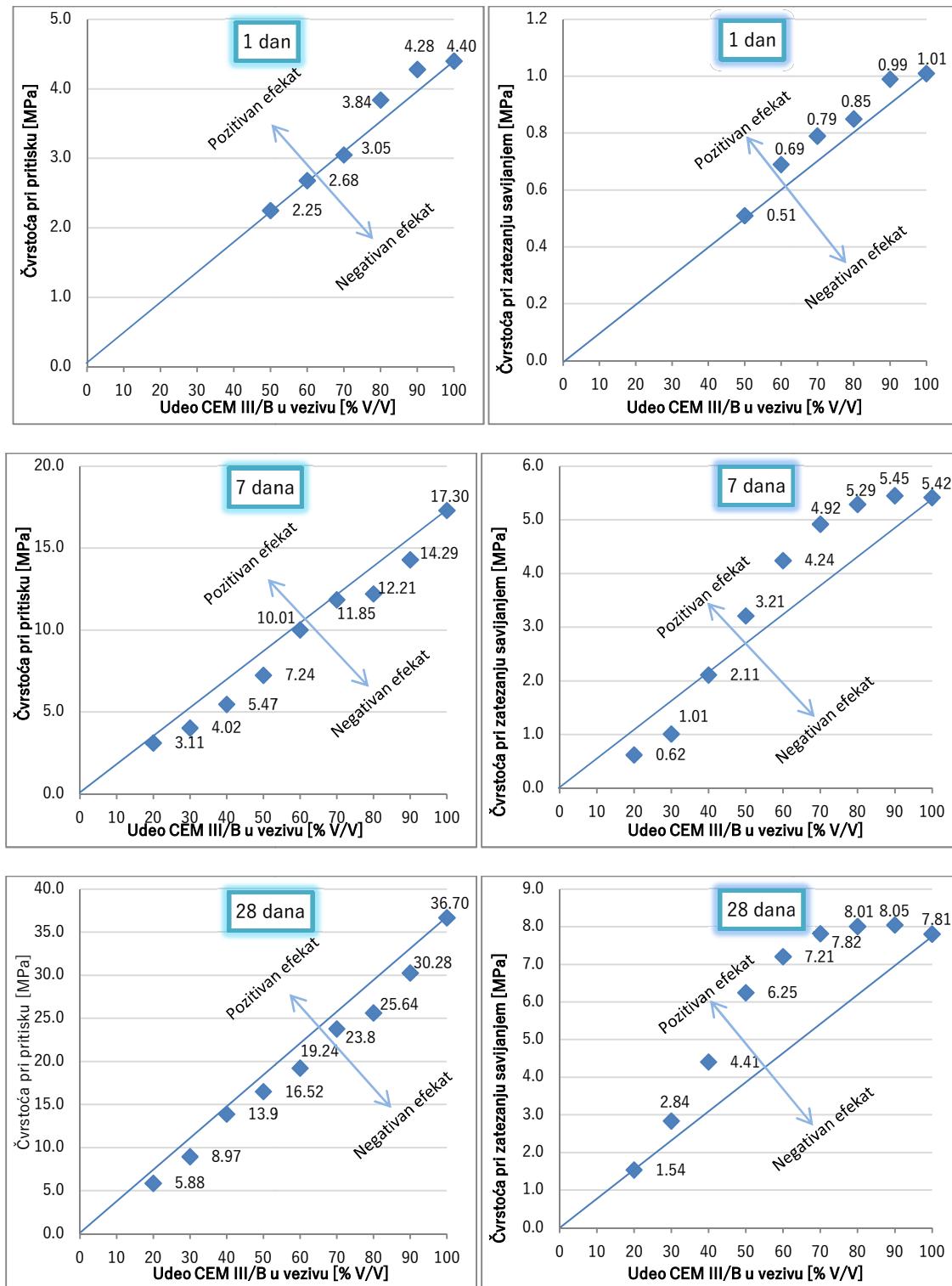
#### 4.2.2.6 ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 30 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase na uzorcima sa inkorporiranim deponovanim pepelom iz TENT B, nakon 30 minuta mlevenja, su prikazani na Slici 4.46.



Slika 4.46 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 30 minuta mlevenja

Promena povećanja ugradljivosti je očigledna do 50 %V/V. Pri većim količinama zamjenjenog pepela od 30%V/V, povećavaju se priraštaji nakon 7 i 28 dana, što je pokazatelj ujedno i granice boljeg pakovanja zrna u mešavini. Na Slici 4.47

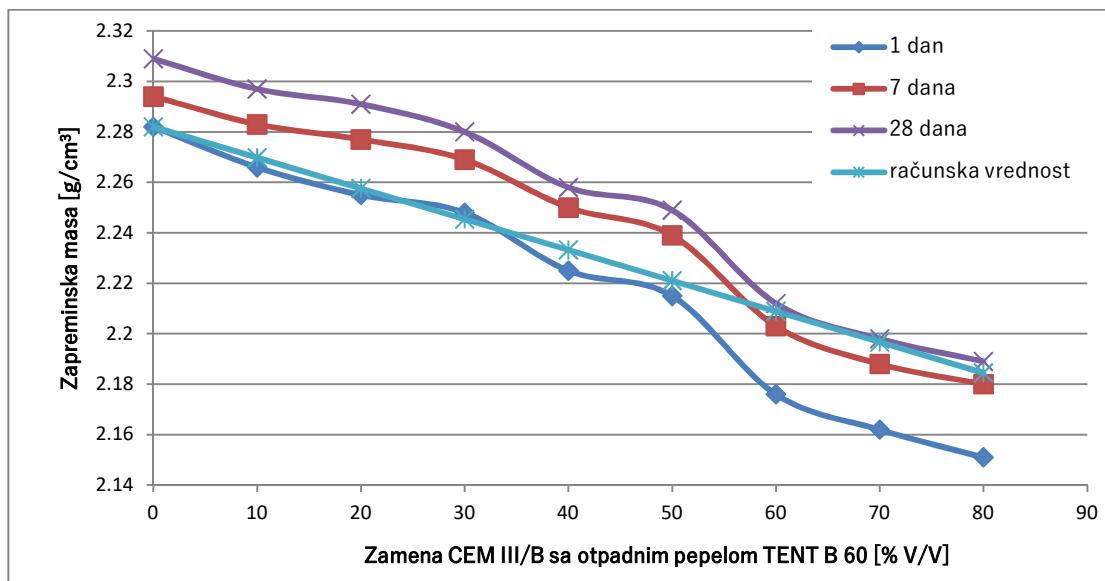


Slika 4.47. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TENT B30 na čvrstoću maltera

su prikazani rezultati ispitivanja čvrstoće uzorka sa vezivom, gde je CEM III/B zamjenjen sa OP TENT B30, a vrednosti su dati u Prilogu 4-9, zajedno sa rezultatima ispitivanja zapreminske mase i primjenjenim recepturama mešavina. Mešavine sa 50 % V/V ili više pepela nisu očvrslji nakon 24 sata, slično prethodnom setu uzorka. Rezultati i čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju savijanjem su nakon 24 sata blizu linije proporcionalnosti, što pokazuje da pri 30 minuta mehaničke aktivacije je postignuto veoma malo poboljšanje u smislu efekta filera. Postignuto je dalje povećanja svih vrednosti po celom dijapazonu zamene i pri svim starostima, ali rezultati čvrstoće pri pritisku su i dalje ostali ispod linije proporcionalnosti, što pokazuje da je zamena i sa ovom vrstom pepela još bez pozitivnog efekta.

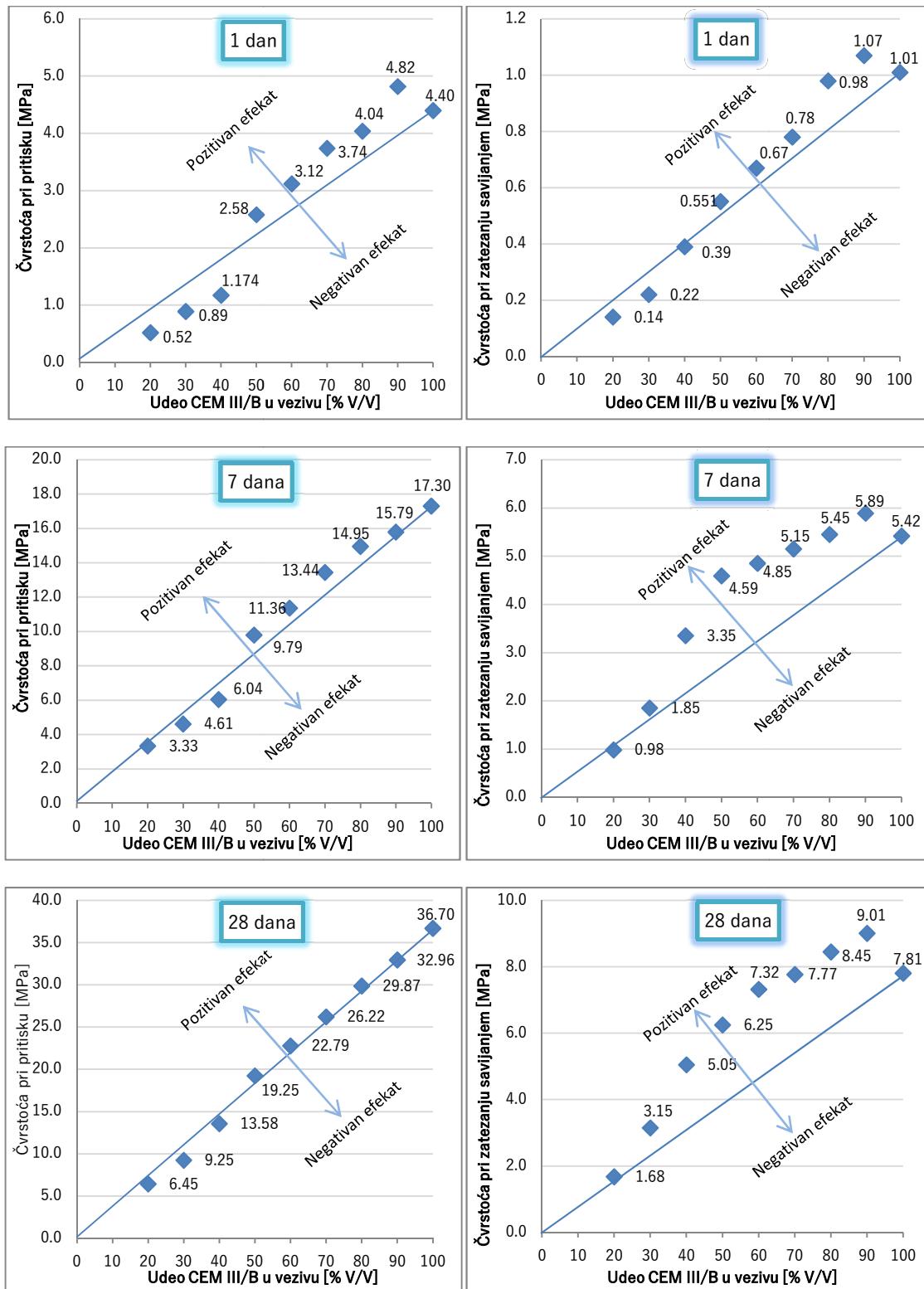
#### 4.2.2.7 ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 60 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase na uzorcima usled supstitucije cementa pepelom sa pepelišta TENT B nakon 60 minuta mlevenja su prikazani na Slici 4.48.



Slika 4.48 Grafički prikaz efekta suptitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 60 minuta mlevenja

Sa ovim pepelom je postignuto značajno poboljšanje ugradljivosti do 50 % V/V, ali pri većim količinama pepela ova finoća nije rezultirala adekvatnom ugradnjom.

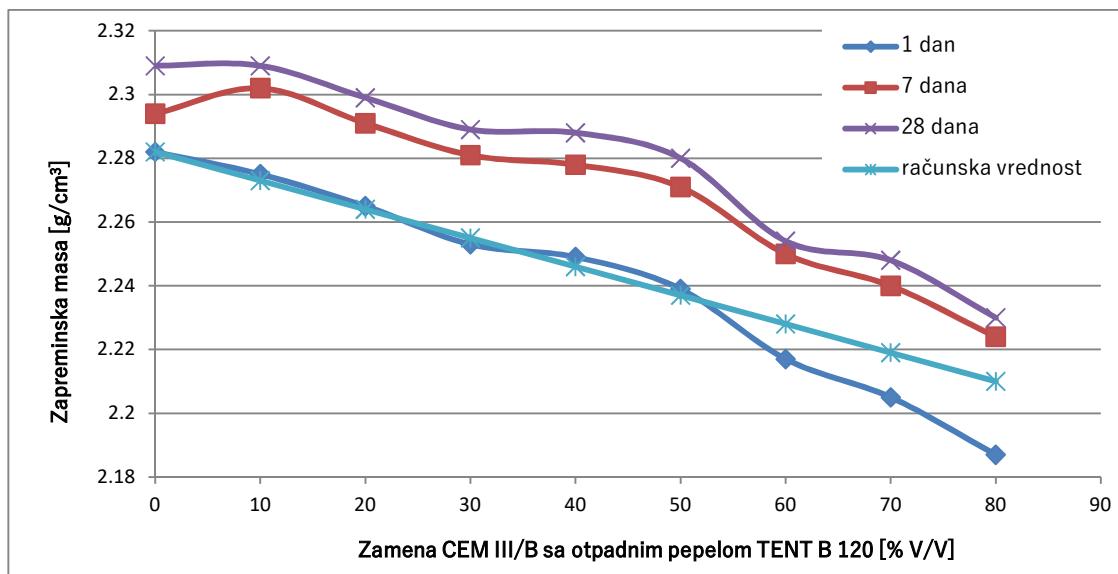


Slika 4.49. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa OP TENT B60, na čvrstoću maltera

Kod ovog seta uzoraka je prvi put postignuta dovoljna čvrstoća kod svih uzoraka u celom dijapazonu zamene pepela (od 0 do 80 %V/V) nakon 24 sata, da bi se mogli izvaditi i ispitati. Rezultati ispitivanja čvrstoće uzoraka su prikazani na Slici 4.49, a dati su u Prilogu 4-10. Pojava povećenja jednodnevne čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju savijanjem u odnosu na liniju proporcionalnosti ukazuje da je ova vrsta pepela imala već značajniji efekat punioca. Pri udelu OP TENT B 60 u vezivu od 10 % V/V rane čvrstoće i pri pritisku i pri zatezanju savijanjem su veće i od absolutne vrednosti referentne mešavine. Slično sa LP TENT B 60 čvrstoća pri zatezanju savijanjem nakon 28 dana je kod svih uzoraka iznad linije proporcionalnosti.

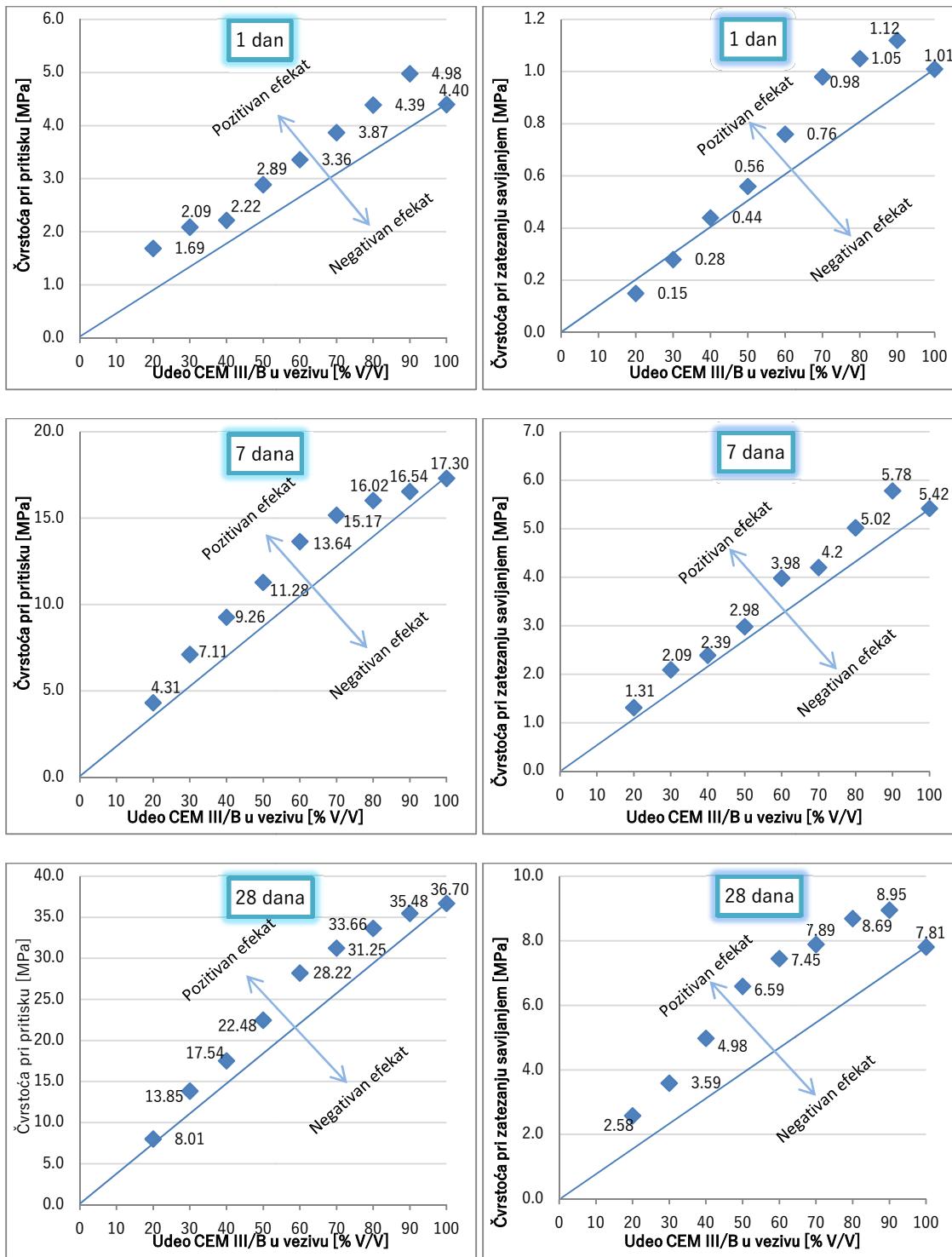
#### 4.2.2.8 ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 120 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.50. Ovde je postignuto dodatno poboljšanje ugradljivosti. Vrednosti zapreminske mase do 50 % V/V pepela kao i u prethodnom setu imaju veoma dobру korelaciju sa računskim.



Slika 4.50 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TENT B nakon 120 minuta mlevenja

Rezultati ispitivanja čvrstoće uzoraka su prikazani na Slici 4.51, a dati su u Prilogu 4-11, zajedno sa rezultatima zapreminske mase i recepturama mešavina.

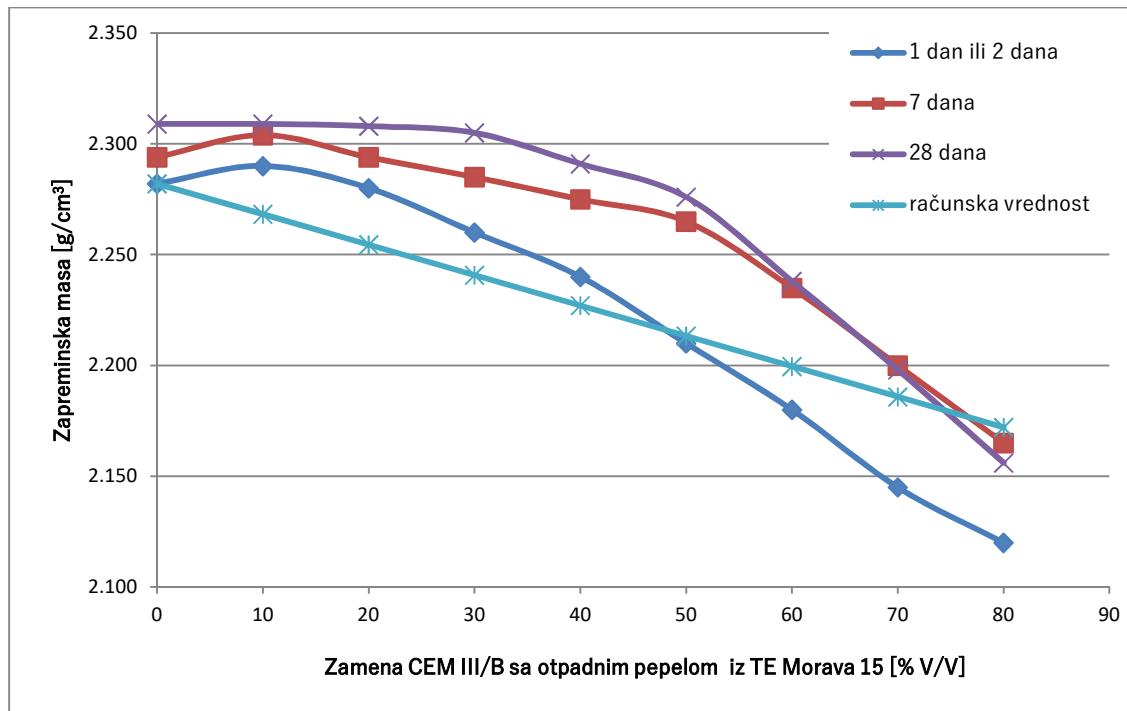


Slika 4.51 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TENT B120, na čvrstoću maltera

Na osnovu rezultata čvrstoće pri pritisku maltera može se zaključiti da zamena sa pepelom ovom vrstom pepela ima umeren pozitivan efekat po celom predmetnom opsegu zamene. Posmatrajući rezultate čvrstoće pri zatezanju savijanjem jasno je da je taj pozitivan efekat izraženiji do 50 % V/V zamene.

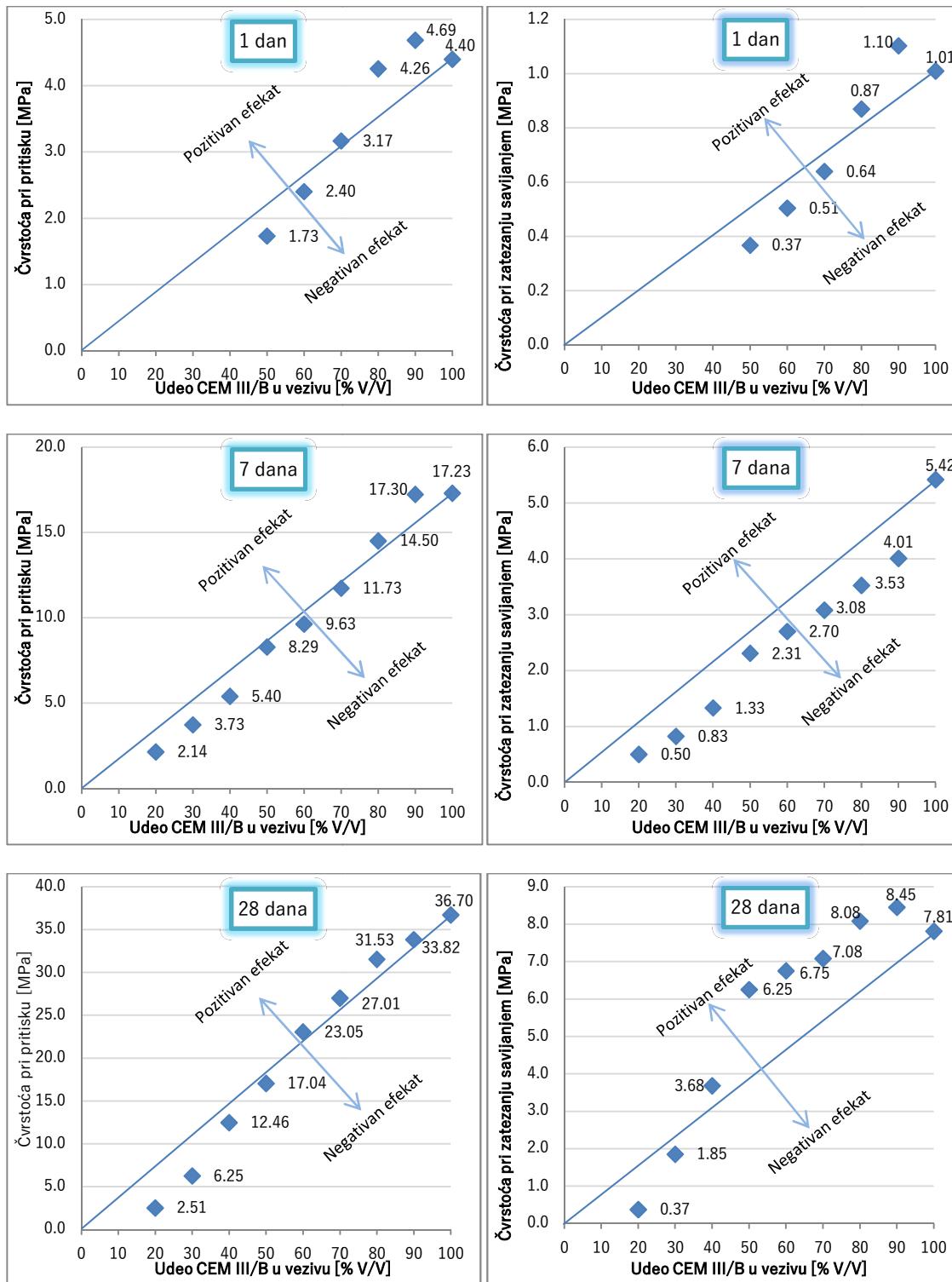
#### 4.2.2.9 ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 15 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.52. Upoređujući sa rezultatima otpadnog pepela iz TE Morava pre mlevenja (Slika 4.33), nakon 15 minuta mehaničke aktivacije, kod ove modifikacije pepela je takođe primetan efekat punioca. Pri zameni pepela sa CEM III/B do 40% V/V zapreminske mase su veće u odnosu na računske vrednosti. Konzistencija svežih mešavina je do 10 % V/V zamene sa pepelom bila povoljnija od referentne. Na Slici 4.52 je veoma indikativna i promena zapreminske mase između početne vrednosti i one merene nakon 7. Ta razlika je ista pri količinama pepela 0-20% V/V, što znači da je postignuta kompaktnost ista za sve 3 mešavine. Uočljivo je kako dalje ta vrednost raste do 50 % V/V pepela, posle koje ta razlika ostaje ista do 80 % V/V. Pri 80 %V/V pepela vrednost zapreminske mase nakon 28 dana je manja od vrednosti merene nakon 7 dana. Najverovatnije usled ispiranja veziva pri nedovoljnoj kompaktnosti.



Slika 4.52 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava nakon 15 minuta mlevenja

Rezultati ispitivanja čvrstoće uzorka sa vezivom, gde je CEM III/B zamenjen sa otpadnim pepelom iz TE Morava 15 su prikazani na Slici 4.53, a vrednosti dati su u Prilogu 4-12 zajedno sa rezultatima ispitivanja zapremske mase i recepturama mešavina.

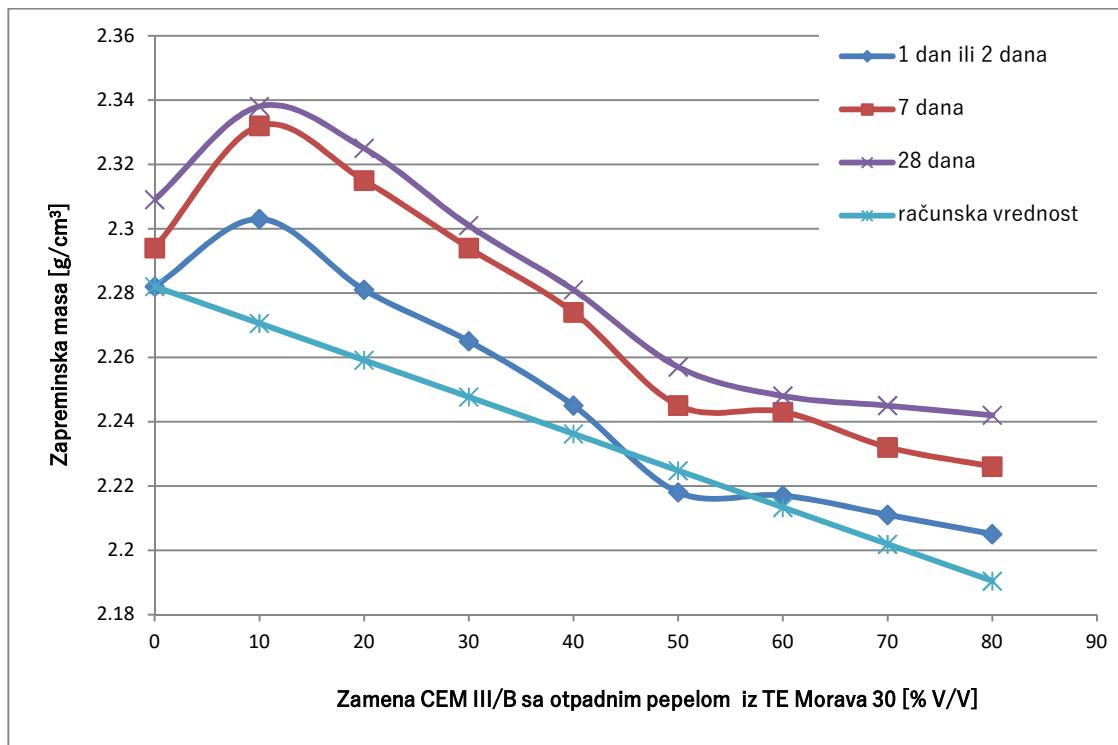


Slika 4.53. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 15, na čvrstoću maltera

Upoređujući sa druge dve vrste preprađenog pepela pri istom trajanju mlevenja, kod ovog pepela je pozitivan efekat na mehaničke osobine najizraženiji. Već nakon 15 minuta mlevenja, zamena CEM III/B sa pepelom do 20 % V/V ima pozitivan efekat na jednodnevne čvrstoće i pri pritisku i pri zatezanju. Ta razlika u odnosu na druge dve vrste pepela je pored drugih razlika posledica pre svega morfološke razlike samih čestica pepela i hemijske inertnosti usled značajne razlike u starosti. Pri kratkotrajnom mlevenju veće cenosfere, pogotovo otvorene su se izdrobile, pa je upijanje pepela drastično smanjeno. Takođe, plezosfere su se otvorile, oslobođajući značajno manje cenosfere u mešavinu, koje su povećale ugradljivost. Nakon 15 minuta mlevenja finoća pepela i CEM III/B je slični, ali po obliku zrna velika je razlika. CEM III/B ima uglaste, šiljaste čestice, dok je su u pepelu tada su još zastupljene manje čestice pravilnog loptastog oblika, što povoljno utiče na ugradljivost. Interesantno je da nakon 7 dana u odnosu na referentnu mešavinu, taj pozitivan efekat nije primetan. Dakle ne radi se još o pojavi efekta filera, nego je samo upijanje pepela eliminisano. Može se konstatovati i pozitivan efekat na 28-dnevne čvrstoće i pri pritisku i pri zatezanju savijanjem. Upoređujući sa rezultatima aktivacije letećeg pepela iz TENT B, sličan je efekat mlevenja tog pepela nakon 60 minuta.

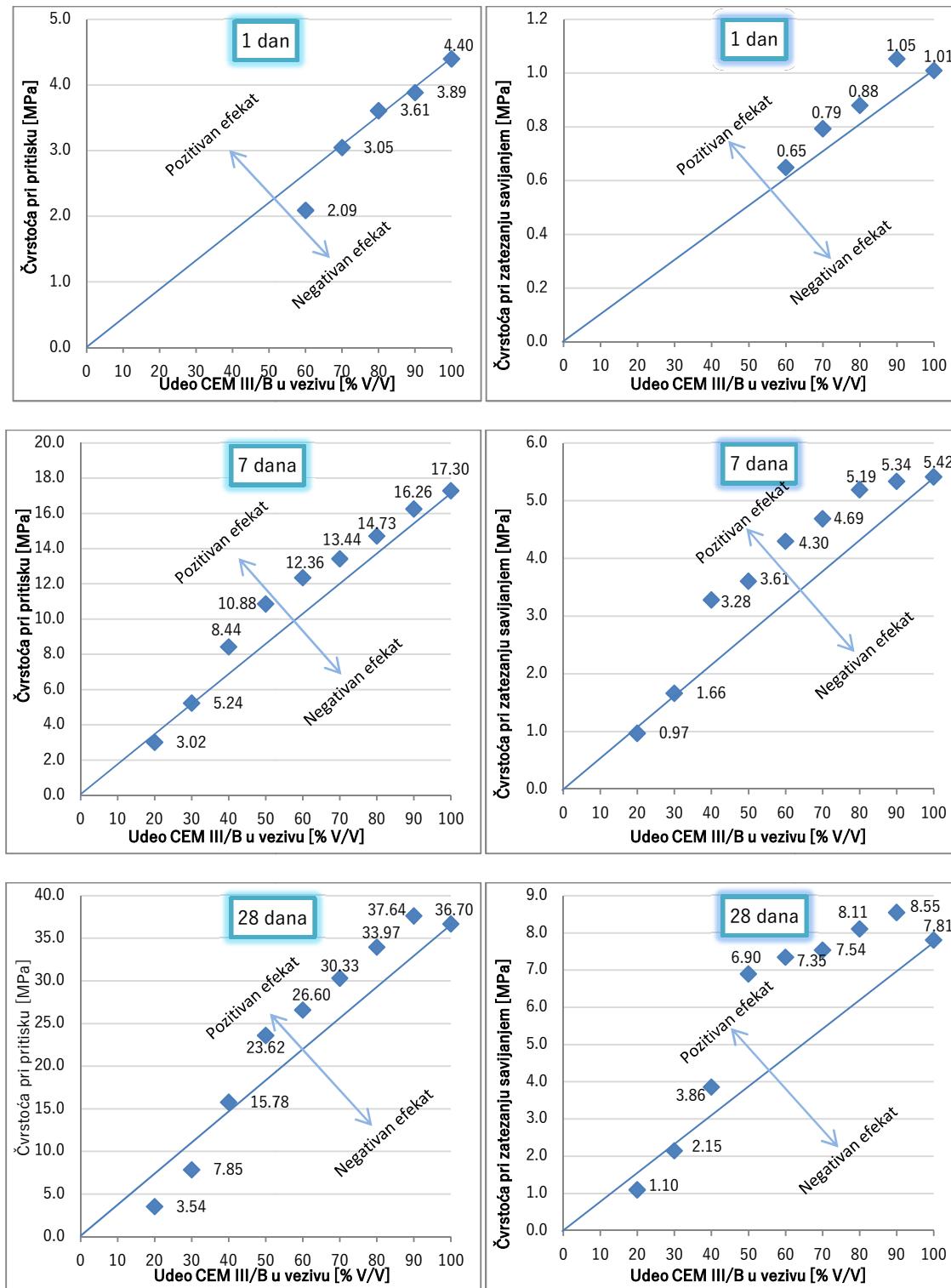
#### 4.2.2.10 ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 30 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.54.



Slika 4.54 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava, nakon 30 minuta mlevenja

Rezultati ispitivanja čvrstoće su prikazani na Slici 4.55 i sa rezultatima zapreminske mase uticaja zamene sa otpadnim pepelom iz TE Morava 30, a vrednosti dati su u Prilogu 4-13, zajedno sa recepturama mešavina.

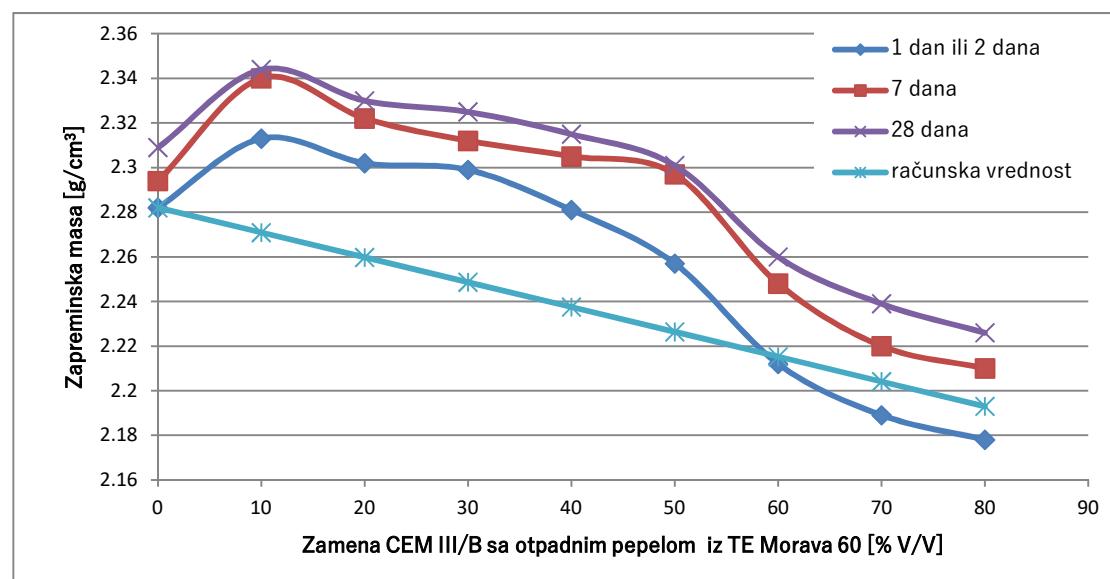


Slika 4.55. Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 30 na čvrstoću maltera

Posmatrajući rezultate zapreminske mase na Slici 4.54 može se zaključiti da je došlo do daljeg rasta ugradljivosti i da je jedino pri 50 % V/V zamene sa pepelom zapreminska masa uzoraka manja od računske, pošto pri predmetnoj finoći sa tom količinom pepela nije bilo moguće postići istomerno pakovanje zrna, kao pri drugim %. Jednodnevne čvrstoće na Slici 4.55 nemaju pozitivan rast kao pri prethodnoj finoći. Ali je primetan rast 7-dnevne i 28-dnevne čvrstoće i pri pritisku i pri zatezaju savijanjem u odnosu na liniju proporcionalnosti. Što je posledica mnogo boljeg kompaktiranja, ali kao posledica poboljšanja pakovanja zrna, a ne značajne promene finoće ili značajnijeg efekta filera.

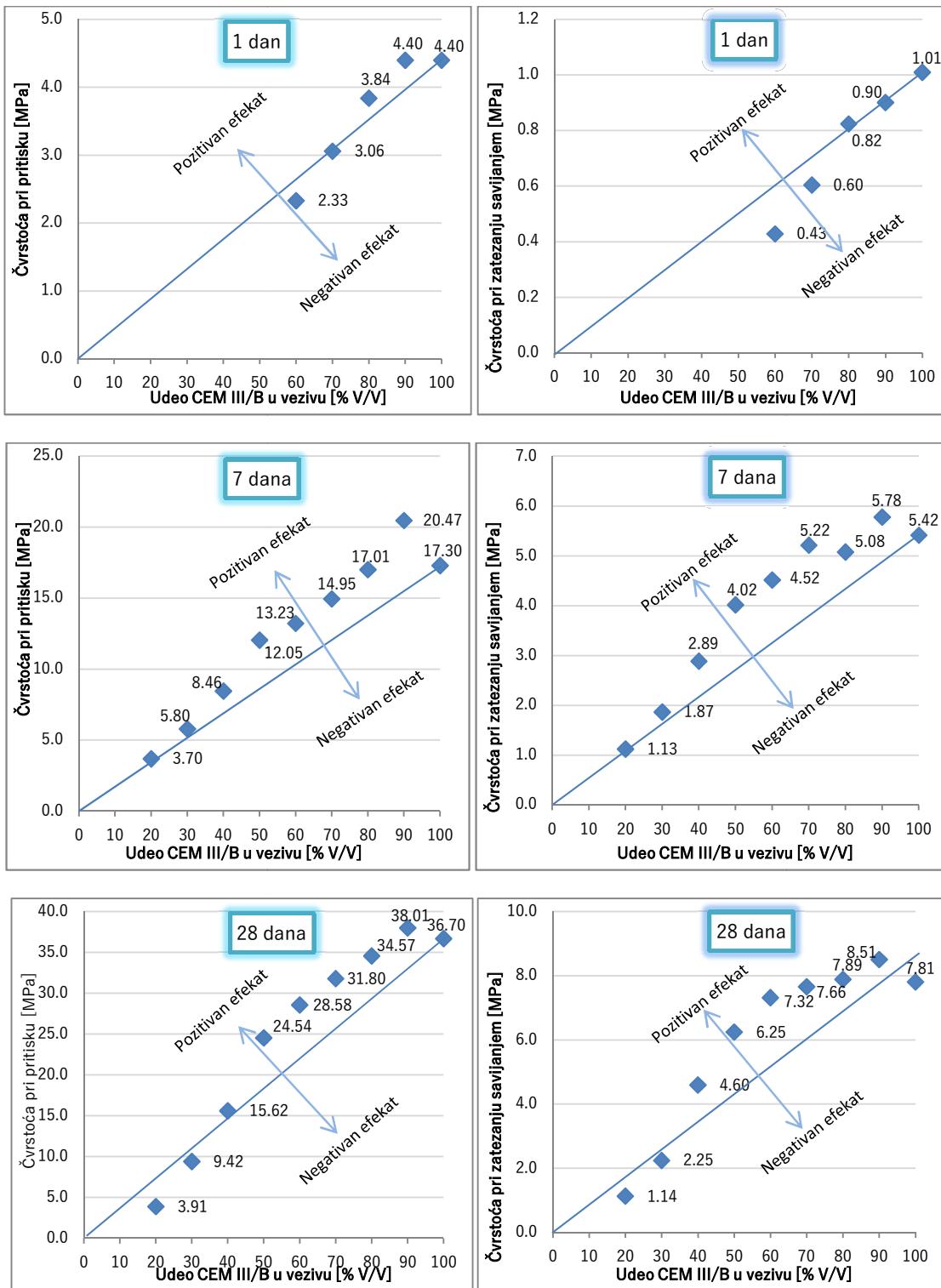
#### 4.2.2.11 ZAMENA CEM III/B SA OP IZ TE MORAVA NAKON 60 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase su prikazani na Slici 4.56



Slika 4.56 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava, nakon 60 minuta mlevenja

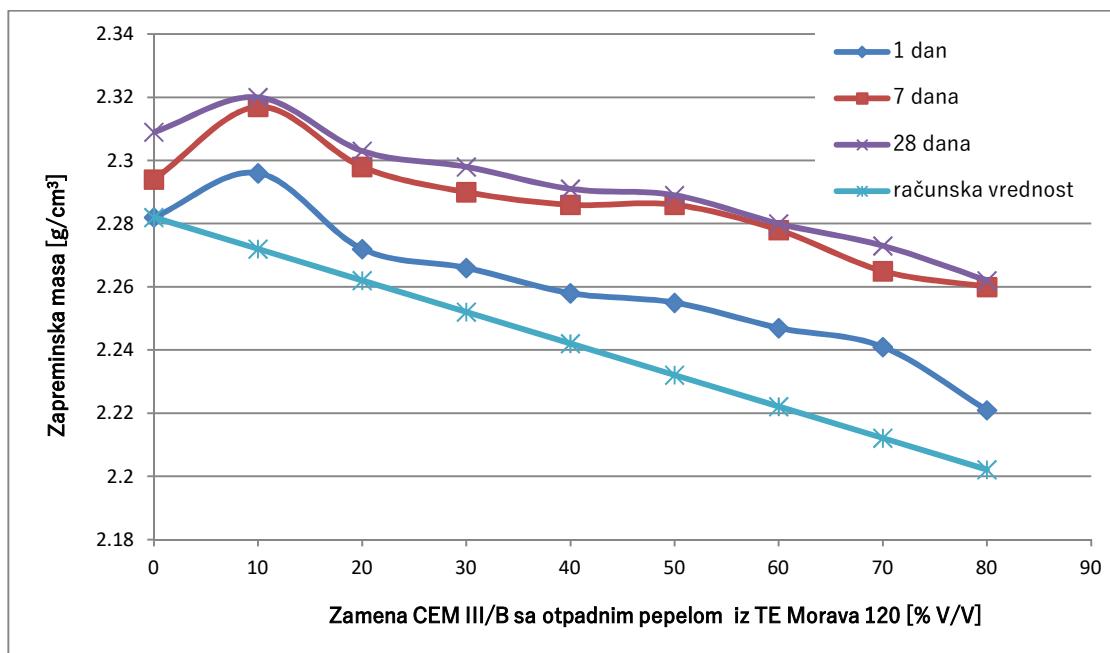
Na Slici 4.56 je primetno značajno povećanje zbijenosti mešavina do 50 % V/V zamene sa pepelom. Rezultati čvrstoće na Slici 4.57 takođe pokazuju dalji rast pri svim starostima. Uočljiv je i efekat filera, pošto su pored konzistencije svežeg maltera i jednodnevne i sedmodnevne čvrstoće iznad linije proporcionalnosti.



Slika 4.57 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 60 na čvrstoću maltera

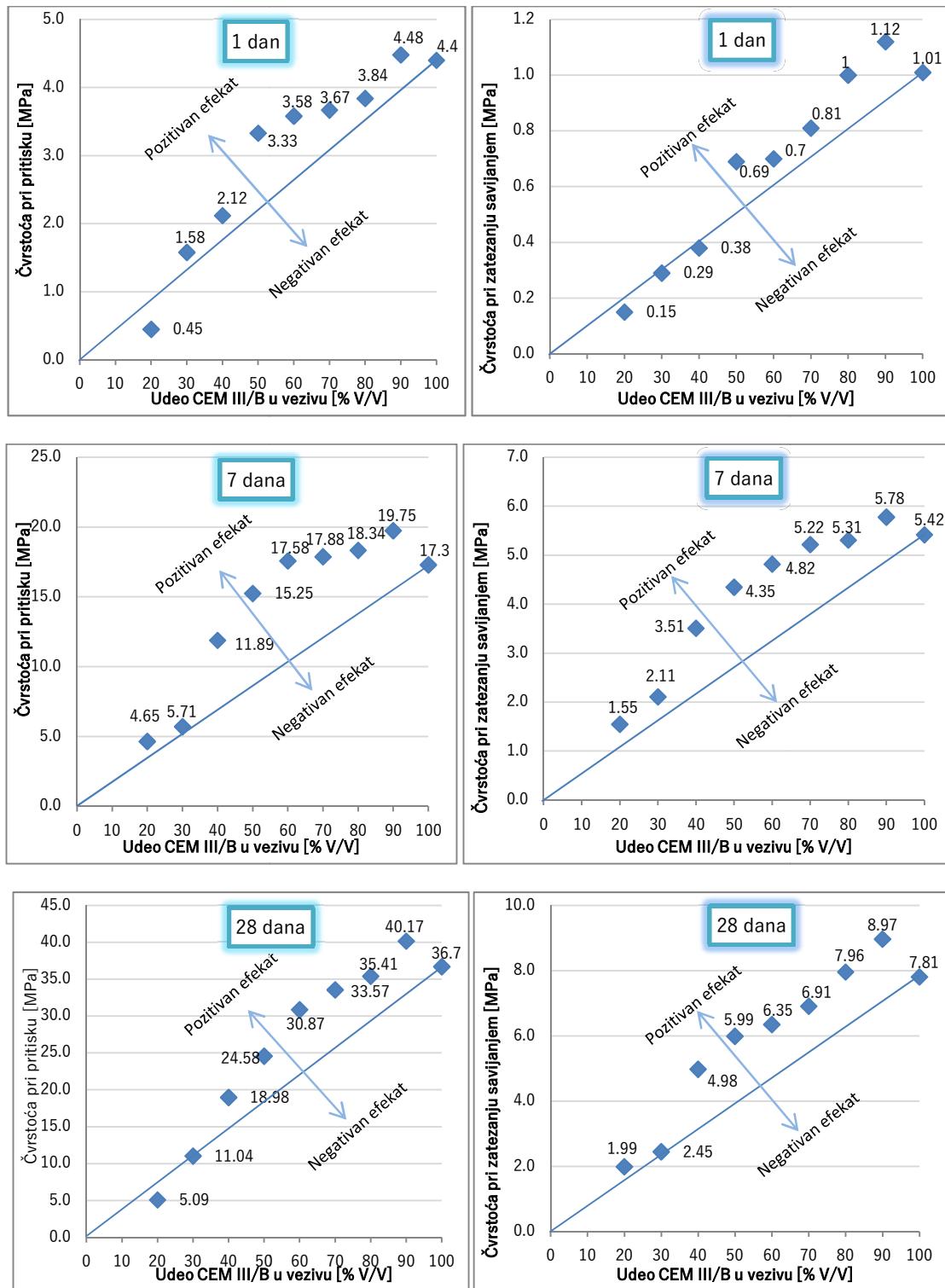
#### 4.2.2.12 ZAMENA CEM III/B SA OP TE MORAVA NAKON 120 MINUTA MLEVENJA

Rezultati zapreminske mase su prikazani na Slici 4.58. Mešavina sa zamenom pepela do 30 % V/V su imali primetno bolju konzistenciju od referentnog maltera. „Višak vode“ u mešavini je i razlog zašto su zapreminske mase ovih uzoraka niže do 50 % V/V upoređujući sa rezultatima sa pepelom TE Morava 60.



Slika 4.58 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava, nakon 120 minuta mlevenja

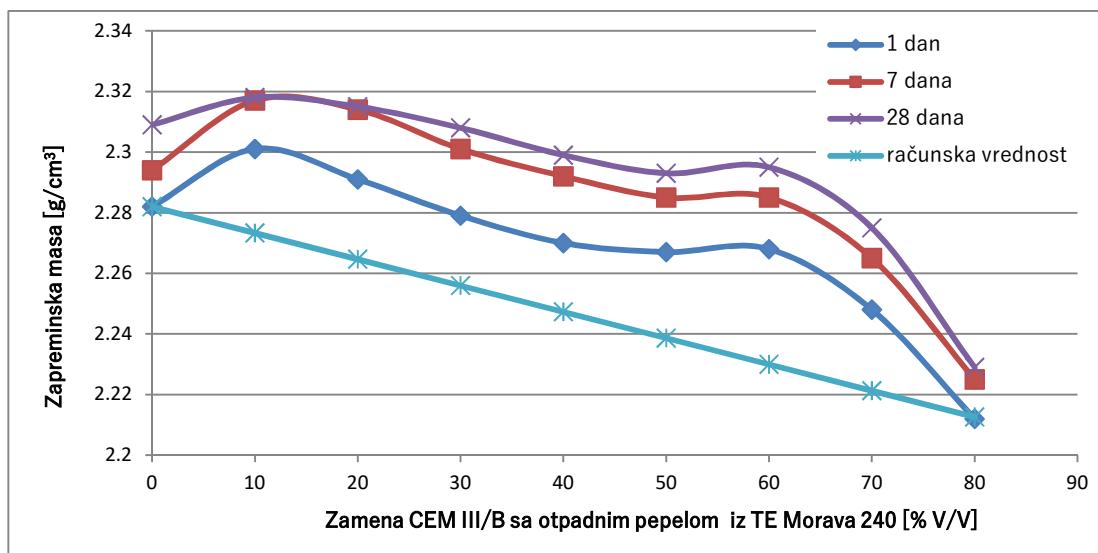
Iz istog razloga povećale su se i razlike između zapreminske mase nakon 1 i 7 dana usled upijanja vode. Rezultati jednodnevne čvrstoće pri pritisku na Slici 4.59 potvrđuju isto, pošto su najveći pozitivni efekti pri zamenama pepela od 30% do 50% V/V, a ne od 10-20 % V/V, što bi bilo logično da je uzrok samo povećana finoća. Rezultati svih čvrstoća sa OPTE Morava nakon 120 minuta mehaničke aktivacije su dati u Prilogu 4-15 sa vrednostima zapreminske mase i recepturama mešavina. Čvrstoće pri pritisku nakon 7 dana su veće od absolutne vrednosti referentnog maltera do 40% V/V zamene, ali nakon 28 dana jedino je mešavina sa 10 % V/V imala veću čvrstoću, jer se radi o hemijski inertnom pepelu.



Slika 4.59. Uticaj supsticije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 120, na čvrstoću maltera

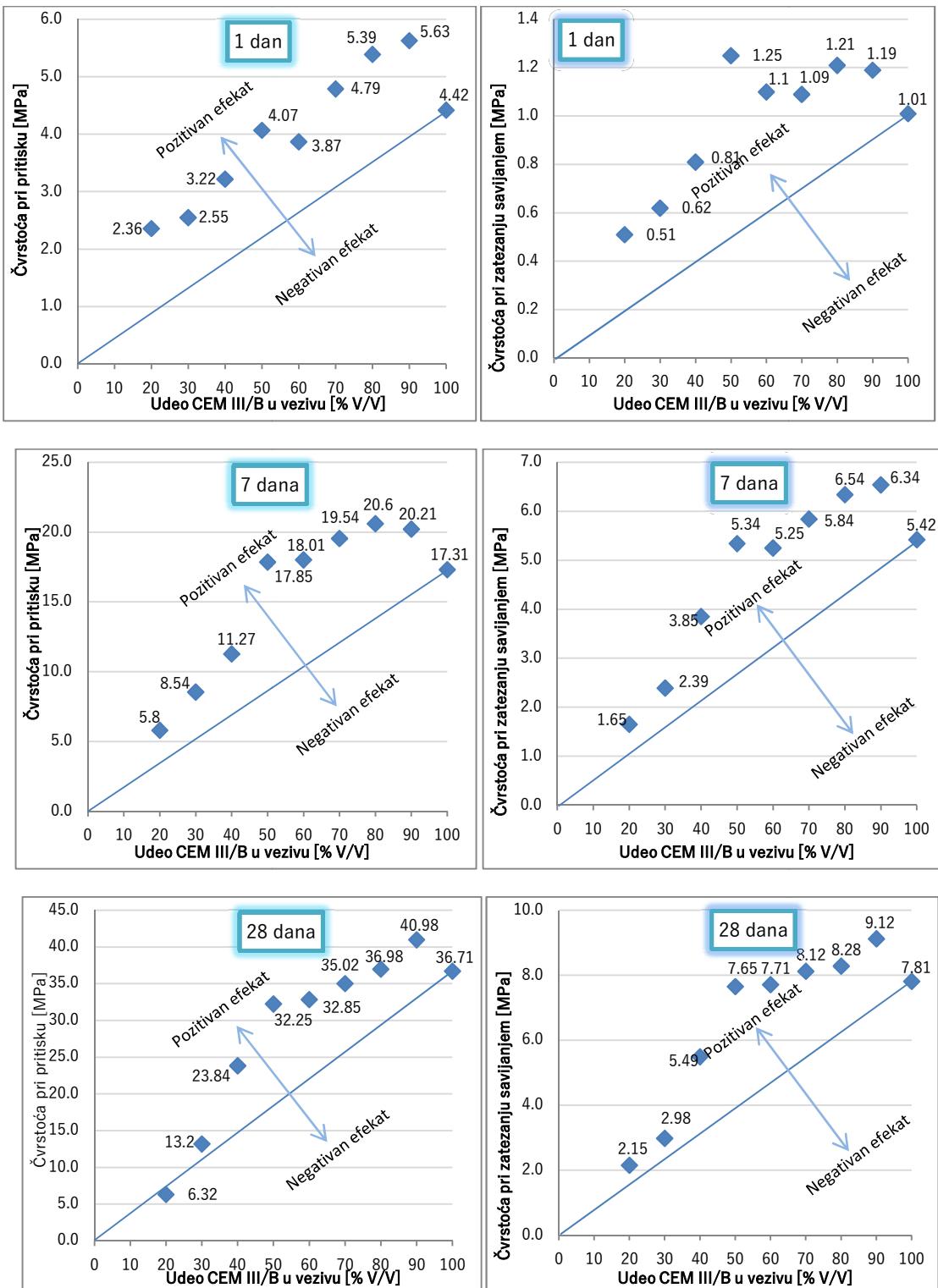
#### 4.2.2.13 ZAMENA CEM III/B SA OPTE MORAVA NAKON 240 MINUTA MLEVENJA

Rezultati ispitivanja zapreminske mase pri zameni CEM III/B sa otpadnim pepelom iz TE Morava od 0-80 % V/V su prikazani na Slici 4.60. Sa ovom vrstom prerađenog pepela je postignuta najbolja zbijenost pri svim procentima zamene. Pored toga treba napomenuti da je konzistencija svežeg maltera bila plastičnija od referentnog maltera do 50 % V/V zamene. Najveći priraštaj u odnosu na računske vrednosti zapreminske mase je zabeležen pri 60% V/V što pokazuje da je imao povoljan uticaj na ugradljivost i kompaktnost čak i pri većim udelom u mešavini od cementa.



Slika 4.60 Grafički prikaz efekta supstitucije CEM III/B sa otpadnim pepelom od 0 do 80% V/V iz TE Morava, nakon 240 minuta mlevenja

Rezultati ispitivanja čvrstoće su prikazani na Slici 4.61 i sa rezultatima zapreminske mase uticaja zamene sa otpadnim pepelom iz TE Morava 240, a vrednosti dati su u Prilogu 4-16, zajedno sa recepturama mešavina. Kao što se Slici 4.61 može videti zamena samlevenog pepela sa pepelišta TE Morava je imao izuzetan efekat na jednodnevne čvrstoće. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem je pri 50% V/V pepela povećana čak 25% u odnosu na referentnog maltera. To je posledica superponiranja 2 uticaja: povećane zbijenosti i efekta filera. Čak i jednodnevne čvrstoće pri pritisku su veće do 30 % V/V zamene od absolutne vrednosti referentnog maltera.



Slika 4.61 Uticaj supstitucije CEM III/B, sa otpadnim pepelom TE Morava 240, na čvrstoću maltera

Skoro svi rezultati (sem 28-dnevne pritisne čvrstoće pri 80% V/V zamene) su pokazali pozitivan efekat zamene što je bilo najbolji rezultat u ovom delu eksperimenta. Pri čemu je najveći pozitivan efekat postignut, u odnosu na proporcionalne vrednosti zamene, pri 50 % V/V zamene - 75% veća čvrstoća pri pritisku. Važno je naglasiti da očigledan pad čvrstoće pri većim količinama zamene su posledica toga da se CEM III/B u mešavini smanjuje za više od 50%.

#### 4.2.3. ANALIZA UTICAJA ZAMENE CEM III/B SA PREDMETNIM PEPELIMA I ZAKLJUČAK

Ispitivanja zamene CEM III/B sa mehanički aktiviranim predmetnim pepelima u dijapazonu 0-80 % V/V su pokazala da je reč o kombinaciji veoma kompleksnih uticaja. Mlevenjem pepela iz TE se smanjuje upijanje vode čestica pepela, povećava se specifična površina i gustina čestica, utiče se na pakovanje zrna u mešavini i na efekat filera.

##### UPIJANJE PEPELA

Upijanje pepela je najveća u izvornom stanju, posle toga mlevenjem se pore otvaraju, pa upijanje samog pepela, koji smanjuje efektivni vodo-vezivni faktor u mešavini, se smanjuje. Značaj upijanja vode agregata je veoma značajan, imajući u vidu da su pepeli u izvornom obliku imali manju finoću od cementa, ali njihovom zamenom ipak je opala konzistencija kod prvih mešavina u delu 4.2.1.

##### FINOĆA PEPELA

Samo povećanje specifične površine pepela usled mlevenja je takođe veoma bitan faktor koji utiče na ugradljivost sveže mešavine i rastom finoće pepela povećava se i potreban vodo-vezivni faktor da bi se održala konzistencija.

##### PAKOVANJE ZRNA U MEŠAVINI

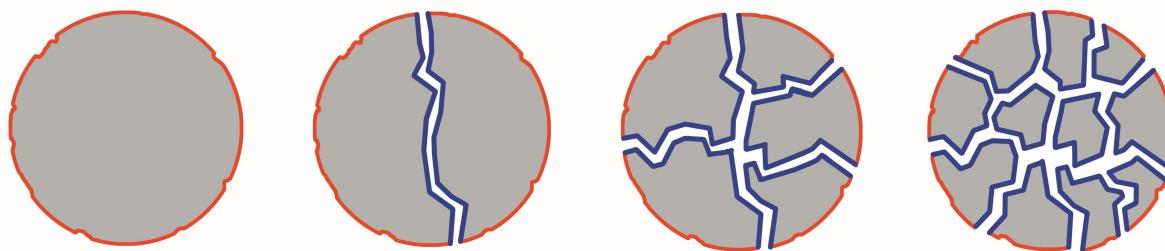
Usled mlevenja čestice pepela se smanjuju i ta promena svakako utiče na pakovanje zrna u mešavini. Na SEM snimcima međutim može se uočiti da usled morfološke razlike u pepelima iz TE Morava i TENT B mlevenje rezultira različitim promenama. Veličina pepela iz TENT B se smanjuje mnogo brže, tj. promena finoće je mnogo efikasnija, nego kod pepela iz TE Morava. Međutim različita je i granulacija pepela posle mlevenja. Dok je pepeo iz TENT B jednolične granulacije posle mlevenja, pepeo iz TE Morava je povoljnije granulacije. Na SEM snimku pepela iz TE Morava može se videti da i nakon 4 sati mlevenja uočljive su krupne cenofsere i generalno granulacija je veoma raznolika i nakon mlevenja, što je

povoljnije uticalo na pakovanje zrna u mešavini pri većim % zamene cementa sa pepelom (npr. kod pepela TE Morava 240 pri 50% V/V zamene).

Upoređenjem dobijenih zapreminskih masa ternarnih mešavina sa LP TENTB240 i OPTE Morava240, imajući u vidu da su čestice ovih pepela iste gustine, može se uočiti da se sa OPTE Morava240 dobija kompaktnije struktura maltera.

#### „AKTIVIRANJE“ EFEKTA FILERA

Na osnovu rendgenske difrakcione analize strukture pepela iz TENT B i njene promene pri mlevenju je jasno uočljiv rast intenziteta kristala kvarca do 240 minuta mlevenja. Ta tendencija se slaže i sa promenom ugradljivosti, tj. promenom potrebne količine vode za ugradnju standardne mešavine maltera sa pepelom. Pri mlevenju/tj. razaranju čestice pepela nastaju izlomljeni delovi na čijem omotaču se smanjuje udeo prvenstvenog vanjskog omotača i povećava se površina koja je do tada bila u unutrašnjosti čestice (Slika 4.62).



Slika 4.62 Grafička ilustracija “aktiviranja” efekta filera (— hemijski aktivnija površina  
pepela iz TE, — hemijski inertnija površina (novootkrivena usled mlevenja)

Kao što je u [43] dokazano vanjska površina čestica pepela je hemijski aktivnija, pošto je bila izložena višoj temperaturi, u dužem trajanju i na otvorenom, dok je unutrašnji deo letećeg pepela hemijski inertniji. Na povećanje efekta filera, kao što su Soroka i Seter (Soroka i Setter) 1977. godine potvrdili, utiče i količina i finoća

INERTNOG (koji nema ni hidraulična, ni pucolanska svojstva) filera u mešavini [155]. Na osnovu toga se može zaključiti da je pozitivan efekat na povećanje čvrstoća uzoraka pri određenom procentu zamene CEM III/B sa pepelom rezultat efekta filera i zapravo je ubrzanje procesa hidratacije. Taj efekat se najbolje može posmatrati na primeru letećeg pepela iz TENT B iz više razloga. Prvo, gradacija tog pepela po svim finoćama jednolična, pa nema promena u uticaju (pri različitom trajanju mlevenja) na pakovanje zrna u mešavini. Drugo, reč je o svežem letećem pepelu, dakle hemijski aktivnijem od druge dve vrste. Treće, tendencija promene ugradljivosti svežeg maltera se slaže sa promenom tendencije rasta kristalne faze kvarca (deo 4.1.4) i sa priraštajem jednodnevne čvrstoće – sve imaju maksimalnu vrednost pri trajanju mlevenja pepela od 240 minuta. Mehanička aktivacija pepela je dakle više aktiviranje uloge filera u mešavini nego aktivacija pucolanskih svojstava.

#### 4.2.4. UTICAJ ZAMENE DELA AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM

U naučnoj literaturi leteći pepeo je pretežno predmet ispitivanja mogućnosti zamene cementa. Međutim, imajući u vidu da je leteći pepeo dostupan u ogromnim količinama i trenutna proizvodnja je još uvek nadmašuje kapacitete iskorišćenosti na globalnom nivou, postoje i primeri da se leteći pepeo koristi i u svojstvu agregata. Postoji i drugi opravdan razlog za takvu vrstu primene: to je finoća letećeg pepela. U nekim slučajevima (kao što su bili i predmetni pepeli), finoća pepela iz TE, je isuviše krupna u poređenju sa cementom, više odgovara sitnoj frakciji agregata. S jedne strane niska cena pepela iz TE, s druge strane situacije kada adekvatan agregat nije dostupan ili je skup mogu opravdati da se leteći pepeo, a pogotovo deponovani pepeo sa pepelišta (zajedno sa šljakom) koriste u svojstvu sitnog agregata, zamenjujući delimično ili čak u potpunosti.

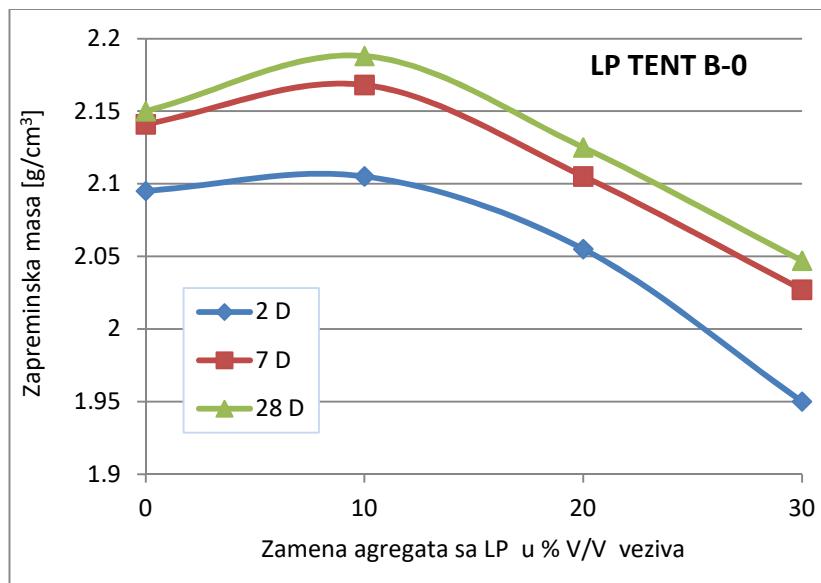
Na osnovu rezultata sa prerađenim pepelima (deo 4.2.2) može se videti da postoji značajan pad u mehaničkim parametrima kada u mešavini udeo CEM III/B zameni sa više od 50 % V/V. To je i razumljivo, imajući u vidu da je već i pri toj mešavini udeo cementnog klinkera izuzetno nizak (cca. 13%). U prethodnom delu rezultati su pokazali takođe, da pri većim finoćama pepela (dužem trajanju mehaničke aktivacije) upravo zapreminska odnos 50%-50% u vezivu daje najveći doprinos tj. pozitivan efekat.

Na osnovu prethodno navedenih razloga, istraživanjem je obuhvaćena i mogućnost da se pored zamene cementa u vezivu, dodatno zameni i deo agregata (rečnog peska) sa letećim pepelom. Za taj opit je izabran samo sveži leteći pepeo iz TENT B, pošto se druge dve vrste mogu smatrati inertnima u hemijskom pogledu. Kao što je već pre navedeno, sa letećim pepelom su urađeni opiti nakon 0, 15, 60, 120 i 240 minuta mlevenja. Pored mešavina sa CEM/B – LP TENT 50%-50% V/V u vezivu (čiji rezultati su već navedeni u delu 4.2.2.1) napravljene su još 3 sa dodatkom LP u količinama 10, 20 i 30% V/V veziva. Dakle u tim mešavinama je sa 10, 20 i 30%

povećana zapremina veziva sa dodatim pepelom, pri istomernom smanjenju zapremine agregata.

#### 4.2.3.1 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B

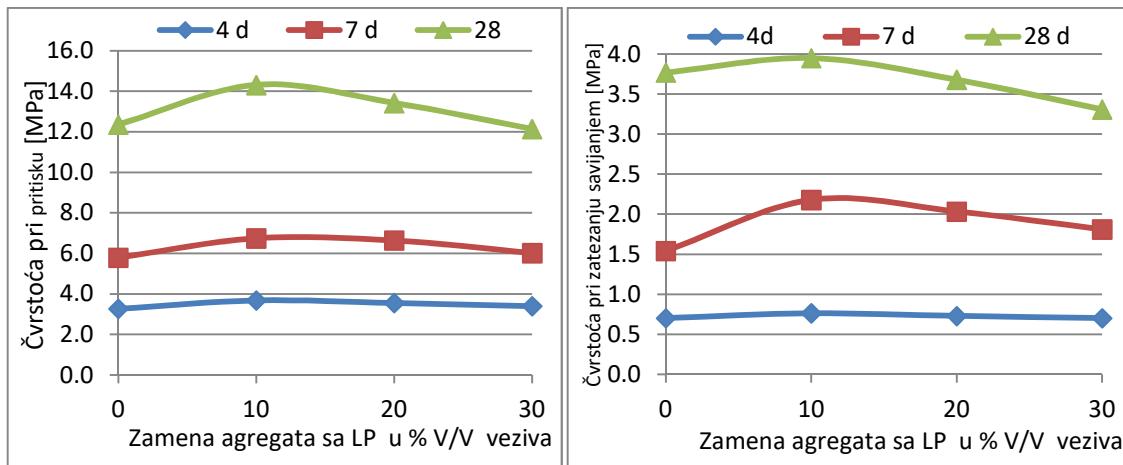
Rezultati ispitivanja zapreminske mase uzorka, gde je 50 % V/V CEMIII/B i deo agregata (izraženo u 0-30 % V/V veziva) zamjenjeno sa LP TENT u izvornom obliku, prikazani su na Slici 4.63. Važno je primetiti da se dodavanjem LP TENT B u izvornom obliku povećavaju priraštaji zapreminske mase nakon 7 i 28 dana. To svakako pokazuje da dodatne količine pepela u očvrsłom malteru će značiti i veće upijanje. Povećanje zapremine veziva sa pepelom za 10 % V/V ima pozitivan efekat na povećanje zbijenosti, dok veće količine zamene agregata sa pepelom izazivaju suprotak efekat.



Slika 4.63 Grafički prikaz zamene dela agregata u mešavini sa LP TENT B bez mlevenja

Rezultati ispitivanja čvrstoće uzorka sa zamenom dela agregata sa letećim pepelom iz TENT bez mlevenja su prikazani na Slici 4.64, a vrednosti dati su u

Prilogu 4-17 zajedno sa rezultatima ispitivanja zapreminske mase i recepturama mešavina.

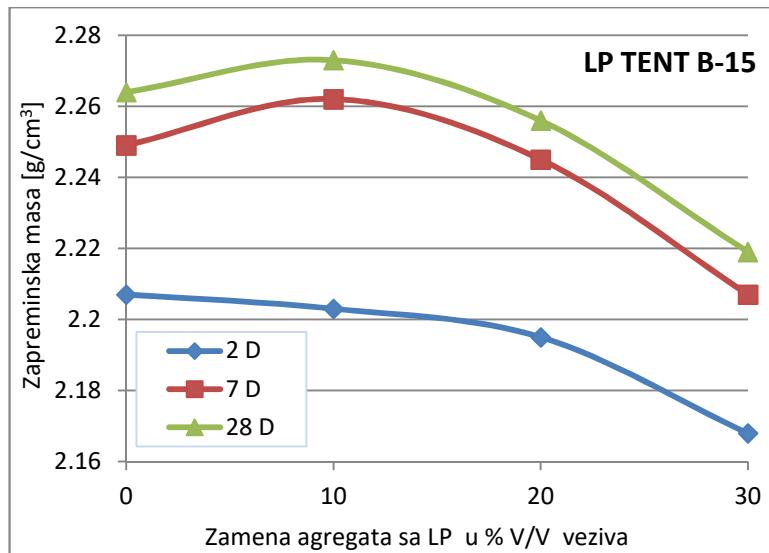


Slika 4.64 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT B bez mlevenja, na čvrstoću maltera

Pri dodavanju 10 %V/V pepela primetan je pozitivan efekat i na mehaničke osobine pri svim starostima. Veće količine pepela imaju pozitivan doprinos samo ranijim čvrstoćama pri pritisku i pri zatezanju.

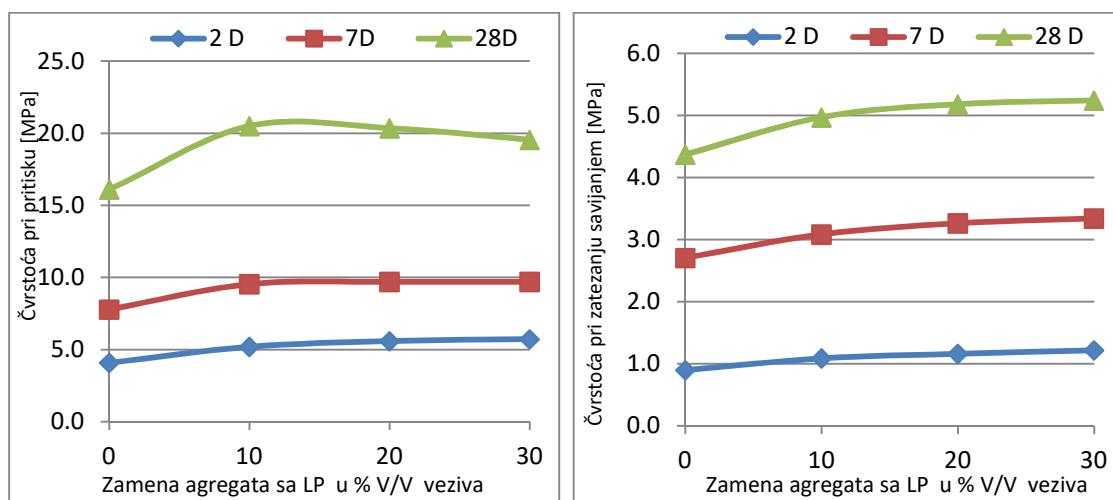
#### 4.2.3.2 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B-15

Rezultati ispitivanja zapreminske mase uzorka, gde je 50 % V/V CEMIII/B i deo agregata (izraženo u 0-30 % V/V veziva) zamjenjeno sa LP TENT nakon 15 minuta mlevenja, prikazani su na Slici 4.65. Kako je gustina pepela nakon 15 minuta mlevenja cca 20% manja od agregata, i u ovom slučaju se mogu konstatovati isti zaključci kao i u prethodnom slučaju i što se zbijenosti i što se upijanja tiče.



Slika 4.65 Grafički prikaz delimične zamene CEM III/B i agregata u mešavini sa LPTENT B15

Rezultati ispitivanja čvrstoće uzorka sa vezivom, gde je CEM III/B zamenjen sa letećim pepelom iz TENT nakon 15 minuta mlevenja su prikazani na Slici 4.66, a vrednosti dati su u Prilogu 4-18 zajedno sa rezultatima ispitivanja zapreminske mase i recepturama.

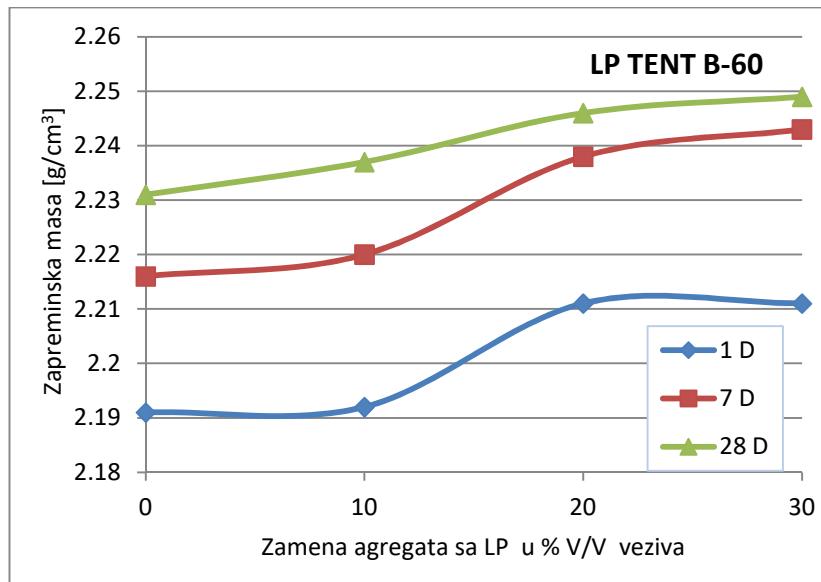


Slika 4.66 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-15, na čvrstoću maltera

Posmatrajući rezultate čvrstoće pri zatezanju savijanjem može se zaključiti da zamena dela agregata sa LP TENT B-15 ima pozitivan efekat i tendenciju rasta sa procentom povećanja zamene. Povećanje čvrstoće pri zatezanju sa savijanjem od cca. 20% se može smatrati značajnim, pogotovo što je praćena sa istovremenim povećanjem čvrstoće pri pritisku. Za čvrstoću pri pritisku je optimalna zamena agregata sa 10 % V/V, i rezultat je očiglednog doprinosa pucolanskih svojstava ovog pepela. Pri većim količinama zamene agregata, mala čvrstoća pepela je prepreka za dalji rast čvrstoće pri pritisku.

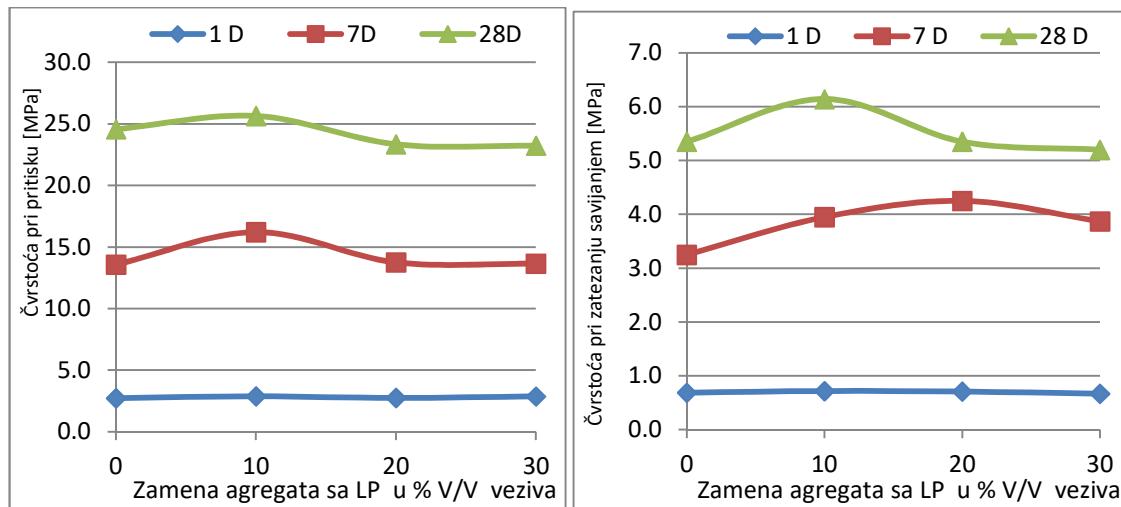
#### 4.2.3.3 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B-60

Rezultati ispitivanja zapreminske mase uzorka, gde je 50 % V/V CEMIII/B i deo agregata (izraženo u 0-30 % V/V veziva) zamjenjeno sa LP TENT B-60, prikazani su na Slici 4.67. LP nakon 60 minuta mlevenja ima već značajno povećanu finoću što ima povoljan uticaj na povećanje zbijenosti maltera. Zapreminska mase se povećava sa % zamene agregata sa pepelom, što važna promena imajući u vidu da je i ovaj pepeo lakši od agregata. Pri ugradnji, konzistencija se nije drastično menjala povećanjem količine pepela, pa je ugradljivost bila slična. Jedino povećanje promene zapremine nakon 7 dana ukazuje da 30% V/V zamene uzrokuje veću poroznost i stoga i veće upijanje.



Slika 4.67 Grafički prikaz delimične zamene CEM III/B i agregata u mešavini sa L TENT B60

Rezultati ispitivanja čvrstoće uzorka sa vezivom, gde je CEM III/B zamenjen sa letećim pepelom TENT B-60 su prikazani na Slici 4.68, a vrednosti dati su u Prilogu 4-19 zajedno sa rezultatima ispitivanja zapremske mase i recepturama.



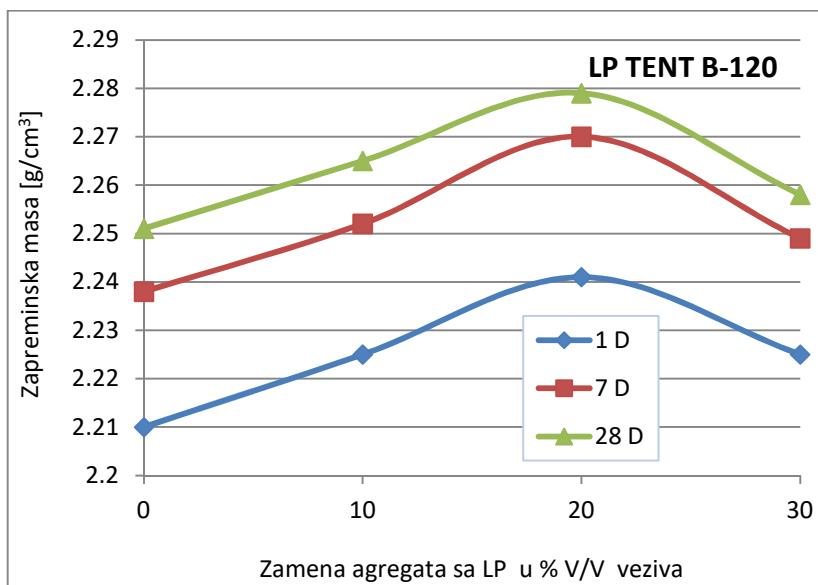
Slika 4.68 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT bez mlevenja, na čvrstoću maltera

Kao što se na grafičkom prikazu može videti rane čvrstoće pri zatezanju savijanjem se povećavaju i pri 20 i 30 % V/V, ali samo usled efekta filera. Zbog male količine

cementa, samo pri 10% V/V zamene agregata sa letećim pepelom je došlo do povećanja 28-dnevne čvrstoće usled aktiviranja pucolana u pepelu. Analizirajući rezultate čvrstoće pri pritisku takođe se može zaključiti da je pozivan efekat zabeležen samo pri povećanju veziva sa 10% V/V letećeg pepela.

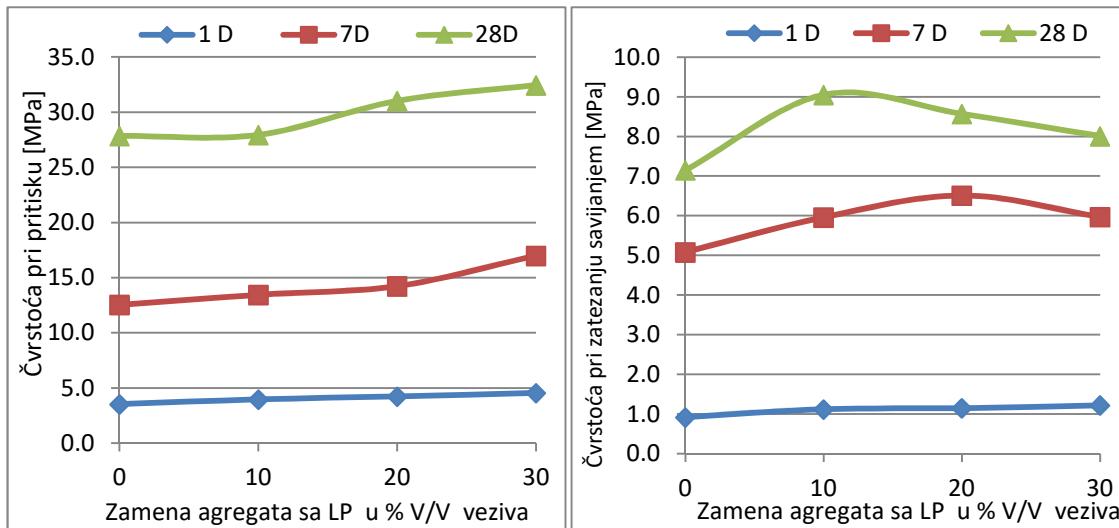
#### 4.2.3.3 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B-120

Rezultati ispitivanja zapreminske mase uzoraka, gde je 50 % V/V CEMIII/B i deo agregata (izraženo u 0-30 % V/V veziva) zamjenjeno sa LP TENT mlevenog 120 minuta, prikazani su na Slici 4.69. Zapreminska masa uzoraka sa 20%V/V zamene agregata sa pepelom je imala najveće povećanje usled značajno boljeg pakovanja zrna, pošto LP TENT B-120 je već značajno finiji od cementa. Pri 30% V/V zamene je već konzistencija svežeg maltera bila manje plastična, što se vidi i po rezultatima tih uzoraka, koji su postigli manju kompaktnost.



Slika 4.69 Grafički prikaz delimične zamene CEM III/B i agregata u mešavini sa LPTENT B120

Rezultati ispitivanja čvrstoće su prikazani na Slici 4.70, a vrednosti sa rezultatima zapreminske mase uticaja zamene sa letećim pepelom TENT B-120 dati su u Prilogu 4-20, zajedno sa recepturama mešavina.

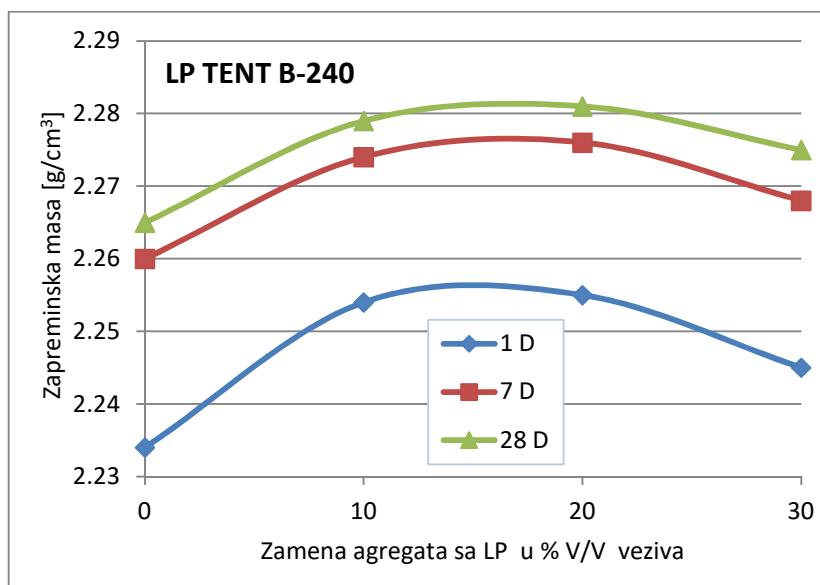


Slika 4.70 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-120, na čvrstoću maltera

Upotreboom ovog pepela je jedino postignut najznačajniji doprinos čvrstoći pri pritisku kod mešavine sa najviše pepela. Pošto ta tendencija nije praćena i kod čvrstoće pri zatezanju savijanjem, očigledno nije reč o značajnijoj aktivnosti pepela, nego se ta promena može objasniti daljim usitnjavanjem pepela. Naime, imajući u vidu poroznu strukturu ovog pepela, može se reći da se u očvrsloj strukturi maltera ponaša kao laki agregat, na taj način i porozne čestice pepela utiču na sličan način na čvrstoću: veća zrna imaju veći efekat na smanjenje pritisne čvrstoće, a smanjenjem samog zrna se smanjuje taj nepovoljan uticaj na čvrstoću samom kompozitu. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem nakon 28 dana je i u ovom slučaju je imala maksimalnu vrednost pri 10 % V/V zamene agregata sa pepelom.

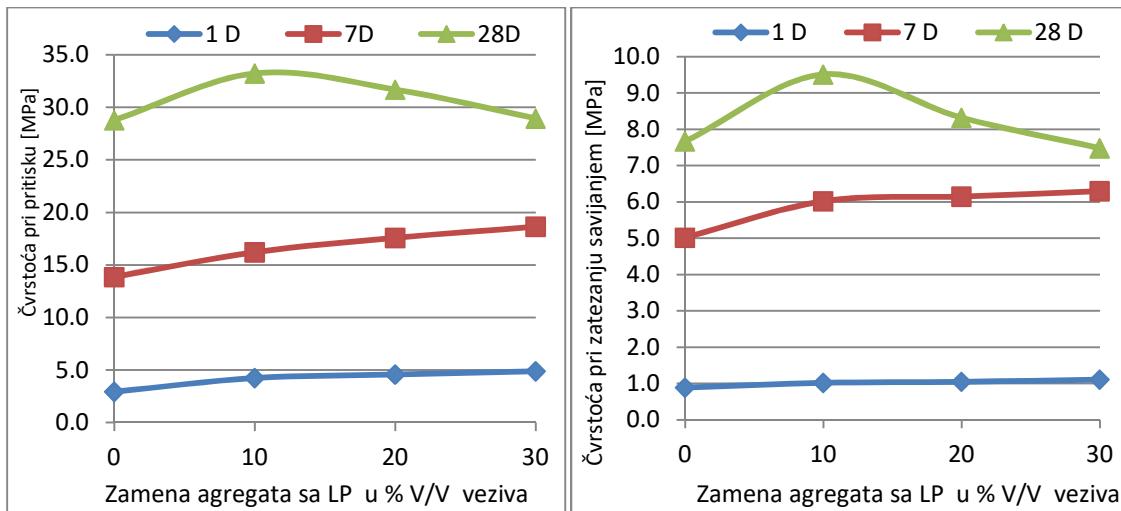
#### 4.2.3.3 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B-240

Rezultati ispitivanja zapreminske mase uzorka, gde je 50 % V/V CEMIII/B i deo agregata (izraženo u 0-30 % V/V veziva) zamjenjeno sa LP TENT mlevenog 240 minuta, prikazani su na Slici 4.71. Prilikom zamene sa ovim pepelom rezultati su pokazali da u sva tri slučaja dolazi do pozitivne promene u smislu povećanja kompaktnosti, ali najveća gustina uzorka je postignuta sa 10 i 20 % V/V zamene agregata.



Slika 4.71 Grafički prikaz delimične zamene CEM III/B i agregata u mešavini sa LP TENT B-240

Rezultati ispitivanja čvrstoće su prikazani na Slici 4.72, a vrednosti sa rezultatima zapreminske mase uticaja zamene sa letećim pepelom TENT B-240, dati su u Prilogu 4-21, zajedno sa recepturama mešavina.



Slika 4.72 Uticaj supstitucije agregata i CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-240, na čvrstoću maltera

Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 4.72 može se zaključiti da povećanje količine ovog pepela ima pozitivan uticaj na rane čvrstoće i pri pritisku i pri zatezanju savijanjem. To povećanje je skoro proporcionalno povećanju količini zamene sa pepelom. Imajući u vidu prethodno već data objašnjenja, ovde je najočigledniji primer ubrzanja hidratacije pojmom veće količine punioca u mešavini. Posmatrajući međutim 28-dnevne čvrstoće može se zaključiti da je pozitivan doprinos čvrstoćama usled povećanja količine pučolana postignut samo pri 10 %V/V dodatka pepela.

4.2.4.6 UTICAJ ZAMENE DELA AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM - ZAKLJUČAK:

Nakon ispitivanja uticaja dodatne poveća količine LP u mešavinama zamenom dela agregata može se zaključiti:

- pri svim finoćama LP, dodatna količina usled zamene dela agregata je imala pozitivan efekat,
- povećanje zapreminske mase, tj. povećanje kompaktnosti uzorka ne znači i nužno povećanje čvrstoće,
- pri svim finoćama, posmatrajući zajedno i rezultate čvrstoće pri zatezanju i pri pritisku nakon 28 dana, najbolji rezultat se postiže dodatnom zamenom agregata sa 10 % V/V pepela
- pri mehanički aktiviranim pepelima (TENT B-15, TENT B-60, TENT B-120, TENT B-240) sa 30% V/V povećenjem dobijaju se značajno bolje rane čvrstoće (pogotovo nakon 7 dana), dok su 28-dnevne čvrstoće veoma slične rezultatima bez promene agregata sa pepelo. Na taj način 7 dnevne čvrstoće pri pritisku se povećavaju i za 35%
- zamenom dela agregata sa LP bez mlevenja povećava se upijanje, ali korišćenjem mlevenog pepela se upijanje smanjuje

### 4.3 UTICAJ ZAMENE CEM III/B SA SVEŽIM LETEĆIM PEPELOM I OTPADNIM PEPELOM SA PEPELIŠTA PRI POVIŠENIM TEMPERATURAMA NEGE

#### 4.3.1. TERNARNI SISTEM VEZIVA NEGUVANI PRI "LETNJIM USLOVIMA -VANI" (PROSEČNA TEMPERATURA 25°C)

Cilj ispitivanja koja su izložena u ovom poglavlju, je bio da se istraži uticaj nege pri tkzv. kratkotrajnom dejstvu povišenih temperature na fizičko-mehaničke osobine sistema veziva C-Z-P. Ovaj deo ispitivanja se već oslanja na rezultate opsežnih istraživanja koja su navedena u delovima 4.1 i 4.2. S jedne strane urađena je već selekcija vrste pepele, vrste mehaničkog aktiviranja (u vidu trajanja mlevenja) i obima zamene pepela sa cementom. S druge strane ova istraživanja su već imala za cilj i ispitivanje mogućnosti primene. Na osnovu navedenih principa eksperimentalna ispitivanja su urađena pod sledećim uslovima:

- nega je bila pod realnim "letnjim uslovima"
- agregat koji je korišćen je standardni kvarcni pesak prema EN 196-1,
- zamena CEM III/B sa pepelom je izražena u % m/m
- svaka mešavina je imala istu konzistenciju
- ugradnja uzorka je bila pomoću vibro stola prema EN 196-1

Pri ispitivanju sa letećim pepelom iz TENT B, oslanjajući se na rezultate izložene u 4.2.2. i 4.2.3., spektar zamene CEM III/B sa pepelom je redukovao do 60 % m/m, pošto su u tom intervalu obuhvaće sve mešavine od značaja.

Izbor vrste LP iz TENT B u smislu trajanja mehaničke aktivacije je bio složeniji. Posmatrajući promenu finoće pepela i promenu intenziteta kvarca na rentgenskom difraktogramu uočljiv je "raskorak" u tendenciji. Rezultati sa mehanički aktiviranim LP TENT B, izloženi u 4.2.2.1-4.2.2.4, su dobijeni pri stalnim zapreminskim

odnosima veziva, vode i agregata, što je imalo za posledicu variranje u konzistenciji svežeg maltera. Stoga je odlučeno da se u ispitivanja pri stalnoj konzistenciji i istim uslovima ugradnje (pomoću vibro stola i jednakom trajanju ugradnje) uključe leteći pepeli TENT B-60, TENT B-120 i TENT B-240.

Kod ispitivanja sa otpadnim materijalom iz TE Morava rezultati izloženi u 4.2.2.9-4.2.2.13 su dosta jednoznačno pokazali da je mehanička aktivacija u trajanju od 240 minuta najefikasniji način preprade. Takođe imajući u vidu i da se radi o letećem pepelu koji je na deponiji bio više od 10 godina, izabrana je samo ta vrsta pepela TE Morava-240 za dalja razmatranja.

#### 4.3.1.1 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 60 MINUTA MLEVENJA

Za postizanje konstantne konzistencije svežih milterskih mešavina pri različitom udelu zamene CEM III/B sa pepelom, prvo je utvrđena potrebna količina vode  $W$  za postizanje konzistencije referentne mešavine sa CEM III/B.

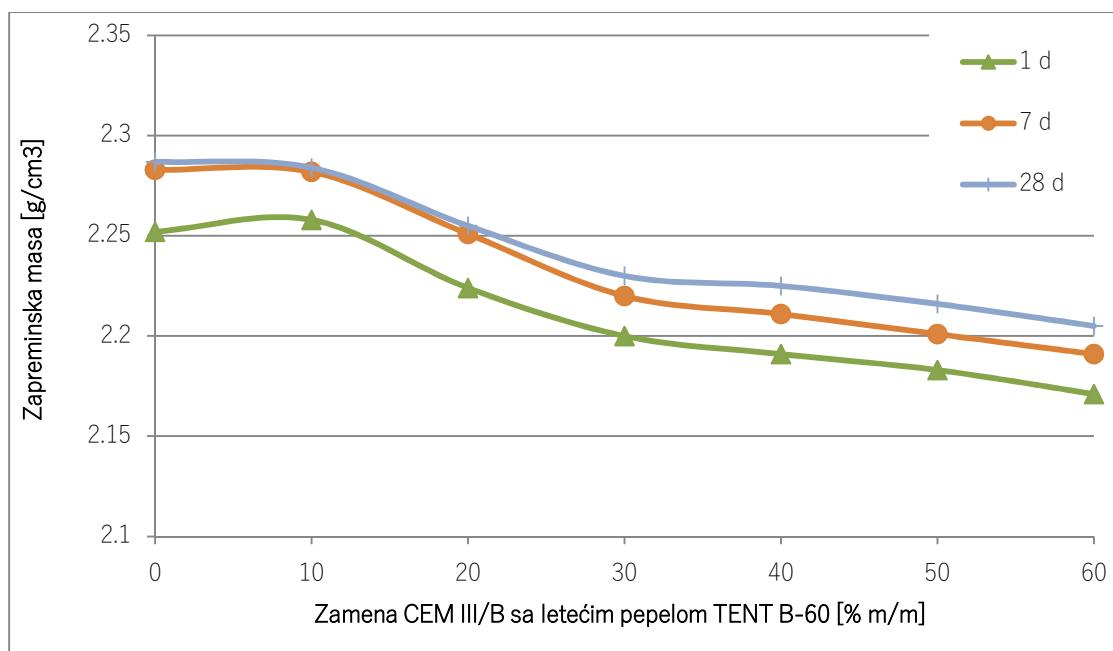
Izmerene potrebne količine vode  $W$  za postizanje referentne konzistencije su dati u Tabeli 4.2:

*Tabela 4.2 Potrebne količine vode  $W$  za postizanje referentne konzistencije*

Udeo LP u vezivu [%m/m]	0	10	20	30	40	50	60
$W$ [%]	100	103.6	105.3	106.7	107.6	108.9	111.1
$V_w/V_b$	1.540	1.550	1.534	1.512	1.485	1.465	1.458

Kao što se može videti u Tabeli 4.2, kod svake mešavine zamena sa LP TENT B-60 je rezultirala većom potrebu za vodom, pošto je gustina ovog LP manja od CEM III/B za cca. 20%. To praktično znači da povećanjem količine zamene LP u mešavini se smanjuje  $V_w/V_b$  - odnos zapremine vode prema zapremini ukupnog veziva (Tabela 4.2). Kao što su rezultati navedeni izuzetak je LP 10 %m/m.

Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslih uzoraka (srednja vrednost 3 merenja) su prikazani na Slici 4.73, a vrednosti dati su u Prilogu 4-22 zajedno sa recepturama mešavina.

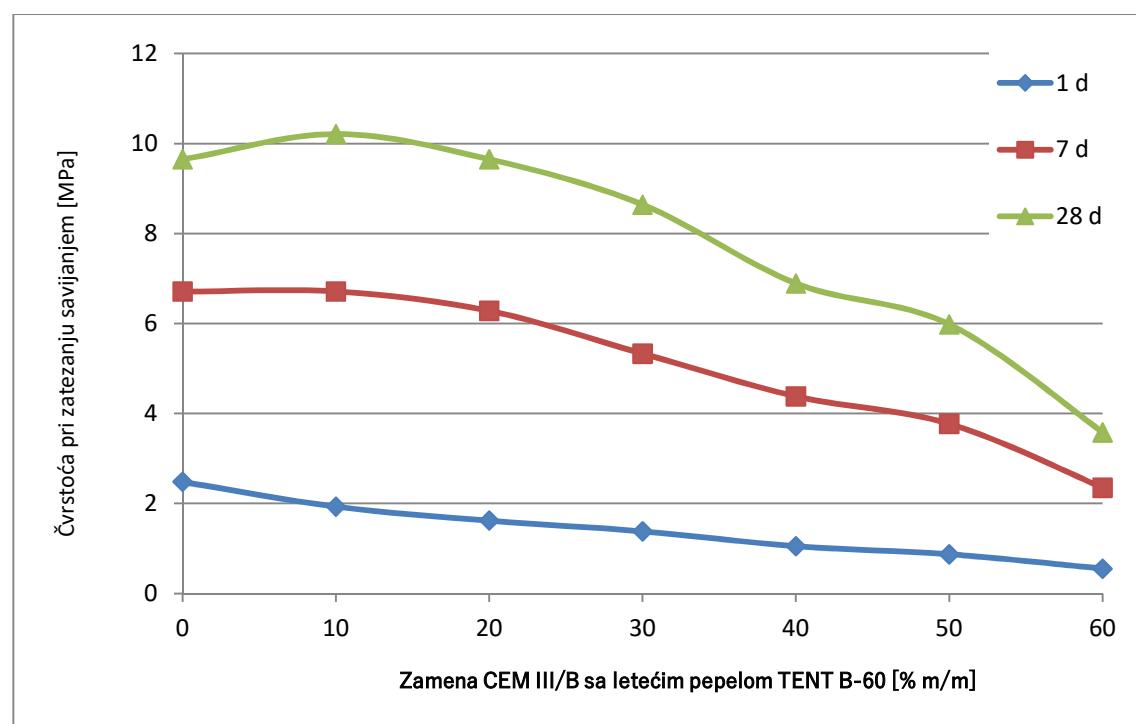


Slika 4.73 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-60, u rasponu od 0 do 60 % m/m na zapreminsku masu maltera

Rezultati su pokazali da pri jednakim uslovima konzistencije sveže mešavine i ugradnje maltera povoljan efekat na povećanje ugradljivosti i kompaktnosti ima samo 10 % m/m zamene CEM III/B sa LP TENT B-60. Takođe je kod ove mešavine dokaz veće zbijenosti i najmanja promena mase nakon 7 i nakon 28 dana. Interesantno je primetiti i da ukupna promena zapreminske mase (razlika između merenja nakon 28 dana i jednodnevног merenja) povećava sa povećanjem pepela.

Takođe je primetna tendencija da se razlika merenja nakon 7 dana smanjuje sa povećanjem udela pepela u mešavini. Dakle može se zaključiti da povećanjem količine LP TENT B-60 u udelu veziva povećava se upijanje vode , ali se smanjuje njegova brzina.

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem uzoraka pri zameni CEM III/B sa LP TENT B-60 nakon 1, 7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperatura su prikazani na Slici 4.74. Vrednosti su dati u Prilogu 4-22, i kao i u Poglavlju 4.2 predstavljanju srednju vrednost 3 merenja.

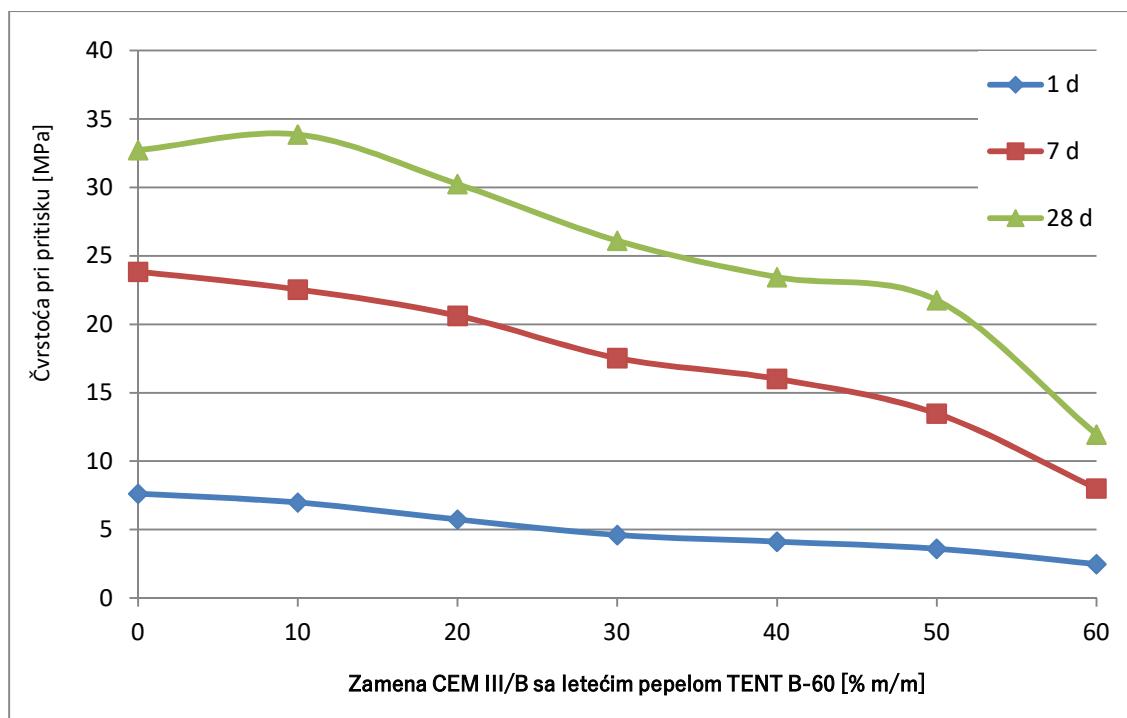


Slika 4.74 Prikaz promene čvrstoće pri zatezanju savijanjem usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-60, nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperatura

Upoređujući rezultate na Slici 4.74 sa rezultatima u 4.2.2.2 veoma je interesantno primetiti da su uzorci sa istom konzistencijom pri ugradnji i u "letnjim uslovima" nege imali manje vrednosti. Jedino je pri zameni od 10% m/m sa LP TENT B-60 zabeležena veća čvrstoća od referentnog maltera i jedino nakon 28 dana. Svakako

je primetan doprinos LP imajući u vidu smanjenje količine cementa, ali je uticaj veoma različit uporedno sa izloženim u 4.2.2.2.

Izmereni rezultati čvrstoće pri pritisku uzoraka pri zameni CEM III/B sa LP TENT B-60 nakon 1, 7 i 28 dana nege pri kratkotraјnom dejstvu povišenih temperatura su prikazani na Slici 4.75. Vrednosti su dati u Prilogu 4-22, i predstavljanju srednju vrednost 5 merenja.



Slika 4.75 Prikaz promene čvrstoće pri pritisku usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-60, nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotraјnom dejstvu povišenih temperatura

Slično rezultatima čvrstoće pri zatezanju savijanjem i čvrstoće pri pritisku su manje u odnosu na rezultate u 4.2.2.2. Jedino je kod mešavine sa 10 % m/m LP TENT B-60 u vezivu zabeležen pozitivan efekat u odnosu na referentnu mešavinu.

---

#### 4.3.1.2 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 120 MINUTA MLEVENJA

Za postizanje konstantne konzistencije svežih malterskih mešavina pri različitom udelu zamene CEM III/B sa LP TENT B-120, potrebna količina vode  $W$  nije se drastično razlikovala od prethodnog seta uzoraka sa pepelom LP TENT B-120.

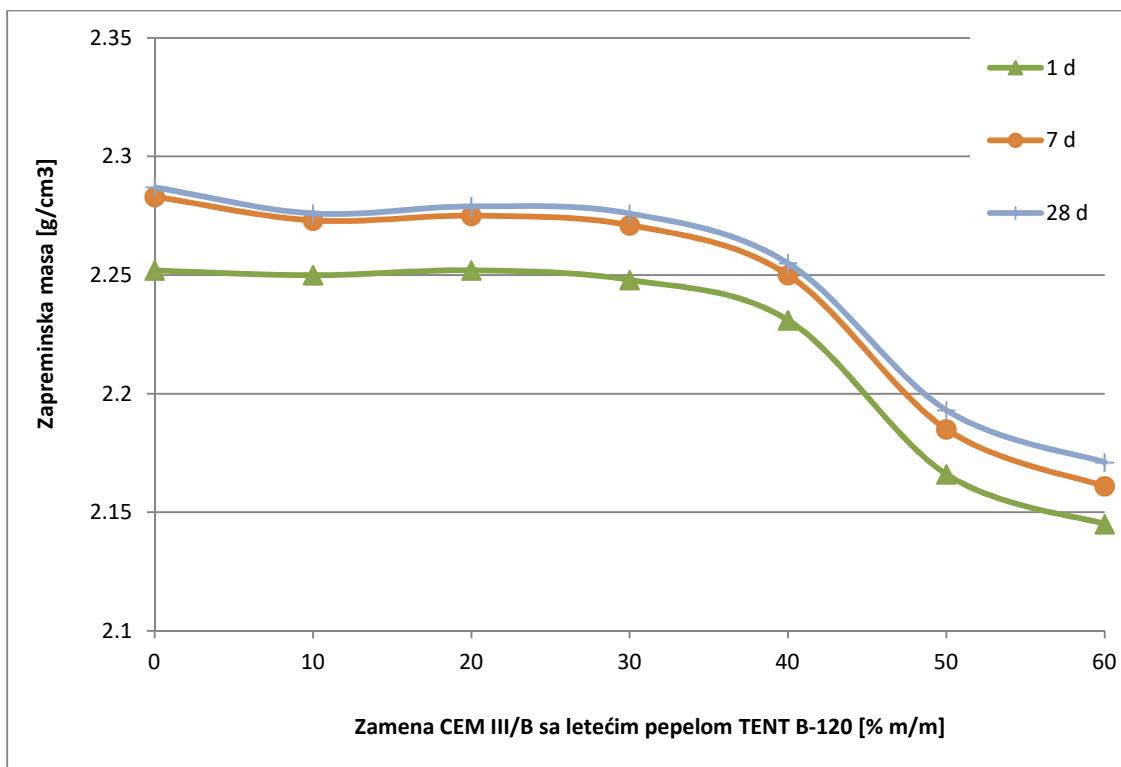
Izmerene potrebne količine vode  $W$  za postizanje referentne konzistencije su dati u Tabeli 4.3:

*Tabela 4.3 Potrebne količine vode W za postizanje referentne konzistencije*

Udeo LP u vezivu [%m/m]	0	10	20	30	40	50	60
W [%]	100	104.4	104.9	105.8	108.9	111.1	114.7
Vw/Vb	1.540	1.571	1.542	1.521	1.532	1.530	1.546

Na osnovu rezultata se može videti, da zamena sa LP TENT B-120 takođe je rezultirala većom potrebom za vodom. Međutim u ovom slučaju zamenom sa LP u mešavini  $V_w/V_b$  - odnos zapremine vode prema zapremini ukupnog veziva se značajno ne menja (Tabela 4.4). Izuzetak i u ovom slučaju je LP 10 %m/m.

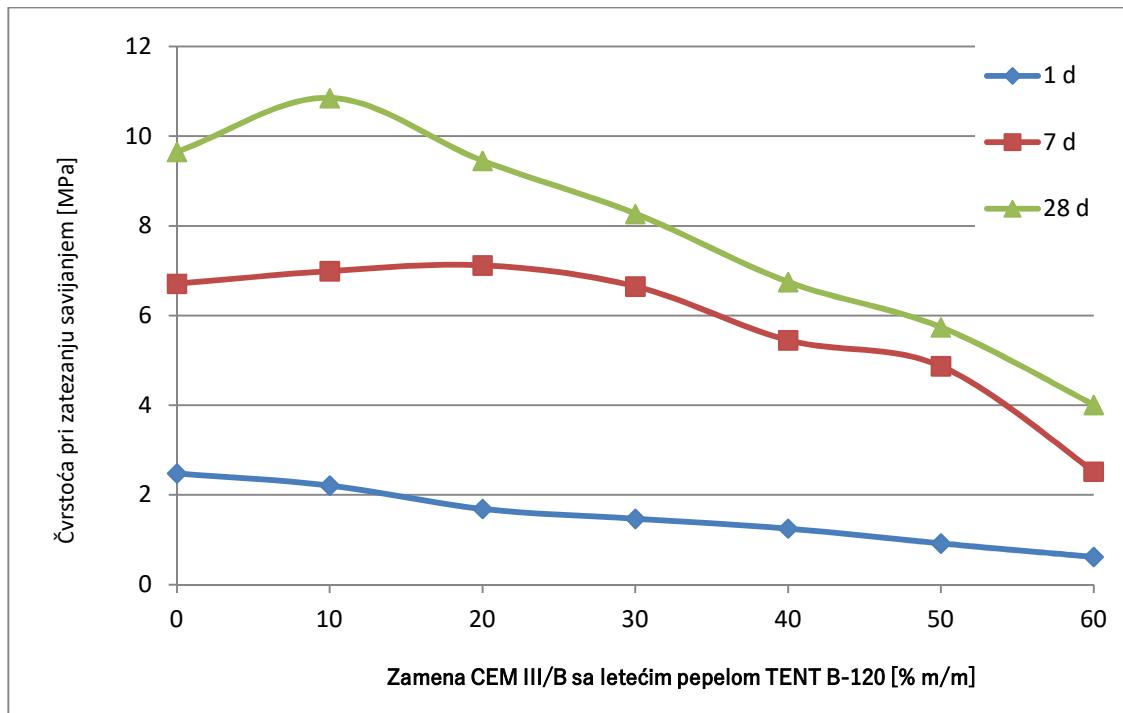
Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslih uzoraka (srednja vrednost 3 merenja) su prikazani na Slici 4.76, a vrednosti dati su u Prilogu 4-23 zajedno sa recepturama mešavina.



Slika 4.76 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-120, u rasponu od 0 do 60 % m/m na zapreminsku masu maltera

Rezultati ispitivanja zapremske mase pri starosti uzorka od 1, 7 i 28 dana su pokazali da 30 % m/m zamena sa LP ima povoljan efekat na rast zbijenosti. Povećana ugradljivost je imala za efekat i dalje smanjenje upijanja nakon 7 dana.

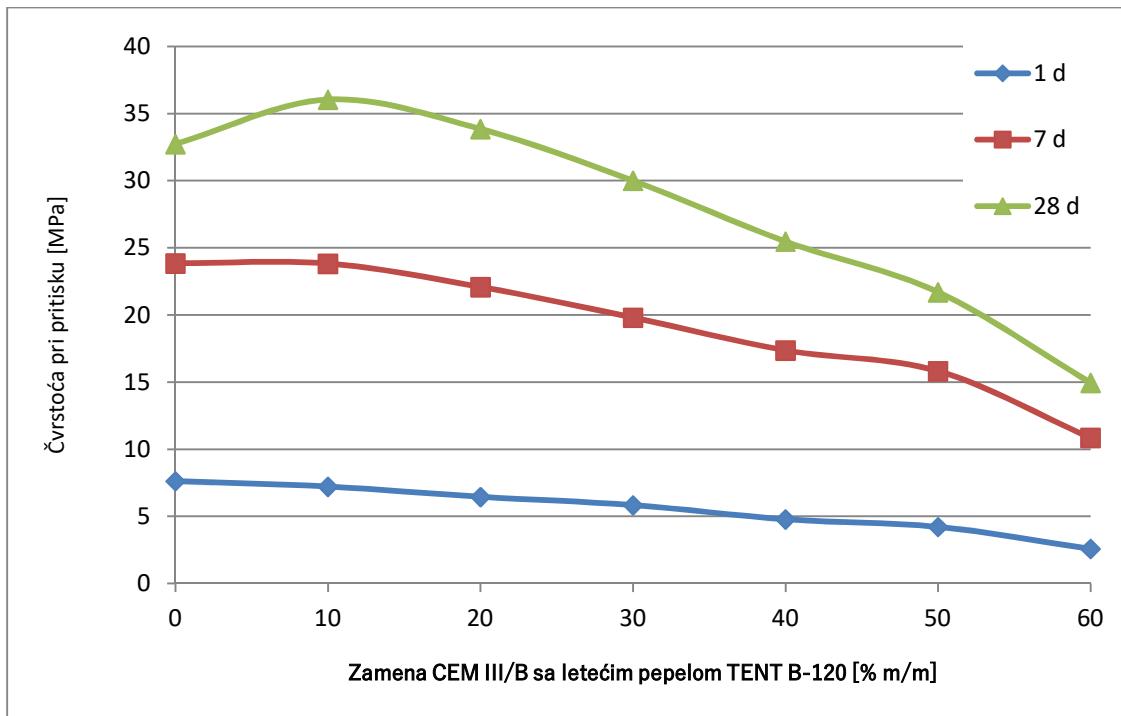
Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem uzorka pri zameni CEM III/B sa LP TENT B-120 nakon 1, 7 i 28 dana nege pri kratkotraјnom dejstvu povišenih temperatura su prikazani na Slici 4.77. Vrednosti su dati u Prilogu 4-23, i kao i u Poglavlju 4.2 predstavljanju srednju vrednost 3 merenja.



Slika 4.77 Prikaz promene čvrstoće pri zatezanju savijanjem usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-120 nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperatura

Postignuto povećanje zbijenost kod uzorka do 30 % m/m zamene sa LP TENT B-120 je vidno uticalo i na čvrstoće pri zatezanju savijanjem nakon 7 dana. Ipak nakon 7 dana veći rast u čvrstoći su imali uzorci samo do 20% m/m zamene sa pepelom TENT B-120. Upoređujući sa rezultatima u delu 4.2.2.3. može se zaključiti da veće vrednosti u ovom slučaju su posledica samo veće čvrstoće pri zatezanju savijanjem samog CEM III/B, ali su relativni doprinosi LP TENT B-120 manji.

Izmereni rezultati čvrstoće pri pritisku uzorka zamenjujući CEM III/B sa LP TENT B-120 nakon 1, 7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperatura su prikazani na Slici 4.78. Vrednosti su dati u Prilogu 4-23, i predstavljanju srednju vrednost 5 merenja.



Slika 4.78 Prikaz promene čvrstoće pri pritisku usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-120, nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperatura

Rezultati čvrstoće pri pritisku su veće u odnosu na rezultate u 4.2.2.3. do 30 % m/m zamene sa LP TENT B-120 u vezivu. Takođe su rezultati do 20 % m/m zamene veći i od referentnog maltera. Dakle zamena sa ovom vrstom pepela se već može proglašiti benefitarnim pri „letnjim uslovima“ nege.

#### 4.3.1.3 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 240 MINUTA MLEVENJA

Za razliku od prethodna dva seta uzoraka pri zameni CEM III/B sa LP TENT B-240, konstantna konzistencija svežih malterskih mešavina je zahtevala manju količinu potrebne vode u mešavini  $W$ .

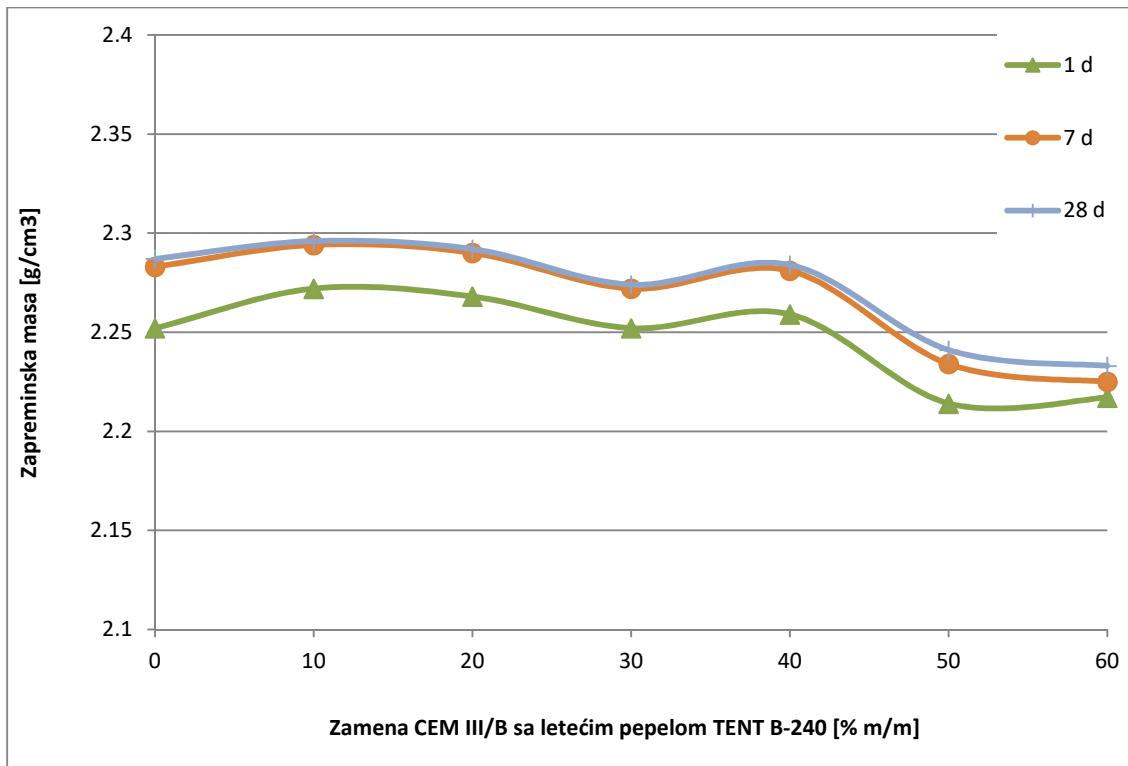
Izmerene potrebne količine vode  $W$  za postizanje referentne konzistencije su dati u Tabeli 4.4:

*Tabela 4.4 Potrebne količine vode za postizanje referentne konzistencije sa LPTENT B240*

Udeo LP u vezivu [%m/m]	0	10	20	30	40	50	60
W [%]	100	100.0	100.0	100.9	102.2	103.6	104.4
Vw/Vb	1.540	1.511	1.484	1.470	1.463	1.457	1.444

Primetna je velika razlika pri analizi rezultata iz Tabele 4.4. Zamena sa LP TENT B-240 je zahtevala manju količinu vode za postizanje referentne konzistencije maltera. S druge strane u ovom slučaju zamenom sa LP u mešavini Vw/Vb - odnos zapremine vode prema zapremini ukupnog veziva se smanjuje pri povećanju uleta pepela (Tabela 4.4), što praktično znači da je sa relativno manjom količinom vode postignuta ista konzistencija do zamene 30 % m/m zamene CEM III/B sa LP.

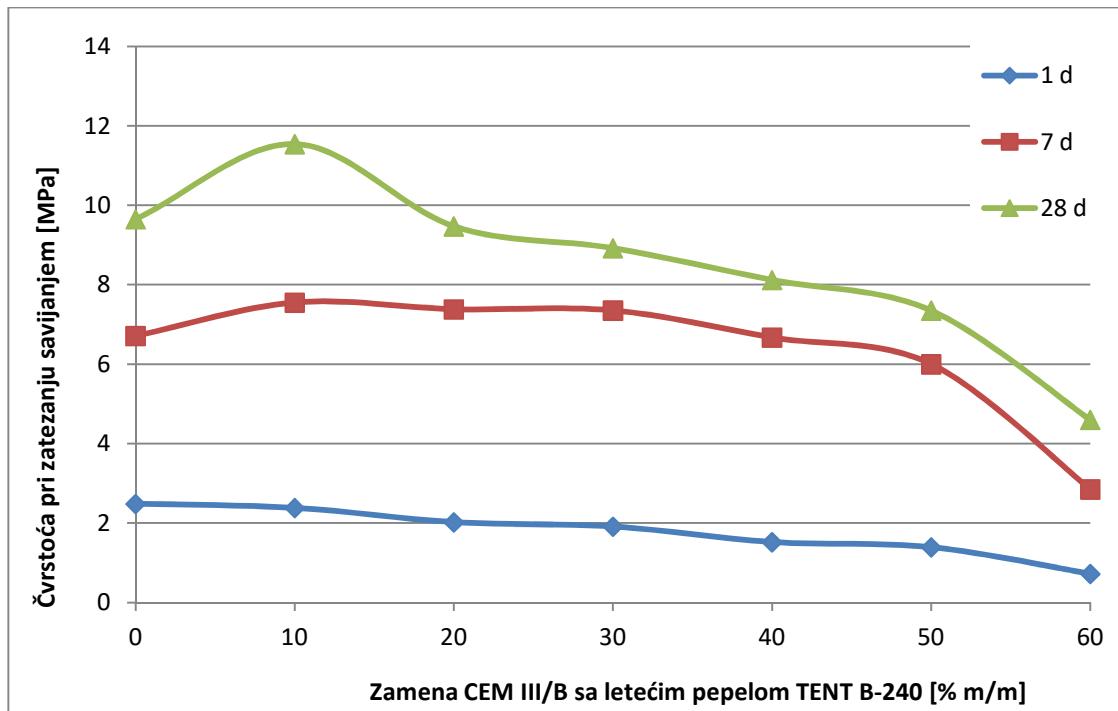
Rezultati ispitivanja zapremske mase očvrslih uzoraka (srednja vrednost 3 merenja) su prikazani na Slici 4.79, a vrednosti dati su u Prilogu 4-24 zajedno sa recepturama mešavina.



Slika 4.79 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-240, u dijapazonu od 0 do 60 % m/m na zapreminsku masu maltera

Rezultati ispitivanja zapreminske mase pri starosti uzorka od 1,7 i 28 dana su pokazali da 40 % m/m zamena sa LP ima povoljan efekat i na rast zbijenosti i na smanjenje upijanja nakon 7 dana.

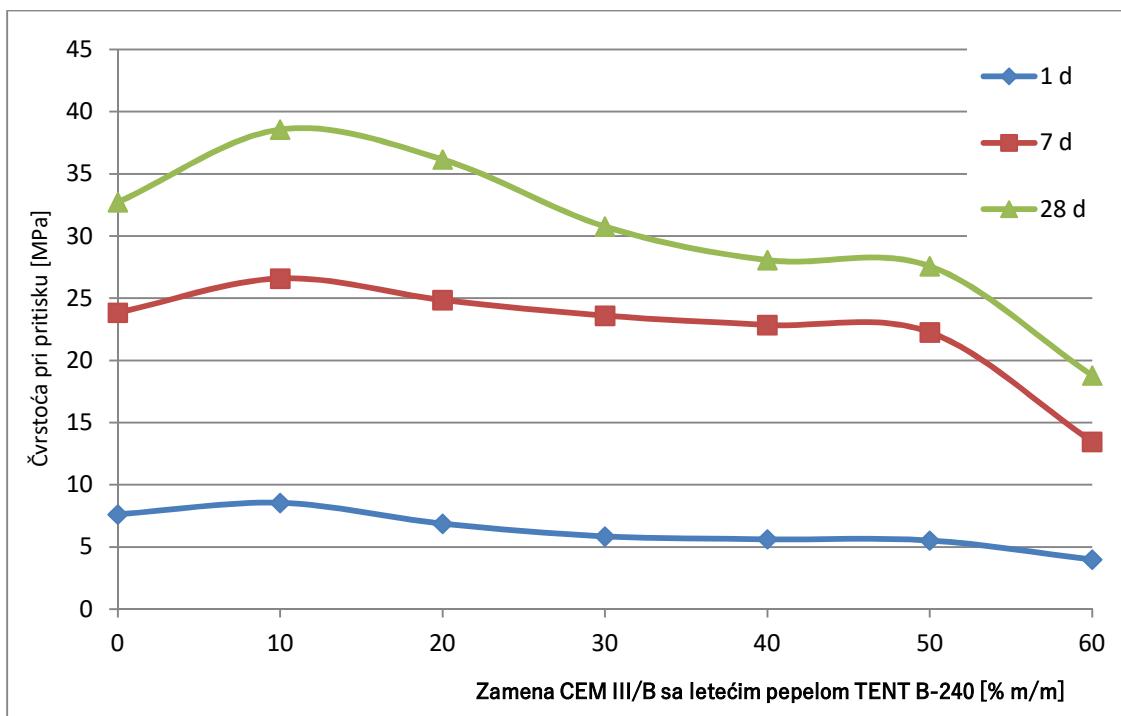
Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem uzorka pri zameni CEM III/B sa LP TENT B-240 nakon 1, 7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperatura su prikazani na Slici 4.80. Vrednosti su dati u Prilogu 4-24, i kao i u Poglavlju 4.2 predstavljanju srednju vrednost 3 merenja.



Slika 4.80 Prikaz promene čvrstoće pri zatezaju savijanjem usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-240 nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajanom dejstvu povišenih temperatura

Postignuto povećanje zbijenost kod uzorka do 40 % m/m zamene sa LP TENT B-240 je u dobroj korelaciji sa čvrstoćom pri zatezaju savijanjem nakon 7 dana, ali je osetan pad jedino zabeležen pri 60% m/m zamene sa LP TENT B-240. Ovi rezultati s jedne strane upućuju na važan uticaj efekta filera na rane čvrstoće i kada su negovani pri povišenim temperaturama, s druge strane ukazuju da je granica racionalne, opravdane zamene CEM III/B sa LP TENT B-240 do 50% m/m.

Ispitani rezultati čvrstoće pri pritisku uzorka pri zameni CEM III/B sa LP TENT B-240 nakon 1, 7 i 28 dana nege primenjujući režim kratkotrajnog dejstva povišenih temperatura su prikazani na Slici 4.81. Vrednosti su dati u Prilogu 4-24, i predstavljanju srednju vrednost 5 merenja.



Slika 4.81 Prikaz promene čvrstoće pri pritisku usled zamene CEM III/B sa letećim pepelom TENT B-240, nakon 1, 7 i 28 dana nege pri kratkotrajnom dejstvu povišenih temperatura

Rezultati čvrstoće pri pritisku sa LP TENT B-240 su pokazali nekoliko važnih specifičnosti ternarnog sistema veziva C-Z-P:

- najveći doprinos u smislu absolutnog priraštaja u odnosu na referentnu dvokomponentnu mešavinu je pri zameni od 10% m/m pepela. Tada udeo cementnog klinkera u mešavini nije još značajno smanjen, što je važno za latentne hidrauličke osobine zgure. Čestice mehanički aktiviranog pepela međutim imaju važan efekat filera, ubrzavajući hidrataciju. Takođe je važan i zbog disperzije čestica u mešavini, što utiče i na relativno smanjenje  $V_w/V_b$  što povećava čvrstoću.

- sa aspekta iskorišćenosti što veće količine LP u malteru/betonu rezultati nakon 7 dana su možda najbolje pokazali da je granica efikasne zamene CEM III/B sa LP TENT B-240 50% m/m. Što je veoma značajna količina, pri kojoj udeo cementnog klinkera je svega cca. 13 % m/m. Dakle 85 % m/m u veziva čine industrijski nuzproizvodi – potencijalni otpadni materijali.

#### 4.3.1.4 ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 240 MINUTA MLEVENJA

Pri merenju konzistencije svežih malterskih mešavina zamenom CEM III/B sa prerađenim pepelom sa pepelišta TE Morava 240, spektar ispitivanja je proširen do 80 % m/m, pošto je i pri 60 % m/m zamene potrebna količina vode za postizanje referentne konzistencije bila nepromenjena. Fotografije merenja konzistencije svežeg maltera sa zamenom pepela OP TE Morava 240 od 0-80% m/m su prikazane na Slici 4.82. Izmerene potrebne količine vode  $W$  za postizanje referentne konzistencije su dati u Tabeli 4.5:

*Tabela 4.5 Potrebne količine vode  $W$  za postizanje referentne konzistencije*

Udeo LP u vezivu [%m/m]	0	10	20	30	40	50	60	70	80
W [%]	100	96.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	102.2	103.6
Vw/Vb	1.540	1.463	1.481	1.453	1.427	1.401	1.376	1.382	1.376

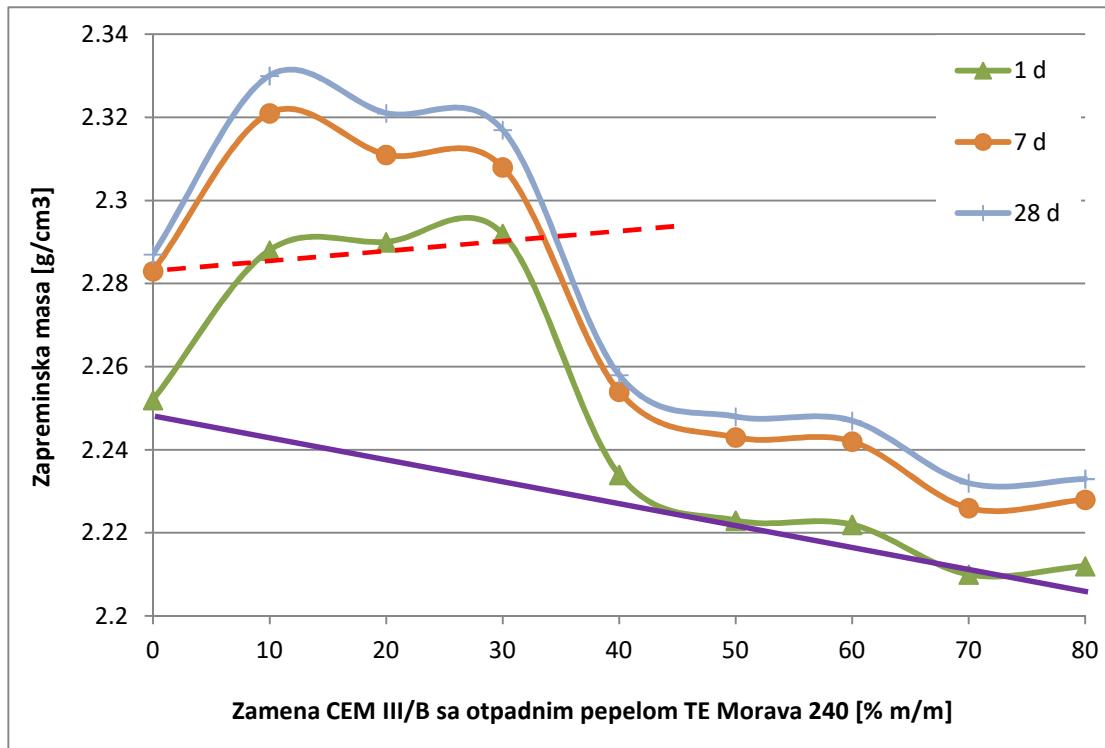
Analizom rezultata u Tabeli 4.5 može se zaključiti da je OP TE Morava nakon 240 minuta mlevenja pokazala najbolje rezultate sa aspekta poboljšanja ugradljivosti. Do 60 % m/m zamene CEM III/B potrebna količina vode nije veća od referentne. Pri toj zameni zapreminski odnos vode i ukupnog ternarnog sistema veziva je smanjen za 11%. Pri tome treba imati u vidu da je specifična površina ovog pepela dvostruko veća od CEM III/B. Dakle postignuta su dva pozitivna efekta u isto vreme:

- smanjen je odnos Vw/Vb, što praktično rezultira bolju kompaktnost
- efektivno veći vodo-cementni faktor, pošto je otpadni pepeo prevashodno inertan material. Što će za rezultat imati ubrzanje hidratacije.



Slika 4.82 Merenje konzistencije svežeg maltera sa OPTE Morava 240 (0-80% m/m zamene)

Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslih uzoraka (srednja vrednost 3 merenja) su potvrdili značajno poboljšanje zbijenosti kao što se vidi na Slici 4.83, a vrednosti su dati su u Prilogu 4-25 zajedno sa recepturama mešavina.



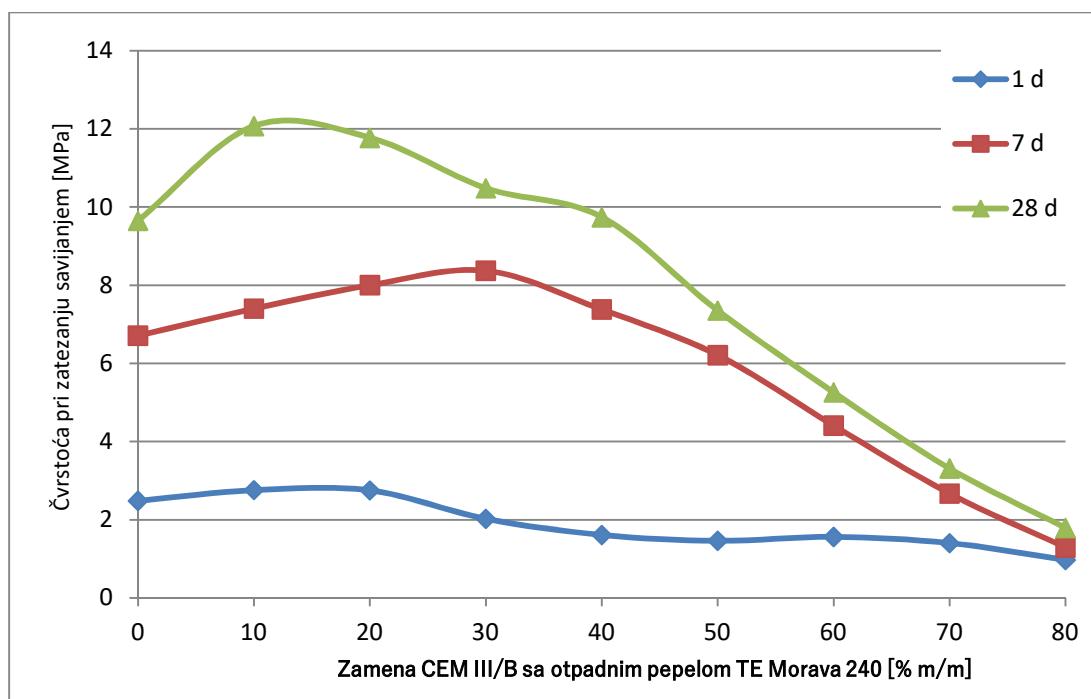
Slika 4.83 Uticaj zamene CEM III/B sa letećim pepelom TE Morava-240, u dijapazonu od 0 do 80 % m/m na zapreminsku masu maltera

Rezultati zapreminske mase pri starosti uzoraka od 1,7 i 28 dana su pokazali jedno dualno ponašanje:

- od 10 %m/m do 30 %m/m zamene sa OPTE Morava 240 postiže se izuzetno povećanje zbijenosti (gustine) očvrslog maltera. (crvena isprekidana linija na Slici 4.82)
- od 40 %m/m do 80 %m/m zamene sa pepelom taj efekat povećanja zbijenosti se gubi. Imajući u vidu da je gustina OP TE Morava 240 15% manja od CEM III/B, može se zaključiti na osnovu Slike 4.83 da pri promeni zapreminske mase u tom dijapazonu postignuta zbijenost značajno ne menja (ljubičasta puna linija).

Taj dualan efekat se može objasniti sa činjenicom da pri manjoj količini pepela (do 30 %m/m) u mešavini postiže se značajno poboljšanje pakovanja zrna, pošto se radi o veličini zrna, koja će uspešno ispuniti prostor između već iz zrna CEM III/B i agregata. Međutim pri većoj količini, ta veličina zrna postaje dominantna u mešavini i rezultira jednoličnom graduacijom koja ne rezultira poboljšanjem kompaktnosti. U prilog tom argumentu je i promena zapreminske mase nakon 7 i 28 dana, koja ostaje konstantna od 40 – 80 % m/m zamene.

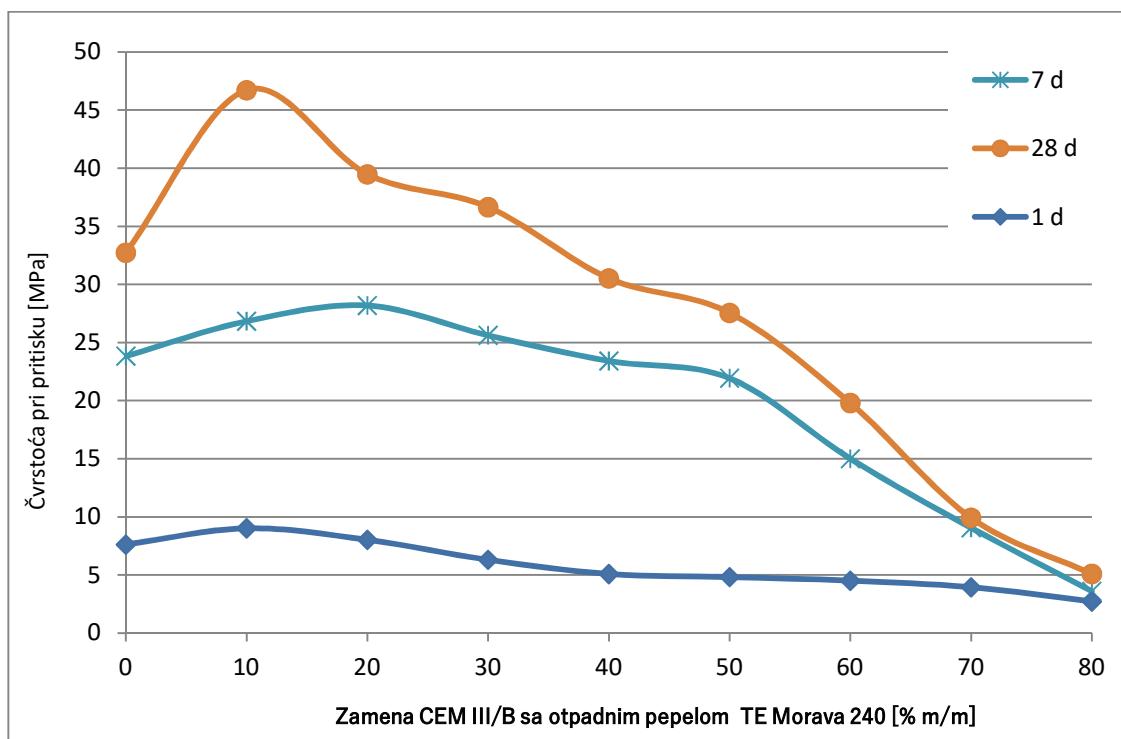
Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem uzorka pri zameni CEM III/B sa OP TE Morava 240 nakon 1, 7 i 28 dana nege pri kratkotraјnom dejstvu povišenih temperatura su prikazani na Slici 4.84. Vrednosti su dati u Prilogu 4-25, i predstavljanju srednju vrednost 3 merenja.



Slika 4.84 Prikaz promene čvrstoće pri zatezanju savijanjem usled zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom TE Morava-240 nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotraјnom dejstvu povišenih temperatura

Postignuto povećanje zbijenost kod uzorka do 30 % m/m zamene sa OP TE Morava240 je i u ovom slučaju u korelaciji sa čvrstoćom pri zatezanju savijanjem nakon 7 dana slično opitu sa LP TENT B-240. Jednodnevne čvrstoće pri zatezanju savijanjem su veće od referentnog maltera do 20 % m/m zamene, nakon 7 i 28 dana do 40 %m/m zamene.

Ispitani rezultati čvrstoće pri pritisku uzorka pri zameni CEM III/B sa OP TE Morava 240, nakon 1, 7 i 28 dana nege primenjujući režim kratkotrajnog dejstva povišenih temperatura su prikazani na Slici 4.85. Vrednosti su dati u Prilogu 4-25, i predstavljanju srednju vrednost 5 merenja.



Slika 4.85 Prikaz promene čvrstoće pri pritisku usled zamene CEM III/B sa otpadnim pepelom TE Morava 240, nakon 1,7 i 28 dana nege pri kratkotrajnem dejstvu povišenih temperatura

Rezultati čvrstoće pri pritisku su pokazali izuzetne osobine ternarnog sistema veziva C-Z-P:

-najveći doprinos u smislu absolutnog priraštaja u odnosu na referentnu dvokomponentnu mešavinu je i kod OP TE Morava 240 pri zameni od 10% m/m pepela. Zamenom 10 %m/m CEMIII/B sa ovim prerađenim otpadnim materijalom povećava se čvrstoća nakon 1,7 i 28 dana za 18%, 12% i 43%, respektivno. To praktično znači povećanje klase čvrstoće CEM III/B na 42,5. Nije poznat drugi material koji bi povećao čvrstoću metalurškog cementa u toj meri [147,148].

- do 30% m/m zamene sa pepelom čvrstoće pri pritisku su veće od referentnog maltera nakon 7 i 28 dana.
- do 50% m/m zamene je granica efikasne zamene CEM III/B sa OPTE Morava 240 sa aspekta iskorišćenosti što veće količine OP u malteru/betonu.

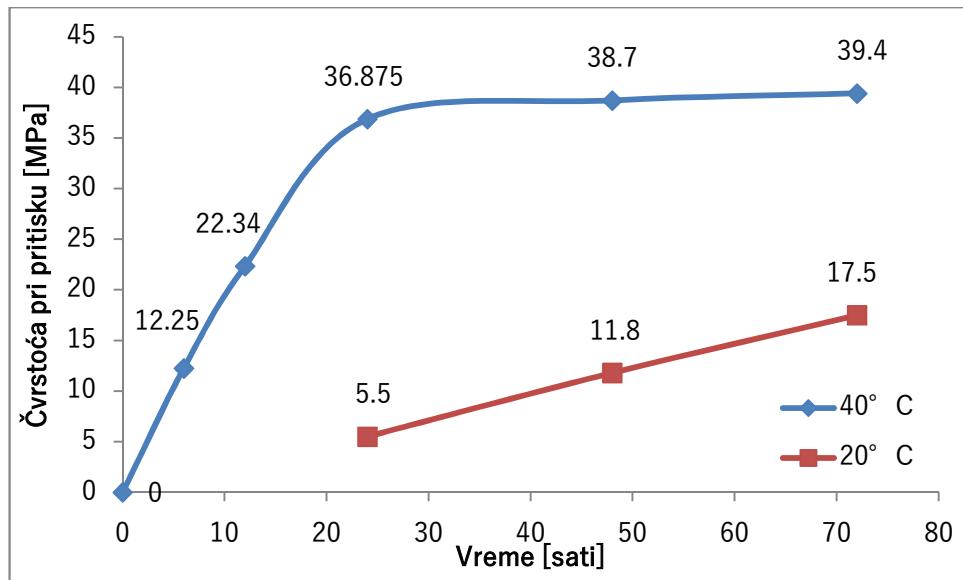
#### 4.3.2. UTICAJ NEGE PRI POVIŠENIM TEMPRATURAMA NA TERNARNI SISTEM VEZIVA

##### 4.3.2.1 NEGA BETONA SA CEM III/B NA 40°C

CEM III/B je dvokomponentno vezivo sa značajnim sadržajem granulisane zgure. Kao što je u Poglavlju 2 već objašnjeno jedan od načina ubrzanja procesa hidratacije sa SCM materijalima koja imaju i pucolanska svojstva je nega pri povišenim temperaturama. Pre ispitivanja uticaja nege pri povišenim temperaturama na ternarnim sistemima veziva, urađena su ispitivanja sa CEM III/B. Na osnovu pregleda rezultata navedenih u naučnim publikacijama i nakon preliminarnih ispitivanja izabrana je nega na 40°C, sa ciljem da se optimalizuju sledeći zahtevi:

- da se ubrza proces očvršćavanja betona,
- da se izbegne ili minimalizuje "crossover"-efekat, tj. da se dobiju povećane rane čvrstoće, ali ne nauštrb značajnog gubitka kasnijih/konačnih čvrstoća.
- da se minimalizuju energetske potrebe, tj. optimalan odnos uložene energije i postignute čvrstoće
- da rešenje bude tehnološki jednostavno, tj. sa što manje koraka.

Na Slici 4.86 dat je prikaz razvoja čvrstoće betona sa CEMIII/B na 40°C tokom prva 72 sata. Takođe, je prikazan i razvoj na 20°C, nakon 24 sata, tj. nakon vađenja iz kalupa.



Slika 4.86 Razvoj čvrstoće pri pritisku betona sa CEM III/B na 20°C i 40°C tokom prvih 72 sata

Prilikom nege na 40°C, CEM III/B ima najintenzivniji rast čvrstoće u prvih 24 sata, nakon toga se značajno usporava dinamika razvoja čvrstoće, ali se povećava do 72 sata.

Naredni opit se bavio istraživanjem koliko dana nege na 40°C bi bilo optimalno, tj. kako dužina inicialne nege na povišenoj temperaturi utiče na kasniji razvoj čvrstoće. Nakon rezultata razvoja rane čvrstoće betona sa CEM III/B izabrana su 4 režima initialne nege:

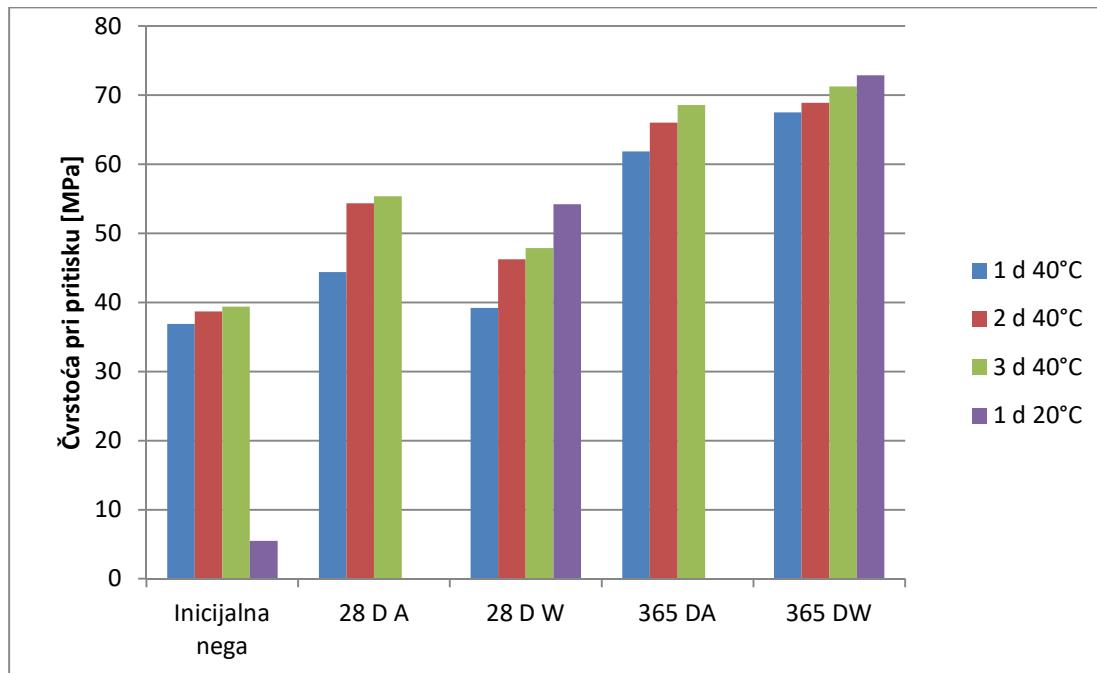
- **1 d 40°C** – tj. beton je 24 sata u kalupu, upakovan streč-folijom, kako bi se sprečio gubitak vlage i negovan na 40°C
- **2 d 40°C** – tj. beton je 48 sata u kalupu, umotan streč-folijom, kako bi se sprečio gubitak vlage i negovan na 40°C
- **3 d 40°C** – tj. beton je 72 sata u kalupu, umotan streč-folijom, kako bi se sprečio gubitak vlage i negovan na 40°C

- **1 d 20°C** – tj. beton je 24 sata u kalupu, upakovan streč-folijom, kako bi se sprečio gubitak vlage i negovan na 20°C, nakon toga ovaj set uzorka je stavljen u rezervoar sa vodom

Ispitivanje uticaja raznovrsnog načina nege na betone pravljene sa CEM III/B, je urađeno nakon:

- **inicijalne nege**, praktično nakon vađenja uzorka iz kalupa. U slučaju nege na 40°C nakon 1, 2 ili 3 dana, a u slučaju nege na 20°C nakon 24 sata.
- **28 D A** – nakon određenog režima inijalne nege, uzorci su bili na vazduhu na  $20 \pm 3^\circ\text{C}$
- **28 D W** – nakon određenog režima inijalne nege, uzorci su bili u vodi na  $20 \pm 3^\circ\text{C}$
- **365 D A** – nakon određenog režima inijalne nege, uzorci su bili 3 meseca u vodi, a posle 9 meseca vazduhu, na  $20 \pm 3^\circ\text{C}$
- **365 D W** – nakon određenog režima inijalne nege, uzorci su bili 9 meseca u vodi, na  $20 \pm 3^\circ\text{C}$

Rezultati ispitivanja uzorka su prikazani na Slici 4.87. Referentni uzorci, koji su negovani u vodi na  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , su prikazani samo pri starosti 1, 28 i 365 dana. Vrednosti predstavljaju prosečne vrednosti 3 rezultata i navedeni su u Prilogu 4-26.



Slika 4.87 Uticaj dužine inicijalne nege na 40°C na razvoj čvrstoće pri pritisku betona sa CEM III/B

Ovim ispitivanjem je potvrđen izbor da se betoni sa CEMIII/B neguju na 40°C. Najvažniji zaključci:

- 2 ili 3 dana nege na 40°C je dovoljno, da beton nakon 28 dana ima istu čvrstoću pri pritisku, kao u vodi na  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , nakon 28 dana. Ovo je možda dokaz najefikasnije nege za CEM III/B, kod koje je nedostatak adekvatne nege čest problem. Takođe, u praksi se retko neguje mesec dana.
- veoma je važan rast čvrstoće nakon nege na 40°C (28 D A), koji ukazuje na efikasan nastavak procesa hidratacije i pre svega pucolanske reakcije zgure. Ujedno je nakon ovoga uočena razlika u efektu dužine nege na 40°C. Uzorci izloženi samo 1 dan temperature od 40°C su nakon mesec dana na suvom imali priraštaj od 20%, dok nakon 2 ili 3 dana nege na 40°C su imali priraštaj od 40%.

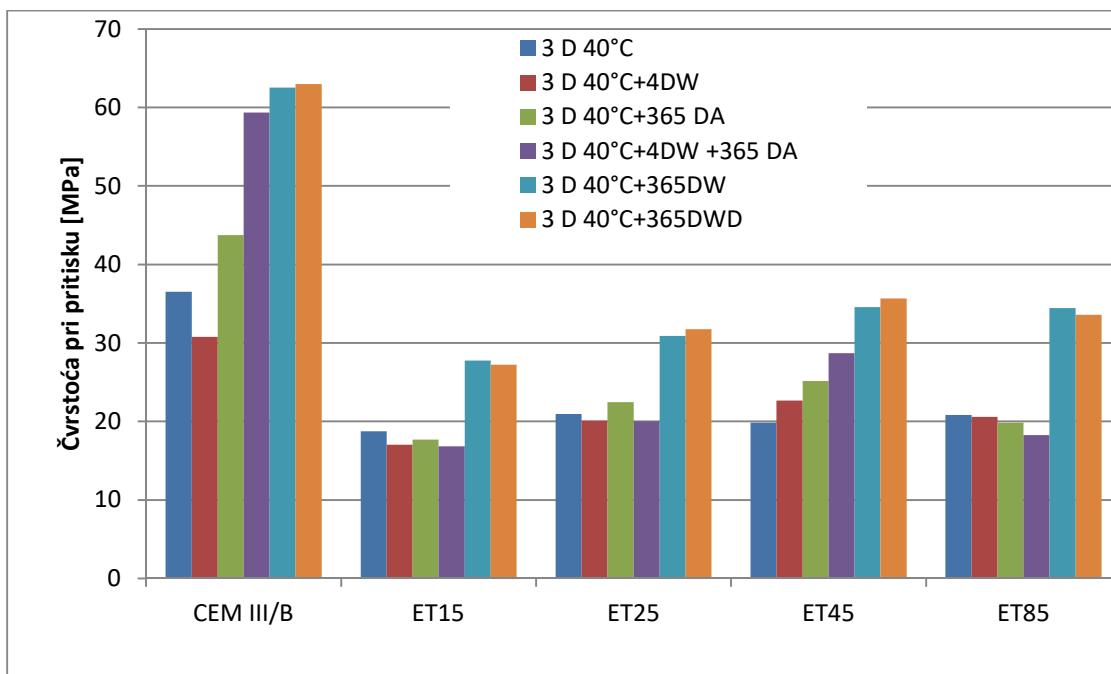
- uzorci koji su nakon nege na 40°C, stavljeni u vodu, nakon mesec dana su imali manju čvrstoću od referentne nege na 20°C u vodi, što dokazuje "crossover" efekat. Betoni sa 2 ili 3 dana prvo izloženi 40°C su manje podložni tom efektu.
- rezultati nakon 365 dana su pokazali da nega betona vodom ima efekta i nakon inicijalnog tretmana na temperaturi od 40°C.

#### 4.3.2.2 UTICAJ NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA LP TENTB

Važno je spomenuti da su za ovaj set ispitivanja pravljeni uzorci maltera kako bi rezultati bili uporedivi sa vrednostima datim u delu 4.2.2.1. Na osnovu prethodnih rezultata za ispitivanje uticaja povišene temperature, uzorci su inicijalno negovani 3 dana na 40°C. U mešavinama je 50% m/m veziva zamenjeno sa LP iz TENT B. U ispitivanje su bili uključeni mehanički aktivirani LP-i nakon 60 minuta (oznaka ET15), 120 minuta (oznaka ET25), 240 minuta (ET45) i nakon 480 minuta (oznaka ET85) mlevenja. Rezultati čvrstoće pri pritisku su grafički prikazani na Slici 4.88. Vrednosti predstavljaju prosečnu vrednost 3 merena rezultata i dati su u Prilogu 4-27. Referentna mešavina bez udela LP TENT B je označena CEM III/B. Ispitivanja su urađena nakon:

- 3 dana nege pri 40°C (oznaka **3 D 40°C**)
- 3 dana nege pri 40°C + 4 dana u vodi na  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , (**3 D 40°C+4DW**)
- 3 dana nege pri 40°C + 365 dana na vazduhu pri  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ (oznaka **3D40°C+365DA**)
- 3 dana nege pri 40°C+4 dana u vodi+365 dana na vazduhu pri  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , (oznaka **3D40°C+4DW + 365DA**)

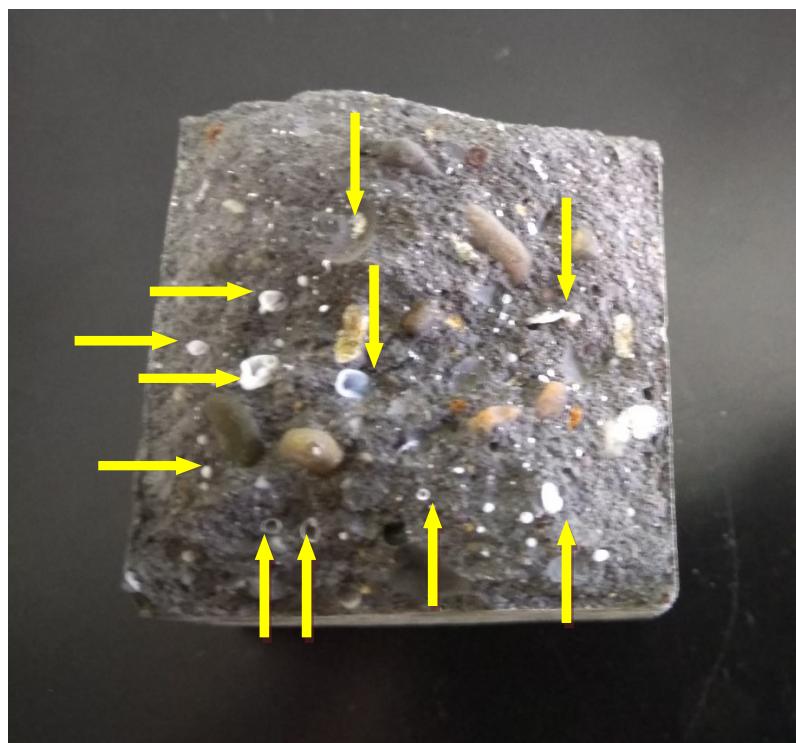
- 3 dana nege pri  $40^{\circ}\text{C}$  +365 dana u vodi na  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$  (oznaka **3 D  $40^{\circ}\text{C}+365$  DW**)
- 3 dana nege pri  $40^{\circ}\text{C}$  +365 dana u vodi na  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$  + osušen do stalne mase (oznaka **3 D  $40^{\circ}\text{C}+365$  DWD**)



Slika 4.88 Uticaj dužine mlevenja LP TENT B na razvoj čvrstoće pri pritisku malterskih mešavina negovanih 3 dana na  $40^{\circ}\text{C}$

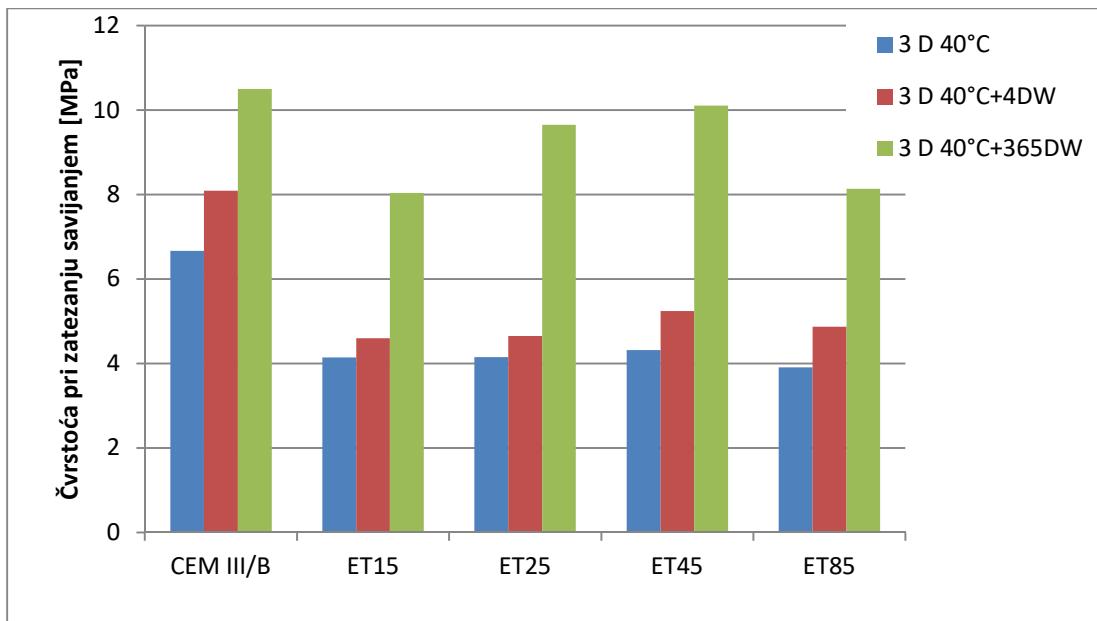
Može se primetiti da su sve mešavine sa modifikacijama LP TENTB imali približno istu čvrstoću pri pritisku nakon 3 dana nege na  $40^{\circ}\text{C}$ , što je približno 50% čvrstoće maltera sa CEM III/B. Dakle može se zaključiti da finoča pepela (u ovom dijapazonu) ne utiče značajno na čvrstoću pri pritisku nakon 3 dana nege na  $40^{\circ}\text{C}$ , ali bitno utiče na kasniji razvoj čvrstoće ako su kasnije uzorci negovani u vodi. To je dokaz pucolanskih reakcija koje se mogu videti pri starosti od  $3 + 365$  dana i koje zavise od dužine mehaničke aktivacije pepela. Rezultati su pokazali da LP TENT B jedino pri mehaničkoj aktivaciji od 240 minuta, nakon inicijalne nege na  $40^{\circ}\text{C}$ , ima priraštaje čvrstoće pri svim uslovima nastavka nege. To je može ukazati da pri

mehaničkoj aktivaciji u trajanju od 240 minuta je postignuto dobro pakovanje zrna. Naime, primećeno je da ako se posle nege na  $40^{\circ}\text{C}$  uzorci neguju u vodi, u šupljinama, porama je uočljivo da dolazi do izluživanja (Slika 4.89). Dakle usled ubrzane reakcije u 3 dana na  $40^{\circ}\text{C}$  dolazi do intenzivne hidratacije i stvaranja portlandita, kome je međutim potreban duži period za reakcije sa pucolanimi. Ukoliko pakovanje u betonu nije adekvatno taj potencijal se može izgubiti bilo izluživanjem (u vodi) ili karbonatizacijom (na vazduhu). Međutim kao što se u slučaju mešavine ET45 može videti, postignutim dobrim pakovanjem zrna taj portlandit ostaje u porama i dostupan za razvoj pucolanskih reakcija.



Slika 4.89 Izluživanje u šupljinama i porama na površini sveže polomljene prizme mešavine  
ET25

Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem su grafički prikazani na Slici 4.88. Vrednosti predstavljaju prosečnu vrednost 3 merena rezultata i dati su u Prilogu 4-27.



Slika 4.90 Uticaj dužine mlevenja LP TENT B na razvoj čvrstoće pri zatezanju savijanjem malterskih mešavina negovanih 3 dana na 40°C

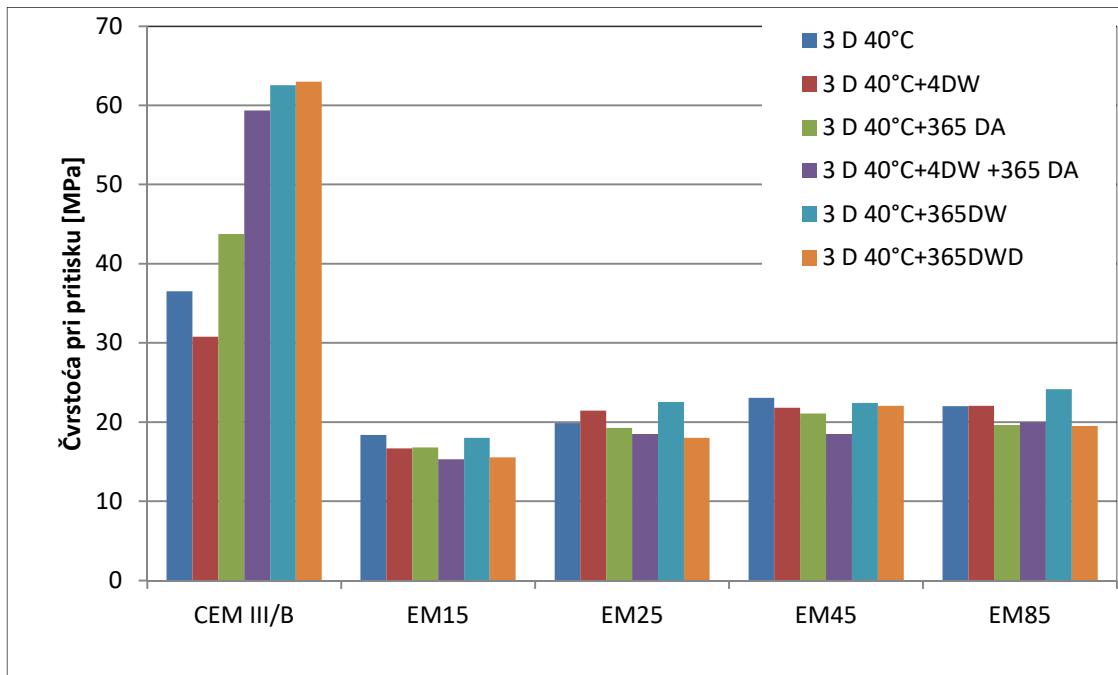
Najbolji rezultati su postignuti zamenom CEM III/B sa LP TENTB nakon 240 minuta mlevenja. Razlike nakon 3 dana su velike između referentne mešavine i mešavina sa LP, slično kao čvrstoćama pri pritisku. Nakon 365 dana u vodi rezultati sa LP se međutim približavaju referentnoj mešavini, takođe zahvaljujući pucolanskim reakcijama. Veza između uticaja pucolanskih reakcija i specifične površine – tj. finoće pepela se možda najbolje može prikazati razlikom u čvrstoći pri zatezanju savijanjem nakon 365 dana. Pri čemu je primetan i nepovoljan efekat agregacije LP nakon 480 minuta mlevenja.

Pored ostalih rezultata važno je napomenuti da je u ovom opitu čvrstoća pri pritisku sa CEM III/B bez pepela, nakon 3 dana nege na 40°C rezultirala skoro identičnom vrednošću kao i na 20°C u vodi nakon 28 dana kao što je navedeno u delu 4.2.

#### 4.3.2.3 UTICAJ NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA OP TE MORAVA

Slično prethodnoj grupi ispitivanih mešavina sa LP-om (deo 4.3.2.2), sa otpadnim pepelom iz TE Morava je takođe izvršeno ispitivanje uticaja povišene temperature, sa inicijalnim negovanjem 3 dana na 40°C. U mešavinama je 50% m/m CEM III/B zamenjeno sa OP TE Morava. U ispitivanje su bili uključeni mehanički aktivirani OP-i nakon 60 minuta (oznaka EM15), 120 minuta (oznaka EM25), 240 minuta (EM45) i nakon 480 minuta (oznaka EM85) mlevenja. Rezultati čvrstoće pri pritisku su grafički prikazani na Slici 4.91. Vrednosti predstavljaju prosečnu vrednost 3 merena rezultata i dati su u Prilogu 4-28. Referentna mešavina bez udela pepela je označena CEM III/B. Ispitivanja su urađena nakon:

- 3 dana nege pri 40°C (oznaka **3 D 40°C**)
- 3 dana nege pri 40°C + 4 dana u vodi na  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , (**3 D 40°C+4DW**)
- 3 dana nege pri 40°C + 365 dana na vazduhu pri  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ (oznaka **3D40°C+365DA**)
- 3 dana nege pri 40°C+4 dana u vodi+365 dana na vazduhu pri  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , (oznaka **3D40°C+4DW + 365DA**)
- 3 dana nege pri 40°C +365 dana u vodi na  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  (oznaka **3 D 40°C+365 DW**)
- 3 dana nege pri 40°C +365 dana u vodi na  $20 \pm 3^\circ\text{C} +$  osušen do stalne mase (oznaka **3 D 40°C+365 DWD**)

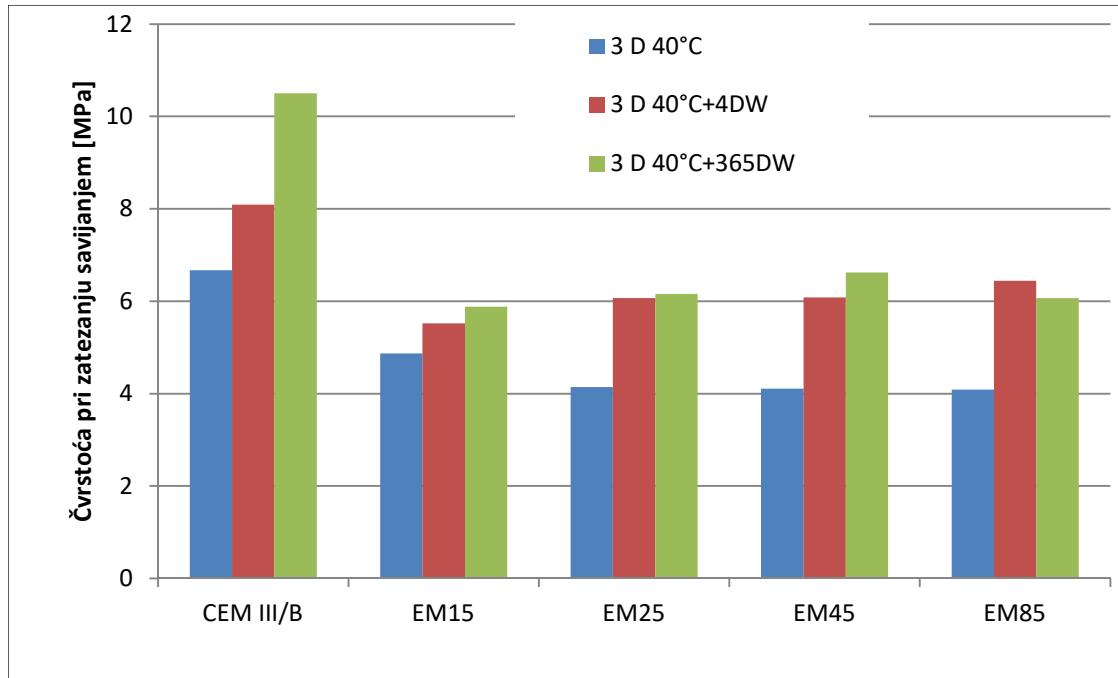


Slika 4.91 Uticaj dužine mlevenja OP TE Morava na razvoj čvrstoće pri pritisku malterskih mešavina negovanih 3 dana na 40°C

Na osnovu rezultata zamene CEM III/B OP-om iz TE Morava, prikazanih na Slici 4.91 uočljiva je velika razlika upoređujući sa rezultatima dobijenih zamenom sa svežim letećim pepelom. Uticaj trajanja mehaničke aktivacije pepela TE Morava se u ovom slučaju već može opaziti, ali je bez velikog značaja. Upoređujući rezultate nakon 3 dana inicijalne nege, EM45 je dao bolje rezultate od EM15, EM25 i EM85 za 25%, 16% i 5%, respektivno. Drugi veoma važan zaključak je nedostatak kasnijeg priraštaja čvrstoće pri pritisku po bilo kom režimu nege. To je i bilo za očekivati, imajući u vidu da se radi o pepelu koji je bio deponovan a pepelištu, u vlažnoj sredini više od 10 godina, tj. ovo je dokaz njegove hemijske inertnosti u smislu pučolankih reakcija.

Čvrstoće pri zatezanju savijanjem su prikazane na Slici 4.92 a rezultati su navedeni u Prilogu 4.28. Na osnovu rezultata se može zaključiti da finoća mliva kod OP TE Morava takođe nema uticaja na rezultate dobijene neposredno nakon inicijalne nege. Ostali rezultati, koji su mereni u vlažnom stanju pokazuju određene promene

i međusobne razlike, ali su verovatno većim delom rezultat koeficijenta razmekšanja i kao ne pokazuju veće promene tokom vremena, što takođe potvrđuje da u ovom slučaju pucolanska aktivnost pepela je zanemarljiva.



Slika 4.92 Uticaj dužine mlevenja OP TE Morava na razvoj čvrstoće pri zatezanju savijanjem malterskih mešavina negovanih 3 dana na 40°C



**ZELENI BETONI VISOKIH  
PERFORMANSI SA VELIKOM  
KOLIČINOM  
LETEĆEG PEPELA**



## 5. ZELENI BETONI VISOKIH PERFORMANSI SA VELIKOM KOLIČINOM LETEĆEG PEPELA (ZBVPP)

Sve mešavine betona su koncipirane uvažajući određene principe:

- **zeleni betoni** su dizajnirani sa namerom da se koriste prvenstveno SCM-i, a zamenjujući cementni klinker u što manjoj meri
- prilikom primene SCM-a, cilj je koristiti **ekološki opravdaniji** materijal u što većoj količini - stoga je minimalan udio pepela iz TE 30 %m/m
- sve mešavine su pravljene uzimajući u obzir i **trajnost betona** – kao princip održivog razvoja. Stoga su određene izvesne granice:
  - minimalna količina veziva 450 kg/m<sup>3</sup>,
  - maksimalni vodovezivni faktor (w/b) 0,4
  - Minimalna čvrstoća pri pritisku nakon inicijalne nege 40 MPa
  - maksimalna količina pepela iz TE u vezivu 50 % m/m
- ZBVPP betoni su pokazali izuzetnu kompatibilnost sa superplastifikatorima na bazi polikarboksilat-etara. Ipak maksimalna količina superplastifikatora u mešavinama je bila ograničena na 2% u odnosu na količinu veziva.
- sa aspekta primenjivosti ZBVPP veoma je važna ugradljivost sveže mešavine. Stoga je ciljna konzistencija svežih mešavina betona bila S3
- za agregat je izabran rečni agregat  $D_{max}=16$  mm. Kako bi se smanjio uticaj slabih zrna na evaluaciju rezultata, frakcija 4/8 je zamenjena sa drobljenim agregatom – eruptivcem. Nakon neočekivano dobrih rezultata, u nekim mešavinama je sav krupan agregat zamenjen sa drobljenim eruptivcem, pošto se čvrstoća rečnog agregata pokazala nedovoljnim. Prilikom zamene rečnog agregata (oblog zrna) sa drobljenim (uglasta zrna) u mešavini,

primećeno je da pri istoj recepturi ugradljivost ostaje skoro ista. To je verovatno posledica relativno velike količine veziva u mešavinama i aditiva, ali u svakom slučaju je još jedan dokaz kompatibilnosti ternarnih mešavina i superplastifikatora na bazi PCE.

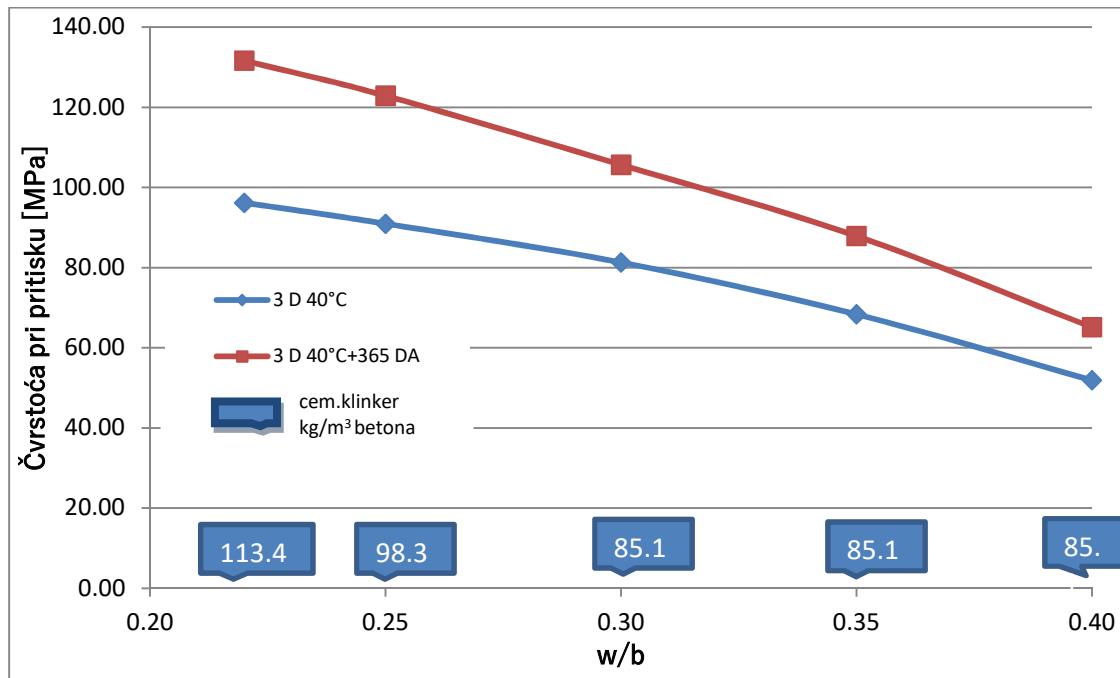
Prilikom pripreme mešavina prvo je kontrolisana ugradljivost sveže mešavine metodom sleganja (slump-test) i za prethodno određenu mešavinu je konzistencija korigovana kompatibilnim superplastifikatorom kako bi se postigla klasa S3. Ispitivanja ZBVPP sa letećim pepelom iz TENT B i sa odležalim, starim pepelom sa pepelišta TE Morava su urađena zamenom 30%, 40% i 50% m/m CEM III/B u vezivu.

Nakon mešanja uzorci su ugrađeni u kalupe na vibro-stolu, izmerena je postignuta zapreminska masa svežeg betona, pa su zapakovani sa streč-folijom (manji kalupi) ili pokriveni plastičnom folijom sa gornje strane i stavljeni su na 40°C u sušnicu 3 dana. Nakon toga utvrđena zapreminska masa, a posle nekoliko sati (dok su se uzorci ohladili) čvrstoća pri pritisku i zatezanju savijanjem. Uzorci betona na kojima se ispituje čvrstoća pri pritisku i nakon godinu dana – su držani u laboratorijskim uslovima na vazduhu.

## 5.1 ZBVPP SA SVEŽIM LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B

Sve mešavine betona su pravljene sa mehanički aktiviranim letećim pepelom TENTB-240, koji je izabran na osnovu prethodnih rezultata (Poglavlje 4) ternarnih mešavina. Za mešavine 325T i 32T frakcija rečnog agregata 8/16 je zamenjena sa drobljenim – granitom. Za w/b od 0,3 do 0,4 količina ternarnog sistem veziva (450kg) je bila dovoljna da se obezbedi adekvatna ugradljivost pri istovremenom smanjenju količine vode i povećanja količine superplastifikatora. Za  $w/b < 0,3$ , količina veziva u mešavini se povećavala na taj način, da zapremina veziva ( $V_b$ ) i vode ( $V_w$ ) u mešavini bude  $V_b + V_w \leq 0,34 \text{ m}^3$  – što odgovara zapremini veziva i vode u polaznoj recepturi sa 450 kg veziva i  $w/b = 0,4$ .

Rezultati čvrstoće pri pritisku ZBVPP sa 30% m/m LP TENTB-240 u vezivu su prikazani u funkciji postignutog vodovezivnog faktora na Slici 5.1. Merenja su urađena nakon inicijalne nege 3 dana na 40° C (oznaka 3 D 40° C) i nakon godinu dana skladištenja na vazduhu u laboratoriji (oznaka 3 D 40° C + 365 DA). Takođe na Slici 5.1 je prikazana i količina cementnog klinkera u kg/m<sup>3</sup> ugrađenog, svežeg betona.



Slika 5.1 Čvrstoća pri pritisku betona sa 30 % m/m LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora

Važno napomenuti da mešavina 32T nije mogla da se uradi, tj. vodovezivni faktor 0,2 nije bilo moguće postići pri adekvatnoj konzistenciji, stoga najniži postignut vodovezivni faktor sa LP TENTB-240 iznosi 0,22 i to pri konzistenciji S2.

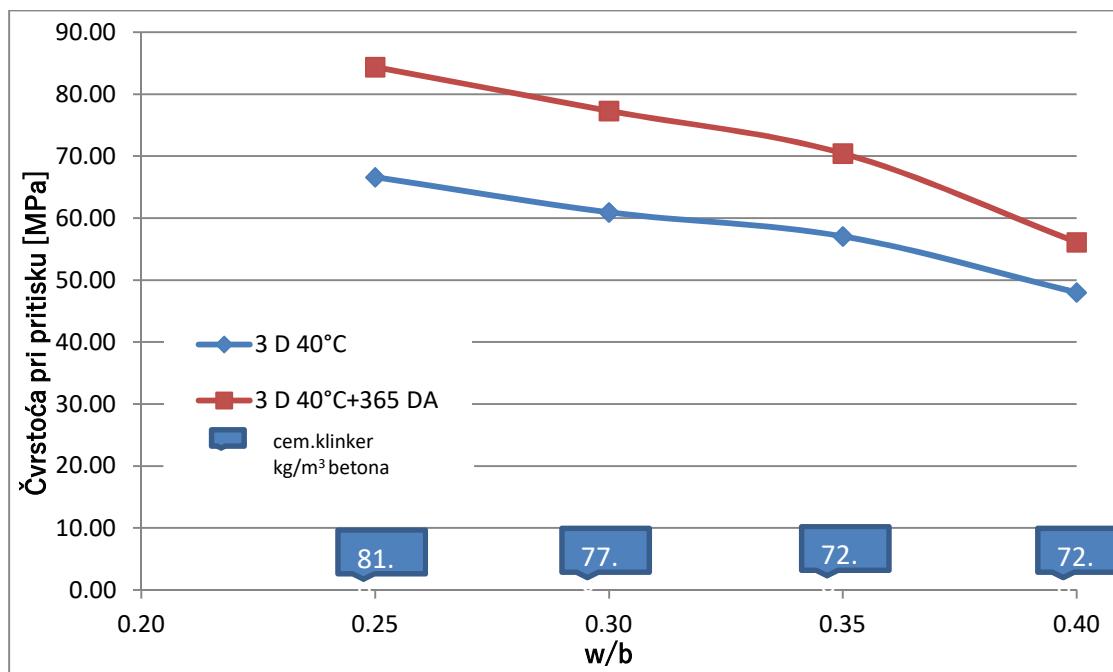
Rezultati prikazani na Slici 5.1 predstavljanju prosečne vrednosti 3 merena rezultata, koji su dati u Prilogu 5-1. Kao što se vidi, čvrstoće pri pritisku ZBVPP posle inicijalne nege imaju značajan priraštaj nakon godinu dana, koji je u funkciji

vodovezivnog faktora. Za vodovezivni faktor 0,4 taj priraštaj je „najmanji“, iznosi 26%, a pri  $w/b=0,22$  taj priraštaj je najveći - 37%.

Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem ZBVPP sa 30% m/m LP TENTB-240 u vezivu su prikazani u funkciji postignutog vodovezivnog faktora na Slici 5.4. Merenja su urađena nakon inicijalne nege 3 dana na  $40^{\circ} C$  i predstavljanju prosečne vrednosti 3 merena rezultata, koji su dati u Prilogu 5-1.

Upoređujući rezultate čvrstoće pri zatezanju savijanjem i čvrstoće pri pritisku, može se konstatovati da se taj odnos menja u funkciji vodovezivnog faktora i kreće se od 8,95 (za  $w/b=0,4$ ) do 7,12 (za  $w/b=0,22$ ). Upoređujući taj odnos sa preporukama pravilnika za beton i rezultatima koje se koriste u literaturi, može se konstatovati da je on manji (povoljniji). Čvrstoća pri zatezanju savijanjem nije merena nakon godinu dana, ali uzimajući u obzir određen gubitak vlage tokom vremena (smanjuje čvrstoću), ali i ustanovljen značajan rast čvrstoće pri pritisku, za očekivati je da se taj odnos tokom vremena značajno ne menja.

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku ZBVPP sa 40% m/m LP TENTB-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.2.



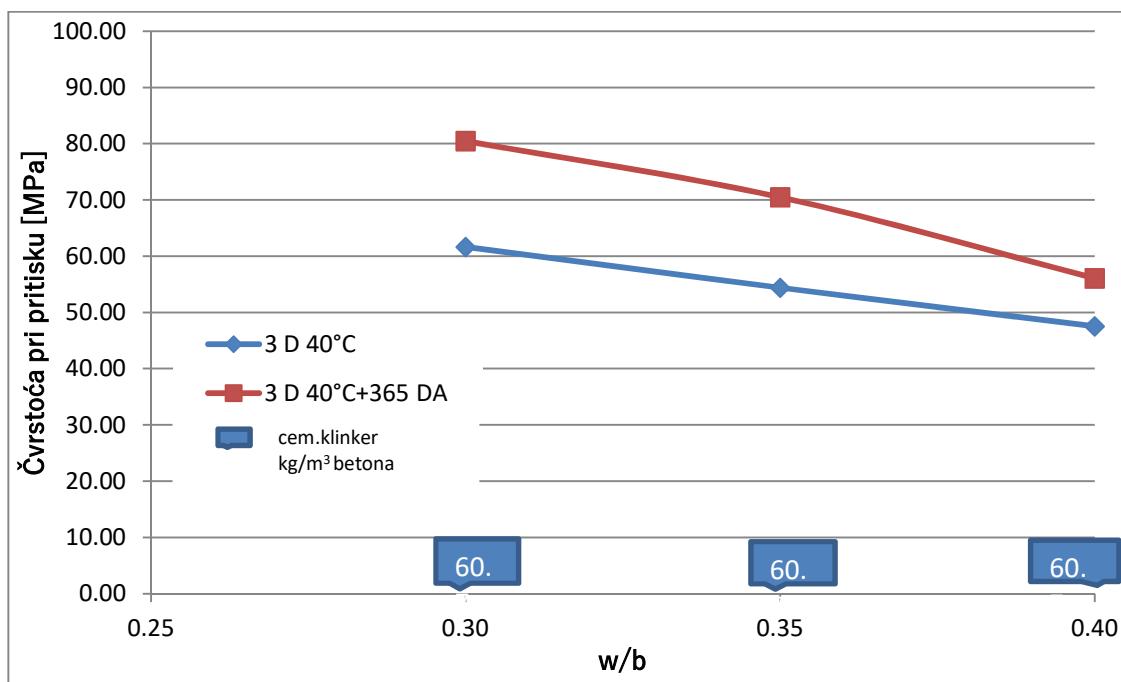
Slika 5.2 Čvrstoća pri pritisku betona sa 40 % m/m LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora

Zamenom CEM III/B sa 40 % m/m LP TENTB-240 postignut je najniži vodovezivni faktor od 0,25. Povećana količina pepela u mešavini postepeno smanjuje čvrstoće pri pritisku upoređujući sa odgovarajućim rezultatima koji su postignuti zamenom 30 %m/m letećeg pepela na Slici 5.1. Primetan je i efekat smanjenja doprinosa čvrstoće pri pritisku nakon godinu od inicijalne nege. Priraštaji čvrstoće su manji i kreću od 17% do 27% nakon godinu dana, pri istoj tendenciji promene kao i sa 30% m/m pepela. S druge strane, i zamenom 40 %m/m veziva pepelom vodovezivni faktor od 0,4 se pokazao dovoljnim da se dobije beton čvrstoće veće od 40 MPa i pri značajno manjoj količini cementnog klinkera po jedinici zapremine betona.

Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem ZBVPP sa 40% m/m LP TENTB-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.4. Merenja su urađena nakon inicijalne nege 3 dana na 40° C i predstavljanju prosečne vrednosti 3 merena rezultata, koji su dati u Prilogu 5-1.

Odnos postignutih čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri zatezanju savijanjem je još manji (tj. povoljniji) u poređenju sa prethodnom grupom betona. Odnos se menja u funkciji vodovezivnog faktora i kreće se od 8,62 (za  $w/b=0,4$ ) do 5,27 (za  $w/b=0,25$ ). Vrednosti čvrstoća pri zatezanju savijanjem se značajno razlikuju (čak su i dvostruko veće) od računskih vrednosti, koje se dobijaju na osnovu njihove čvrstoće pri pritisku koristeći poznate iskustvene korelacije.

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku ZBVPP sa 50% m/m LP TENTB-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.3 i predstavljanju prosečne vrednosti 3 merena rezultata, koji su dati u Prilogu 5-1.

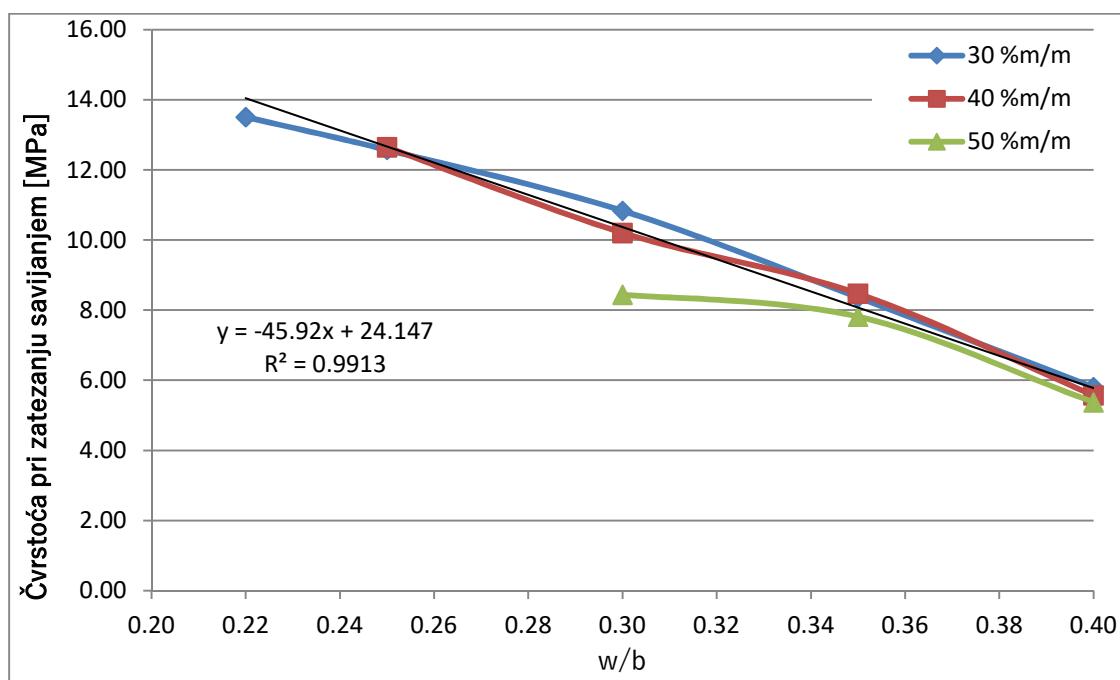


Slika 5.3 Čvrstoća pri pritisku betona sa 50 % m/m LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora

Zamenom CEM III/B sa 50 % m/m LP TENTB-240, vodovezivni faktor nije bilo moguće spustiti ispod 0,3 – pridržavajući se na početku utvrđenih principa/granica. Kao što se vidi, čvrstoće pri pritisku ZBVPP posle inicijalne nege takođe imaju značajan priraštaj nakon godinu dana, koji se u funkciji vodovezivnog faktora

menja. Za vodovezivni faktor 0,4 taj priraštaj iznosi 18%, a pri w/b=0,3 je najveći - 31%. Postignuti rezultati su vrednosno slični postignutim rezultatima sa 40 %m/m zamene pepela za odgovarajući vodovezivni faktor. To je veoma interesantno posmatrajući da su te čvrstoće postignute da znatno manjom količinom cementnog klinkera.

Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem ZBVPP sa 50% m/m LP TENTB-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.4. Merenja su urađena nakon inicijalne nege 3 dana na 40° C i predstavljanju prosečne vrednosti 3 merena rezultata, koji su dati u Prilogu 5-1.



Slika 5.4 Veza čvrstoća pri zatezanju savijanjem betona sa 30%, 40% i 50 % m/m LP TENTB-240 i vodovezivnog faktora

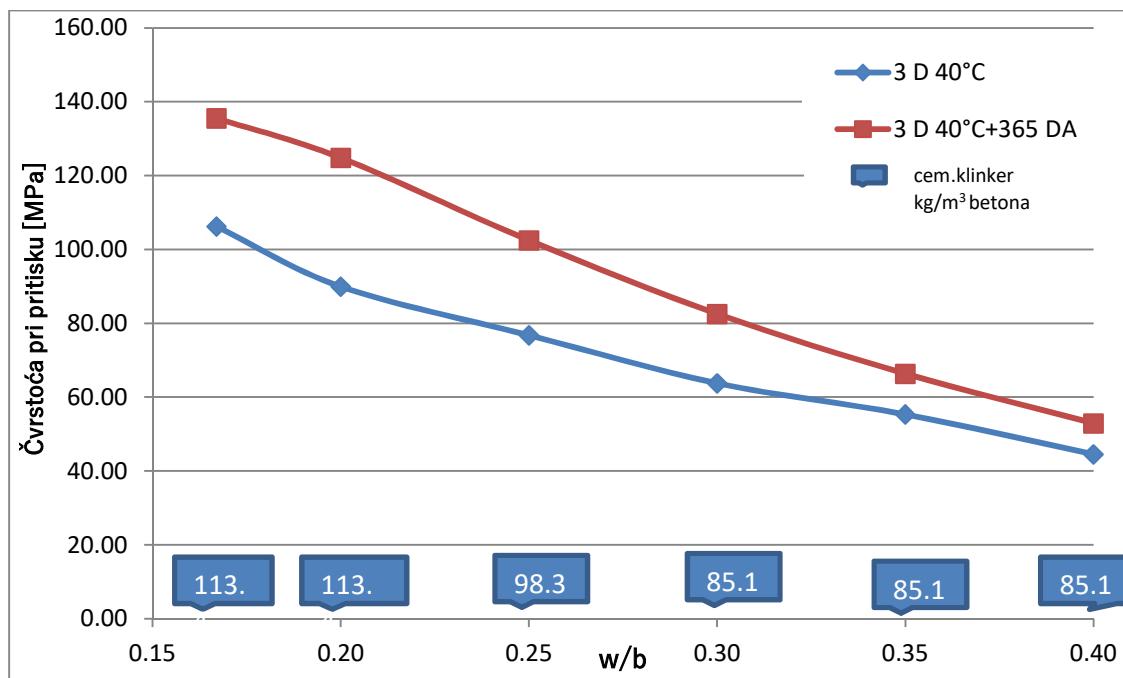
Posmatrajući rezultate čvrstoće pri zatezanju savijanjem zajedno, pri zamenama veziva sa 30%, 40% i 50 % m/m LP TENTB-240 može se uočiti, da zapravo količina udela pepela u vezivu na utiče na promenu čvrstoće pri zatezanju savijanjem. Kod 50 % m/m zamene, pri vodovezivnom faktoru 0,3 (što je granični slučaj) očigledno

nije postignuta adekvatna kompaktnost prilikom ugradnje betona, stoga je jedino tamo uočljivo odstupanje. Izuzev tog rezultata, može se zaključiti da čvrstoće pri zatezanju savijanjem ZBVPP sa LP iz TENT B zavise samo od vodovezivnog faktora, ne i od udela pepela u vezivu.

## 5.2 ZBVPP SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA

Sve mešavine betona su pravljene sa mehanički aktiviranim otpadnim pepelom TE Morava-240, koji je izabran na osnovu prethodnih rezultata (Poglavlje 4) ternarnih mešavina. Za mešavine sa vodovezivnim faktorom  $w/b < 0,3$  frakcija rečnog agregata 8/16 je zamjenjena sa drobljenim – granitom. Za  $w/b$  od 0,3 do 0,4 ukupna količina veziva od 450kg je bila dovoljna da se obezbedi adekvatna ugradljivost pri istovremenom smanjenju količine vode i povećanja količine superplastifikatora. Za  $w/b < 0,3$ , količina veziva u mešavini se povećavala na taj način, da zapremina veziva ( $V_b$ ) i vode ( $V_w$ ) u mešavini bude  $V_b + V_w \leq 0,34 \text{ m}^3$  – što odgovara zapremini veziva i vode u polaznoj recepturi sa 450 kg veziva i  $w/b = 0,4$ .

Rezultati čvrstoće pri pritisku ZBVPP sa 30% m/m OP TEMorava-240 u vezivu su prikazani u funkciji postignutog vodovezivnog faktora na Slici 5.5 i predstavljanju prosečne vrednosti 3 merena rezultata, koji su dati u Prilogu 5-2. Merenja su urađena nakon inicijalne nege 3 dana na  $40^\circ \text{ C}$  i nakon godinu dana skladištenja na vazduhu u laboratoriji.



Slika 5.5 Čvrstoća pri pritisku betona sa 30 % m/m OP TE Morava-240 u funkciji vodovezivnog faktora

Prilikom priprema i ugradnje mešavina sa udelom mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava-240 izuzetno dobra ugradljivost je bila očigledna. Zahvaljujući toj osobini klasa sleganja S3 je postignuta sa vodovezivnim faktorom  $w/b=0,2$  i pored toga što je upotrebljen drobljeni agregat. Kako bi se dalje istražili efekti smanjenja vodovezivnog faktora, napravljena je i mešavina sa vodovezivnim faktorom  $w/b=0,167$ , ali uz povećanje superplastifikatora na 3%. Tokom ugradnje je postignuta adekvatna kompaktnost i pored tako ekstremno niskog vodocementnog faktora, kao što su rezultati pokazali, a pored toga se može videti i na polomljenom uzorku nakon ispitivanja čvrstoće pri pritisku, koji je prikazan na Slici 5.6.

Kod ZBVPP sa 30 %m/m otpadnog pepela, koji se može smatrati hemijski inertnim takođe se može uočiti značajno povećanje čvrstoće nakon godinu dana, tokom koje nisu bili negovani vodom i bili su samo u suvoj sredini. Najniži priraštaj je postignut sa vodovezivnim faktorom 0,4 i iznosi 19%, a pri  $w/b=0,20$  taj priraštaj je najveći - 39%. Interesantno pri  $w/b=0,167$  taj priraštaj je manji, 28%. Najverovatnije je ta

mešavina bila jedina kod koje efektivni vodocementni faktor bio prenizak ( $w/c=0,238$ ) za razvoj hidratacionih i pucolanskih reakcija tokom godinu dana. Izuzev tog slučaja, kod ostalih mešavina takođe je primetna tendencija rasta priraštaja čvrstoće tokom vremena usled smanjenja vodovezivnog faktora, kao i u slučaju primene letećeg pepela.



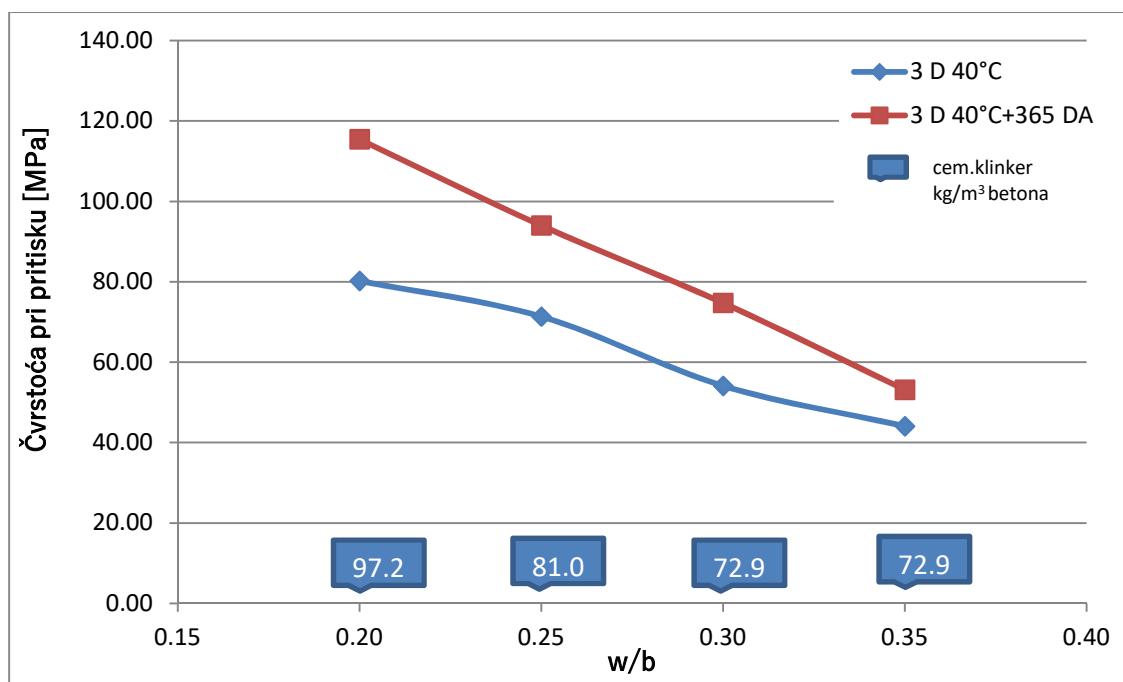
Slika 5.6 Polomljen uzorak ZBVPP sa 30 % m/m OP TE Morava-240 i  $w/b=0,167$  nakon ispitivanja čvrstoće pri pritisku

Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem ZBVPP sa 30% m/m mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.10. Merenja su urađena nakon inicijalne nege 3 dana na  $40^{\circ} C$  i predstavljanju prosečne vrednosti 3 merena rezultata, koji su dati u Prilogu 5-2.

Odnos rezultata čvrstoće pri zatezanju savijanjem i čvrstoće pri pritisku se kreće se od 7,03 (za  $w/b=0,4$ ) do 6,05 (za  $w/b=0,3$ ). Upoređujući taj odnos sa rezultatima pri 30% m/m zamene LP TENTB-240, može se konstatovati da je povoljniji (manji) kod

betona sa otpadnim pepelom. Međutim u ovom slučaju minimum ove vrednosti nije kod betona sa najnižim vodovezivnim faktorom, kao kod mešavina sa letećim pepelom. Nije čak ni u korelaciji sa vodovezivnim faktorom, nego sa količinom paste u betonu. Posmatrajući mešavine sa 30 %m/m otpadnog pepela u vezivu, najmanja zapremina paste (vezivo+voda) je kod mešavine sa vodovezivnim faktorom 0,3 i iznosi  $0,29 \text{ m}^3/\text{1m}^3$ .

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku ZBVPP sa 40% m/m OP TE Morava-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.7.



Slika 5.7 Čvrstoća pri pritisku betona sa 40 % m/m OP TE Morava-240 u funkciji vodovezivnog faktora

Zamenom CEM III/B sa 40 % m/m OP TE Morava-240 postignuta je klasa konzistencije S3 sa najnižim vodovezivni faktor od 0,20 bez ikakvih promena u prethodno postavljenim uslovima. Međutim, čvrstoća pri pritisku od 40 MPa je postignuta samo sa vodovezivnim faktorom od 0,35. Povećana količina pepela u

mešavini postepeno smanjuje čvrstoće pri pritisku upoređujući sa odgovarajućim rezultatima koji su postignuti zamenom 30 %m/m pepela na Slici 5.5.

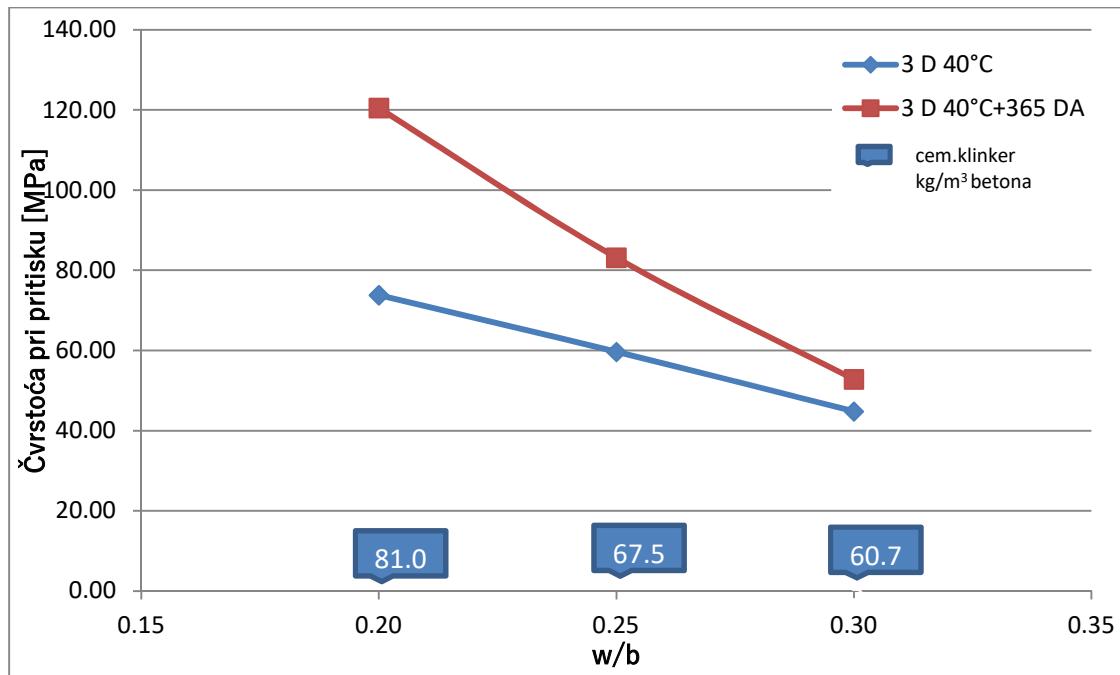
Može se primetiti da doprinosi čvrstoće pri pritisku, godinu dana nakon inicijalne nege značajnije rastu pri smanjenju vodovezivnog faktora. Priraštaji se menjaju od 21% ( $w/b=0,35$ ) do 44% ( $w/b=0,2$ ) nakon godinu dana, što se svakako može smatrati značajnim za godinu dana, pogotovo u suvoj sredini, na vazduhu. Odnos količine cementnog klinkera ( $kg/1m^3$ ) prema dobijenom 1 MPa čvrstoće pri pritisku se takođe značajno smanjuje što se može smatrati i jednim indikatorom performanse zelenih betona.

Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem ZBVPP sa 40% m/m OP TENTB-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.10. Merenja su urađena nakon inicijalne nege 3 dana na  $40^\circ C$  i predstavljanju prosečne vrednosti 3 merena rezultata, koji su dati u Prilogu 5-2.

U odnosu postignutih čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri zatezanju savijanjem može se opaziti velika razlika u funkciji vodovezivnog faktora. Dok za  $w/b=0,35$  ta vrednost iznosi 7,41, za  $w/b=0,3$ ,  $w/b=0,25$  i  $w/b=0,2$  se značajno smanjuje na 5,77, 5,51 i 5,47, respektivno. Imajući u vidu da se radi o betonima relativno velikih čvrstoćama pri pritisku, ti rezultati ukazuju da se radi o veoma kvalitetnoj vezi u kontaktnoj zoni između agregata i veziva.

Odnos se menja u funkciji vodovezivnog faktora i kreće se od 8,62 (za  $w/b=0,4$ ) do 5,27 (za  $w/b=0,25$ ). Vrednosti čvrstoća pri zatezanju savijanjem se značajno razlikuju (čak su i dvostruko veće) od računskih vrednosti, koje se dobijaju na osnovu njihove čvrstoće pri pritisku koristeći poznate iskustvene korelacije.

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku ZBVPP sa 50% m/m OP TE Morava-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.8.



Slika 5.8 Čvrstoća pri pritisku betona sa 50 % m/m OP TE Morava-240 u funkciji vodovezivnog faktora

Zamenom CEM III/B sa 50 % m/m OP TE Morava-240 je postignuta klasa konzistencije S3 sa najnižim vodovezivnim faktorom od 0,20 bez ikakvih promena u prethodno postavljenim uslovima. Na Slici 5.9 je prikazana izmerena konzistencija svežeg betona. Čvrstoća pri pritisku od 40 MPa je postignuta samo sa vodovezivnim faktorom od 0,30.

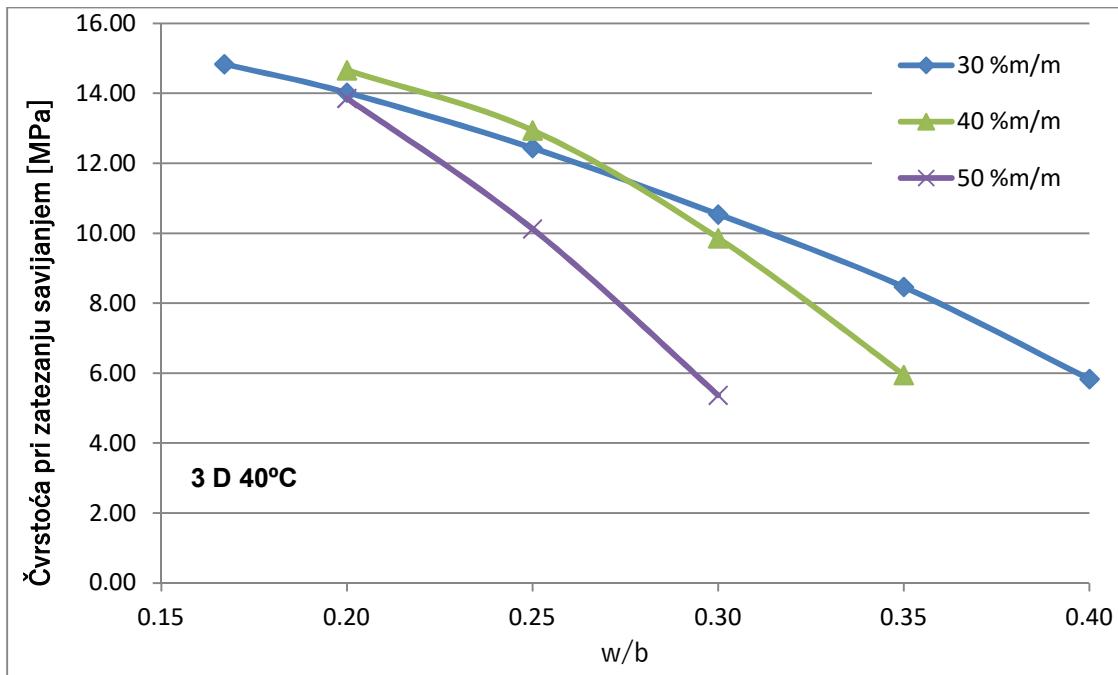


Slika 5.9 Konzistencija svežeg betona sa 50 % pepela u vezivu, sa vodovezivnim faktorom 0,2

Interesantno je primetiti da postepeno povećanje količine zamene CEM III/B sa ovom vrstom pepela za rezultat ima postepeno smanjenje vodovezivnog faktora za postizanje 40 MPa, ali pri vodovezivnom faktoru 0,2 nakon godinu dana čvrstoće pri pritisku ostaju skoro nepromenjene. Priraštaji se menjaju od 18% ( $w/b=0,35$ ) do 63% ( $w/b=0,2$ ) nakon godinu dana. Povećanje čvrstoće od 63% u suvoj sredini, na vazduhu je veoma značajno i ukazuje na jednu pojavu koja u ZBVPP se u značajnoj meri može iskoristiti – kako je dokazano. Radi se o unutrašnjoj nezi betona. Naime, beton sa  $W/B=0,2$  zaista imaju ekstremno malu količinu vode, ali je zamenom cementa sa hemijski inertnim SCM u takođe velikoj količini (50%) postignut je zapravo vodocementni faktor  $w/c=0,4$ . Što znači da u svežoj mešavini betona ima dovoljne količine vode za proces hidratacije i za pucolanske reakcije. Nakon ugradnje, tokom inicijalne nege dolazi do relativno brzog očvršćavanja i na taj način u očvrsłom betonu, u porama ostaje određena količina slobodne vode. Ta slobodna voda je zarobljena velikim otporom prema difuziji samog betona usled izuzetno kompaktne strukture i na taj način tokom vremena na efikasan način slobodna voda postane hemijski vezana voda.

Odnos količine cementnog klinkera ( $\text{kg}/1\text{m}^3$ ) prema dobijenom 1 MPa čvrstoće pri pritisku je izuzetno nizak. Npr. za mešavinu sa 50% OPTE Morava-240 i  $w/b=0,2$  taj odnos je **0,67 kg/MPa** po  $1\text{m}^3$  ugrađenog betona. Radi upoređenja sa običnim betonima, za marke betona, koje se najčešće upotrebljavaju taj odnos je oko **10 kg/MPa** cementnog klinkera po  $1\text{m}^3$  ugrađenog betona, dakle približno 15 puta manje.

Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem ZBVPP sa 50% m/m OP TENTB-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.10. Merenja su urađena nakon inicijalne nege 3 dana na  $40^\circ \text{C}$  i predstavljanju prosečne vrednosti 3 merena rezultata, koji su dati u Prilogu 5-2.

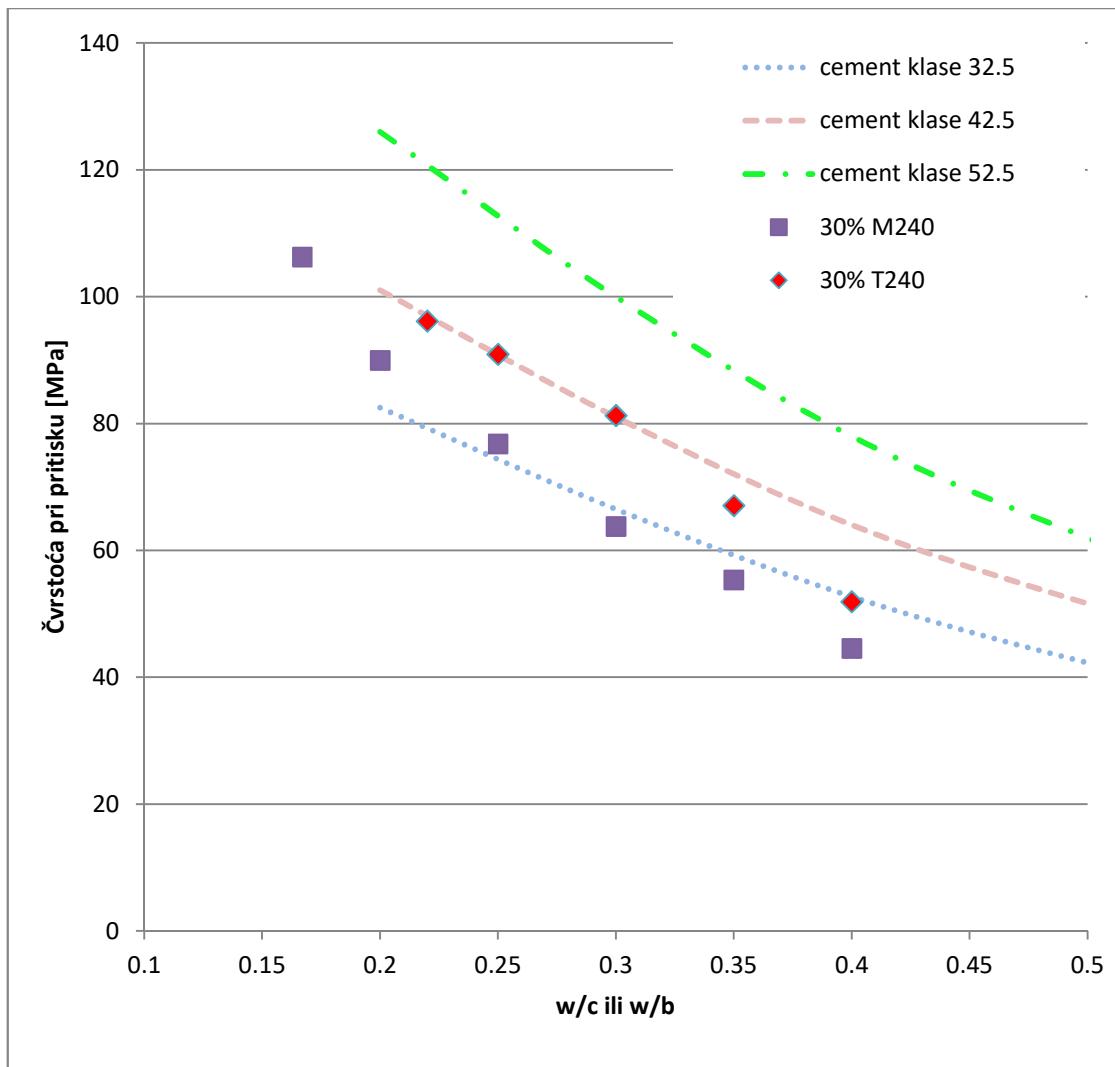


Slika 5.10 Veza čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona sa 30 %, 40 % i 50 % m/m OP TE Morava-240 i vodovezivnog faktora

U slučaju udela od 50 % m/m pepela postignute čvrstoće pri zatezanju savijanjem su u različitoj korelaciji sa čvrstoćama pri pritisku u funkciji vodovezivnog faktora. Dok za  $w/b=0,30$  ta vrednost iznosi 8,34, a za  $w/b=0,25$  i  $w/b=0,2$  je značajno manje 5,89 i 5,32, respektivno.

Ako se dobijeni rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem sa OP TE Morava-240 uporede sa rezultatima dobijenim LP TENTB-240 može se uočiti veoma različita tendencija. Dok čvrstoća pri zatezanju savijanjem ZBVPP sa svežim, hemijski aktivnim letećim pepelom zavisi samo od postignutog vodovezivnog faktora, kod betona sa otpadnim, hemijski inertnim pepelom ona zavisi i od količine pepela u mešavini.

Dobijenih rezultata sa obe vrste mehanički aktiviranih pepela se mogu analizirati i upoređenjem sa Valcovim-krivama čvrstoće betona pri pritisku nakon 28 dana za klase čvrstoće cementa 32.5, 42.5 i 52.5 kao što je prikazano na Slici 5.11.



Slika 5.11 Čvrstoća betona pri pritisku u funkciji vodocementnog faktora i klase cementa i ZBVPP sa 30% pepela (OP TE Morava-240 i LP TENTB-240)

На основу горе приказаних резултата може се видети да металуршки цемент CEM III/B 32,5N LH/SR заменом са 30% механички активираног LP TENTB-240 практично прелази у класу чврстоће 42.5. Опадни пепео има бољу уградљивост и практично мању потребу за воду од летећег пепела за  $w/b=0,05$ . Ако се Слика 5.11 посматра на тај начин, резултати ZBVPP са отпадним пепелом су веома слични резултатима ZBVPP са летећим пепелом.

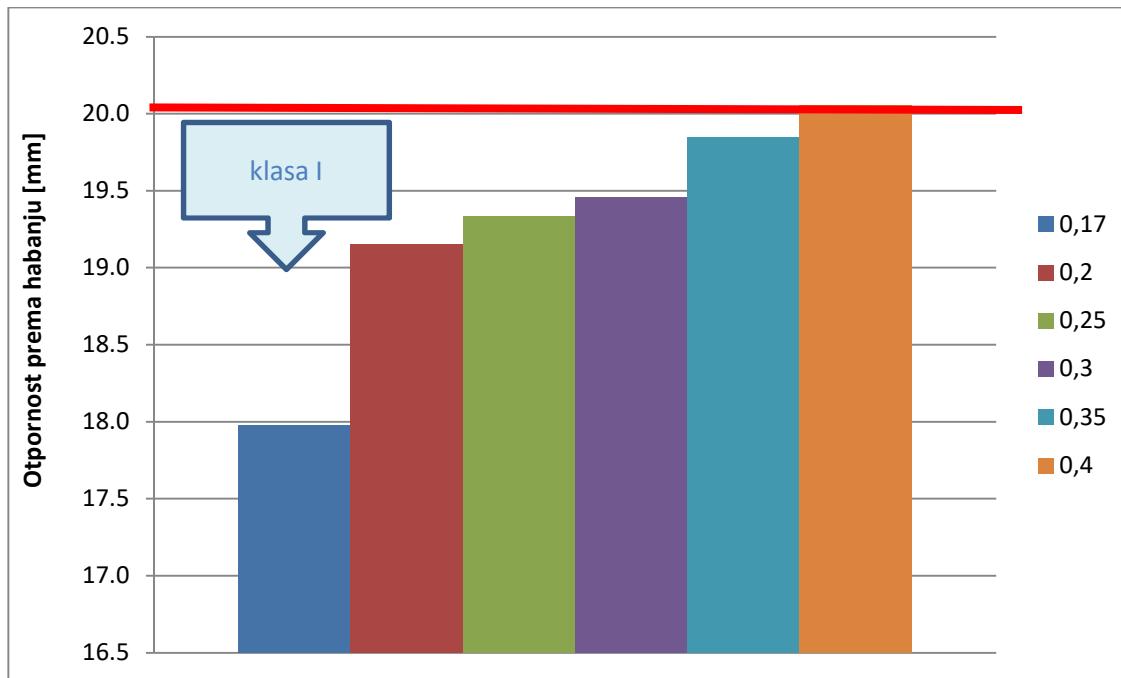
### 5.3. OTPORNOST ZBVP NA HABANJE

Prema dostupnoj literaturi i granulisana zgura i pepeo iz TE su SCM koji zamenjujući određenu količinu cementa, u opštem slučaju smanjuju njegovu otpornost na habanje. Pored toga, kako je već navedeno u Poglavlju 2, betoni sa manje od 20 % cementnog klinkera u vezivu su bili veoma upitni po pitanju otpornosti na habanje.

Ispitivanja otpornosti na habanje su urađena na uzorcima ZBVP od istih mešavina na kojima su utvrđena i čvrstoće pri pritisku i pri zatezaju savijanjem. Merenja su urađena nakon 3 dana nege na  $40^{\circ}$  C + 4 dana na  $20^{\circ}$  C na vazduhu. Prilikom ispitivanja se koristila metoda širokog točka koja je opisana u Poglavlju 3.

#### 5.3.1. OTPORNOST NA HABANJE ZBVP SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA

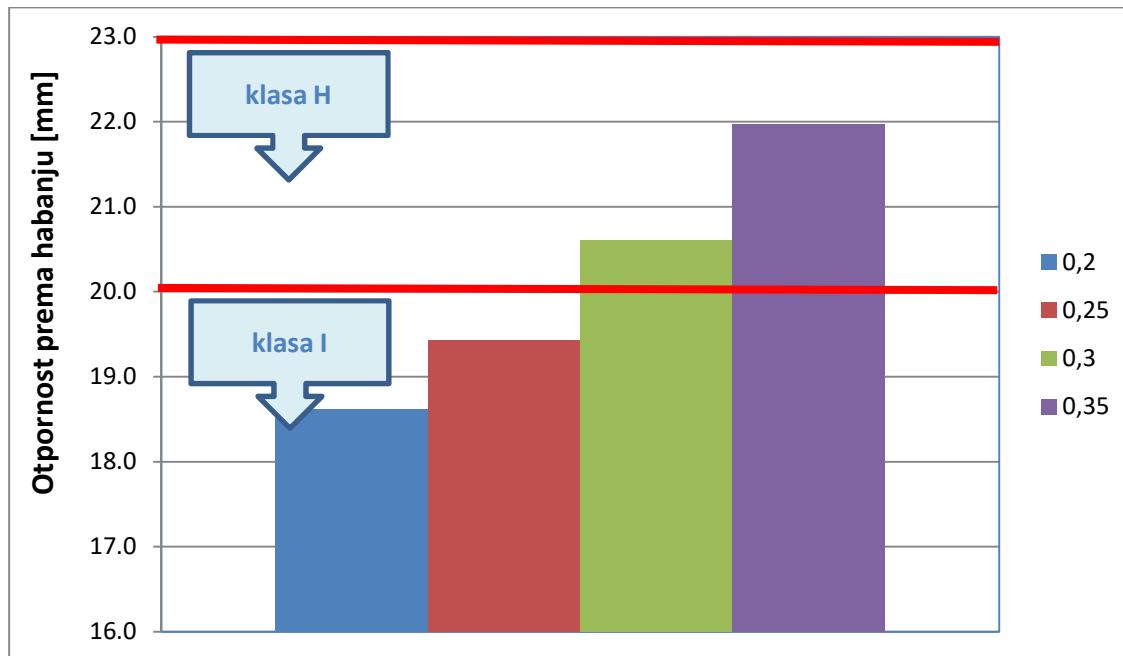
Rezultati ispitivanja otpornosti prema habanju uzorka sa 30% mehanički aktiviranog pepela sa pepelišta OPTE Morava-240 su prikazani na Slici 5.12, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su navedene u Prilogu 5-3.



Slika 5.12 Otpornost ZBVPP na habanje sa 30% OP TE Morava 240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)

Na osnovu rezultata se može oceniti da su svi betoni zadovoljili klasu I – otpornosti betona ( $< 20 \text{ mm}$ ), koja je najotpornija klasa prema standardima za betonske prefabrikate [156, 157, 158]. Dakle, ovi betoni na osnovu svoje izmerene otpornosti prema habanju bi mogli da se koriste za popločavanje najopterećenijih habajućih spoljašnjih površina (trotoari, parkinzi, trgovи, itd...)

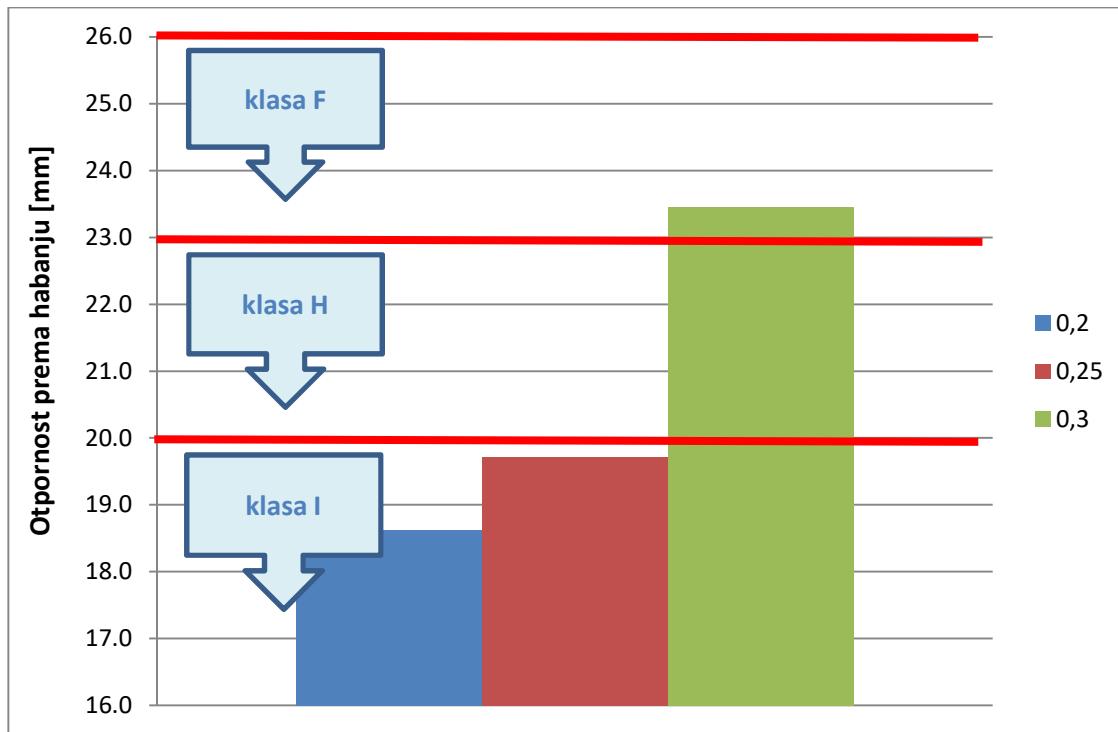
Rezultati ispitivanja otpornosti prema habanju uzorka sa 40% mehanički aktiviranog pepela sa pepelišta OPTE Morava-240 su prikazani na Slici 5.13, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su navedene u Prilogu 5-4.



Slika 5.13 Otpornost ZBVPP na habanje sa 40% OP TE Morava 240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)

Na osnovu rezultata se može oceniti da su betoni sa 40% pepela i  $W/B < 0,3$  zadovoljavaju klasu I otpornosti betona na habanje, dok sa  $W/B \geq 0,3$  zadovoljavaju klasu H ( $< 23\text{mm}$ ) – koja je srednja klasa otpornosti betona prema habanju.

Rezultati ispitivanja otpornosti prema habanju uzoraka sa 50% mehanički aktiviranog pepela sa pepelišta OPTE Morava-240 su prikazani na Slici 5.14, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su navedene u Prilogu 5-5.



Slika 5.14 Otpornost ZBVPP na habanje sa 50% OP TE Morava 240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)

Na osnovu rezultata betoni sa 50% pepela i  $W/B < 0,3$  spadaju u klasu I otpornosti betona na habanje, dok sa  $W/B \geq 0,3$  zadovoljavaju treću klasu F ( $< 26\text{mm}$ ), što je najniža klasa otpornosti betona prema habanju.

### 5.3.2. OTPORNOST NA HABANJE ZBVPP SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENTB

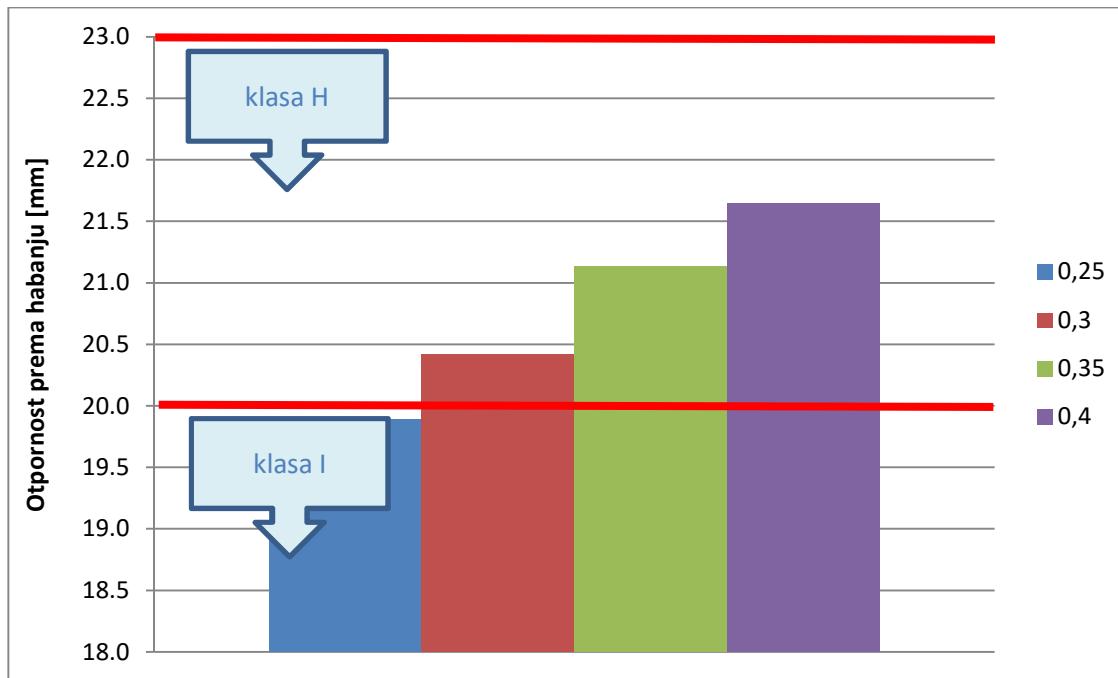
Rezultati ispitivanja otpornosti prema habanju uzoraka sa 30% mehanički aktiviranog letećeg pepela TENTB-240 su prikazani na Slici 5.15, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su navedene u Prilogu 5-6.



Slika 5.15 Otpornost ZBVPP na habanje sa 30% letećeg pepela TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)

Na osnovu rezultata se može oceniti da su svi betoni zadovoljili klasu I – otpornosti betona, koja je najotpornija klasa prema standardima za betonske prefabrikate [156, 157, 158] koji će tokom eksploatacije biti izloženi mehaničkom uticaju habanja. Veoma slično rezultatima sa otpadnim pepelom i ove mešavine letećim pepelom su pokazali izvanrednu otpornost prema habanju posmatrajući ekstremno malu količinu cementnog klinkera (<19%) u vezivu.

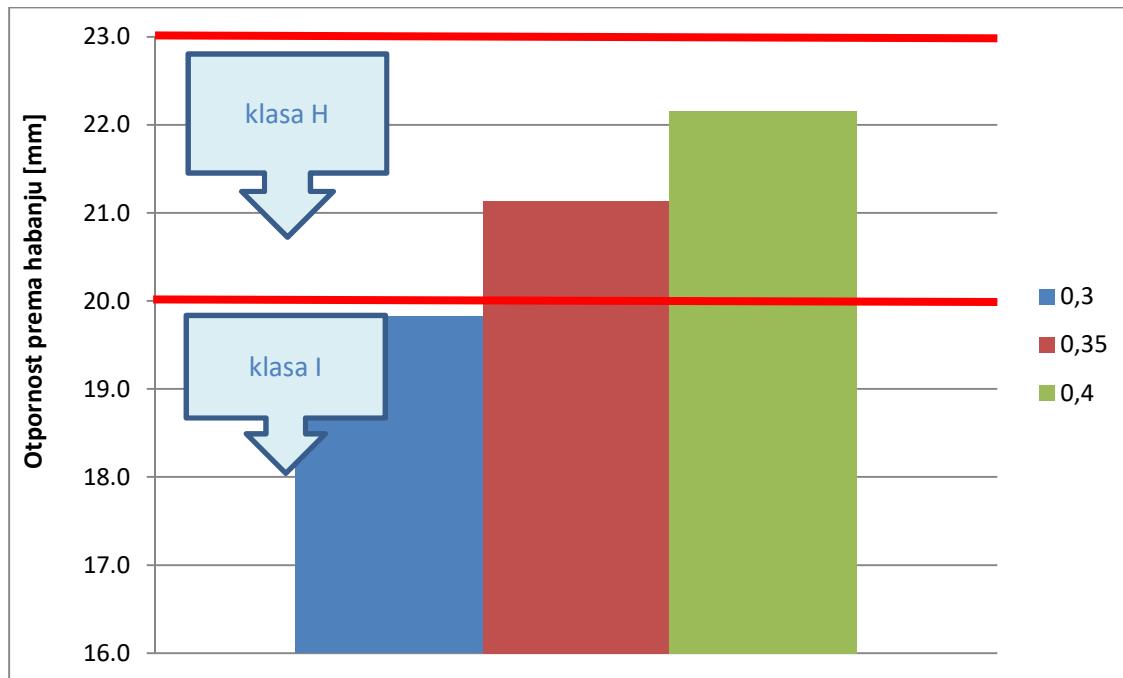
Rezultati ispitivanja otpornosti prema habanju uzoraka sa 40% mehanički aktiviranog letećeg pepela TENTB-240 su prikazani na Slici 5.16, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su navedene u Prilogu 5-7.



Slika 5.16 Otpornost ZBVPP na habanje sa 40% letećeg pepela TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)

Na osnovu rezultata se može oceniti da betoni sa 40% pepela i  $W/B < 0,3$  zadovoljavaju klasu I otpornosti betona na habanje, dok sa  $W/B \geq 0,3$  zadovoljavaju klasu H, pri čemu je očigledno da pri istim vodovezivnim faktorom i ekvivalentnom količinom zamene pepela, LP iz TENT B je pokazao značajno bolju otpornost prema habanju.

Rezultati ispitivanja otpornosti prema habanju uzorka sa 50% mehanički aktiviranog letećeg pepela TENTB-240 su prikazani na Slici 5.17, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su navedene u Prilogu 5-8.



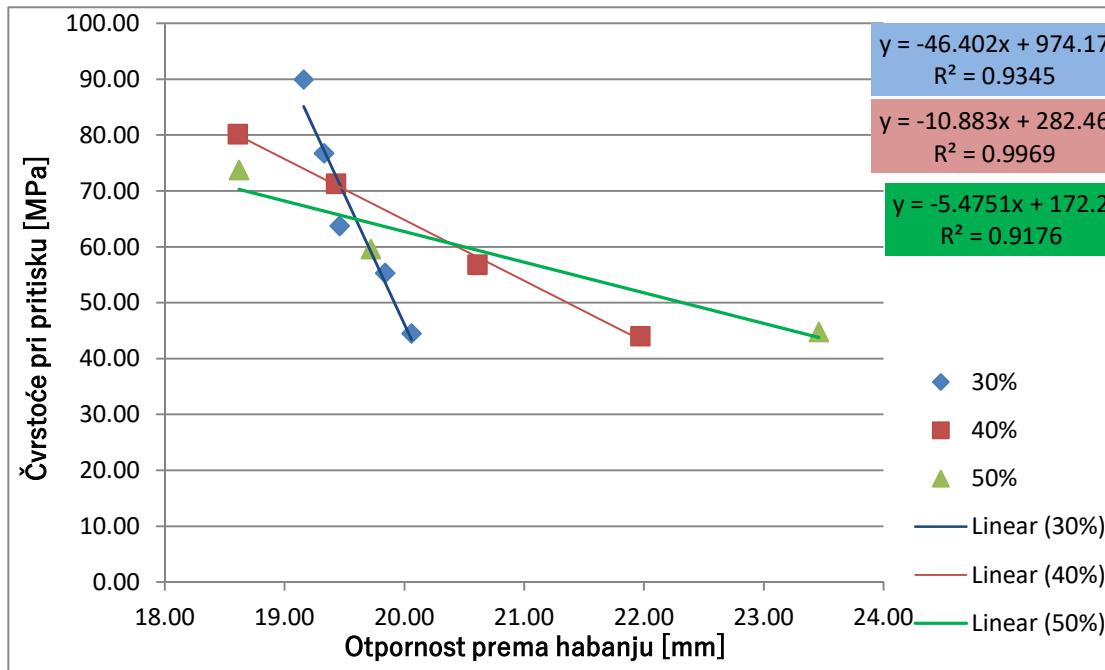
Slika 5.17 Otpornost ZBVPP na habanje sa 50% letećeg pepela TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora (W/B)

Na osnovu rezultata se može oceniti da betoni sa 50% pepela i  $W/B < 0,3$  spadaju u klasu I otpornosti betona na habanje, dok sa  $W/B \geq 0,3$  zadovoljavaju klasu H ( $< 23\text{mm}$ ). Na osnovu ovih rezultata može se oceniti da i pri ekstremno niskoj količini cementnog klinkera ( $< 14\%$ ) i sa visokim sadržajem letećeg pepela (50% m/m) u vezivu je postignuta odlična otpornost prema habanju.

### Zaključci

Kada je ova osobina ZBVPP u pitanju, slično običnim betonima, ona je u korelaciji sa čvrstoćom pri pritisku. Ali za razliku od običnih betona kod ZBVPP je otpornost prema habanju i funkcija udela zamenjujućeg pepela u vezivu, pored čvrstoće pri pritisku.

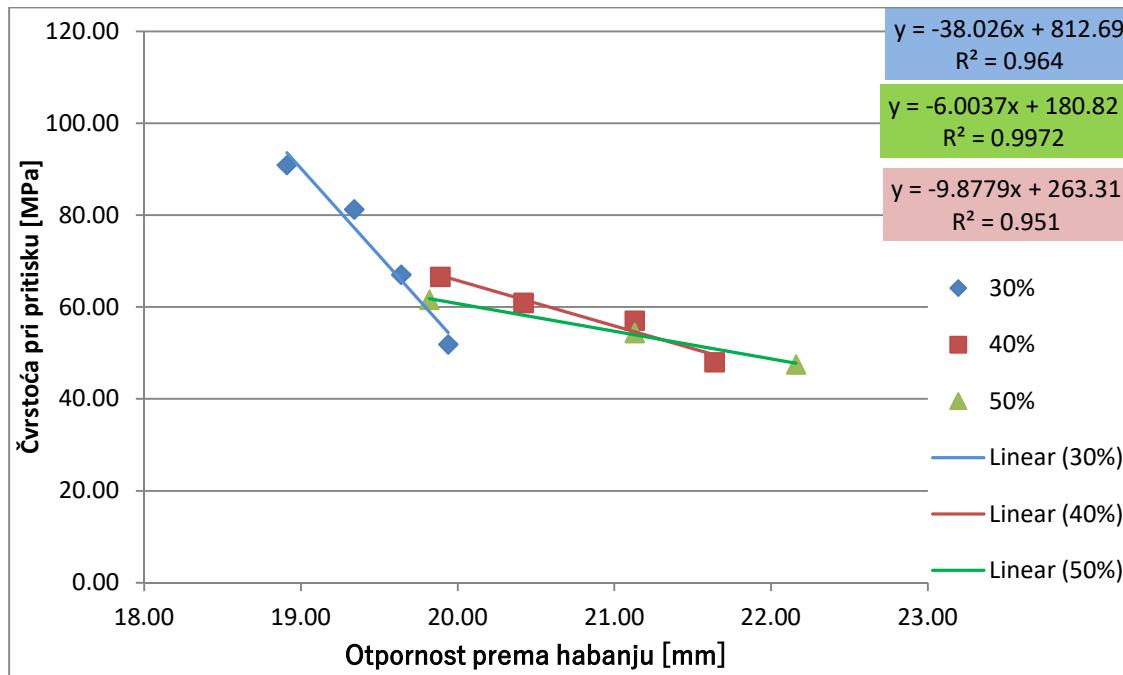
Na Slici 5.18 je prikazana korelacija kod betona sa otpadnim pepelom. Iz analize je izostavljen rezultat betona sa krupnom frakcijom od drobljenog agregata, pošto ona značajno utiče na otpornost pri habanju kao što se i na Slici 5.12 vidi.



Slika 5.18 Korelacija otpornosti ZBVPP na habanje i čvrstoće pri pritisku kod mehanički aktiviranog OPTE Morava240

Kao što se na Slici 5.18 vidi povezanost čvrstoće i otpornosti prema habanju se veoma jednostavno može predstaviti linearnom funkcijom sa veoma dobim koeficijentom korelacije za svaku grupu rezultata prema % zamene CEMIII/B sa pepelom.

Na Slici 5.19 je prikazana korelacija kod betona samehanički obrađenim letećim pepelom iz TENT B. I kod ove analize je izostavljen rezultat betona sa krupnom frakcijom od drobljenog agregata kod w/b=0,22 – iz već gore objašnjenog razloga.



Slika 5.19 Korelacija otpornosti ZBVPP na habanje i čvrstoće pri pritisku kod mehanički aktiviranog letećeg pepela TENTB-240

Na Slici 5.19 je povezanost čvrstoće pri pritisku i otpornosti prema habanju ZBVPP takođe predstaljena linearnom funkcijom sa veoma dobrom koeficijentom korelacije za svaku grupu rezultata prema % zamene CEMIII/B sa pepelom.

Pored prezentovanih rezultata ispitivanja otpornosti prema habanju treba napomenuti da vrednost otpornosti prema habanju od 18 mm se približava kvalitetu industrijskih podova koji uglavnom imaju otpornost od 15-18 mm. To jeste interesantno, jer upotrebljen je običan rečni pesak, pri visokom sadržaju pepela (30-50%) i veoma niskom sadržaju cementnog klinkera (13-19%) u vezivu. Što je imajući u vidu preporuke važećih standarda za beton [77,78]- iznenađujuće, pogotovo po pitanju visoke količine pepela.

Za moguću praktičnu primenu je dodatan argument da su ove osobine ZBVPP izmerene 7 dana nakon proizvodnje. Od toga je 3 dana inicijalan nega upakovanih

uzoraka betona na  $40^{\circ}$  C i 4 dana na  $20^{\circ}$  C na vazduhu. To praktično znači 2 prednosti u poređenju sa postojećom praksom:

- vremenski, mnogo raniju moguću primenu, sa adekvatnim kvalitetom da se obezbedi trajnost betona već nakon 7 dana – naspram 90 dana u [47, 48, 49, 50, 51]
- eliminaciju rizika u efikasnosti adekvatne nege tokom 28 ili 90 dana .

Proizvodnjom ZBVPP na prikazan način je obezbeđena otpornost na habanje betona sa visokim sadržajem SCM-a, koja je veoma kritična kod proizvodnje i nege na uobičajen način.

## 5.4. DUBINA PENETRACIJE VODE POD PRITISKOM

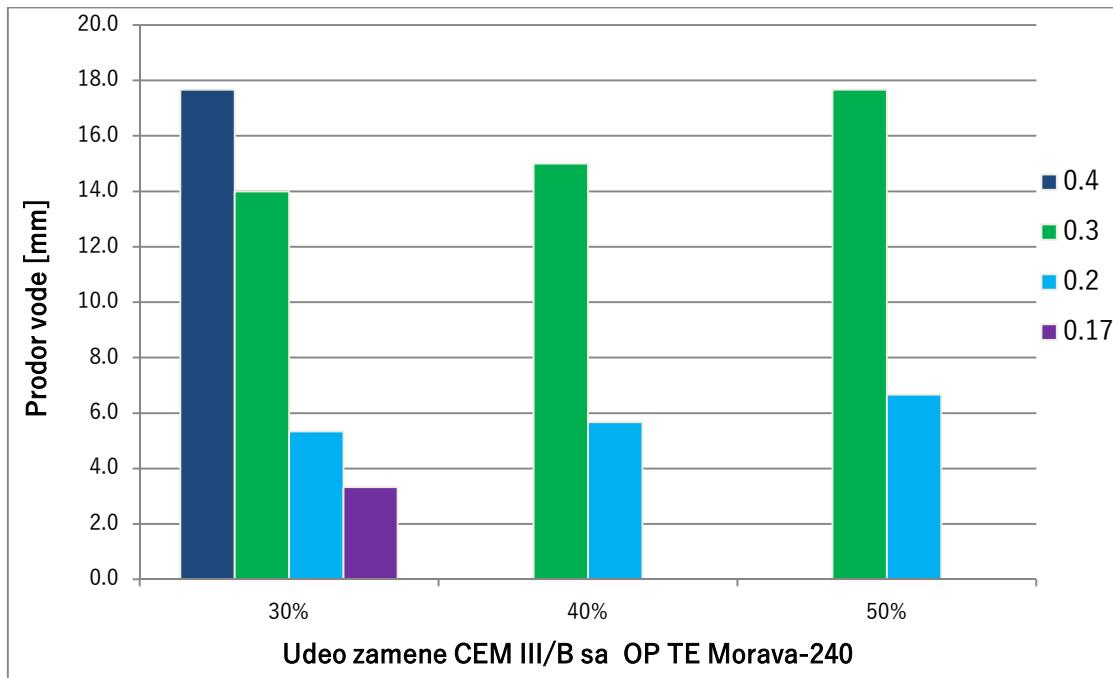
Jedan od najvažnijih pokazatelja trajnosti betona je njegova permeabilnost-propustljivost. Betoni sa malom propustljivošću su otporniji kako prema prodoru gasova tako i prema prodoru vode, koja će uvek imati neke rastvore soli – potencijalne uzroke korozije betona. Upravo zato je važno ispitivanje otpornosti betona pri penetraciji vode pod pritiskom.

Ispitivanje vodonepropustljivosti ZBVPP je urađeno 4 dana nakon inicijalne nege betona od 3 dana na 40° C. Primenjena je metoda [160] i pritisak od 0,5 MPa u trajanju od 72 sata je uvek apliciran na bočnu stranu uzorka, upravno na pravac ugradnje betona.

ZBVPP na kojima je meren prodor vode pod pritiskom su pravljeni sa mehanički aktiviranim otpadnim pepelom iz TE Morava i letećim pepelom iz TENTB, oba mlevena 240 minuta. Predmetni uzorci ZBVPP za ispitivanje vodonepropustljivosti su pravljeni koristeći mešavine na kojima su utvrđena i čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju savijanjem u delu 5.1 i 5.2.

### 5.4.1. ISPITIVANJE DUBINE PRODORA VODE POD PRITISKOM ZBVPP SA OP TE MORAVA

Rezultati ispitivanja prodora vode pod pritiskom uzoraka sa 30%, 40% i 50% m/m mehanički aktiviranog pepela sa pepelišta OPTE Morava-240 su prikazani na Slici 5.20, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su navedene u Prilogu 5-9.



Slika 5.20 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod pritiskom ZBVPP sa 30-50% m/m mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240 i vodovezivnim faktorima od 0,17-0,4

Rezultati su pokazali da se prodor vode smanjuje sa smanjenjem vodovezivnog faktora i povećava se pri povećanju količine udela pepela u vezivu.

Na osnovu rezultata, svi predmetni betoni sa pepelom OP TE Morava-240, koji su zadovoljili čvrstoću pri pritisku od 40 MPa, mogu se oceniti prema [77, 159] da pripadaju klasi vodonepropustljivosti: V-III.

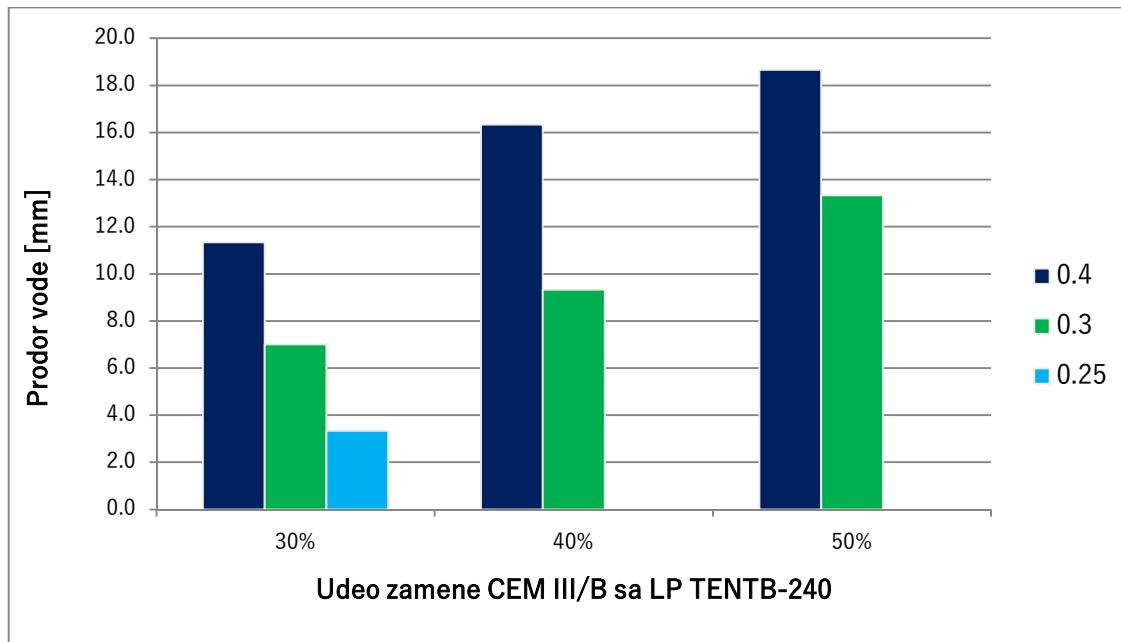
Ova klasa ocene utvrđuju najveću otpornost prema prodiranju vode pod pritiskom i odnosi se na vrednosti penetracije do 20 mm. Na Slici 5.21 je prikazano ispitivanje na karakterističnom uzorku iz grupe sa otpadnim pepelom.



Slika 5.21 Ispitivanje prodora vode pod pritiskom uzorka sa 30% m/m mehanički aktiviranim pepelom OP TE Morava 240, w/b=0,3

#### 5.4.2. ISPITIVANJE DUBINE PRODORA VODE POD PRITISKOM ZBVPP SA LP TENTB

Rezultati ispitivanja prodora vode pod pritiskom uzorka sa udelom 30%, 40% i 50% m/m mehanički aktiviranog letetećeg pepela TENTB-240 u vezivu su prikazani na Slici 5.22, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su navedene u Prilogu 5-10.



Slika 5.22 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod pritiskom ZBVPP sa 30-50% m/m mehanički aktiviranog LP TENTB-240 i vodovezivnim faktorima od 0,25-0,4

Na osnovu rezultata, svi predmetni betoni sa pepelom LP TENTB-240, se mogu oceniti prema da pripadaju klasi vodonepropustljivosti prema Na osnovu rezultata, svi predmetni betoni sa pepelom OP TE Morava-240, koji su zadovoljili čvrstoću pri pritisku od 40 MPa, mogu se oceniti prema [77,159] da pripadaju klasi vodonepropustljivosti: V-III.

Kao i pri prethodnoj grupi uzorka prodor vode se smanjuje sa smanjenjem vodovezivnog faktora i povećava se pri povećanju količine udela pepela u vezivu.

Uzorci sa letećim pepelom su imali jasno veći otpor pri prodiranju vode pod pritiskom – upoređujući betone sa istom količinom pepela u vezivu i jednakim vodovezivnim faktorom.

Pored toga važno je napomenuti da je prodor vode izuzetno mali kod uzorka sa vodovezivnim faktorom ispod vrednosti 0,3. Kao što je i na Slici 5.23 prikazano, prodor vode je u takvim slučajevima bio primetan samo na mestima neke imperfekcije (slabo zrno, plikovi, mehurići, itd...)



Slika 5.23 Ispitivanje prodora vode pod pritiskom uzorka sa 30% m/m mehanički aktiviranim LP TENTB-240, w/b=0,25

Rezultati ispitivanja prodora vode pod pritiskom su pokazali da svi uzorci predmetnih ZBVPP, sa obe vrste pepela imaju odličnu vodonepropustljivost. Sa obzirom na niske vodovezivne faktore i upotrebljene materijale, ti rezultati su bili i očekivani. Imajući u vidu tendenciju promene veličine prodara u funkciji količine pepela i vodovezivnog faktora, može se zaključiti da pri većim količinama pepela ili uvećanim vodovezivnim faktorima bi došlo do promene klase vodonepropusljivosti.

## 5.5. OTPORNOST NA DEJSTVO MRAZA I SOLI

Ciljevi istraživanja istovremenog dejstva mraza i soli na ZBVPP su bila:

- da se utvrdi kako količina pepela u betonima pravljenim sa CEM III cementom utiče na njihovu mrazootpornost
- koja je razlika u mrazootnosti betona pri korišćenju svežeg letećeg pepela ili starog hemijski inaktivnog otpadnog pepela sa pepelišta
- ispitati mrazootnost ZBVPP bez aeranta i sa aerantom

Treba spomenuti da je za ispitivanje otpornosti ZBVPP prema dejstvu mraza izabrana umesto najsavremenije ili najrealnije - najnepovoljnija metoda, sa željom da se evaluira ponašanje pri najgorem scenariju. Naime, postoji ogroman broj standardnih i nestandardnih metoda za ispitivanje mrazootnosti, koje se razlikuju u:

- prisustvo soli za odmrzavanje tokom ispitivanja. Za betone je mnogo nepovoljniji uticaj mraza kada su prisutne i soli.
- temperaturni opseg ispitivanja mrazootnosti. Pre svega je važna minimalna temperatura tokom ispitivanja, koja se uglavnom kreće od  $-12^{\circ}\text{C}$  do  $-20^{\circ}\text{C}$ .
- dužina trajanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja takođe varira u velikom dijapazonu kod različitih metoda, uglavnom od 4 do 18 sati.
- priprema i kondicioniranje uzoraka betona se značajno razlikuje. Glavni aspekti pri izboru su bili da se NE stavlja termoizolacija na neizložene strane uzorka – tj. da se NE smanjuje brzina i propagacija smrzavanja u betonu. Da se sa kondicioniranjem počne odmah nakon inicijalne nege u trajanju od 3 dana. I da se uzorci pre početka ispitivanja potpuno zasite sa rastvorom soli.

Na osnovu svih navedenih aspekata je izabrana starija metoda SRPS U.M1.055 [161] iz 1984. godina. Koja je opisana u Poglavlju 3. Ovde je samo važno naglasiti da bi ostale metode ispitivanja bile povoljnije za ispitivanje mrazootnosti ZBVPP

zbog njihovih specifičnosti (mala poroznost, specifična struktura pora, visoke čvrstoće, malo upijanje, itd…)

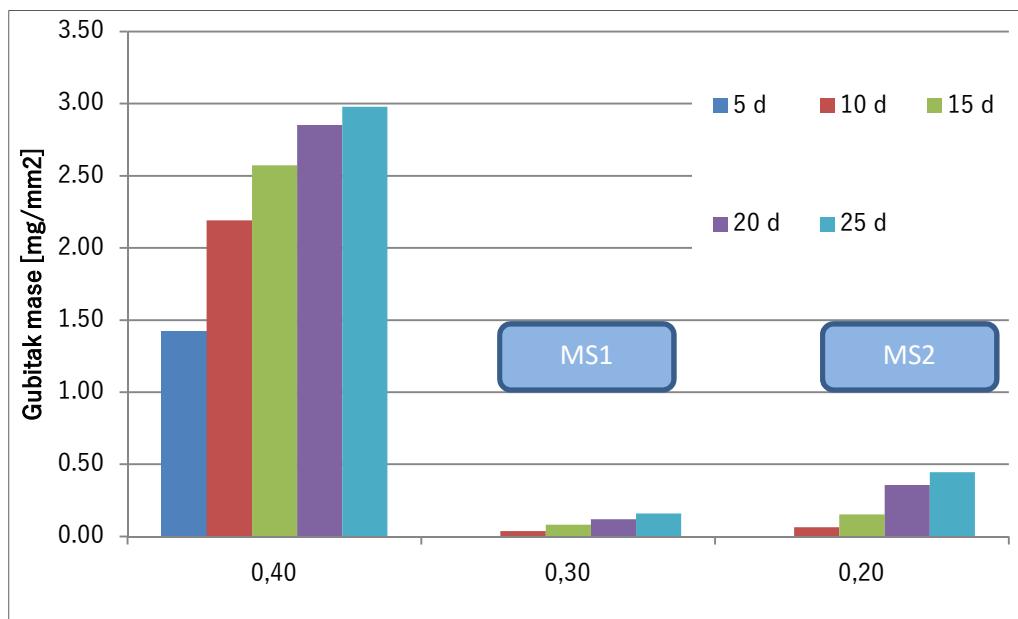
Posebna pažnja je bila posvećena korišćenju aditiva aeranta kao efektivnog sredstva za pospešavanje mrazootpornosti betona, pogotovo pri klasama izloženosti XF2 i XF4 (betoni izloženi korozivnim dejstvima smrzavanjem i odmrzavanjem u prisustvu soli za odmrzavanje prema [77]). Naime, iako je upotreba ovih aditiva ušla u svakodnevnu praksu, njihova uspešnost u primeni zavisi od niza faktora, kao što su: vrsta i količina cementa, konzistencija svežeg betona, sastav mešavine betona, temperatura betona, dužina mešanja i transporta betona, vrste i količine eventualnog plastifikatora i naravno, od količine aeranta u mešavini.

#### **5.5.1. OTPORNOST NA DEJSTVO MRAZA I SOLI ZBVPP SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA**

Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli uzorka sa 30% mehanički aktiviranog pepela sa pepelišta OPTE Morava-240 su prikazani na Slici 5.24.

Nakon svakih 5 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja izmerena je masa koja se odvojila na površini uzorka koja je i prikazana u mg/mm<sup>2</sup>.

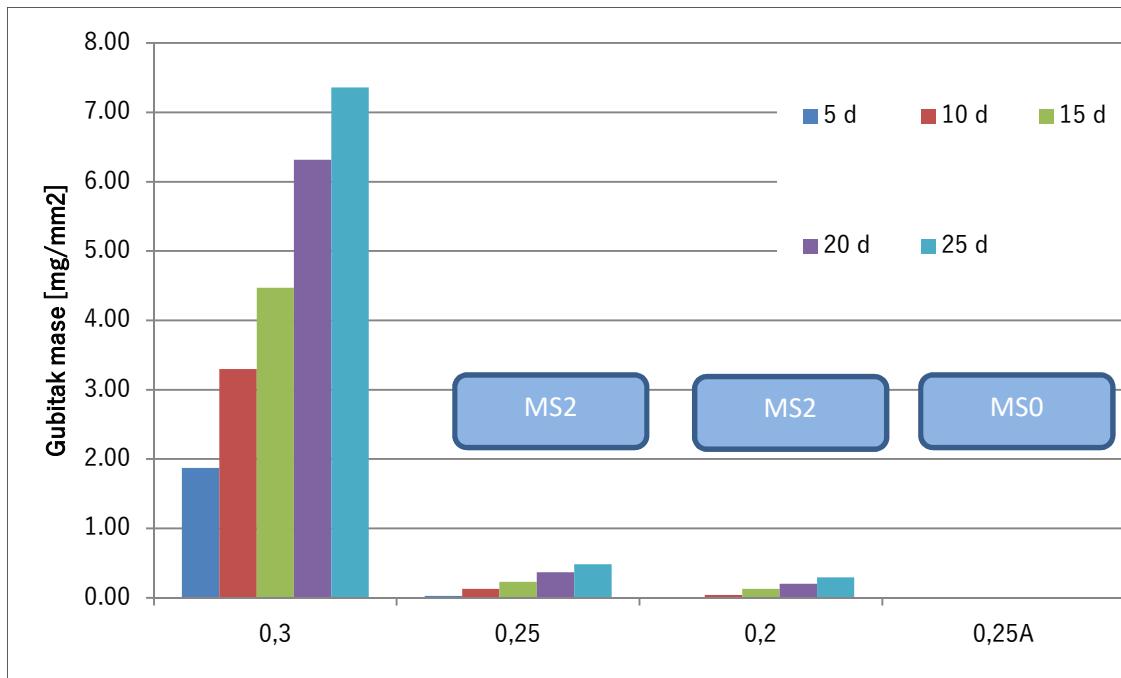
Poreg rezultata na Slici 5.24 su prikazane i ocene postignute klase otpornosti. MS1 se odnosi na gubitak mase do 0,2 mg/mm<sup>2</sup>, dok ocena klase otpornosti MS2 znači gubitak mase manje od 0,5 mg/mm<sup>2</sup>, nakon 25 ciklusa.



Slika 5.24 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 30% OPTE Morava240 u funkciji vodovezivnog faktora

Kao što se na Slici 5.24 može videti pri zameni CEM III/B sa 30% OPTE Morava240, sa vodovezivnim faktorom 0,4 gubitak mase je te količine da ta mešavina nije otporna na istovremeno dejstvo mraza i soli. Sa W/B=0,2 mešavina zadovoljava klasu MS2 i bez aeranta, dok sa W/B=0,3 je postignuta klasa MS1. To je ujedno i najbolji rezultat ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli i najverovatnije je posledica optimalne količine i rastojanja nesmlevenih čestica letećeg pepela, koje su prikazane na Slikama 4.15 do 4.18. Imajući u vidu da aeranti smanjuju čvrstoću pri pritisku, za W/B=0,4 nije napravljena mešavina sa aerantom, pošto bi očekivano imala čvrstoću manju od 40 MPa.

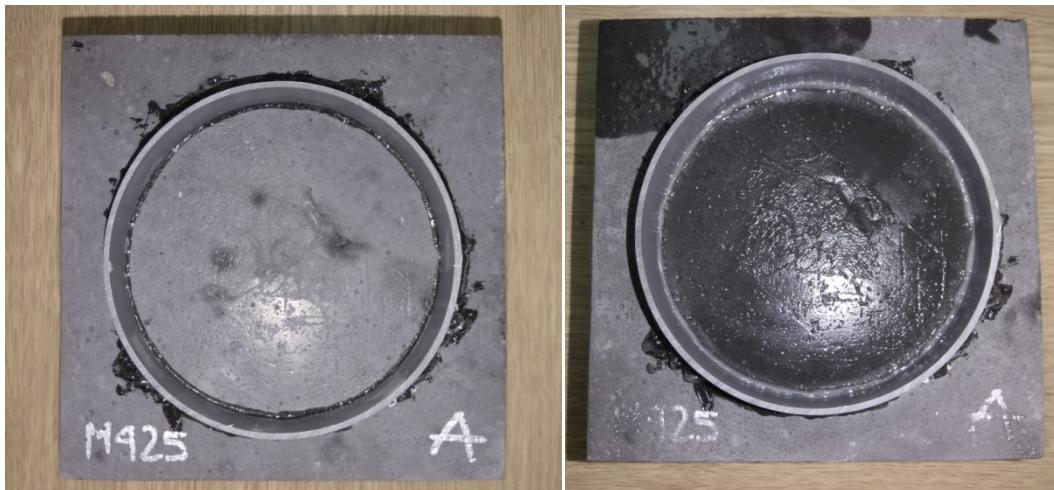
Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli uzorka sa 40% mehanički aktiviranog pepela sa pepelišta OPTE Morava-240 su prikazani na Slici 5.25.



Slika 5.25 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 40% OPTE Morava240 u funkciji vodovezivnog faktora

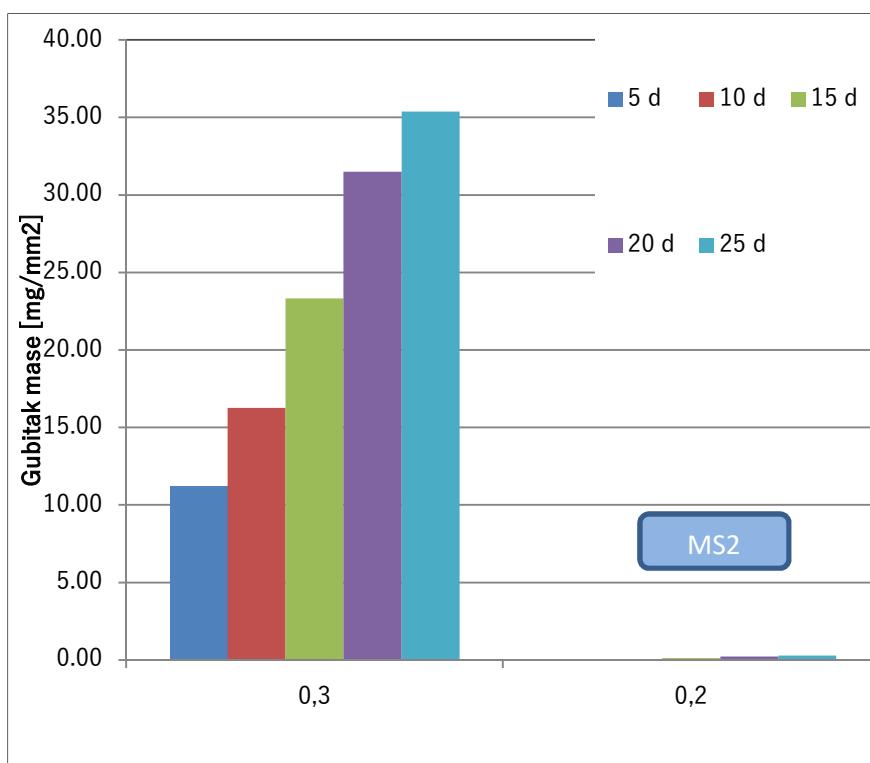
Kao što se na Slici 5.25 može videti pri zameni CEM III/B sa 40% OPTE Morava240, sa vodovezivnim faktorom 0,3 gubitak mase je te količine da ta mešavina nije otporna na istovremeno dejstvo mraza i soli. Sa  $W/B=0,2$  i  $W/B=0,25$  mešavina zadovoljava klasu MS2 i bez aeranta. Za mešavinu sa  $W/B= 0,25$  je napravljena varijanta i sa aerantom označena na Slici 5.25 sa 0,25A. Kao što se i na Slici 5.26 može videti, pomoću aeranta je postignuta klasa MS0, tj. nije bilo nikakvih oštećenja na površini betona nakon 25 ciklusa .

Interesantno je da čvrstoća pri pritisku betona sa aerantom (prosečna 72,2 MPa) je bila skoro identična nakon inicijalne nege sa betonom bez aeranta (prosečna 71,3 MPa) i razlika u zapreminskim masama je bila 2451,2 kg/m<sup>3</sup> i 2520,4 kg/m<sup>3</sup>, respektivno (2,7% razlika). Nakon godinu dana, međutim očekivana razlika je i zabeležena. Beton sa aerantom je imao čvrstoću pri pritisku 86,8 MPa i zapreminsku masu 2328,9 kg/m<sup>3</sup>, dok je beton bez aeranta imao vrednosti 93,99 MPa i 2440,6 kg/m<sup>3</sup> (razlika u zapr.masi 4,6%).



Slika 5.26 Uzorak betona sa 40% OPTE Morava240 pre (levo) i posle (desno) ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli

Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli uzorka sa 50% mehanički aktiviranog pepela sa pepelišta OPTE Morava-240 su prikazani na Slici 5.27.



Slika 5.27 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 50% OPTE Morava240 u funkciji vodovezivnog faktora

Betoni sa 50% pepela u vezivu i  $W/B=0,3$  su imali izuzetno velika oštećenja na mraz već nakon 5 ciklusa (Slika 5.28 levo), dok je ljušpanje primećeno već i nakon 1 ciklusa (Slika 5.28 desno)

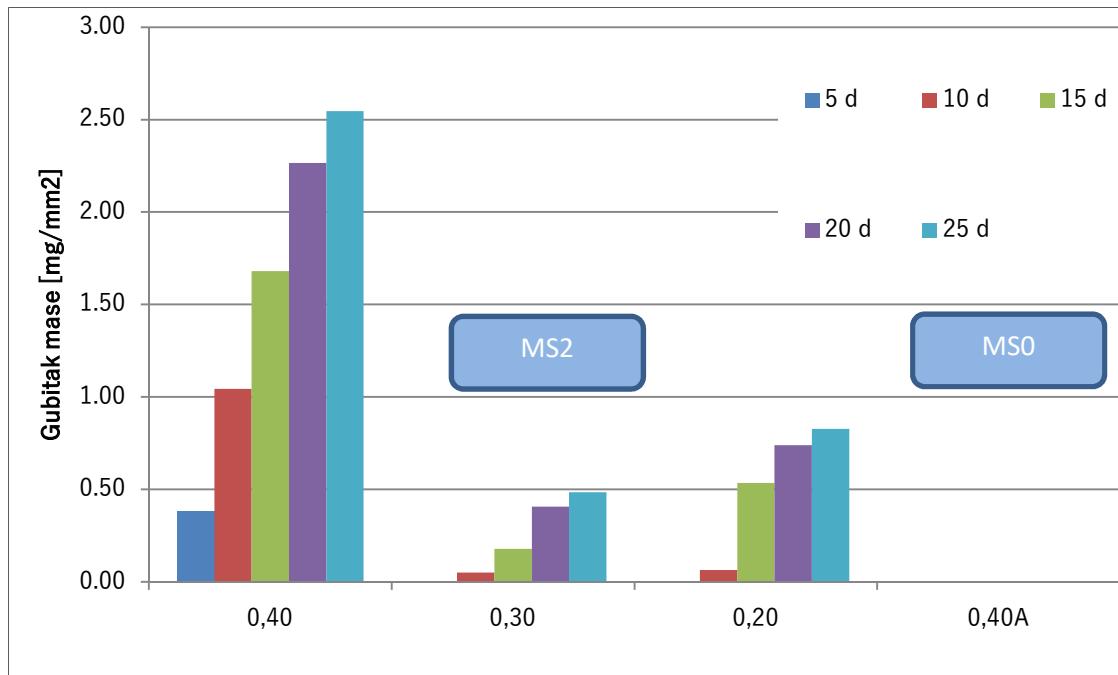


Slika 5.28 Uzorak betona sa 50% OPTE Morava240 nakon 5. ciklusa (levo) i posle 1. ciklusa (desno) ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli

Betoni sa 50% pepela i  $W/B=0,2$  su međutim zadovoljili klasu MS2 ( $0,28 \text{ mg/mm}^2$ ) i bez aeranta.

### 5.5.2. OTPORNOST NA DEJSTVO MRAZA I SOLI ZBVEPP SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENTB

Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli uzorka sa 30% mehanički aktiviranog pepela sa letećim pepelom iz TENTB-240 su prikazani na Slici 5.29.

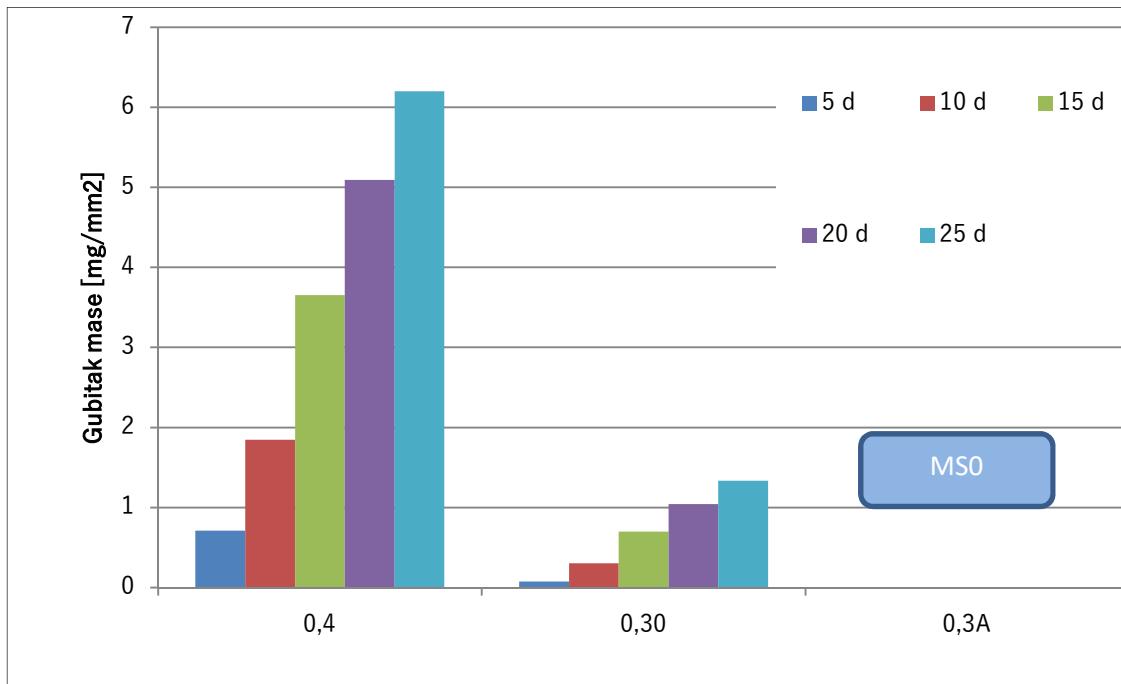


Slika 5.29 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 30% LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora

Kao što se na Slici 5.29 može videti pri zameni CEM III/B sa 30% LP TENTB-240, sa vodovezivnim faktorom 0,4 i 0,2 gubitak mase je te količine da ta mešavina nije otporna na istovremeno dejstvo mraza i soli. Sa W/B=0,23 mešavina zadovoljava klasu MS2 i bez aeranta.

Za mešavinu sa W/B= 0,4 je napravljena varijanta i sa aerantom označena na Slici 5.290 sa 0,4A. Kao što se može videti, pomoću aeranta je postignuta klasa MS0, tj. nije bilo nikakvih oštećenja na površini betona nakon 25 ciklusa.

Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli uzorka sa 40% mehanički aktiviranog pepela sa letećim pepelom iz TENTB-240 su prikazani na Slici 5.30.

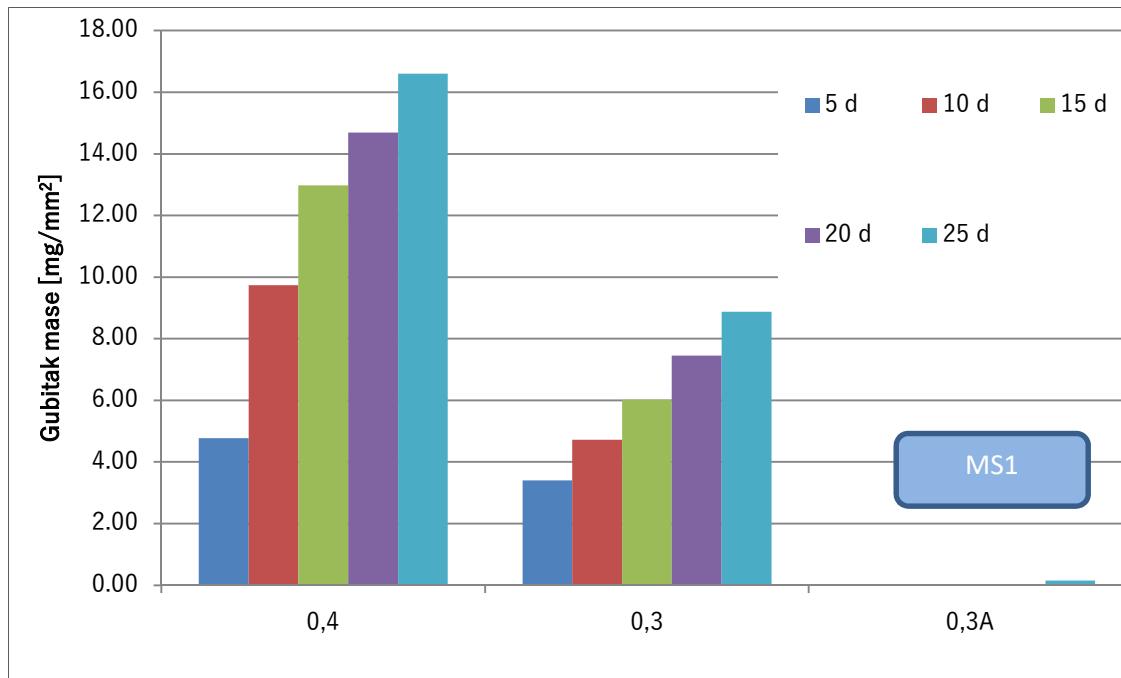


Slika 5.30 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 40% LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora

Kao što se na Slici 5.30 može videti pri zameni CEM III/B sa 40% LP TENTB-240, sa vodovezivnim faktorom 0,4 i 0,3 gubitak mase je te količine da ta mešavina nije otporna na istovremeno dejstvo mraza i soli.

Za mešavinu sa  $W/B = 0,3$  je napravljena varijanta i sa aerantom označena na Slici 5.30 sa 0,3A. Kao što se može videti, pomoću aeranta je postignuta klasa MS0, tj. nije bilo nikakvih oštećenja na površini betona nakon 25 ciklusa.

Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza i soli uzorka sa 50% mehanički aktiviranog pepela sa letećim pepelom iz TENTB-240 su prikazani na Slici 5.31.

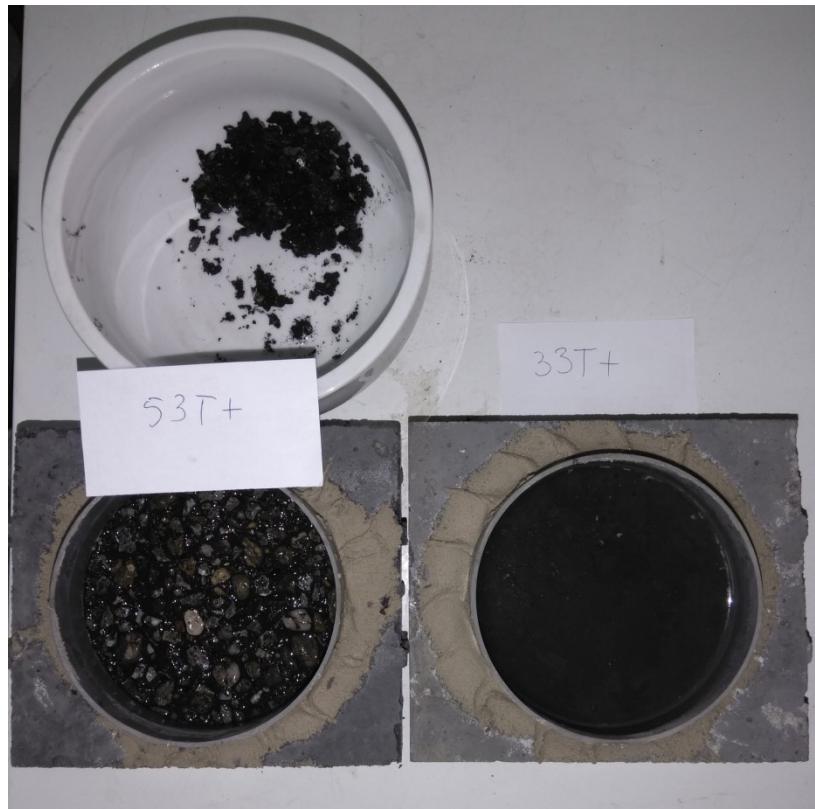


Slika 5.31 Otpornost na dejstvo mraza i soli ZBVPP sa 40% LP TENTB-240 u funkciji vodovezivnog faktora

Kao što se na Slici 5.31 može videti pri zameni CEM III/B sa 50% LP TENTB-240, ni sa vodovezivnim faktorom 0,4, ni sa 0,3 mešavina nije bila otporna na istovremeno dejstvo mraza i soli.

Za mešavinu sa  $W/B= 0,3$  je napravljena varijanta i sa aerantom označena na Slici 5.31 sa 0,3A. Na taj način je postignuta klasa MS1, tj. bilo je samo minimalnih oštećenja na površini betona nakon 25 ciklusa ( $0,15 \text{ mg/mm}^2$ ).

Uzorci sa  $W/B=0,3$  su prikazani i na Slici 5.32. Sa leve strane je uzorak betona sa 50% letećeg pepela, a sa desne strane sa 30% pepela u vezivu, nakon 5. ciklusa ispitivanja.



Slika 5.32 Uzorci betona sa  $W/B=0,3$  nakon 5. ciklusa sa 50% (levo) i sa 30% (desno) LP TENTB240 u vezivu

#### Zaključak

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja otpornosti površine ZBVPP na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje se može zaključiti:

- povećanjem količine pepela u betonu u opštem slučaju smanjuje se njegova otpornost
- povećanjem vodovezivnog faktora smanjuje se otpornost na dejstvo mraza i soli
- leteći pepeo iz TENT B je imao značajno bolju otpornost prema mrazu od OP TE Morava, pri istom vodovezivnom faktoru.
- za ZBVPP može da se konstatuje uslov za dobijanje zadovoljavajuće mrazootpornosti:

$$\frac{W/B}{M_c/M_B} \leq 0.5 ,$$

gde je:

W/B – vodovezivni faktor

M<sub>c</sub> – masa CEM III/B

M<sub>B</sub> – masa ukupnog veziva

- upotrebom aeranta se može postići ZBVPP koji je potpuno otporan na dejstvo mraza i soli
- možda najinteresantniji rezultat je postignut sa 30% zamene OPTE Morava240, pri vodovezivnom faktoru 0,3, koji je pokazao neočekivano otpornost na dejstvo mraza i soli. Najverovatnije je to posledica adekvatne količine nesamlevenih čestica letećeg pepela u mešavini, koji su na taj način pokazali sličan efekat koji se dobija i dodavanjem aeranta.

## 5.6. UKUPNOUPIJANJE ZBVPP

Ispitivanje ukupnog upijanja ZBVPP je sprovedeno prema Aneksu E standarda SRPS EN 1340 [157]. Pored toga što se ovaj standard koristi za ispitivanje upijanja betonskih prefabrikata, razlog za njegov izbor je bio i kriterijum po kome betoni sa upijanjem (utvrđenom ovom metodom) manjim od 6% smatraju otpornima na atmosferske uticaje.

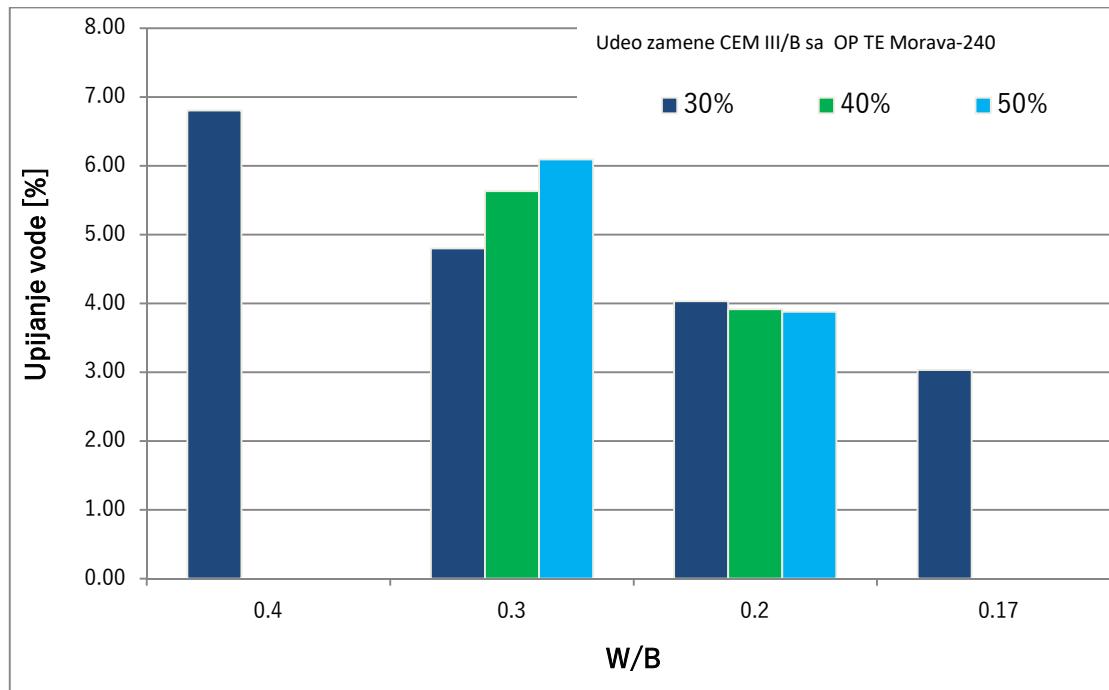
Uzorci ZBVPP na kojima je mereno upijanje su bili dimenzija 10x10x10 cm i pravljeni su prema recepturama betona na kojima su utvrđena i čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju savijanjem u delu 5.1 i 5.2.

Tokom ispitivanja je uočeno da kriterijum standarda za ispitivanja ukupnog upijanja nije dovoljne preciznosti za ZBVPP koji imaju visoku kompaktnost. Stoga je uslov da se masa uzroka ne promeni više od 0,1% u roku 24 sata promenjen i upijanje uzorka je praćen dok u roku od 7 dana nije zabeležena promena veća od 0,1% od mase uzorka. Kod nekih uzorka je ispitivanje trajalo i do 3 meseca.

Ispitivanje ukupnog upijanja vode ZBVPP je sprovedeno nakon inicijalne nege betona od 3 dana na 40°C. Uzorci su prvo zasićeni do stalne mase, a nakon toga u sušnici na 105°C osušeni do stalne mase.

ZBVPP na kojima je mereno ukupno upijanje su pravljeni sa mehanički aktiviranim otpadnim pepelom iz TE Morava i letećim pepelom iz TENTB, oba mlevena 240 minuta.

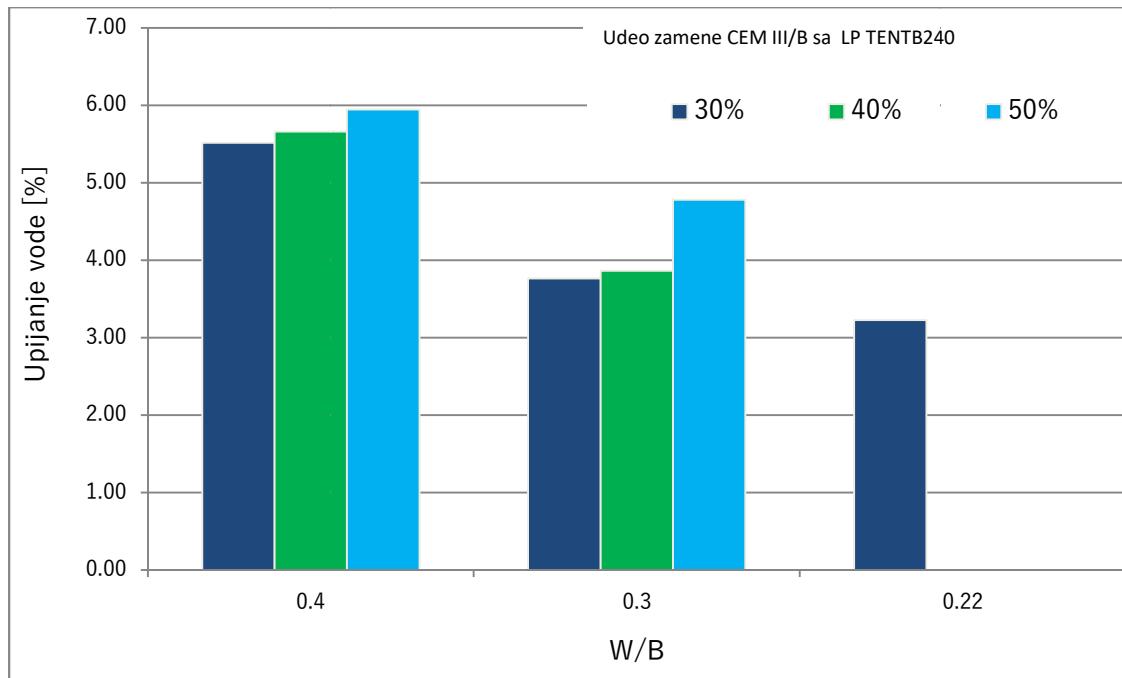
Rezultati ispitivanja ukupnog upijanje uzorka sa 30%, 40% i 50% m/m mehanički aktiviranog pepela sa pepelišta OPTE Morava-240 su prikazani na Slici 5.33, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su date u Prilogu 5-11.



Slika 5.33 Rezultati ispitivanja ukupnog upijanja ZBVPP sa 30-50% m/m mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240 i vodovezivnim faktorima od 0,17-0,4

Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 5.33 je jasno vidljiv uticaj vodovezivnog faktora i procenta udela OP TE Morava 240. Pri smanjenju vodovezivnog faktora smanjuje se ukupno upijanje. Uticaj količine pepela je takođe u funkciji vodovezivnog faktora. Pri  $W/B < 0,3$  povećanje količine pepela povoljno utiče, inače obrnuto. Pri  $W/B \leq 0,3$  ukupno upijanje postaje manje od 6% koja je prema navedenom standardu granica za betone koji se smatraju postojanimi pri atmosferskim uticajima.

Rezultati ispitivanja ukupnog upijanje uzorka sa 30%, 40% i 50% m/m mehanički aktiviranog LP TENTB-240 su prikazani na Slici 5.34, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su date u Prilogu 5-12.



Slika 5.34 Rezultati ispitivanja ukupnog upijanja ZBVPP sa 30-50% m/m mehanički aktiviranog pepela LP TENTB240 i vodovezivnim faktorima od 0,22-0,4

Rezultati prikazani na Slici 5.34 su pokazali da se zamenom sa LP TENTB240 postižu manja upijanja nego pri zameni sa OP TE Morava240. Takođe je jasno vidljiv uticaj vodovezivnog faktora i procenta udela LP TENTB240. Pri čemu i u kod ovih betona vodovezivni faktor ima dominantan uticaj. Pri  $W/B \leq 0.4$  ukupno upijanje svih betona pravljenih sa LP je manje od 6% pa se mogu smatrati postojanimi pri atmosferske uticaje.

Za razliku od OP TE Morava240, kod LP TENTB240 nije uočljiva promena tendencije da pri manjim vodovezivnim faktorima većim količinama zamene sa pepelom se može postići manje upijanje.

Takođe se jasno vidi i da kod mešavine sa  $W/B=0.3$  i 50% LP TENTB240 nije postignuta adekvatna ugradljivost, pa je stoga i upijanje vode odstupa od tendencije.

## 5.7. KAPILARNOUPIJANJE ZBVPP

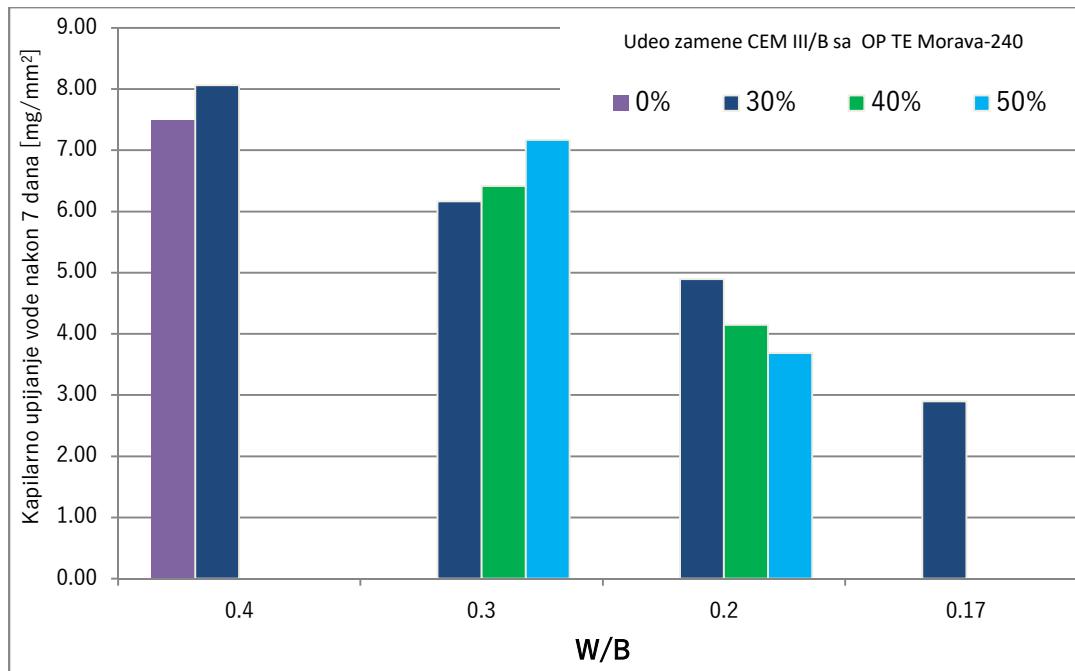
Ispitivanje kapilarnognog upijanja ZBVPP je ispitano prema standardu SRPS EN 480-5 [162].

Uzorci ZBVPP na kojima je mereno kapilarno upijanje su bili dimenzija 4x4x16 cm i pravljeni su prema recepturama betona na kojima su utvrđena i čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju savijanjem u delu 5.1 i 5.2. Razlog da se koriste ovi relativno mali uzorci, jeste da se ispita trajnost njihove površine, koja se brzo karbonatizuje i koja je poroznija. Kod ovih uzoraka male dimenzijske je odnos površine omotača i njihove zapremine mnogo veći, kao i odnos površine bočnih strana, prema površini koja se nalazi u vodi. Na taj način uticaj kapilarnog upijanja je "povećan" kako bi se za relativno kratko vreme dobili kvalitetni rezultati za evaluaciju ZBVPP koji imaju veoma kompaktnu strukturu – kao što su i rezultati ispitivanja otpornosti prema prođoru vode pod pritiskom pokazali.

Ispitivanje kapilarnog upijanja vode ZBVPP je sprovedeno na uzorcima nakon inicijalne nege betona od 3 dana na 40°C i kondicioniranja (sušenja) na vazduhu na 20°C 2 meseca. Pošto se radi o uporednoj metodi evaluacije, napravljeni i ugledni uzorci sa 100% CEMIII/B bez zamene sa pepelom, sa vodocementnim faktorom 0.4 (prema istoj recepturi kao i M34), koji su negovani u vodi 28 dana i nakon toga 2 meseca kondicionirani na 20°C na vazduhu.

ZBVPP na kojima je mereno kapilarno upijanje su pravljeni sa mehanički aktiviranim otpadnim pepelom iz TE Morava i letećim pepelom iz TENTB, oba mlevena 240 minuta.

Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja uzorka sa 30%, 40% i 50% m/m mehanički aktiviranog pepela sa pepelišta OPTE Morava-240 su prikazani na Slici 5.35 zajedno sa rezultatima kontrolnih uzoraka sa 100% CEMIII/B, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su date u Prilogu 5-13.

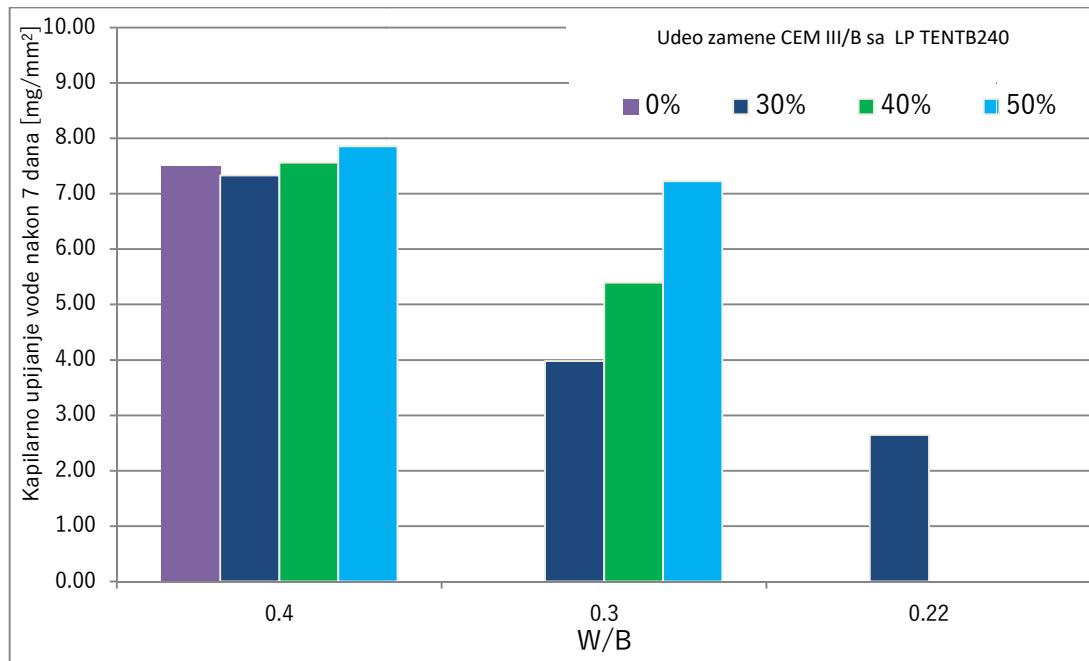


Slika 5.35 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja ZBVPP sa 0-50% m/m mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240 i vodovezivnim faktorima od 0,17-0,4

Na osnovu rezultata se može zaključiti da zamena CEM III/B sa pepelom pri vodovezivnom faktoru od 0.4 povećava u određenoj meri kapilarno upijanje nakon 7 dana. Vodovezivni faktor znatno utiče na smanjenje kapilarnog upijanja. Slično rezultatima ispitivanja ukupnog upijanja i rezultati kapilarnog upijanja su pokazali dualnost u uticaju količine pepela u funkciji vodovezivnog faktora. Pri vodovezivnom faktoru < 0.3 znatno se smanjuje kapilarno upijanje povećanjem zamene CEM III/B sa OP TE Morava 240.

Taj efekat zamene sa pepelom ujedno i objašnjava zašto je unutrašnja nega betona toliko efikasna nakon inicijalne nege.

Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja uzorka sa 30%, 40% i 50% m/m mehanički aktiviranog LP TENTB-240 su prikazani na Slici 5.36 zajedno sa rezultatima kontrolnih uzorka sa 100% CEMIII/B, a rezultati 3 merenja i prosečne vrednosti su date u Prilogu 5-14.



Slika 5.36 Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja ZBVPP sa 0-50% m/m mehanički aktiviranog pepela LP TENTB240 i vodovezivnim faktorima od 0,22-0,4

Rezultati prikazani na Slici 5.36 su pokazali da su zamenom sa LP TENTB240 postignuta manja kapilarna upijanja nego pri zameni sa OP TE Morava240. Takođe je jasno vidljiv uticaj vodovezivnog faktora i procenta udela LP TENTB240. Pri čemu i u kod ovih betona vodovezivni faktor ima dominantan uticaj. Za razliku od OPTE Morava240, zamenom sa letećim pepelom se postiže manja vrednost kapilarnog upijanja pri  $W/B=0.4$  od referentne mešavine bez pepela. Povećavanjem količine LP TENTB240 u mešavini pri istom vodovezivnom faktoru se povećava kapilarno upijanje.

### Zaključci

Vodovezivni faktor ima dominantan uticaj i na ukupno upijanje i na kapilarno upijanje ZBVPP. Ove dve metode ispitivanja su dala slične tendencije prilikom upotrebe obe vrste pepela.

Upotrebom OP TE Morava240 pri  $W/B \leq 0.3$  ukupno upijanje postaje manje od 6% koja je prema navedenom standardu granica za betone koji se smatraju postojanima pri atmosferskim uticajima. Sa LP TENTB240 je postignuto ukupno upijanje manje od 6% i sa  $W/B = 0.4$ , pri svim količinama zamene pepela.

Obe metode su pokazale da se primenom većih količina OP TE Morava240 (40% i 50%) mogu se postići manje vrednosti upijanja pri  $W/B < 0.3$ .

Kod LP TENTB240 zamena sa većom količinom uvek, pri svim  $W/B$  znači i veće vrednosti upijanja.





MOGUĆNOSTI I OGRANIČENJA  
KORIŠĆENJA VODE I AGREGATA  
KOJI SADRŽE HLORIDE PRI  
PROIZVODNJI ZBVPP



## 6. MOGUĆNOSTI I OGRANIČENJA KORIŠĆENJA VODE I AGREGATA KOJI SADRŽE HLORIDE PRI PROIZVODNJI ZBVPP

Prilikom ispitivanja uticaja hlorida na ternarni sistem veziva C-Z-P, cilj je bio da se ispitaju mogućnosti pravljenja betona sa ternarnim mešavinama veziva C-Z-P:

- pomoću morske vode za mešanje,
- korišćenjem agregata poreklom iz morske vode ili
- pomoću rasola (eng. brine ili briny water), otpadne vode sa povećanim salinitetom koja se dobija u industriji desalinizacije morske vode.

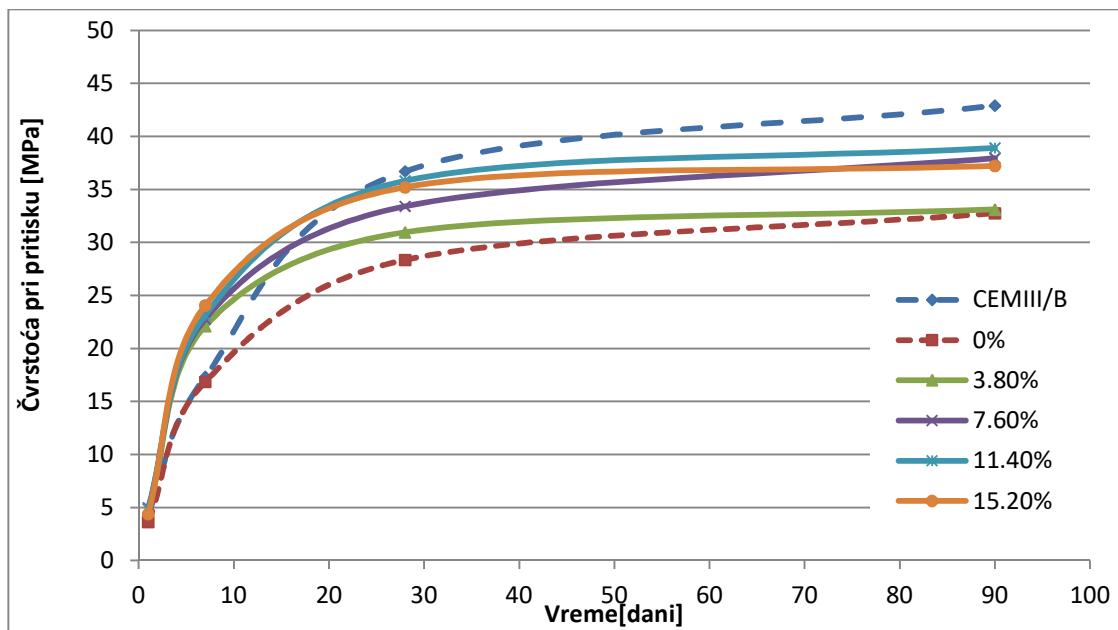
Sve tri mogućnosti bi značajno povećale značaj korišćenja ovog sistema veziva sa aspekta održivog razvoja i zaštite životne sredine. Iz tog razloga su izabrane dozaže morske soli u funkciji saliniteta morske vode.

Eksperimentalna ispitivanja su bila koncipirana da se iskoriste i povoljni uticaji nege pri većim temperaturama.

### 6.1 UTICAJ KOLIČINE SOLI U VODI ZA PRIPREMU MALTERA SA TERNARNIM SISTEMOM VEZIVA

Na osnovu rezultata datih u Poglavlju 4, sa aspekta korišćenja pepela iz TE moglo se videti da je udeo pepela u vezivu od 30-50% V/V najinteresantnije i racionalnije za primenu. Zbog toga su ispitivanja uticaja količine saliniteta na ternarnom sistemu veziva urađena sa vezivom, gde je 40 % V/V OP TE Morava 240, tj. koristeći recepture iz dela 4.2.2.3. Rezultati su upoređeni sa referentnom mešavinom od CEM III/B koja je pravljena sa pijacom vodom bez soli i sa rezultatima ternarne mešavine sa 40 % V/V udela istog pepela ali koja je pravljena sa vodom bez soli. Uzorci pravljeni sa slanom vodom su negovani u slanoj vodi (3,8% saliniteta) na 20°C. Na Slici 6.1 je dat grafički prikaz promene čvrstoće pri pritisku merene nakon 1,7, 28 i 90 dana. Rezultati su dati u Prilogu 6-1. Pored navedenih rezultata važno je spomenuti da pri mešanju ternarnih veziva sa slanom vodom sveže mešavine imaju

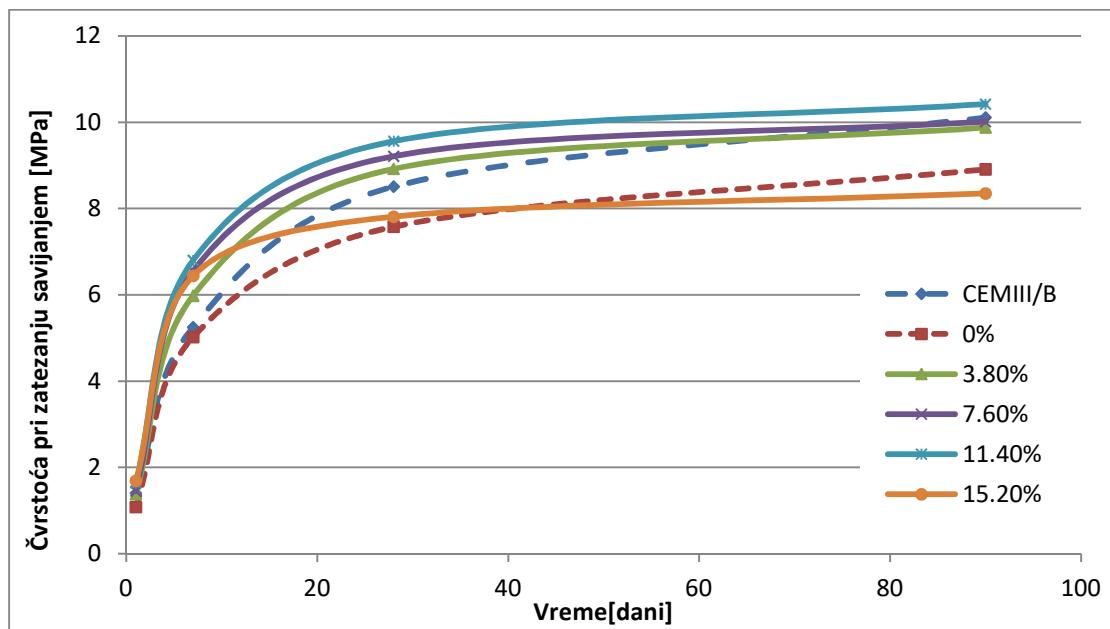
„mastan“ izgled za razliku kada se pripremaju sa običnom vodom. Ta pojava ne znači veliku razliku u konzistenciji sveže mešavine, ali je ugradnja u kalupe mnogo lakša i sprečava pojavu eventualnog viška vode na površini nakon ugradnje, tzv. krvarenje.



Slika 6.1 Uticaj saliniteta vode za pripremu maltera na čvrstoće pri pritisku uzoraka sa 40%V/V mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240

Na Slici 6.1 se vidi da uz prisustvo hlorida rane čvrstoće pri pritisku maltera sa 40 %V/V pepela su značajno veće od referentne mešavine sa CEM III/B (nakon 7 dana i do 39%), tj. dolazi do značajnog ubrzanja hidratacije. Nakon toga dolazi do "crossover" efekta, tj. referentna mešavina ima veću čvrstoću nakon 28 i 90 dana od ostalih. Ipak, posmatrajući mešavine sa udelom 40% V/V pepela, pozitivan efekat hlorida na čvrstoću ostaje i nakon 90 dana. Dakle, ternarne mešavine imaju veću čvrstoću pri pritisku ako se prave sa slanom vodom i posmatrajući rezultate nakon 28 i 90 dana nege, najbolje rezultati su postignuti sa 7,6% i 11,4% soli u vodi, tj. kada je salinitet 2x ili 3x veća od saliniteta mora.

Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem su prikazani grafički na Slici 6.2 a vrednosti sa recepturama dati u Prilogu 6-1.



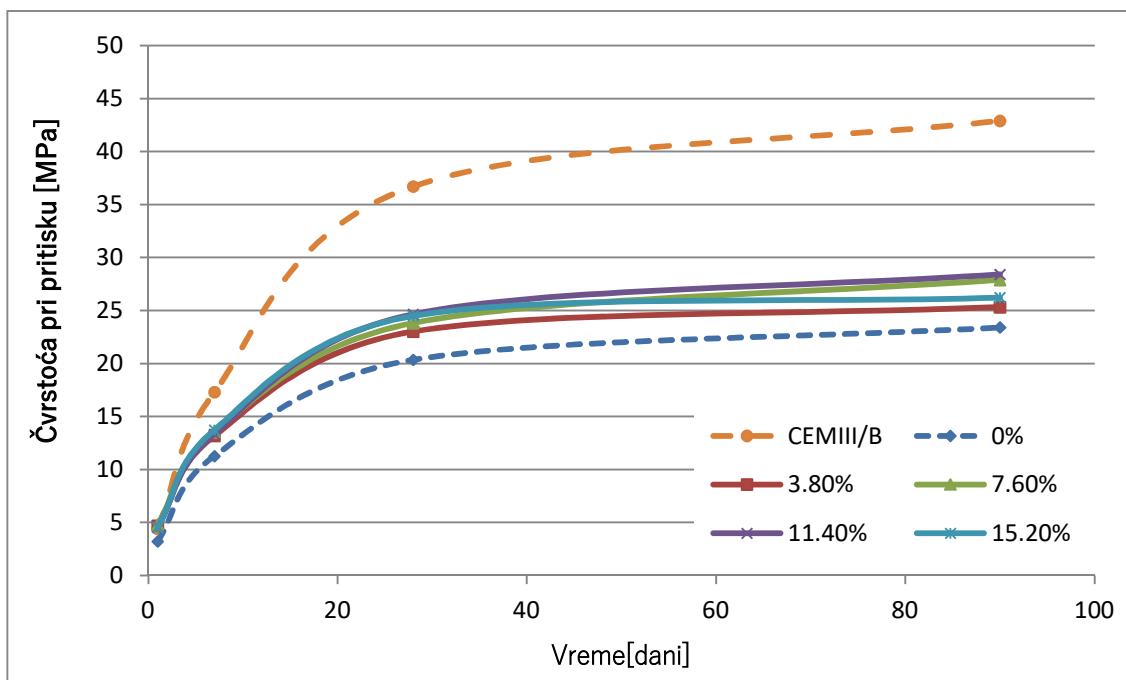
Slika 6.2 Uticaj saliniteta vode za pripremu maltera na čvrstoće pri zatezanju savijanjem uzoraka sa 40%V/V mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240

Pozitivan uticaj hlorida u vodi za pripremu ternarnih mešavina je još izraženiji na čvrstoćama pri zatezanju savijanjem. Na Slici 6.2 jasno je uočljivo da salinitet od 15,2% previše za mešavine sa 40% V/V pepela i vodovezivni faktor 0,39. Međutim posmatrajući ostale ternarne mešavine sa hloridima, pozitivan efekat je prisutan i posmatrajući čvrstoće nakon 90 dana nege, što je veoma značajno imajući u vidu da je u tim mešavinama udeo cementnog klinkera je u proseku 16% m/m veziva ili svega cca. 73 kg/m<sup>3</sup>. Čvrstoće pri zatezanju savijanjem su takođe potvrdile da se povoljniji efekti hlorida sa ternarnim mešavinama postižu pri salinitetu vode od 7,6% i 11,4% m/m.

U narednom koraku su urađena ispitivanja sa ternarnim mešavinama, gde je 60% V/V veziva bilo zamenjeno sa mehanički aktiviranim pepelom OP TE Morava 240,

takođe koristeći recepture iz dela 4.2.2.3. U Poglavlju 4 je već utvrđeno da pri ovoj količini zamene mehaničke karakteristike već značajno opadaju, jer je CaO u mešavini značajno smanjen. Upravo iz tog razloga je sa tom mešavinom veziva ponovljeno ispitivanje sa slanom vodom uključujući salinitete od 0-15,2%.

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku su dati u Prilogu 6-1, a grafički su prikazani na Slici 6.3 sa referentnim rezultatima uzoraka sa CEMIII/B i 0% soli.



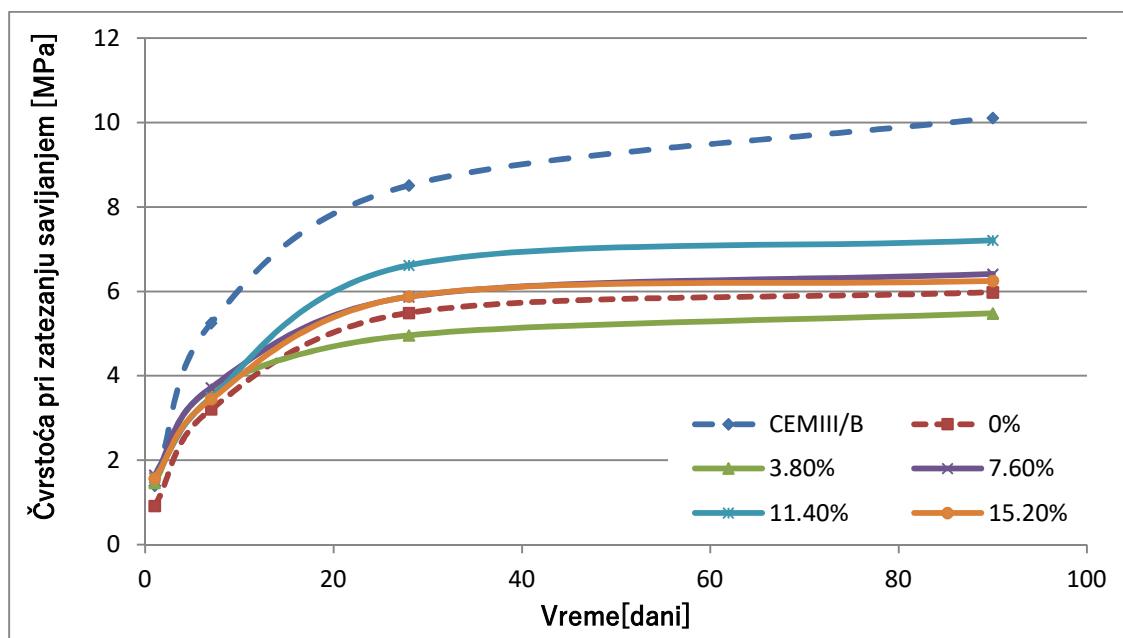
Slika 6.3 Uticaj saliniteta vode za pripremu maltera na čvrstoće pri pritisku uzoraka sa 60 %V/V mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240

Naravno, uzorci sa 60 % V/V i sa vodom koja sadrži hloride su imali mnogo manje čvrstoće pri pritisku upoređujući sa referentnom mešavinom - CEMIII/B. Pored toga primetan je i manji doprinos prisustva hlorida u priraštajima ranih čvrstoća. Međutim veoma je interesantan nedostatak "crossover"-efekta, posmatrajući čvrstoće pri pritisku ternarnih mešavina nakon 28 i 90 dana sa i bez soli u vodi. Rezultati ovog eksperimenta ukazuju na synergiju između ternarnih mešavina C-Z-P i slane vode, tj. hlorida u njoj. Dakle hloridi imaju doprinos u čvrstoći i pored odvijanja pucolanskih reakcija, tj. ne štete razvoju tih reakcija. Za razliku od efekta filera u

ternarnom sistemu veziva ovde se ne radi o ubrzajuju priraštaja čvrstoće nego o doprinosu čvrstoći.

Iako se odnos mase hlorida i CaO u ovoj grupi uzorka razlikuje od prethodne grupe sa 40% V/V, takođe se salinitet od 7,6% i 11,4% pokazao najučinkovitijim.

Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem su prikazani grafički na Slici 6.4 a prednosti sa recepturama dati u Prilogu 6-1.

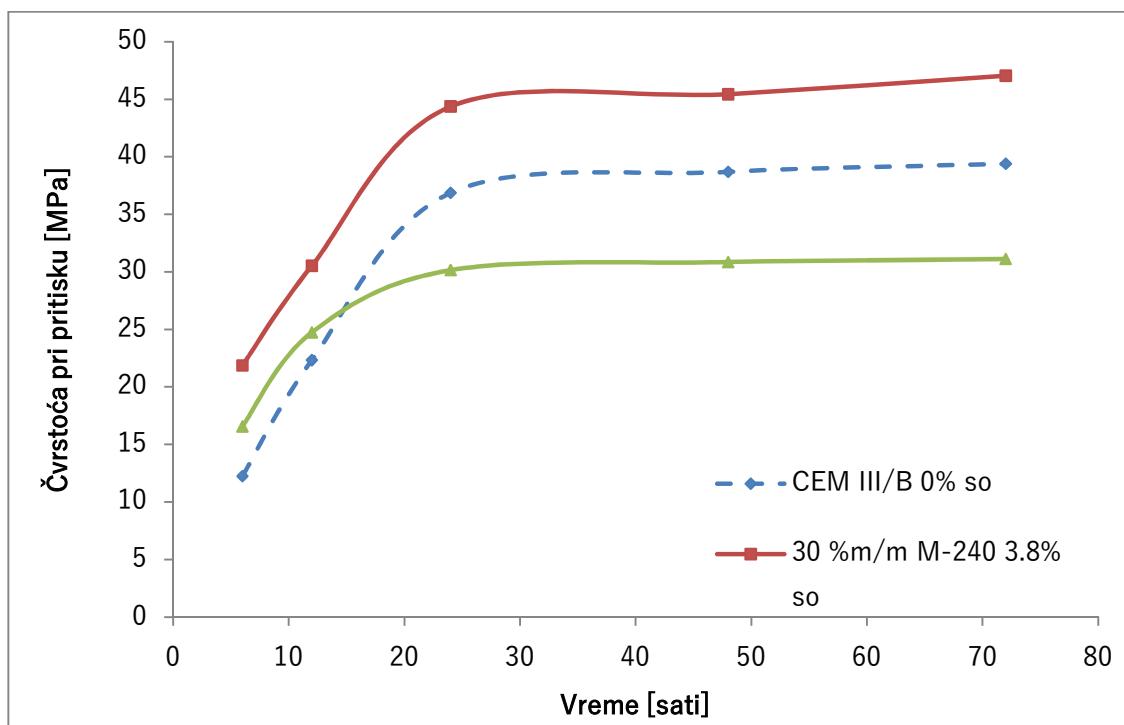


Slika 6.4 Uticaj saliniteta vode za pripremu maltera na čvrstoću pri zatezanju savijanjem uzorka sa 60%V/V mehanički aktiviranog pepela OP TE Morava 240

Na Slici 6.4 se uočljivo da je salinitet od 11,4% za ternarne mešavine sa 60% V/V pepela imao najveći pozitivan uticaj na čvrstoću pri zatezanju savijanjem. I na ovom grafičkom prikazu je jasno vidljivo da tendencija rasta tokom vremena ne opada ni u mešavinama pravljenima sa slanom vodom.

## 6.2 BETONI SA TERNARNOM SISTEMOM VEZIVA –UTICAJ SLANE VODE I NEGE NA 40°C

Za razliku od ispitivanja navedenog u 6.1, u ovom slučaju uzorci su pravljeni sa slanom vodom (3,8% morska so) i negovani na 40°C. Prvo je utvrđen uticaj udela pepela u vezivu pod pomenutim uslovima nege. Recepture i rezultati ispitivanja betona su dati u Prilogu 6-2. Na Slici 6.5 je prikazan razvoj čvrstoće pri pritisku u prvih 72 sata, uzoraka betona koji su pravljeni sa 30% i 50% m/m zamene CEM III/B mehanički aktiviranim OP TE Morava 240. Vodovezivni faktor je bio 0,4,  $D_{max}=16\text{mm}$ , masa veziva 450 kg.



Slika 6.5 Uticaj količine pepela na razvoj čvrstoće pri pritisku betona tokom prvih 72 sata kod betona pravljениh sa slanom vodom

Posmatrajući i tendenciju razvoja čvrstoće, pri 30 % m/m zamene sa pepelom i kod CEM III/B u prvih 72 sata nije uočljiv "crossover"-efekat i razlika u čvrstoćama se značajno ne menja tokom inicijalne nege u prvih 72 sata upoređujući mešavine sa i bez zamene pepela. Upoređujući krive razvoja čvrstoće sa CEM III/B (bez soli)

tokom nege na 40°C može videti, da ukoliko se koristi slana voda za mešanje betona sa 30 % m/m zamene sa pepelom OPTE Morava 240 dobiju se još veće čvrstoće od betona pravljenog sa CEM III/B i običnom vodom.

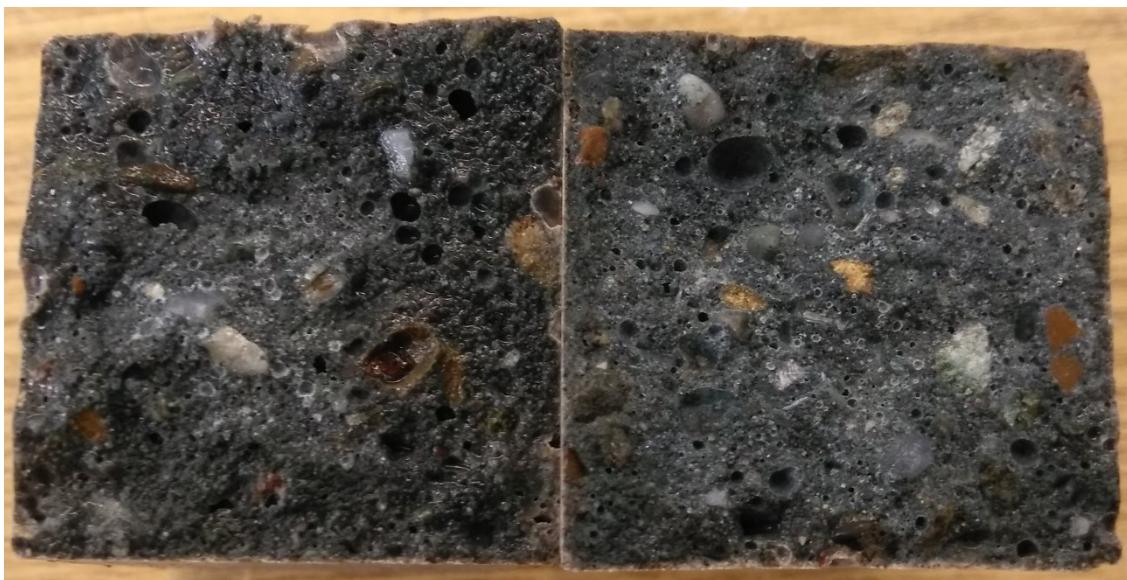
### 6.3 UTICAJ HLORIDA I NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA OP TE MORAVA

Na osnovu gore navedenih rezultata u ovom Poglavlju, postavlja se pitanje kako se betoni pravljeni sa ternarnim sistemom veziva pomoću slane vode i nege na 40°C, ponašaju kasnije.

U tu svrhu su urađena ispitivanja sa 50% m/m mehanički aktiviranim otpadnim pepelom iz TE Morava 240, prema recepturi EM45 (Poglavlje 4.3.2.3). Uzorci pravljeni sa 0%, 3,8% i 11,4% saliniteta (oznake 0C, 1C, 3C, respektivno) i sa inicijalnim negovanjem 3 dana na 40°C.

Kako bi se mogli uporediti i referentna mešavina od CEM III/B je pravljena sa 0% i 3,8% saliniteta u vodi za mešanje. Primećeno je da mešavina sa CEMIII/B bez pepela prilikom mešanja sa slanom vodom ima potpuno suprotan efekat na svojstva svežeg betona, tj. ugradljivost se drastično menja odmah nakon mešanja i sveži malter se ponaša kao kada počinje da veže. To i jeste bio razlog zašto nije bilo moguće napraviti mešavinu CEM III/B sa 11,4% soli. Interesantno je i da povećenjem količine vode za mešanje ne menja se ugradljivost, do jedne granice, posle koje iznenada ima viška vode i dolazi do značajnog krvarenja.

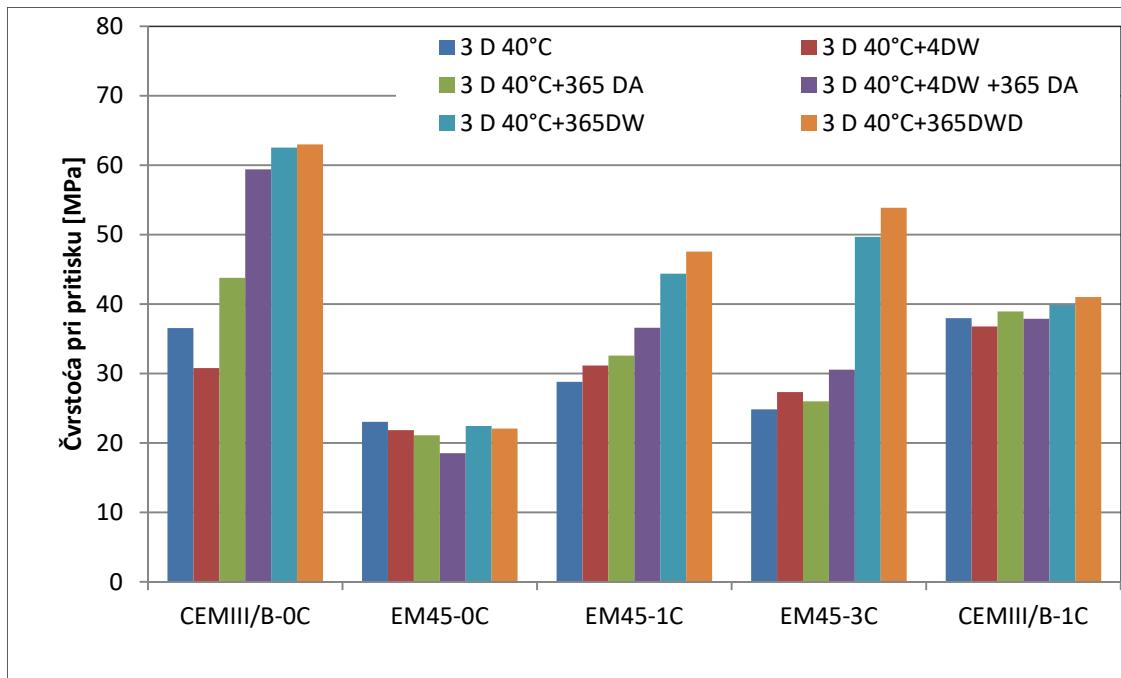
Na Slici 6.6 su i prikazane sveže polomljene površine prizmi malterskih mešavina sa CEMIII/B nakon 365 dana u vodi. Uzorak sa leve strane je pravljen sa slanom vodom (oznaka CEMIII/B-1C) i vidljivo ima povezan sistem pora usled slabije ugradnje. Uzorak sa desne strane ima veću kompaktnost i veća je površina u centralnom delu, koja nije vodom zasićena. Takođe je interesantno primetiti prisustvo inluživanja u manjim porama kod oba uzorka.



Slika 6.6 Unutrašnjost malterskih mešavina nakon 365 dana u vodi, levo CEMIII/B-1C, a sa desne strane CEMIII/B-0C

Rezultati čvrstoće pri pritisku su grafički prikazani na Slici 6.7. Vrednosti predstavljaju prosečnu vrednost 3 merena rezultata i dati su u Prilogu 6-2. Referentne mešavine bez udela pepela su označene CEM III/B. Ispitivanja su urađena nakon:

- 3 dana nege pri  $40^{\circ}\text{C}$  (oznaka **3 D  $40^{\circ}\text{C}$** )
- 3 dana nege pri  $40^{\circ}\text{C}$  + 4 dana u vodi na  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ , (**3 D  $40^{\circ}\text{C}+4\text{DW}$** )
- 3 dana nege pri  $40^{\circ}\text{C}$  + 365 dana na vazduhu pri  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ (oznaka **3D $40^{\circ}\text{C}+365\text{DA}$** )
- 3 dana nege pri  $40^{\circ}\text{C}+4$  dana u vodi+365 dana na vazduhu pri  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ , (oznaka **3D $40^{\circ}\text{C}+4\text{DW} + 365\text{DA}$** )
- 3 dana nege pri  $40^{\circ}\text{C} + 365$  dana u vodi na  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$  (oznaka **3 D  $40^{\circ}\text{C}+365\text{ DW}$** )
- 3 dana nege pri  $40^{\circ}\text{C} + 365$  dana u vodi na  $20 \pm 3^{\circ}\text{C} +$  osušen do stalne mase (oznaka **3 D  $40^{\circ}\text{C}+365\text{ DWD}$** )



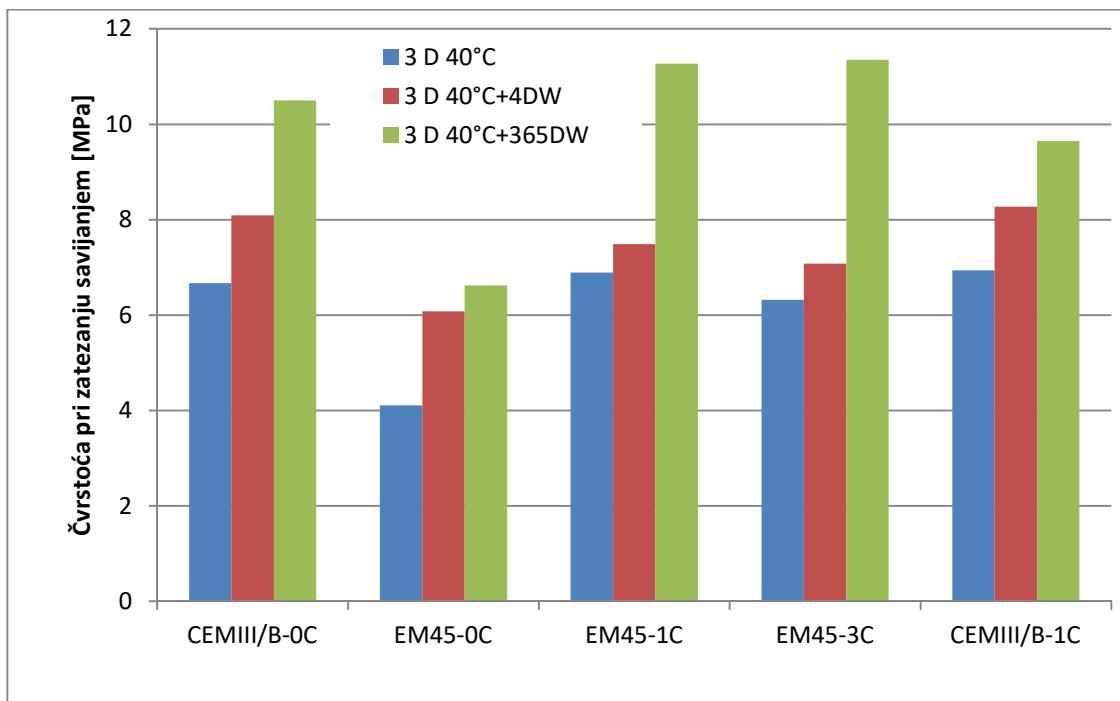
Slika 6.7 Uticaj saliniteta na razvoj čvrstoće pri pritisku ternarnih sistema malterskih mešavina i CEM III/B negovanih 3 dana na 40°C

Na osnovu rezultata zamene CEM III/B OP-om iz TE Morava, prikazanih na Slici 6.7 uočljive je velika razlika u razvoju čvrstoće između uzoraka sa ternarnim sistemom veziva i uzoraka sa CEMIII/B bez pepela:

- Upoređujući uzorce EM45-0C sa EM45-1C i EM45-3C, može se zaključiti da slana voda za mešanje daje veće čvrstoće nakon 3 dana nege na 40°C i nakon mesec dana i nakon godinu dana, bilo da se uzorci posle neguju u vodi ili na vazduhu.
- Mešavine sa CEM III/B bez pepela imaju posle inicijalne nege manji priraštaj čvrstoće po svim uslovima nege ako se prave sa slanom vodom. To je u skladu sa navedenom literaturom [95], ali je izraženija razlika kod CEMIII/B, verovatno zbog uticaja slane vode na svojstva svežeg betona.
- Postoji jasna razlika u razvoju čvrstoće pri različitim uslovima nege u funkciji saliniteta. Ako će posle inicijalne nege biti u pretežno suvoj sredini, salinitet od 3,8 % daje povoljnije rezultate, pri izloženosti pretežno vlažnoj sredini veći salinitet je povoljniji.

- Ako se mešavine pripremaju sa slanom vodom CEM III/B ima razloga zameniti čak i do 50% sa mehanički aktiviranim otpadnim pepelom u cilju postizanja boljih rezultata čvrstoće
- Najvažniji rezultat daje uporedna analiza rezultata mešavina EM45 nakon 365 dana nege u vodi. Samo razlika u salinitetu vode za mešanje uzrokuje povećanje čvrstoće pri pritisku od 214% i 244%, pri salinitetu od 3,8% i 11,4%, respektivno. Interesantno je da nakon mesec dana pri oba režima nege tendencija je bila obrnuta, dajući prednost manjem salinitetu. Ovaj rezultat je interesantan, jer i hloridi u vodi za mešanje, i inicijalna nega 3 dana na 40°C su očekivano trebali izazvati "crossover"-efekat. Međutim usled **sinergije ternarnog sistema veziva i hlorida** u slanoj vodi dolazi do značajnog rasta čvrstoće.

Čvrstoće pri zatezanju savijanjem su prikazane na Slici 6.8, a rezultati su navedeni u Prilogu 6.2.



Slika 6.8 Uticaj saliniteta na razvoj čvrstoće pri pritisku ternarnih sistema malterskih mešavina i CEM III/B negovanih 3 dana na 40°C

Uzorci sa ternarnim sistemom veziva imaju veću čvrstoću pri zatezanju savijanjem ako se prave sa slanom vodom i značajno veći priraštaj čvrstoće nakon godinu dana. Njihove čvrstoće pri zatezanju savijanjem su veće i od rezultata uzorka CEMIII/B sa i bez soli u vodi za pripremu.

Na Slici 6.9 su prikazane sveže polomljene površine prizmi malterskih mešavina sa ternarnim sistemom veziva nakon 365 dana u vodi. Uzorak sa leve strane je EM45-1C i vidljivo je prisustvo izluživanja u manjim porama, dok kod uzorka EM45-3C (sa desne strane) ta pojava nije primećena.



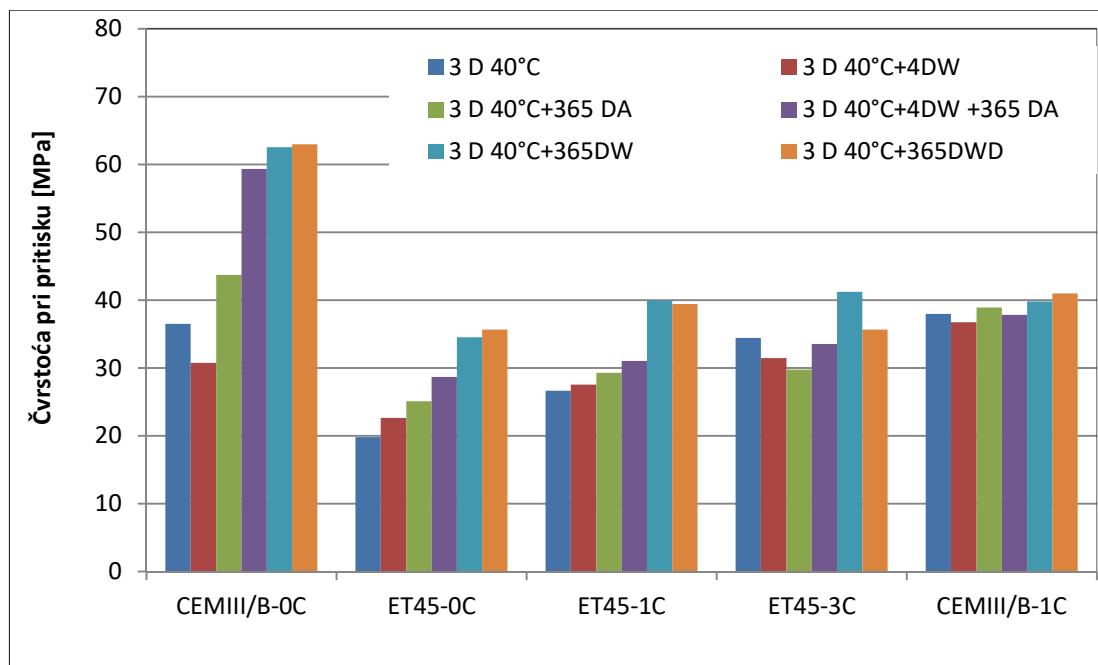
Slika 6.9 Uzorak levo - izluživanje u ponekim porama EM45-1C, uzorak desno - bez izluživanja u porama EM45-3C nakon 365 dana u vodi

## 6.4 UTICAJ HLORIDA I NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA

### LPTENT B

Ispitivanja sa 50% m/m mehanički aktiviranim letećim pepelom LP TENTB 240, su urađena prema recepturi ET45 (Poglavlje 4.3.2.2). Uzorci pravljeni sa 0%, 3,8% i 11,4% saliniteta (oznake 0C, 1C, 3C, respektivno) i sa inicijalnim negovanjem 3 dana na 40°C. Slično rezultatima ternarnih mešavina sa OP TE Morava 240 u delu 6.4, njihovi rezultati su grafički prikazani sa rezultatima referentnog maltera pravljenog samo metalurškim cementum CEM III/B sa i bez soli u vodi za pripremu (oznake CEM III/B-0C i CEM III/B-1C) koji su prethodno već opisani.

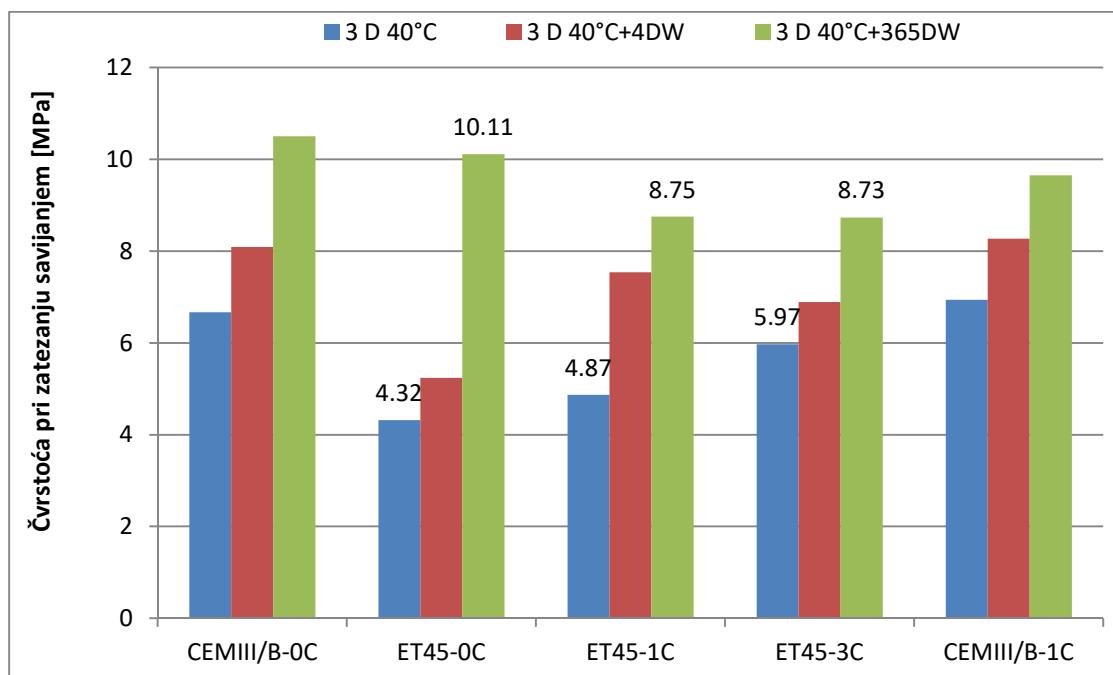
Rezultati čvrstoće pri pritisku su prikazani na Slici 6.10. Vrednosti predstavljaju prosečnu vrednost 3 merena rezultata i dati su u Prilogu 6-3. Oznake režima nege su navedene u prethodnom delu 6.3.



Slika 6.10 Uticaj saliniteta na razvoj čvrstoće pri pritisku ternarnih sistema mešavina sa LP TENTB-240 i CEM III/B nakon inicijalne nege 3 dana na 40°C

Posmatrajući u Poglavlju 4.3.2.2 već prikazan razvoj čvrstoće mešavine ET45 bez prisustva hlorida, mešavine ET45-1C i ET45-3C imaju mnogo manje priraštaje usled 3,8% i 11,4% saliniteta u vodi za mešanje. Čvrstoće pri pritisku nakon inicijalne nege pokazuju tendenciju rasta u funkciji povećanja prisustva hlorida, ali vremenom te razlike se smanjuju. Ipak, posmatrajući čvrstoće pri pritisku nakon 365 dana bilo u vlažnoj ili u suvoj sredini, upotreba slane vode rezultira većim čvrstoćama pri pritisku. Sa aspekta održivog razvoja takođe je opravdana zamena CEMIII/B sa letećim pepelom ako se koristi slana voda prilikom mešanja, jer postižu se iste čvrstoće, ali sa manje emisije štetnih gasova i smanjenjem ekološkog otiska.

Čvrstoće pri zatezanju savijanjem uzoraka sa 50% m/m mehanički aktiviranim LP TENTB 240 su prikazane na Slici 6.11, a rezultati su navedeni u Prilogu 6.3.



Slika 6.11 Uticaj saliniteta na razvoj čvrstoće pri pritisku ternarnih sistema mešavina sa LP TENTB-240 i CEM III/B nakon inicijalne nege 3 dana na 40°C

Na ovom opitu se može uočiti da dolazi do „crossover“-efekta. Posmatrajući rezultate uzoraka iz grupe ET45-0C, ET45-1C i ET45-3C nakon inicijalne nege 3

dana na 40°C je potpuno jasan efekat hlorida na prirast čvrstoće i on je čak i proporcionalan:

- čvrstoća za ET45-1C u odnosu na ET45-0C je  $4,87 \text{ MPa} / 4,32 \text{ MPa} = 1,127$
- čvrstoća za ET45-3C u odnosu na ET45-0C je  $5,97 \text{ MPa} / 4,32 \text{ MPa} = 1,382$

dakle:

- povećanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem sa 11,4% salinitetom je 38,2%,
- a pri salinitetu od 3,8%, priraštaj čvrstoće pri zatezanju savijanjem je 12,7% prema tome:

odnos priraštaja čvrstoće :  $38,2\% / 12,7\% = 3,007$

jednak je:

odnosa saliniteta:  $11,4\% / 3,8\% = 3,00$

Međutim, godinu dana nakon inicijalne nege odnosi u priraštajima čvrstoća pri zatezanju savijanjem se menjaju. Po priraštaju čvrstoće nakon godinu dana važi redosled ET45-0C > ET45-1C > ET45-3C. Dakle ubrzanje hidratacije tokom inicijalne nege prouzrokovana hloridima je smanjila ne samo priraštaje čvrstoće pri zatezanju savijanjem tokom vremena, nego i ukupne čvrstoće.

## 6.5 KONTROLNA ISPITIVANJA UTICAJ HLORIDA I NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA PEPELIMA IZ TE

Posmatrajući ceo niz efekata koji doprinose razvoju čvrstoće betona sa ternarnim sistemima veziva logično se pojavila i sumnja da li su ti rezultati ograničeni samo na upotrebljene komponentne materijale i u kojoj meri se mogu ponoviti sa promenom neke komponente.

Kontrolna ispitivanja su urađena sa mehanički aktiviranim pepelom sa pepelišta TE Morava u trajanju od 240 minuta. Razlozi za ovaj izbor pepela su dosta jednostavnii očigledni. Primena svežeg letećeg pepela kao SCM je već dovoljno istražena i oni se

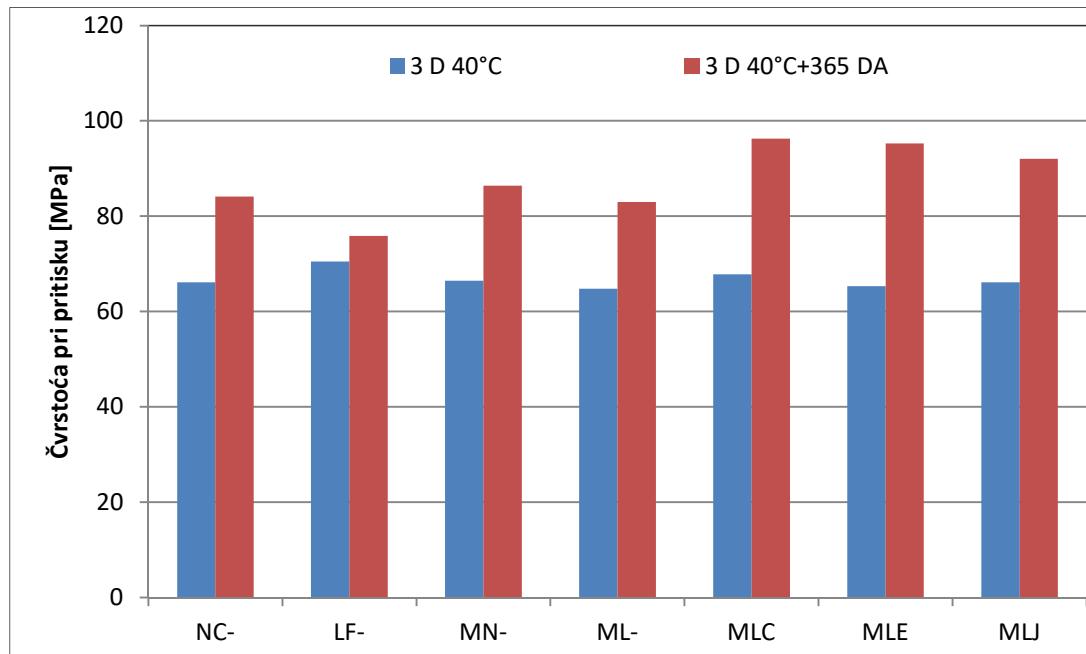
svakodnevno i primenjuju u betonima. Međutim pepeo sa pepelišta je hemijski inertan i zbog toga se ne primenjuje u betonima (sem nekih retkih slučaja, ali za proizvodnju betona nižih čvrstoća). Kontrolna ispitivanja sa OP TE Morava 240 su urađena sa:

- varijacijom cementa CEM III/B 32,5N LH/SR od dva različita proizvodača: Lafarge beočinska fabrika cementa d.o.o. i Našicecement d.d. Našice
- upotrebom morske vode umesto dodavanja morske soli u vodu. U tu svrhu su napravljeni betoni sa ternarnim sistemom veziva i morskog vodom sa Egejskog mora i Jadranskog mora

Betoni su pravljeni sa vodovezivnim faktorom  $w/b=0,285$ , sa ukupno 450 kg veziva i  $D_{max}=16\text{mm}$ . Svi betoni su negovani zapakovani 3 dana na  $40^{\circ}\text{C}$  i posle vađenja iz kalupa su ispitane čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri zatezanju savijanjem. Uzorci su držani u laboratoriji, na vazduhu i ispitane su čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju savijanjem nakon godinu dana. Oznake su:

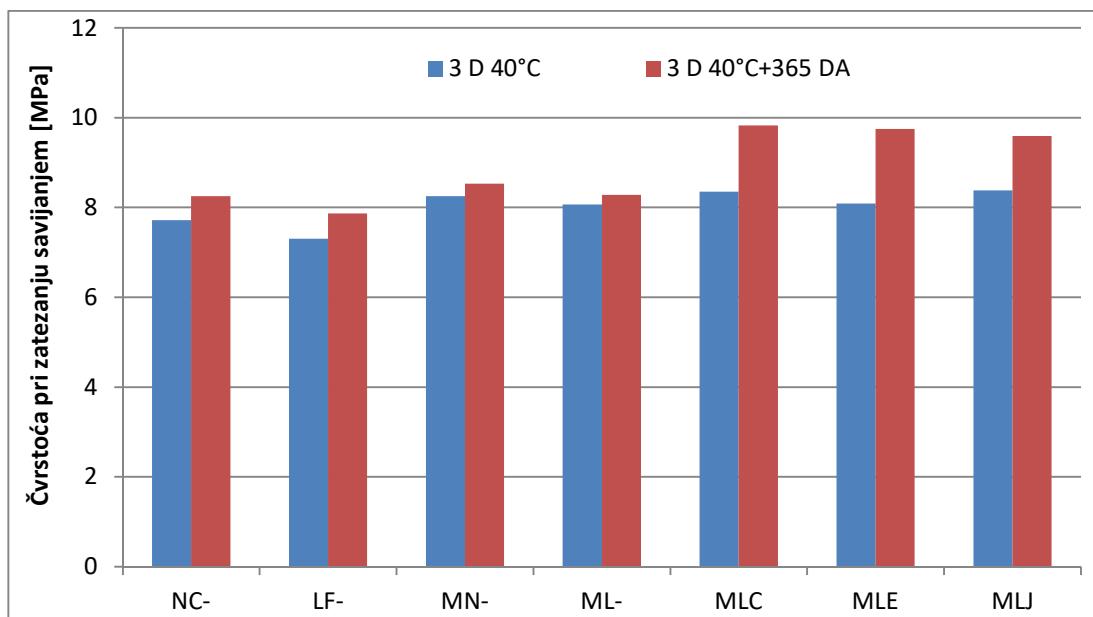
- **NC**- 100% veziva CEMIII/B - Našicecement sa običnom vodom
- **LF**- 100% veziva CEMIII/B - Lafarge cement sa običnom vodom
- **MN**- 30% m/m zamene CEMIII/B (Našicecement) sa OPTEMorava - 240 sa običnom vodom
- **ML**- 30% m/m zamene CEMIII/B (Lafarge cementa) sa OPTEMorava - 240 sa običnom vodom
- **MLC** 30% m/m zamene CEMIII/B (Lafarge cementa) sa OPTEMorava - 240 sa slanom vodom (dodavanjem 3,8% morske soli u vodu)
- **MLE** 30% m/m zamene CEMIII/B (Lafarge cementa) sa OPTEMorava - 240 sa morskog vodom iz Egejskog mora
- **MLJ** 30% m/m zamene CEMIII/B (Lafarge cementa) sa OPTEMorava - 240 sa morskog vodom iz Jadranskog mora

Rezultati čvrstoće pri pritisku su grafički prikazani na Slici 6.12. Vrednosti predstavljaju prosečnu vrednost 3 merena rezultata i dati su u Prilogu 6-4.



Slika 6.12 Rezultati čvrstoće pri pritisku kontrolnih uzoraka nakon 3 dana inicijalne nege na 40°C i nakon godinu dana

Čvrstoće pri zatezanju savijanjem kontrolnih uzoraka su prikazane na Slici 6.13, a rezultati su navedeni u Prilogu 6-4.



Slika 6.13 Rezultati čvrstoće pri zatezanju savijanjem kontrolnih uzoraka nakon 3 dana inicijalne nege na 40°C i nakon godinu dana

Na osnovu prikazanih rezultata izmerenih čvrstoća nakon 3 dana inicijalne nege i godinu dana skladištenja u suvom ambijentu na 20°C, uočljivo je da:

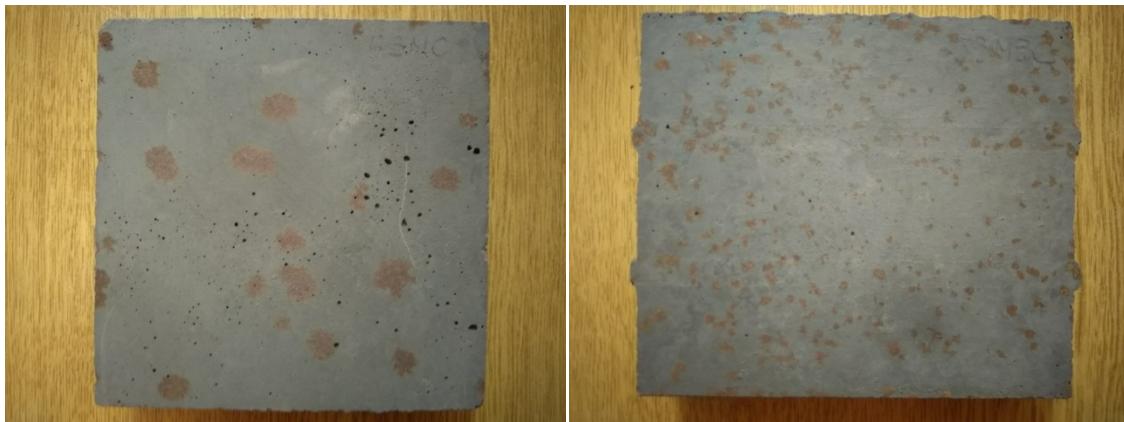
- upoređujući rezultate 2 različite vrste CEM III/B 32,5N LH/SR, bez i sa 30% OPTE Morava-240, može se izvesti zaključak da iako postoji razlika u cementima (NC-, LF-) sa 30% m/m pepela iz TE se postižu bolje čvrstoće nakon godinu dana, u oba slučaja.
- upoređujući rezultate MLC, MLE i MLJ može se rezimirati da dodavanjem morske soli u vodu za mešanje su dobijeni slični rezultati kao sa dva uzorka morske vode, tj. sulfati u morskoj vodi su neznatno smanjili pozitivne efekte hlorida.
- na osnovu postignutih rezultata nakon godinu dana, ternarne mešavine sa i bez hlorida imaju veće čvrstoće pri pritisku 26% i 9%, respektivno. Čvrstoće pri zatezanju savijanjem imaju slične odnose u korist ternarnih mešavina veziva, gde je očigledan doprinos primene slane vode za mešanje.

Na ternarnoj mešavini veziva (bez agregata) sa 30% OPTE Morava240, W/B=0.4 i salinitetom vode 3.8 % 15 dana nakon inicijalne nege je utvrđena količina slobodnih jona hlorida bila 0,17% m/m veziva, a pH 10.4.

## 6.6 POVEZANOST HLORIDA I TERNARNOG SISTEMA VEZIVA NA OTPORNOST PRI HABANJU

Opšte je prihvaćen stav da otpornost betona prema habanju je pre svega u korelaciji sa čvrstocom pri pritisku, vrstom upotrebljenog agregata i njegovom poroznošću. Prilikom ispitivanja uzorka ZBVPP primećeno je da prisustvo hlorida utiče, između ostalog, i na otpornost pri habanju.

Na Slici 6.14 su prikazani uzorci ZBVPP sa 50% m/m zamene CEMIII/B pepelom OP TE Morava-240 pre ispitivanja otpornosti prema habanju metodom širokog točka. Sa leve strane je uzorak pravljen sa vodom 3,8%, a desno sa 11,4% saliniteta (oznake 53MC i 53M3C). A na Slici 6.15 isti uzorci posle ispitivanja



Slika 6.14 Uzorci ZBVPP pravljeni sa vodom 3,8% i 11,4% saliniteta pre ispitivanja otpornosti na habanje



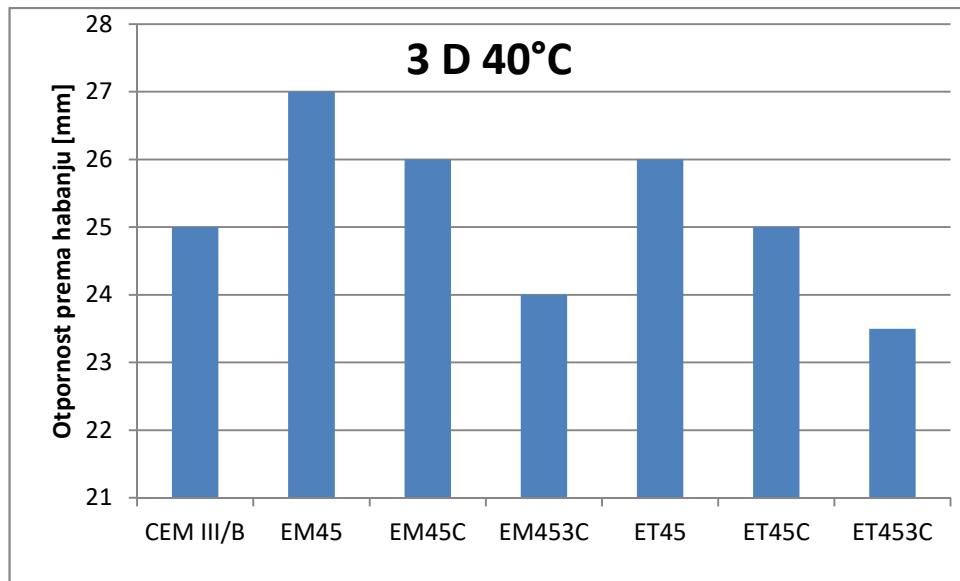
Slika 6.15 Uzorci ZBVPP pravljeni sa vodom 3,8% i 11,4% saliniteta nakon ispitivanja otpornosti na habanje

Kao što se i na slikama može videti uzorci sa različitim salinitetom, pokazali su različite rezultate i u otpornosti prema habanju. Uzeći u komparaciju i uzorak 53M sa 0% saliniteta, rezultati sunavedeni u Tabeli 6.1:

Tabela 6.1 Uporedna analiza uticaja saliniteta na habanje ZBVPP sa 50% OPTEMorava240

Salinitet	0%	3,8%	11,4%
Čvrstoća pri pritisku [MPa]	44,8	45,1	46,0
Kapilarno upijanje [%]	1,89	2,60	2,89
Otpornost prema habanju [mm]	23,5	22,5	21,0

Uporedna analiza na malterskim mešavinama, već prezentovanim u delu 6.3 i 6.4 pokazuju još bolje razliku. Kao i u prethodnom slučaju, ispitivanje otpornosti prema habanju je urađeno nakon 3 dana inicijalne nege, rezultati su prezentovani na Slici 6.15.



Slika 6.15 Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje kod uzoraka sa 0%, 3,8% i 11,4% saliniteta vode za mešanje

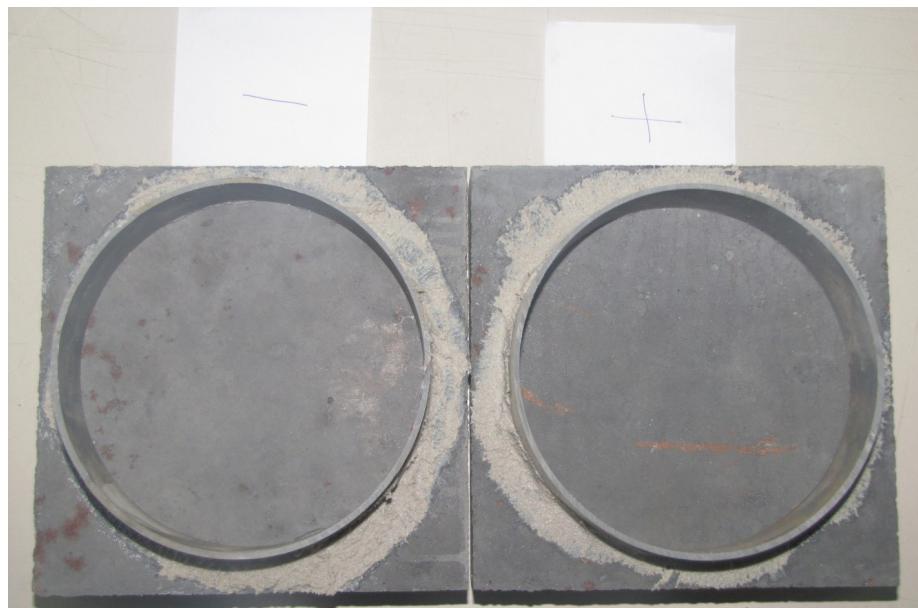
Gore navedeni rezultati su pokazali, da u odnosu na referentni mešavinu bez pepela i saliniteta vode (oznak CEM III/B), uzorci sa 50 %m/m pepela u vezivu i bez hlorida imaju manju otpornost pri habanju. Sa 3,8% saliniteta imaju približno istu otpornost sa CEMIII/B, a uzorci sa 11,4% saliniteta su otporniji na uticaj habanja.

## 6.7 OTPORNOST NA MRAZ U PRISUSTVU SOLI TERNARNOG SISTEMA VEZIVA I HLORIDA U VODI ZA MEŠANJE

Poznato je da prisustvom soli u vodi smanjuje se temperatura smrzavanja vode, u funkciji koncentracije soli u rastvoru i do -21°C. Prilikom ispitivanja uzorka ZBVPP primećeno je da prisustvo hlorida pozitivno utiče i na otpornost površine betona prema dejstvu mraza i soli .

Urađeno je samo jedno probno ispitivanje sa ternarnim sistemom mešavine sa 30% OPTE Morava120 i W/B=0.3 prema recepturi mešavine M33. Napravljena su dva seta od po 3 uzorka sa običnom vodom i sa vodom saliniteta 3,8%. Nakon inicijalne nege 3 dana na 40°C oba seta su ispitana prema metodi opisanoj u Poglavlju 3.

Na Slici 6.16 su prikazani uzorci ZBVPP pre ispitivanja otpornosti prema dejstvu mraza i soli. Sa leve strane je uzorak pravljen sa običnom vodom saliniteta 0%, a desno sa 3,8% saliniteta (oznake - i +).

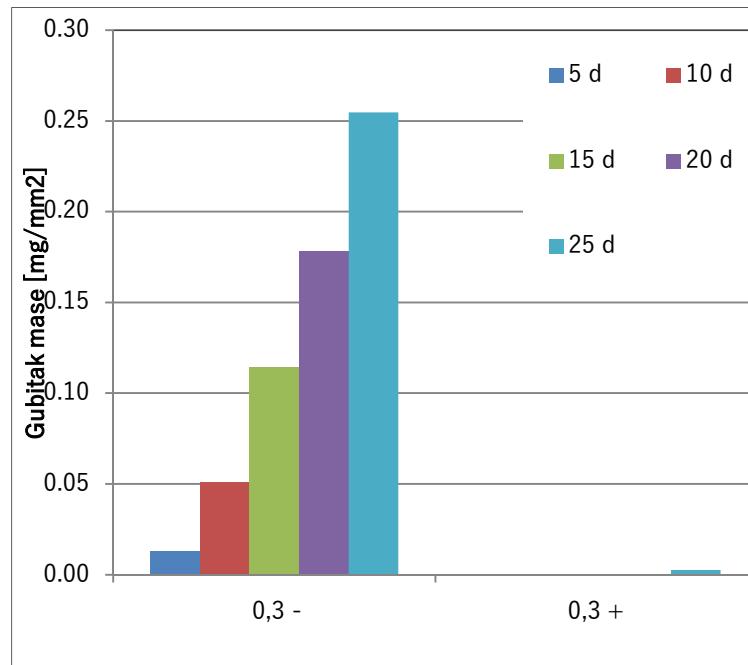


Slika 6.16 Uzorci ZBVPP pravljeni sa običnom vodom i slanom vodom pre ispitivanja otpornosti na mraz

Na Slici 6.17 suprikazani isti uzorci posle ispitivanja u istom redosledu, a rezultati ispitivanja su prikazani na Slici 6.18.



Slika 6.17 Uzorci ZBVPP pravljeni sa običnom vodom (levo) i slanom vodom (desno) nakon ispitivanja otpornosti na mraz



Slika 6.18 Otpornost na dejstvo mraza i soli ternarnog sistema veziva sa 30% OPTE Morava120 proizvedenog sa običnom vodom (oznaka -) i sa salinitetom 3.8% (oznaka+)

Rezultati ispitivanja su pokazali da prisustvom soli u pornom rastvoru ternarnih sistema veziva može se smanjiti štetan uticaj dejstva mraza i soli.



# ZELENI BETONI ULTRAVISOKIH PERFORMANSI



## 7. ZELENI BETONI ULTRAVISOKIH PERFORMANSI

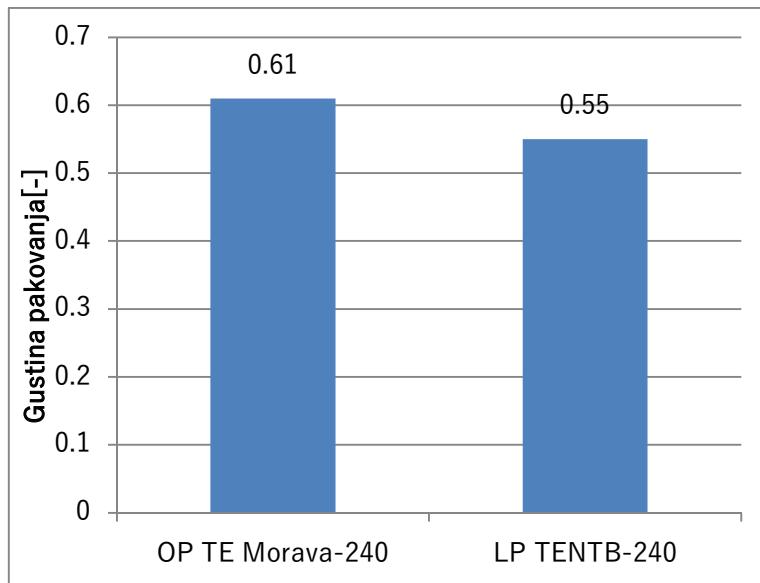
Termini "visoke ili ultravisoke performanse" se ne odnose samo na čvrstoću, već generalno na bilo koja svojstva betona, koja su značajno poboljšana u odnosu na uobičajene vrednosti [149].

Istraživanja u okviru disertacije bila su fokusirana i da na razvoj betona ultravisokih performansi: sa značajno smanjenim ekološkim otiskom i drastično smanjenom cenom, implementacijom ternarne mešavine veziva C-Z-P i recikliranih vlakana iz pneumatika.

Kao što je u delu 2.8 već objašnjeno, primenom SCM u mešavinama UHPC značajno se može smanjiti količina cementnog klinkera. Pri izboru vrste i količine zamenjujućeg mineralnog dodatka prvenstveno bi trebalo koristiti lokalne materijale, ako su primenjivi, pa čak i ako je rezultat možda nekoliko MPa manja čvrstoća. Primena lokalnih materijala podrazumeva ne samo kraći transport, nego niz prednosti sa aspekta održivog razvoja. Drugi korak pri izboru lokalnog materijala ili kombinacije tih materijala bi trebao da bude gustina pakovanja. Ona je izuzetno važna sa aspekta održivog razvoja, jer povećanjem same gustine pakovanja veziva ili betona se povećava efikasnost primene SCM. Dakle, još pre analize hemijske kompatibilnosti, pravilan izbor SCM za UHPC bi trebao da podrazumeva usavršavanje recepture sa aspekta usavršavanja gustine pakovanja. To je najjeftiniji i najracionalniji način povećanja čvrstoće.

Upravo zbog toga je gustini pakovanja posvećena velika pažnja u razvoju ternarnih sistema mešavina. U delu 4.2 i 4.3 su prikazani rezultati ispitivanja uticaja vrste i količine pepela iz TE na svojstva maltera. Pre svega zbog morfoloških razlika, mehanički aktivirani OP TE Morava-240 je pokazao bolje rezultate od LP TENTB-240 u ternarnim sistemima veziva. Pored tih ispitivanja gustina pakovanja je

utvrđena i prema metodi koja je opisana u Poglavlju 3. Rezultati su prikazani na Slici 7.1

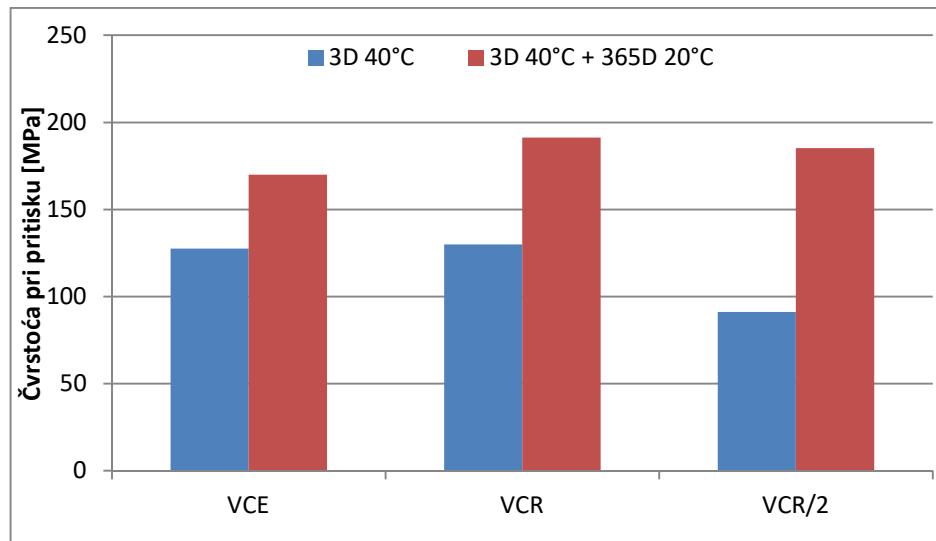


Slika 7.1 Izmerena gustina pakovanja za predmetne vrste pepela iz TE

Rezultati su pokazali da otpadni pepeo sa pepelišta TE Morava nakon prerade ima približno 10% bolju gustinu pakovanja od sežeg LP TENTB-240, koja je značajna razlika kada se radi o visokom sadržaju letećeg pepela u mešavini.

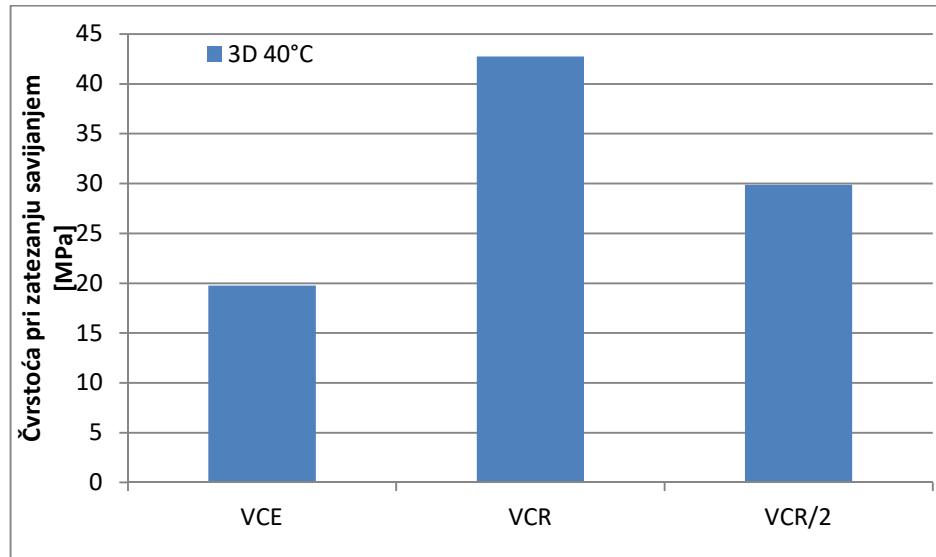
Čelična vlakna su veoma bitan sastavni deo UHPC. S jedne strane su neophodna za povećanje duktilnosti i čvrstoće, s druge strane značajno poskupljuju sam proizvod. Stoga je bilo veoma važno ustanoviti da li se mogu adekvatno ugraditi i kakav je njihov uticaj na čvrstoću u poređenju sa industrijskom mikroarmaturom koja se inače primenjuje. Kao što je u Poglavlju 3 objašnjeno obe vrste vlakana u izvornoj obliku (pre reciklaže pneumatika) imaju sličnu čvrstoću. Na Slici 7.2 su prikazani rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku 3 vrste UHPC. Uzorci sa oznakom **VCE** su pravljeni sa  $300 \text{ kg/m}^3$  industrijske mikroarmature, dok su uzorci sa oznakom **VCR** i **VCR/2** pravljeni sa recikliranim vlaknima u količinama  $300 \text{ kg/m}^3$  i  $150 \text{ kg/m}^3$ , respektivno. Za ispitivanje uticaja vlakana upotrebljen je CEM I cement klase 52,5N

i mikrosilika (silikatna prašina) sa kvarcnim agregatom prema recepturi datoј u Prilogu 7-1.



Slika 7.2 Ispitivanje čvrstoće pri pritisku UHPC sa industrijskim (VCE) i recikliranim vlaknima (VCR)

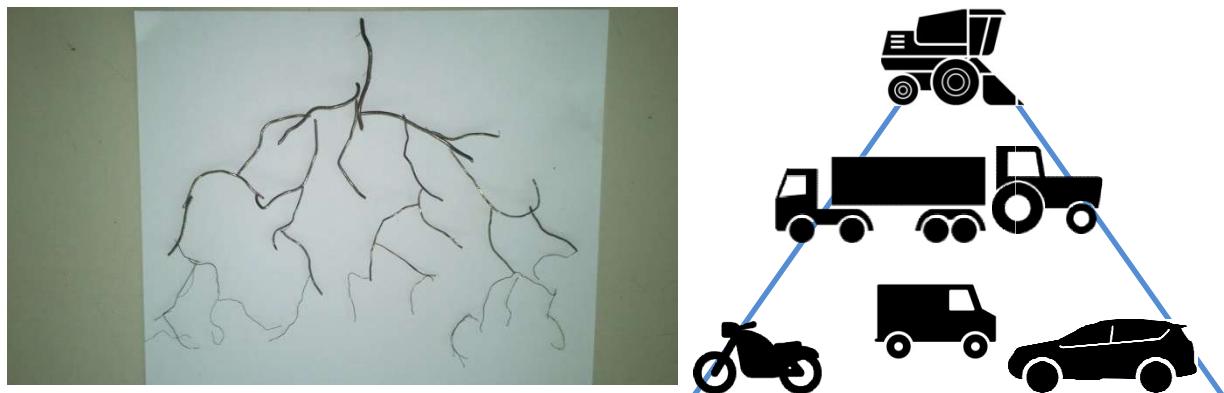
Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem su prikazani na Slici 7.3, predstavljaju srednju vrednost tri ispitivanja i dati su u Prilogu 7-1.



Slika 7.3 Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem UHPC sa industrijskim (VCE) i recikliranim vlaknima (VCR)

Na osnovu gore prikazanog može se zaključiti da su reciklirana vlakna pokazala izuzetno dobre rezultate za primenu u UHPC. Pre svega je značajan njihov uticaj na čvrstoću pri zatezanju savijanjem, gde su pri istoj količini ( $300 \text{ kg/m}^3$ ) pokazala dvostruko veću čvrstoću. Interesantno da su uzorci sa 50% manjom količinom recikliranih vlakana ( $150 \text{ kg/m}^3$ ) imala približno 50% veću čvrstoću pri zatezanju savijanjem od etalonske mešavine sa  $300 \text{ kg/m}^3$  industrijskih vlakana. Ova velika razlika se može objasniti sa dva efekta.

Poznato je da su se u praksi tkzv. kokteli-vlakana, tj. mešavine čeličnih vlakana različitih oblika, dužina i debljina pokaza mnogo efikasnijim od ojačanja koje se postiže primenom samo jedne vrste vlakana u betonu. Prilikom recikliranja pneumatika izmešani sastav vlakana koincidencijom uzrokuje veoma povoljan koktel-vlakana za UHPC, kao što je šematski prikazano na Slici 7.4.



Slika 7.4 Koincidencija u sastavu različitih vrsta pneumatika prilikom recikliranja koja rezultira povoljnim koktelom vlakana za mikroarmiranje betona

Druga povoljnost je upravo osobina koja je donekle i ograničavala širu primenu recikliranih vlakana – njihova relativno teška ugradljivost zbog oblika. Upoređujući sa mikroarmaturom koja je namenski proizvedena, reciklirana vlakna su mnogo više iskrivljena – usled koje je često dolazi do zamršenja vlakana i njihova adekvatna ugradnja je dosta problematična. Nasuprot običnim betonima, usled ogromne

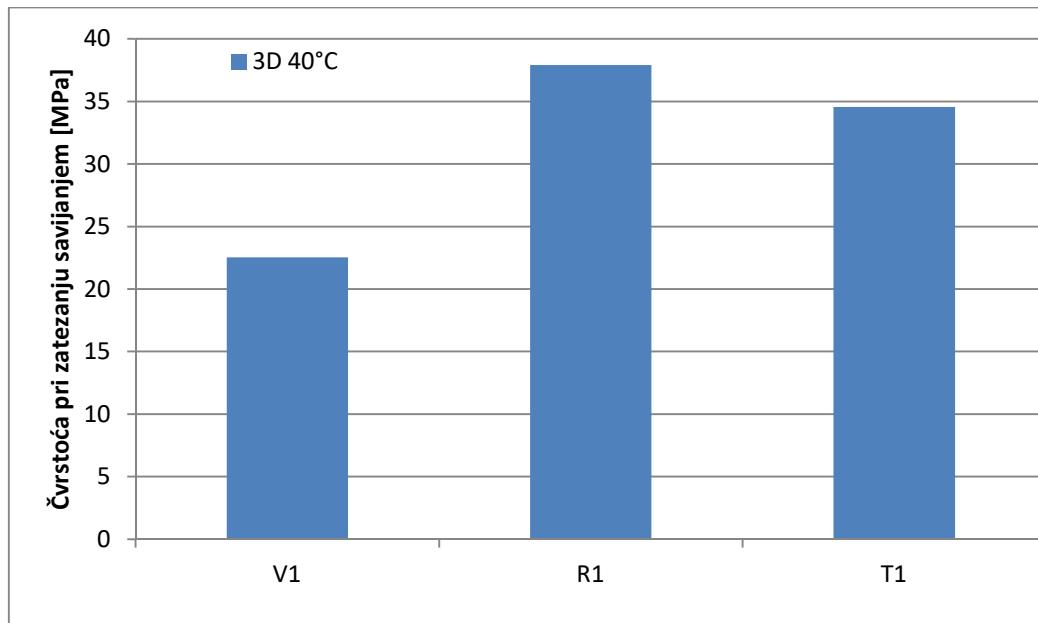
količine veziva i nedostatka krupne frakcije agregata, reciklirana vlakna se veoma efikasno mogu ugraditi u UHPC. A kao što je predstavljeno u radu [150], izdeformisana, izvijena čelična vlakna su efikasnija od izvornog oblika – koji je povoljniji sa aspekta mešanja betona.

Da se reciklirana vlakna veoma efikasno mogu primeniti kod UHPC pokazuju i rezultati čvrstoće pri pritisku prikazani na Slici 7.2. Čvrstoće pri pritisku kod betona sa recikliranim vlaknima su pokazala veću pritisnu čvrstoću od industrijskih vlakana koja se koriste za UHPC i nakon 3 dana inicijalne nege i pri starosti od godinu dana. To potvrđuju i zapreminske mase, 2561, 2601 i  $2515 \text{ kg/m}^3$  izmerene nakon inicijalne nege na uzorcima VCE, VCR i VCR/2, respektivno.

Ispitivanja sa ternarnim sistemima mešavina su sprovedena sa mehanički aktiviranim letećim pepelom TENTB-240 i mehanički aktiviranim OPTE Morava-240. Na osnovu prethodnih ispitivanja se već moglo zaključiti da sa starim, hemijski inaktivnim pepelom iz pepelišta TE Morava je moguće postići bolju gustinu pakovanja, ugradljivost i povoljniji vodovezivni faktor, dok je leteći pepeo iz TENTB hemijski aktivniji i daje doprinos pucolanskim reakcijama.

Nakon rezultata ispitivanja ZBVPP opisanih u Poglavlju 5 izabrane su samo mešavine sa 50 %m/m pepela iz TE. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem su prikazani na Slici 7.5, prikazane su prosečne vrednosti 3 merenja koji su dati u Prilogu 7-1.

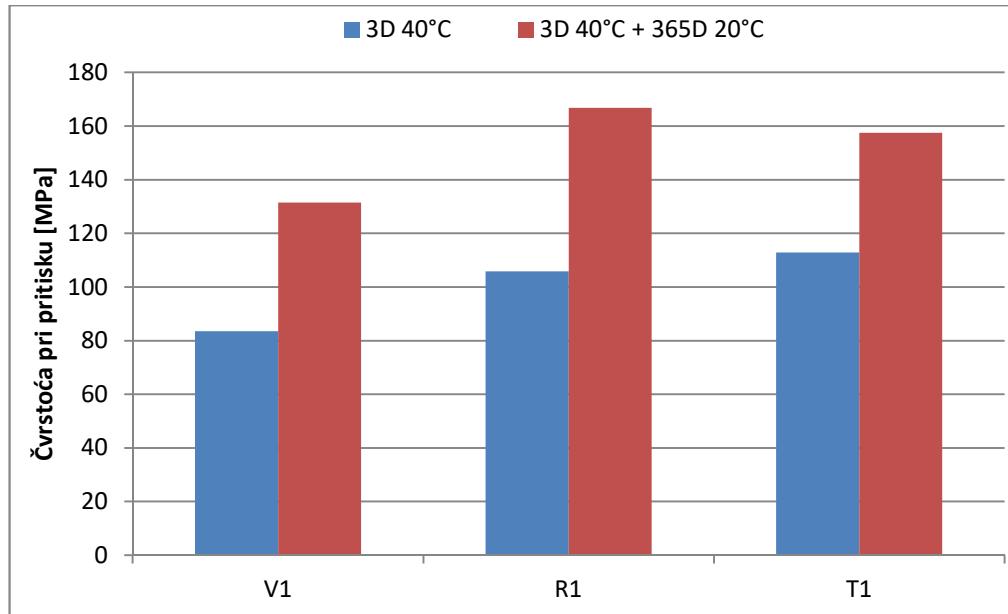
Kod mešavina oznake **V1** i **R1** je CEM III/B zamenjen sa 50 %m/m OPTE Morava240, a leteći pepeo TENTB 240 je primenjen u mešavini oznake **T1**, takođe sa 50% m/m veziva. Uzorci **R1** i **T1** su pravljeni sa  $300 \text{ kg/m}^3$  recikliranih vlaka, dok je **V1** pravljen sa istom količinom industrijskih vlakana koji su i u prethodnom opitu korišćeni.



Slika 7.5 Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem UHPC sa 50 % m/m LP TENTB240 (T1) i 50 % m/m OPTE Morava240 (V1 i R1)

Kao i pri ispitivanju sa cementom CEM I i sa ternarnim sistemom veziva su reciklirana vlakna već nakon inicijalne nege pokazala značajno bolje performanse. Upoređujući čvrstoće pri zatezanju savijanjem sa 2 vrste predmetnih pepela, očekivano je mešavina R1 sa otpadnim pepelom pokazala bolje rezultate zbog veće gustine pakovanja i postignutog manjeg vodovezivnog faktora.

Čvrstoće pri pritisku za iste mešavine su prikazane na Slici 7.6:



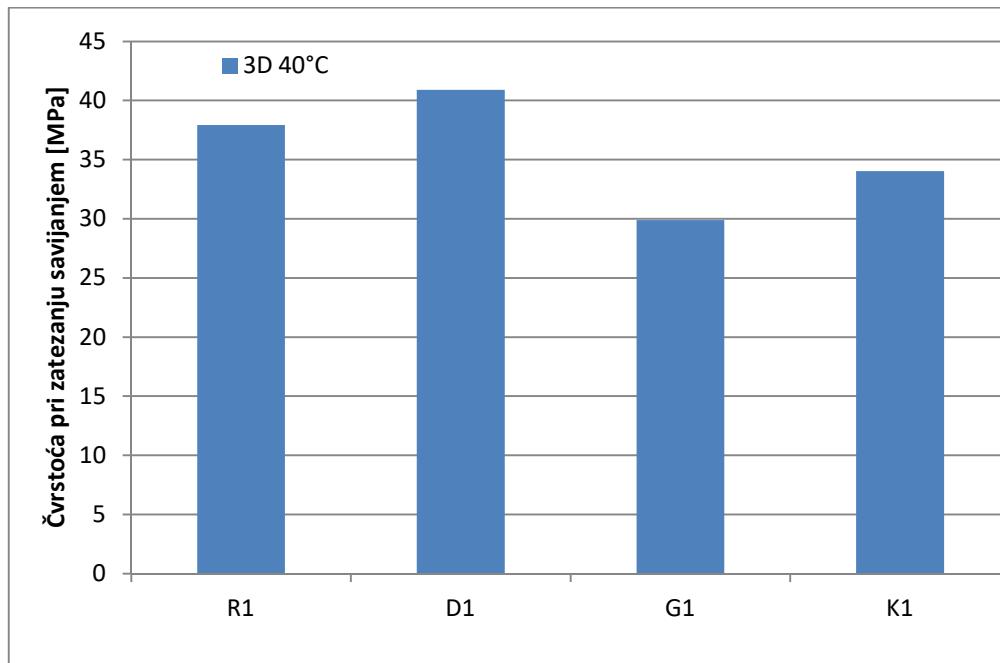
Slika 7.6 Ispitivanje čvrstoće pri pritisku UHPC sa 50 % m/m LP TENTB240 (T1) i 50 % m/m OPTE Morava240 (V1 i R1)

Upoređujući rezultate čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju savijanjem uzoraka oznaka R1 i T1 sa UHPC oznake VCE (sa CEM I i industrijskim vlaknima) može se zaključiti da su postignuti slični rezultati sa ternarnim sistemima veziva i zamenom sa 50 % pepela iz TE u varijaciji sa recikliranim vlaknima iz otpadnih pneumatika. Samo vezivo bazirano na CEM III/B i 50 % m/m pepela ima manju čvrstoću od čistog Portland cementa klase 52.5N, ali sa nižim vodovezivnim faktorom, poboljšanom gustinom pakovanja i optimalnom ugradnjom recikliranih vlakana te razlike se smanjuju. Čvrstoće pri pritisku veće od 100 MPa zajedno sa čvrstoćama pri zatezanju od 40 MPa, dobijene nakon 3 dana inicialne nege na 40° C su dovoljne za primenu, pri čemu nakon godinu dana su čvrstoće pri pritisku povećane za 39% i 59% (za LP TENTB240 i OPTE Morava240) – bez nege. Razvoj čvrstoće bez nege nakon inicialne nege je još jedna velika prednost ternarnih sistema mešavina pre svega pri niskim vodovezivnim faktorima. Naime vodovezivnom faktoru od 0.2 ili manje količina vode u svežoj mešavini se smanjuje do te mere, da u betonu ostaje samo ona količina koja je potrebna i za hidrataciju cementa. U slučaju zamene CEM

III/B sa 50% hemijski inaktivnog pepela vodovezivni faktor od 0,2 praktično znači efektivni vodocementni faktor 0,4 i odličnu kompaktnost, koja nakon inicijalne nege sprečava isparavanje te vode.

Poslednji korak da se UHPC učini "zelenijim" je primena lokalnog alternativnog agregata. Za sve prethodno prikazana ispitivanja na UHPC je korišćen agregat kvarc, visoke čistoće (>99%) i kvaliteta, poreklom iz Nemačke (oznaka **R1**). Za ispitivanje mogućnosti primene lokalnog finog agregata upotrebljeni su kvarc (Ub)-oznaka **K1**, dijabaz (Divčibare)- oznaka **D1** i granit (Radalj)-oznaka **G1**.

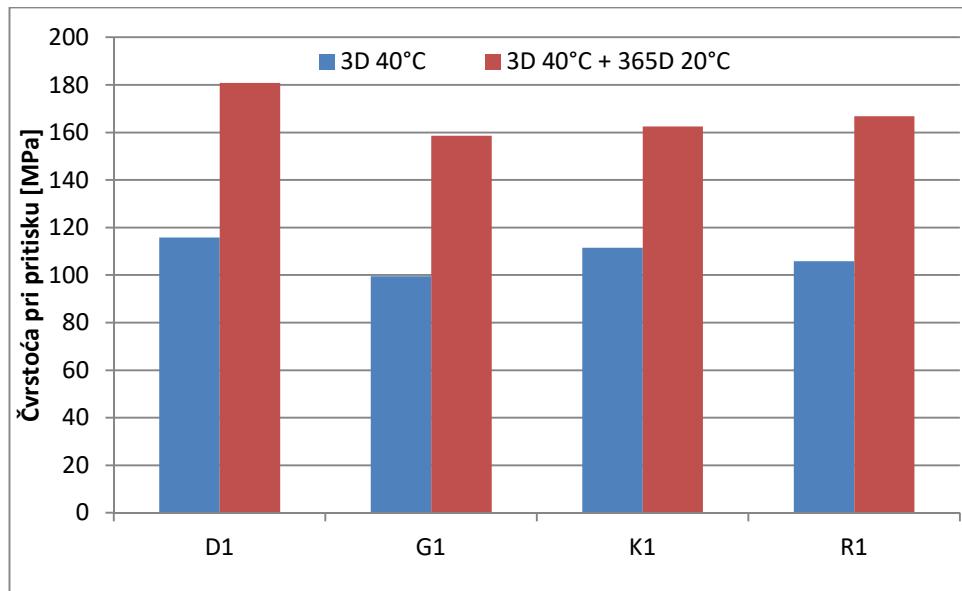
Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem su prikazani na Slici 7.7. Vrednosti su dati u Prilogu 7-1.



Slika 7.7 Uticaj vrste kamenog materijala agregata, fine granulacije na čvrstoće pri zatezanju savijanjem UHPC sa ternarnim sistemom veziva

Sve mešavine su pravljene koristeći recepturu oznake R1, tj. CEM III/B je zamjenjen sa 50% OPTE Morava-240 i upotrebljena su reciklirana vlakna u količini  $300 \text{ kg/m}^3$ .

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku su prikazani na Slici 7.8.:



Slika 7.8 Uticaj vrste kamenog materijala agregata, fine granulacije na čvrstoće pri zatezanju savijanjem UHPC sa ternarnim sistemom veziva

Upoređujući rezultate UHPC dobijene sa lokalnim kamenim materijalima sa rezultatima mešavine R1 može se zaključiti da su svi materijali primenjivi i sa svakom recepturom je dobijena čvrstoća pri pritisku od 150 MPa. Kvarc iz Uba je pokazao veoma slične rezultate kao i kvarc iz Nemačke. Dijabaz je pokazao najbolje rezultate, dok je granit nešto manje od referentne mešavine R1.

### Zaključak

Reciklirana vlakna su pokazala veoma dobre rezultate prilikom primene u UHPC. Upoređujući sa industrijski proizvedenim vlaknima, koja se koriste za te vrste betona, reciklirana vlakna su pokazala ubedljivo bolje rezultate.

Ovi rezultati su pokazali da sa ternarnim sistemima veziva C-Z-P, primenjujući ekstremno nisku količinu cementnog klinkera (manje od  $125 \text{ kg/m}^3$ ) se mogu postići UHPC, sličnih mehaničkih karakteristika kao što imaju i postojeći, komercijalno dostupni UHPC [151].

Režim nege od 3 dana na  $40^{\circ}$  C se pokazao veoma efikasnim i pri veoma niskom vodovezivnim faktorima ( $w/b < 0.15$ ), jer bez dodatne nege posle godinu dana pokazuju znatno povećanje čvrstoće.



**TERNARNI SISTEMI VEZIVA  
POBOLJŠANIH  
TERMOTEHNIČKIH  
SVOJSTAVA**



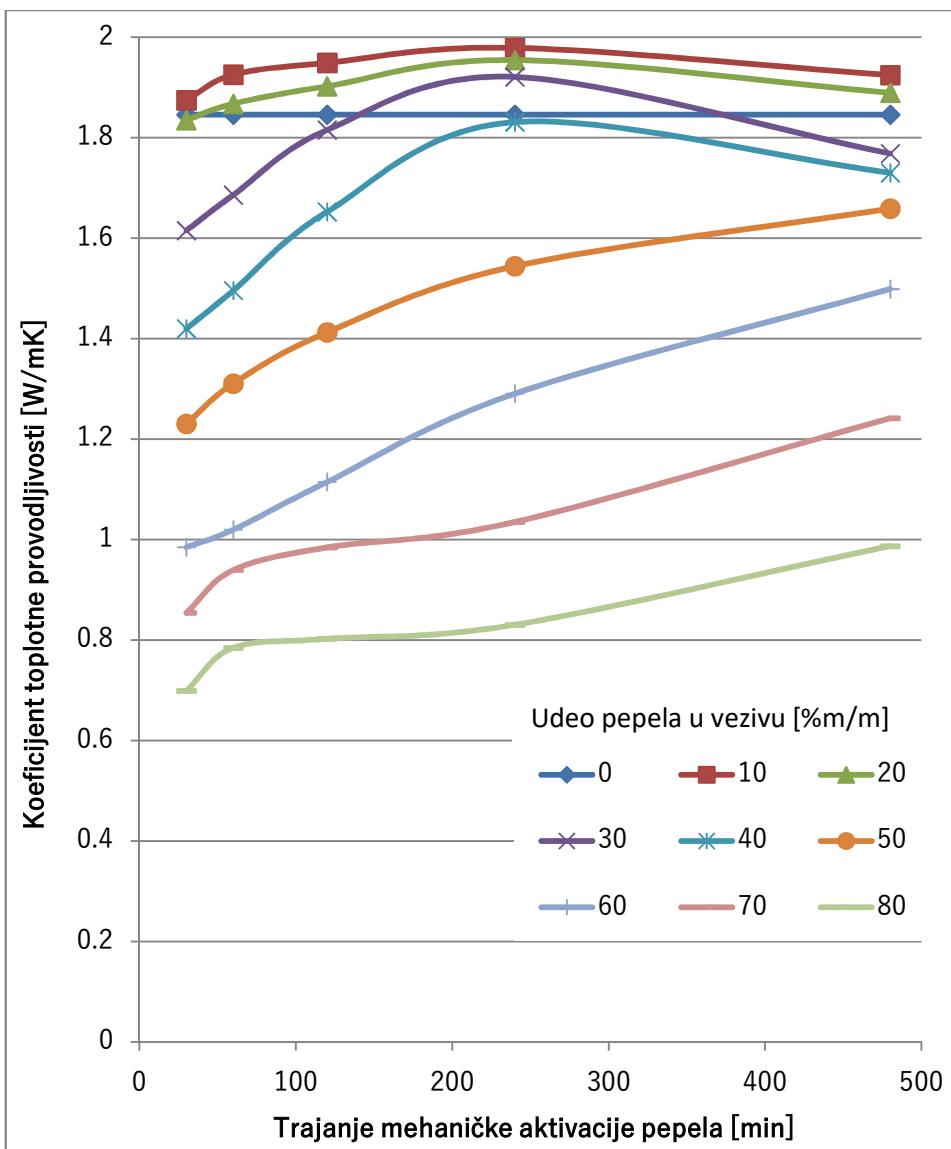
## 8. TERNARNI SISTEMI VEZIVA POBOLJŠANIH TERMOTEHNIČKIH SVOJSTAVA

U vidu činjenica i postojećih stavova, objašnjenih u Poglavlju 2, SCM imaju veliki potencijal u razvoju lakoagregatnih betona. Pored mogućnosti da poboljšaju pakovanje čestica u cementnoj matrici i time **unaprede mehanička svojstva lakih betona** (važno za konstruktivne betone), **smanjuju i karbonski otisak takvog betona.**

Međutim, postoje i dodatne beneficije prilikom primene SCM u lakoagregatnim betonima u **unapređenju** njihovih **termotehničkih svojstava**. Na taj način postiže se dvostruki efekat u energetskoj efikasnosti: inkorporiranjem SCM materijala i smanjenjem količine cementa se smanjuje emisija CO<sub>2</sub> pri realizaciji nekog objekta. Istovremeno se dobije materijal (beton) poboljšanih termoizolacionih svojstava u energetskom omotaču objekta, koji će tokom vremena smanjiti energetske gubitke.

Kod betona, pre svega lakoog betona, može biti važan zahtev njegova karakteristika termoizolacije. Suprotno od slučajeva kada je poželjna visoka topotna provodljivost beona, poput podnih grejnih sistema ili pri smanjenju gradijenta tj. temperaturne razlike u konstrukcijama, naročito kod mostova. Leteći pepeo iz TE je jedan veoma interesantan SCM, jer se može primeniti za modifikovanje koeficijenta topotne provodljivosti betona u oba pravca.

Sa otpadnim pepelom TE Morava je urađeno ekstenzivno ispitivanje ove karakteristike. Koeficijent topotne provodljivosti je izmeren na uzorcima maltera pravljenim prema recepturama iz dela 4.2.2.3., zamenjujući CEMIII/B u intervalu 0-80% V/V. Analiziran je uticaj zamene pepela sa mehanički aktiviranim pepelima u trajanju od 0, 30, 60, 120, 240 i 480 minuta. Merenja su urađena pri starosti od 35 dana (28 dana uronjeni u vodu + 7 dana u sušnici na 60° C). Izmereni rezultati su dati u [152] i grafički prikazani na Slici 8.1.



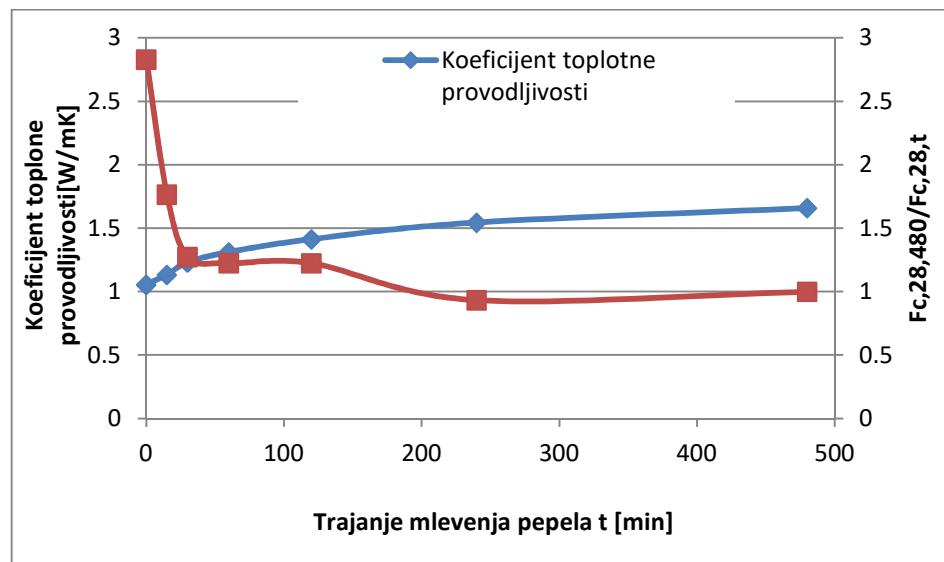
Slika 8.1 Uticaj trajanja mlevenja pepela i procenta zamene veziva sa otpadnim pepelom iz TE Morava

Kao što se na Slici 8.1 može videti, varijacijama sa modifikacijom i količinom pepela iz TE je moguće značajno uticati na koeficijent toplotne provodljivosti. U svim mešavinama zapreminske odnose veziva, agregata i vode je isti. Konstantne su i zapremine agregata i vode. Jedina promenljiva je zamjenjujući deo pepela i taj deo zapremine je između 2 – 13 % od ukupne zapremine betona. Ipak, u poređenju sa

koeficijentom toplotne provodljivosti etalona (uzorak sa 100% CEM III/B u vezivu), koji iznosi  $\lambda = 1.85 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , rezultati variraju od 38% do 107%.

Dalja mogućnost je optimalizacija trajanja mlevenja u cilju postizanja optimalne mešavine. Kao što su rezultati u delu 4.2.2.3 pokazali, sa rastom trajanja mehaničke aktivacije pepela, povećava se kompaktnost trokomponentnog sistema veziva i raste čvrstoća kompozitnog maltera. S druge strane, kao što se na Slici 8.1 može videti, istovremeno se povećava koeficijent toplotne provodljivosti. Ako dakle postoji potreba da se napravi konstruktivni beton sa određenim termoizolacionim svojstvima, kod pepela postoji mogućnost optimalnog izbora.

Za dalje potrebe istraživanja izabrana je mešavina sa 50% otpadnog pepela iz TE Morava. S jedne strane ova količina se već može smatrati značajnom ili „visokim sadržajem pepela“ u mešavini, shodno cilju ove teze. S druge strane na osnovu rezultata Poglavlja 4 je jasno da mehaničke karakteristike se značajno ne smanjuju. Optimalna dužina mehaničke aktivacije je utvrđena na osnovu rezultata prezentovanih na Slici 8.1 i rezultata 28-dnevnih čvrstoća pri pritisku ( $F_c$ ) mešavina sa 50% pepela OPTE Morava (deo 4.2.2.3). Optimalizacija je prikazana na Slici 4.2:



Slika 8.2 Optimalizacija koeficijenta toplotne provodljivosti i čvrstoće maltera sa ternarnim sistemom veziva, u funkciji trajanja mehaničke aktivacije OP TE Morava

Kao što se može videti najoptimalnija je dužina mehaničke aktivacije pepela u trajanju od 30 minuta, koja je usvojena za nastavak ispitivanja.

Analiza uticaja ternarnog sistema veziva u lakoagregatnim betonima je urađena sa 6 različitih vrsta cementa sa udelom portand cementnog klinkera (PCK) [%] kako je prikazano u Tabeli 8.1:

*Tabela 8.1 Upotrebљene vrste cementa i udeo PCK*

1.	CEM I 52.5 N	95-100
2.	CEM I 42.5 R	95-100
3.	CEM III/B 32.5	20-34
4.	CEM II/A/S 42.5 R	80-94
5.	CEM II/A-M (S-V) 42.5 R	80-88
6.	CEM II/B-M (P-S) 32.5R	65-79

Primenjen je laki agregat tipa Liapor granulacije 4/8, kojim je zamenjena krupna frakcija u betonu, zapremine  $0,35 \text{ m}^3/1 \text{ m}^3$ . Prvo su ispitani lakoagregatni betoni pravljeni sa 6 navedenih vrsta cementa prema recepturama datim u Prilogu 8-1, bez dodavanja pepela.

Rezultati ispitivanja važnijih fizičkih i mehaničkih osobina lakih betona su prikazani u Tabeli 8.2 [152]. Nakon 28 dana nege u vodi rezultati su izmereni na vodom zasićenim uzorcima. Posle, uzorci su držani na vazduhu na sobnoj temperaturi do starosti 90 dana, do merenja istih osobina.

*Tabela 8.2 Fizičke i mehaničke karakteristike lakoagregatnih betona od cementa*

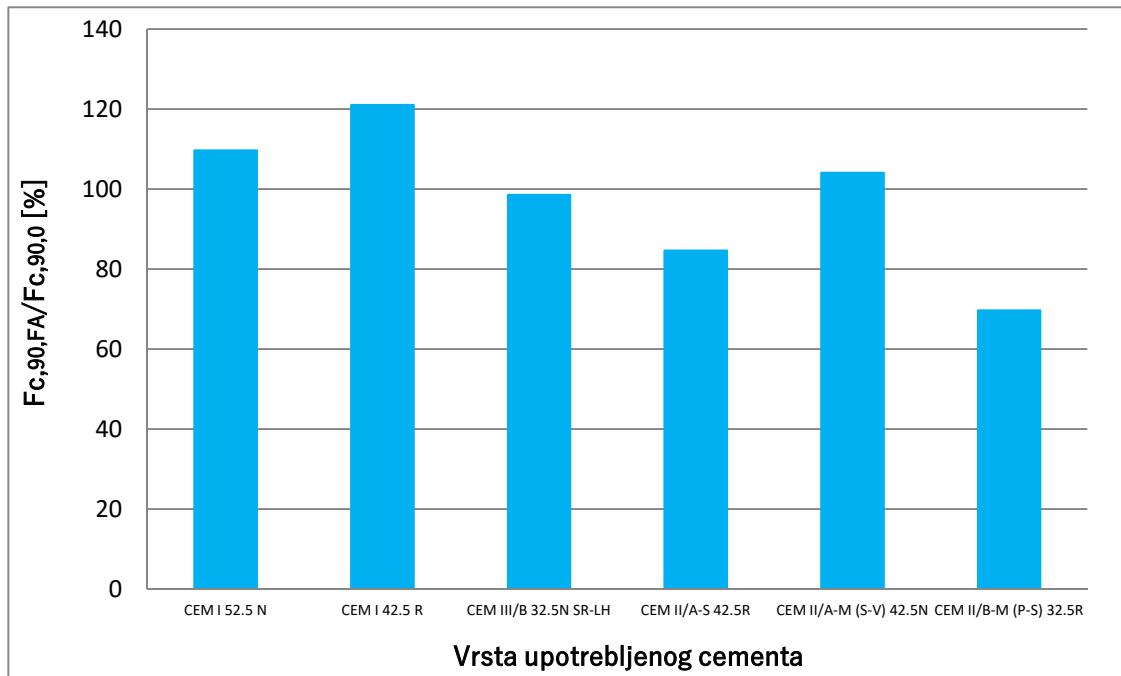
Vrsta cementa	Zasićeno stanje (28 dana)			Suvo stanje (90 dana)		
	Zapr. masa / kg m <sup>-3</sup>	Čvrstoća pri pritisku/ MPa	Brzina užv. / m s <sup>-1</sup>	Zapr. masa / kg m <sup>-3</sup>	Čvrstoća pri pritisku/ MPa	Brzina užv. / m s <sup>-1</sup>
CEM I 52.5 N	1726	17.83	4005	1553	<b>18.55</b>	3419
CEM I 42.5 R	1709	17.18	3953	1570	<b>18.24</b>	3479
CEM III/B 32.5	1728	16.25	3893	1542	18.30	3419
CEM II/A-S 42.5 R	1706	17.53	3970	1587	21.33	3520
CEM II/A-M (S-V) 42.5 R	1705	17.25	3927	1537	18.02	3419
CEM II/B-M (P-S) 32.5R	1709	15.85	3827	1534	17.22	3300

Takođe su napravljeni lakoagregatni betoni sa 6 navedenih vrsta cementa, u kojima je cement zamenjen sa 50% m/m pepela OPTE Morava-30. Rezultati ispitivanja važnijih fizičkih i mehaničkih osobina lakih betona su prikazani u Tabeli 8.3 [152].

*Tabela 8.3 Fizičke i mehaničke karakteristike lakoagregatnih betona sa 50% zamene veziva mehanički aktiviranim pepelom OPTE Morava-30*

Vrsta cementa	Zasićeno stanje (28 dana)			Suvo stanje (90 dana)		
	Zapr. masa / kg m <sup>-3</sup>	Čvrstoća pri pritisku/ MPa	Brzina užv. / m s <sup>-1</sup>	Zapr. masa / kg m <sup>-3</sup>	Čvrstoća pri pritisku/ MPa	Brzina užv. / m s <sup>-1</sup>
CEM I 52.5 N	1709	19.66	3884	1558	20.34	3362
CEM I 42.5 R	1754	21.82	3940	1611	22.08	3419
CEM III/B 32.5	1763	15.87	3569	1561	<b>18.04</b>	3466
CEM II/A-S 42.5 R	1766	15.60	3975	1610	18.06	3520
CEM II/A-M (S-V) 42.5 R	1745	15.16	3940	1595	18.76	3394
CEM II/B-M (P-S) 32.5R	1731	13.95	3709	1542	12.01	3288

Analizom rezultata 2 grupe lakoagregatnih betona sa 6 različitih vrsta cementa (sa i bez zamene sa pepelom) je urađena evaluacija postignutih čvrstoća pri pritisku, prikazana na Slici 8.3.



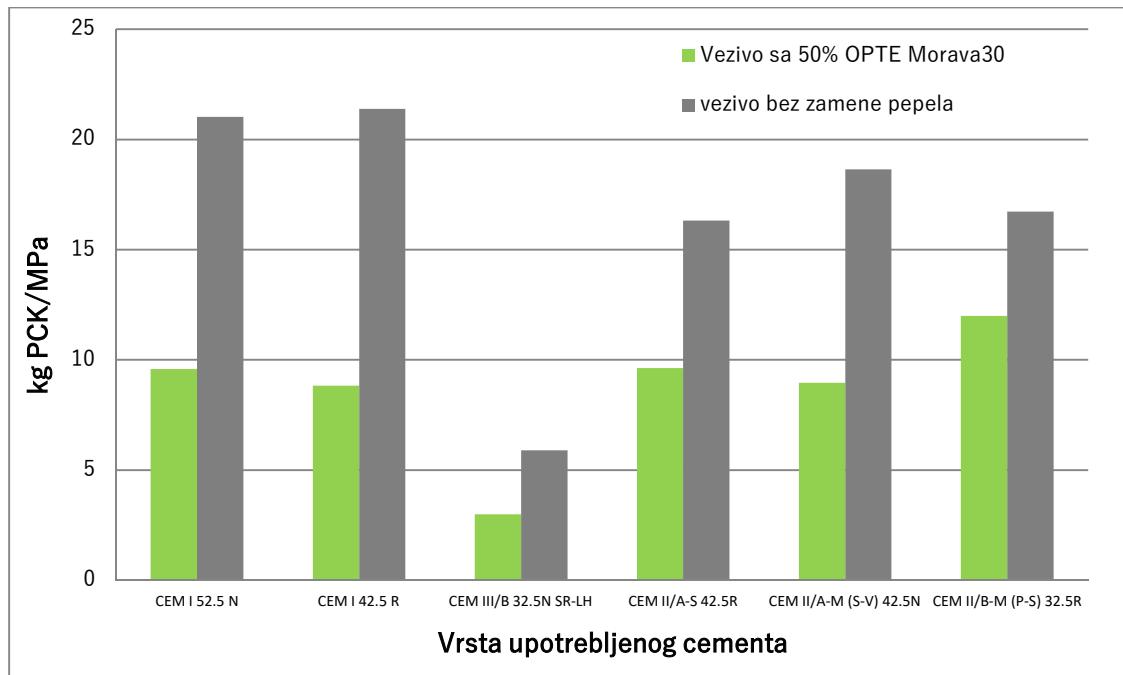
$F_{c,90,FA}$  – čvrstoća pri pritisku lakih betona, sa 50% pepela u vezivu, nakon 90 dana

$F_{c,90,0}$  – čvrstoća pri pritisku lakih betona, bez zamene veziva sa pepelom, nakon 90 dana

Slika 8.3 Uticaj zamene 50% veziva sa OPTE Morava-30 na čvrstoću pri pritisku nakon 90 dana

Na osnovu gore prikazanog upoređenja se može zaključiti da u slučaju CEMIII/B, zamenom 50% veziva sa pepelom OPTE Morava-30, čvrstoća pri pritisku lako betona se značajno ne menja – zahvaljujući efektu unutrašnje nege.

Na Slici 8.4 su analizirane mešavine sa 50% zamenjenim vezivom sa aspekta efikasnosti utrošene količine cementnog klinkera za postignutu čvrstoću pri pritisku, tj. koliko kg cementnog klinkera je potrebno za postizanje 1 MPa čvrstoće pri pritisku:



Slika 8.4 Potrebna količina Portland cementnog klinkera (PCK) za postizanje 1 MPa čvrstoće pri pritisku lakih betona pri starosti 90 dana

Prema prikazanim rezultatima na Slici 8.4, ternarnim sistemom veziva C-Z-P (Slika 8.5) postignuta je drastična redukcija na svega 3 kg PCK po MPa, koja je 6-7 puta manja u poređenju sa lakinim betonima, gde cement nije zamenjen pepelom.

Treći aspekt pri analizi uticaja primene ternarnog sistema veziva na osobine lakoagregatnih betona su postignuti termotehnički parametri. U Tabeli 8.4 su prikazani rezultati ispitivanja koeficijenta toplotne provodljivosti i zapreminskog toplotnog kapaciteta lakih betona bez zamene veziva pepelom – prema [152]. A u Tabeli 8.5 su dati rezultati ispitivanja koeficijenta toplotne provodljivosti i zapreminskog toplotnog kapaciteta lakih betona sa zamenom veziva OPTE Morava-30 – prema [152].



Slika 8.5 Uzorak lakoagregatnog betona sa ternarnim sistemom veziva C-Z-P

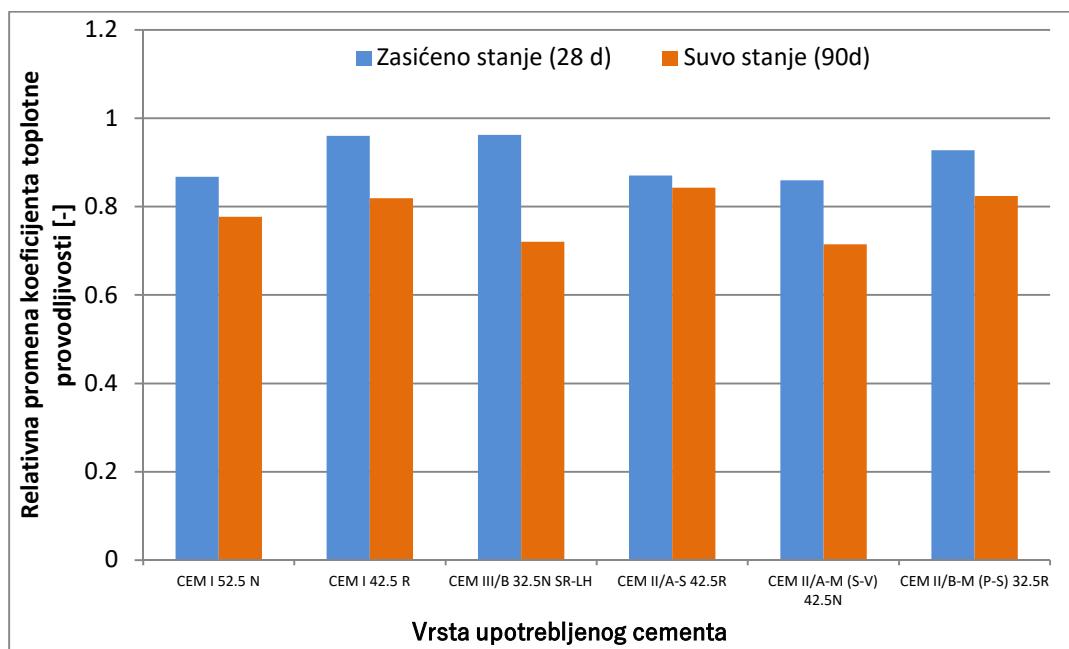
Tabela 8.4 Termotehničke karakteristike lakoagregatnih betona **bez** zamene veziva pepelom

Vrsta cementa	Zasićeno stanje (28 dana)		Suvo stanje (90 dana)	
	Koef. topl. provodljivosti / Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Zapr. topotlni kapacitet / MJm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	Koef. topl. provodljivosti / Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Zapr. topotlni kapacitet / MJm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
CEM I 52.5 N	1.28	1.79	0.86	1.50
CEM I 42.5 R	1.30	1.90	0.85	1.59
CEM III/B 32.5	1.21	1.79	0.78	1.51
CEM II/A-S 42.5 R	1.41	1.86	0.86	1.57
CEM II/A-M (S-V) 42.5 R	1.27	2.02	0.84	1.57
CEM II/B-M (P-S) 32.5R	1.23	1.78	0.78	1.58

*Tabela 8.5 Termotehničke karakteristike lakoagregatnih betona sa 50% zamene veziva mehanički aktiviranim pepelom OPTE Morava-30*

Vrsta cementa	Zasićeno stanje (28 dana)		Suvo stanje (90 dana)	
	Koef. topl. provodljivosti / $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Zapr. toplotni kapacitet / $\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$	Koef. topl. provodljivosti / $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Zapr. toplotni kapacitet / $\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$
CEM I 52.5 N	1.12	1.56	0.67	1.59
CEM I 42.5 R	1.25	1.71	0.69	1.61
CEM III/B 32.5	1.17	1.85	0.56	1.53
CEM II/A-S 42.5 R	1.23	1.87	0.72	1.66
CEM II/A-M (S-V) 42.5 R	1.09	1.76	0.60	1.56
CEM II/B-M (P-S) 32.5R	1.14	1.73	0.64	1.57

Na osnovu datih rezultata u Tabeli 8.4 i Tabeli 8.5 je urađena komparativna analiza rezultata koja je prikazana na Slici 8.6.



Slika 8.6 Potrebna količina Portland cementnog klinkera (PCK) za postizanje 1 MPa čvrstoće pri pritisku lakih betona pri starosti 90 dana

Rezultati prikazani na Slici 8.6 su možda najvredniji pažnje kada je reč o lakin betonima. Često u praksi se sitna frakcija u betonu - rečni pesak zamenjuje adekvatnom frakcijom lakinog agregata, kako bi se koeficijent toplotne provodljivosti smanjio za 20%. U ovom istraživanju su rezultati pokazali da zamenom veziva sa optimalno modifikovanim otpadim pepelom je postignuti sličan učinak (posmatrajući ispitivanja na suvim uzorcima) kod svake vrste cementa. Zamenom 50% CEM III/B sa OPTE Morava30 u mešavini je koeficijent toplotne provodljivosti smanjen za  $0.22 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  ili 28 % što je jedan od najboljih rezultata eksperimenta.

Zapreminski toplotni kapaciteti se nisu značajno promenili.

I sa lakoagregatnim betonima su urađena ispitivanja primenjujući negu od 3 dana na  $40^\circ \text{ C}$ , pri čemu su dobijeni veoma slični rezultati kao i pri opisanoj metodi nege, i stoga detaljno nisu ni izložena.

### Zaključak

Eksperimentalnim delom istraživanja je dokazano da se u slučaju lakinih betona, prelaskom na ternarni sistem veziva C-Z-P mogu značajno unaprediti termotehnička svojstva lakoagregatnih betona, pored istovremenog drastičnog smanjenja karbonskog otiska. Mora se naglasiti i činjenica da je to postignuto sa industrijskim otpadnim materijalom, koji je primenjen u velikim količinama ( $200\text{kg/m}^3$ ) povećavajući ekološki značaj ovog rešenja. Svi ovi pozitivni efekti su postignuti a da se pri tome čvrstoća lakinog betona nije značajnije promenila – zahvaljujući unutrašnjoj nezi.

Kao što je prikazano, sa pepelom iz TE je moguće značajno uticati koeficijent toplotne provodljivosti. Zamenom dela cementa zapremine između 2 – 13 % od ukupne zapremine betona, koeficijent toplotne provodljivosti se menja u dijapazonu -62% do +7%.

Sa aspekta čvrstoće pri pritisku (koja je važna za konstruktivne luke betone), ternarni sistem mešavine se pokazao adekvatnom zamenom u lakoagregatnim betonima. Mešavinom sa 50% CEMIII/B i 50% OPTE Morava30 nakon 90 dana je postignuta skoro ista čvrstoća kao i sa čistim CEM I klase 52,5N i CEM I klase 42,5R.

Sa ekološkog aspekta je postignut najznačajniji rezultat. Ternarnim sistemom veziva C-Z-P postignuta je drastična redukcija na svega 3 kg Portland cementnog klinkera po MPa, koja je 6-7 puta manja u poređenju sa lakinim betonima, gde cement nije zamenjen pepelom.

Zamenom 50% CEM III/B sa OPTE Morava30 u mešavini je koeficijent toplotne provodljivosti smanjen za  $0.22 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  ili 28 %, što je jedan od najboljih rezultata eksperimenta.

Primena pepela u lakinim betonima pokazuje možda najbolje njihov potencijal u održivom razvoju. Kao što su ispitivanja pokazala optimalizacijom svojstava pepela iz TE (u ovom slučaju čak sa pepelišta) može se postići modifikovan SCM dizajniranih svojstava prema nameni. Pored višestruke ekološke koristi, rezultirajući beton ima unapređena funkcionalna svojstva i nižu cenu.





# PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA I ZAKLJUČCI



## 9. 1 PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

### HEMIJSKA AKTIVACIJA PEPELA

Tokom izrade ove disertacije u fokusu je bila mehanička aktivacija pepela. Ona svakako (kao što je pokazano u Poglavlju 4) povećava doprinos svim osobinama svežeg i očvrslog betona. Međutim, postoje mogućnosti dalje aktivacije pepela iz TE. Trenutno je već u fazi testiranja hemijski dodatak kojim se povećava čvrstoća pri pritisku betona sa ternarnim sistemom veziva C-Z-P 20-50%. Tako npr. dodavanjem mešavi sa oznakom M32 postignuta je čvrstoća pri pritisku 167 MPa.

### PRIMENA TERNARNOG SISTEMA VEZIVA SA AGREGATIMA ORGANSKOG POREKLA

Betoni sa ternarnim sistemima veziva C-Z-P imaju niži pH od običnih betona, na taj način su povoljniji za primenu agregata organskog porekla (paulovnija, trska, konoplja i slama). Betoni pravljeni sa slamom kao organski agregat zapremske mase  $1000 \text{ kg/m}^3$  imaju čvrstoću pri pritiskuveću od 10 MPa, koeficijent topotne provodljivosti manji od  $0,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  i nakon 5 godina izloženosti atmostferskim uticajima pokazuju postojanost fizičkih karakteristika.

### RAZVOJ GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA – GUSTINE PAKOVANJA PEPELA U BETONU

Tokom istraživanja urađen je samo uži izbor vrste pepela kao rezultata njegove mehaničke aktivacije. Postoji međutim ogroman potencijal u daljem usavršavanju, razvoju mešavine pepela iz TE sa ciljem daljeg povećanja gustine pakovanja. Kao što je pokazano, to može biti opravdano i sa aspekta povećanja mrazootpornosti betona. Projektovanjem granulometrijskog sastava pepela iz TE (mlevenog) postoji mogućnost da se unapredi gustina pakovanja i da prisustvom celih čestica pepela odgovarajuće veličine poveća trajnost betona sa visokim sadržajem pepela iz TE.

## 9. 2. ZAKLJUČCI

U 21. veku sve više pažnje je posvećeno smanjenju štetnih uticaja na životnu sredinu, na koju i beton ima značajan uticaj. Uticaji proizvodnje cementnog klinkera na životnu sredinu, veliko opterećenje industrijskih otpadnih materijala na životni prostor, nestaćica adekvatnog agregata ili povećanje cene agregata usled dužeg transporta su trenutni već prisutni izazovi vezani za sve veću potrošnju betona. Pri čemu sve veći problem predstavlja i potreba za trećom najvažnijom komponentom svih betona: vodom.

Istraživanja vezana za doktorsku disertaciju su bila fokusirana na težnji ka razvoju betona sa aspekta održivosti, posmatrajući navedene nove okolnosti XXI veka.

Bazirano na tim principima predmet istraživanja doktorske disertacije su bile fizičko-mehaničke karakteristike zelenih betona, koji se sastoje od:

- velike količine letećeg pepela ili otpadnog pepela (više od 30%),
- značajno smanjene količine portland cementnog klinkera (manje od 20% veziva) i
- od granulisane zgure iz visoke peći.

Imajući u vidu da su danas već opravdani su samo dugotrajni betoni, koji podnose uticaje sredine kojima su izloženi iznad svih zahteva pri razvoju je postavljena trajnost. Poštujući ovu činjenicu, u okviru ove doktorske disertacije su istražene mogućnosti za postizanje Zelenih Betona Visokih Performansi sa velikim sadržajem letećeg Pepela (ZBVPP).

Upotrebljene su dve vrste proizvoda sagorevanja uglja: (1) sveže uskladišteni LP (ili elektrofilterski pepeo) klase F iz silosa i (2) stari otpadni pepeo, koji se nalazi na otvorenim deponijama i koji se do sada retko koristio u betonima, a nije poznato da je sa visokim sadržajem primjenjen za proizvodnju betona visokih čvrstoća.

Ispitivanja su pokazala da ternarni sistemi veziva cement-zgura-pepeo, primenom obe vrste pepela u izvornom obliku nisu dala zadovoljavajuće rezultate. Iz tog razloga izabrana je metoda mehaničkog aktiviranja letećeg pepela ili otpadnog pepela.

Mlevenjem dve različite vrste pepela je moguće značajno modifikovati njihove osobine kojima se mogu unaprediti i svojstva konačnog proizvoda – betona.

#### **PRELIMINARNA ISTRAŽIVANJA MEHANIČKI AKTIVIRANOG PEPELA:**

Mlevenjem letećeg pepela iz TENT B i otpadnog pepela iz pepelišta TE Morava njihova gustina i specifična površina se povećava do 240 i 480 minuta mlevenja, respektivno.

SEM snimci su pokazali značajne razlike u morfologiji 2 vrste pepela, koje su uticale i na rezultat mlevenja. Sveži leteći pepeo iz TENT B je nakon mehaničke aktivacije pretežno jednolične granulacije, dok su kod samlevenog OPTE Morava prisutne nesamlevene čestice letećeg pepela i nakon 240 minuta.

Analiza mineralnog sastava pepela iz TE metodom rendgenske difrakcije je pokazala da kod LP iz TENTB usled mehaničke aktivacije najznačajnija promena povećanje intenziteta kvarca, praćena smanjenjem ostalih kristalnih faza. Kod otpadnog pepela iz TE Morava usled mehaničke aktivacije promene u intenzitetima su mnogo manje za razliku od letećeg pepela TENTB. Na sličan način i u ovom slučaju se povećava intenzitet kvarca i smanjuju se ostalih kristalnih faza do 240 minuta trajanja mlevenja.

#### **OSNOVNA ISPITIVANJA TERNARNIH SISTEMA VEZIVA:**

Ispitivanja zamene CEM III/B sa mehanički aktiviranim predmetnim pepelima u dijapazonu 0-80 % V/V su pokazala da je reč o kombinaciji veoma kompleksnih uticaja. Mlevenjem pepela iz TE se smanjuje upijanje vode čestica pepela, povećava se specifična površina i gustina čestica, utiče se na pakovanje zrna u mešavini i na efekat filera.

Zamenom CEM III/B sa elektrofilterskim pepelom iz TENTB u ternarnom sistemu veziva pri mehaničkoj aktivaciji do izražaja dolazi efekat povećanja ugradljivosti, dakle usitnjavanjem čestica pepela povećava se površina hemijski manje aktivnih delova. Pri tome povećava se kristalna faza, pre svega kvarca i izražen je i efekat filera (veće rane čvrstoće), ali i doprinos 28-dnevnoj čvrstoći - zahvaljujući pucolanskoj aktivnosti. Pri zameni CEM III/B sa mehanički aktiviranim letećim pepelom TENT B 240 (mleven 240 minuta) je postignuta najuspešnija supstitucija. Jednodnevne čvrstoće su veće od absolutne vrednosti referentne mešavine do 30 % V/V zamene sa pepelom zahvaljujući efektu filera i pucolanskim reakcijama. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem nakon 28 dana je pri 20 % V/V zamene sa pepelom 15% veća od rezultata mešavine bez pepela. 28-dnevna čvrstoća pri pritisku je pri 10 % V/V takođe veća od čvrstoće referentne mešavine. Najveći pozitivan uticaj na čvrstoću pri pritisku je imala mešavina sa 50 % V/V zamene sa pepelom računajući od linije proporcionalnosti iznosi povećanje od 56,8 %.

Zamenom CEM III/B sa otpadnim pepelom iz TE Morava u ternarnom sistemu veziva pri mehaničkoj aktivaciji najizraženiji je efekat povećanja ugradljivosti, smanjenja upijanja čestica pepela, unapređenja gustine pakovanja i efekat filera. Sa mehanički aktiviranim OP TE Morava u trajanju od 240 minuta skoro svi rezultati (sem 28-dnevne pritisne čvrstoće pri 80% V/V zamene) su pokazali pozitivan efekat zamene što je bilo najbolji rezultat sa malterskim mešavinama. Pri čemu je najveći pozitivan efekat postignut, u odnosu na proporcionalne vrednosti zamene pri 50 % V/V zamene - 75% veća čvrstoća pri pritisku.

To što su generalno gledajući dobijeni bolji rezultati sa hemijski inaktivnim pepelom OPTE Morava 240 ukazuje da mehanički aktivirani pepeo sa različitim veličinama zrna u sastavu rezultira boljim pakovanjem zrna u mešavini od samlevenog pepela sa jednoličnom granulometrijom.

Na ternarne sisteme mešavina povoljno utiče nega pri povećanim temperaturama. Već pri 25°C (letnji uslovi) primetno je značajno povećanje mehaničkih karakteristika, prvenstveno sa otpadnim pepelom. Rezultati su pokazali i da već pri 25°C do 30% m/m zamene sa mehanički aktiviranim pepelima čvrstoće pri pritisku su veće od referentnog maltera (100% CEM III/B) nakon 7 i 28 dana i da do 50% m/m je granica efikasne zamene CEM III/B sa OPTE Morava 240 i LP TENTB240 sa aspekta iskorišćenosti što veće količine u malteru/betonu. Što je veoma značajna količina, pri kojoj ideo cementnog klinkera je svega cca. 13 % m/m i 85 % m/m u vezivu čine industrijski nuzproizvodi i otpadni materijali.

Sa pretenzijom da se iskoriste hidratacioni potencijali CEM III/B, ali istovremeno i da se ubrzaju spore pucolanske reakcije istražena je mogućnost nege na 40°C. Kao što su rezultati pokazali, nega betona na 40°C u trajanju od 3 dana je optimalna, ali su već i 24 sata dovoljna za ternarne sisteme veziva (ako se spreči gubitak vlage) i pojava "crossover"-efekta je zanemarljiva. Rezultati su pokazali da naknadni priraštaji čvrstoća nakon inicijalne nege od 3 dana na 40°C zavise od vrste pepela i od dužine trajanja mehaničke aktivacije.

## ZBVPP

Najvažniji deo istraživanja su ispitivanja Zelenih Betona Visokih Performansi sa velikim sadržajem letećeg Pepela (ZBVPP) u Poglavlju 5. Rezultati su ispunili postavljene ciljeve ove disertacije. Postignute su čvrstoće pri pritisku čak veće od **120 MPa sa 50% pepela** u vezivu i **135 MPa sa 30% pepela** u vezivu, **pri 13% i 19% cementnog klinkera** vezivu, respektivno.

Dve različite vrste pepela imaju veoma različito ponašanje:

Mehanički aktiviranim (240 minuta) svežim letećim pepelom iz TENT B se postižu veće čvrstoće pri određenom vodovezivnom faktoru u poređenju sa otpadnim pepelom. Zamenjujući 30% CEM III/B sa LP TENTB240, postižu se čvrstoće betona za klasu cementa 42.5.

Otpadni pepeo međutim ima mnogo manju potrebu za vodom pri postizanju određene konzistencije svežeg betona naspram ternarnih mešavina sa letećim pepelom. Rezultati su pokazali i da pri većim količinama OPTE Morava240 bolji rezultati se postižu pri niskim vodovezivnim faktorima (čak  $W/B < 0.2$ ), suprotno on LP TENTB240, gde se veće čvrstoće mogu postići samo pri višljim vodovezivnim faktorima.

ZBVPP se mogu postići i klasičnom negom, ali sa predstavljenom metodom nege, 3 dana na  $40^{\circ}\text{C}$ , marginalizovan je rizik od neadekvatne nege betona. Posle inicijalne nege, čvrstoće ZBVPP se razvijaju i nakon godinu dana sa većim priraštajima pri nižim vodovezivnim faktorima – bez potrebe daljeg negovanja vodom.

**Postignuti rezultati čvrstoće pri količini upotrebljenog cementnog klinkera se mogu smatrati jedinstvenima:**

**Čvrstoće pri pritisku veće od 100 MPa** su postignute upotrebom **0,67 kg/MPa** cementnog klinkera, bez upotrebe skupih mineralnih dodataka, što je 10-15 puta manje od najčešće upotrebljene količine cementnog klinkera.

Velika pažnja je bila posvećena ispitivanju indikatora trajnosti betona ovakvih betona. Rezultati su pokazali da se mogu postići ZBVPP koji ispunjavaju najvišje zahteve u pogledu trajnosti:

- klasa otpornosti prema habanju „I“ je postignuta pri svim ispitanim procentima zamene, sa obe vrste pepela. Pored toga je utvrđeno da otpornost na habanje ZBVPP je u dobroj korelaciji sa čvrstoćom.
- ispitivanjem dubine prodora vode pod pritiskom je utvrđeno da su svi ispitani ZBVPP postigli klasu vodonepropostljivosti V-III. Betoni sa većom količinom pepela su pokazala manji otpor prema prodiranju za određeni vodovezivni faktor, kod obe vrste pepela.
- ispitivanje otpornosti površine betona prema dejstvu mraza i soli se pokazao kao najzahtevnije ispitivanje za ZBVPP. Generalno se može zaključiti da ZBVPP bez aeranta sa  $W/B \geq 0,3$  nisu postojani pri ovom dejstvu. Sa aerantima su međutim pokazali veoma dobru kompatibilnost i postignute su klase otpornosti prema dejstvu mraza i soli MS-0.
- pri ispitivanju otpornosti površine betona prema dejstvu mraza i soli mešavina sa 30% OPTE Morava240 i vodovezivnim faktorom  $W/B=0.3$  se pokazala potpuno otporna i bez upotrebe aeranata. Ovo je najverovatnije rezultat dovoljne količine nesamlevenih čestica letećeg pepela povoljnog prečnika, pomoću kojih postignut je sličan efekat u betonima kao i pri aeriranju
- ispitivanjem ukupnog upijanja je utvrđeno da se LP TENTB 240 postižu bolji rezultati pri određenom vodovezivnom faktoru od OPTE Morava 240. Ukupno upijanje manje <6% je postignuto skoro sa svim predmetnim mešavinama ZBVPP, stoga se oni mogu smatrati ujedno i otpornima na atmosferske uticaje.
- rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja su u dobroj korelaciji sa rezultatima ukupnog upijanja.
- ZBVPP pravljeni sa OPTE Morava240 sa  $W/B < 0.3$  su pokazala manje upijanje (i ukupno i kapilarno) sa većim količinama zamene CEMIII/b, suprotno betonima sa LP TENTB240, kod kojih se pri povećanju količine pepela u mešavini uvek se povećava i upijanje.

### SINERGIJA TERNARNIH SISTEMA VEZIVA I HLORIDA

Rezultati ispitivanja su pokazali da između ternarnih sistemi veziva C-Z-P i slane vode za mešanje dolazi do sinergije. Dobijaju se veće rane čvrstoće pri čemu ne dolazi do "crossover"-efekta ni nakon godinu dana. Slana voda utiče povoljno i na ugradljivost ternarnih sistema veziva suprotno kada se koristi samo sa CEMIII/B. Pod vodom, uzorci pravljeni sa slanom vodom, sa 50% otpadnog pepela u vezivu imaju veću čvrstoću na zatezanje pri savijanju čak i referentne mešavine CEMIII/B bez pepela, pravljenog i negovanog pijaćom vodom godinu dana.

Rezultati su pokazali i da ternarni sistemi veziva imaju veću otpornost na habanje ako se prave sa vodom koja sadrži hloride, a povoljno utiče i na mrazootpornost.

Pripremom betona sa morskom vodom za mešanje, korišćenjem agregata poreklom iz morske vode ili pomoću rasola – otpadne vode u industriji desalinizacije morske vode povećava se značaj ZBVPP sa aspekta ekologije i održivog razvoja.

### ZELENI BETONI ULTRAVISOKIH PERFORMANSI:

Sa ciljem smanjenja ekološkog otiska i cene betona ultravisokih performansi eksperimentalnim istraživanjima je analizirana mogućnost adekvatne zamene najuticajnijih komponenti: mikroarmature, cementnog klinkera i agregata.

Betoni ultravisokih čvrstoća su pravljeni sa čeličnim recikliranim vlaknima dobijenih reciklažom pneumatika, koja su zahvaljujući obliku i sastavu pokazala bolja mehanička svojstva i od industrijskih.

Zamenjujući 50% veziva sa mehanički aktiviranim otpadnim pepelom iz TE Morava, sa recikliranim vlaknima je postignuta **čvrstoća pri pritisku od 166 MPa i čvrstoća pri zatezanju savijanjem od 37 MPa**, primenjujući režim inicialne nege od 3 dana na 40°C i sa manje od **125 kg/m<sup>3</sup> cementnog klinkera**, čija cena je nekoliko puta jeftinija od cene referentne mešavine.

Sa izborom odgovarajućeg lokalnog materijala – dijabaza postignuta je **čvrstoća pri pritisku od 180 MPa i pri zatezanju savijanjem od 40 MPa.**

#### TERNARNI SISTEMI VEZIVA POBOLJŠANIH TERMOTEHNIČKIH SVOJSTAVA

Primena pepela u lakin betonima pokazuje možda najbolje njihov potencijal u održivom razvoju. Kao što su ispitivanja pokazala optimalizacijom svojstava pepela iz TE (u ovom slučaju čak sa pepelišta) može se postići modifikovan SCM dizajniranih svojstava prema nameni. Pored višestruke ekološke koristi, rezultirajući beton ima unapređena funkcionalna svojstva i nižu cenu.





LITERATURA



## 10. LITERATURA

- [1] United Nations General Assembly (March 20, 1987). "Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future; Transmitted to the General Assembly as an Annex to document A/42/427 – Development and International Co-operation: Environment; Our Common Future, Chapter 2: Towards Sustainable Development; Paragraph 1". United Nations General Assembly. Retrieved 1 March 2010.
- [2] "Development and the Environment." World Development Report 1992. World Bank, Washington, DC, 1992.
- [3] <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>, (02.02.2020.)
- [4] ISO (2016) ISO/TC 71—STRATEGIC BUSINESS PLAN. Concrete, reinforced concrete and prestressed concrete. International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- [5] Sedgwick, J. Strong but Sensitive, Atlantic. April 1991. Pages 70-76
- [6] U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries - Cement, January 2020, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-cement.pdf>, 01.05.2020.
- [7] Antroula V. Georgiou, Stavroula J. Pantazopoulou. Use of Waste Fly Ash from Power Plants for Use in Cementitious Composites for Structural Elements, 4th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, At Limassol, Cyprus (2016)
- [8] Devezas T.C., Vaz A.M., Magee C.L. Global Pattern in Materials Consumption: An Empirical Study. Industry 4.0. Studies on Entrepreneurship, Structural Change and Industrial Dynamics. Springer, Cham. 2017. pp 263-292
- [9] CEMBUREAU - The European Cement Association. Activity Report 2016. Cembureau. Brussels. 2017

- [10] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio. Sustainable cement production—present and future. In Cement and Concrete Research. Volume 41. Issue 7. 2011. pp. 642-650
- [11] C. Meyer. The greening of the concrete industry. Cement and Concrete Composites, Vol.31 (8). 2009. pp. 601-605
- [12] Climate Change 1995 -IMPACTS, ADAPTATIONS AND MITIGATION OF CLIMATE CHANGE:SCIENTIFIC-TECHNICAL ANALYSES. Cambridge University Press. Cambridge. 1996
- [13] WBCSD. (2005). The Cement Sustainability Initiative: Progress Report. World Business Council for Sustainable Development.  
<http://www.wbcsd.org/> (02.02.2020.)
- [14] United Nations Development Programme:Sustainable Development Goals  
<http://www.undp.org/content/undp/en/home.html> (02.02.2020.)
- [15] Balázs L. György: Challenges and possibilities of sustainability, First International Conference on Concrete Sustainability. Tokyo, Japan. 2013. pp 79-85.
- [16] Sabbie A Miller, Arpad Horvath, Paulo J M Monteiro. Readily implementable techniques can cut annual CO<sub>2</sub> emissions from the production of concrete by over 20%. Environmental Research Letter. Vol. 11. 2016. Pp.1-7
- [17] Glavind, M.: New FIB Guidline on green concrete structures. Proceedings of the First International Conference on Concrete Sustainability. First International Conference on Concrete Sustainability. Japan Concrete Institute, Tokyo. 2013. pp. 25-30
- [18] Thomas, M.: Supplementary Cementing Materials in Concrete. CRC Press, Taylor and Francis Group: New York, NY, USA. (2014)
- [19] R.J. Detwiler, J.I. Bhatty, S. Bhattacharja: Supplementary cementing materials for use in blended cements.PCA Research and Development Bulletin RD112T. (1996)
- [20] Siddique, R. and Khan, M.I.: Supplementary Cementing Materials. Springer, New York. (2011). pp.1-10

- [21] Bjegović, D., Serdar, M.: Alternative materials in sustainable construction. Proceedings of the 1st International Conference CoMS - Zadar. Sveučilište u Zagrebu. Građevinskipakultet.(2017).pp.8-24
- [22] Soroka I, Stern N. Calcareous fillers and the compressive strength of Portland cement. Cement and Concrete Research. 1976 May 1;6(3):367-76.
- [23] Scrivener KL, Lothenbach B, De Belie N, Gruyaert E, Skibsted J, Snellings R, Vollpracht A. TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs. Materials and Structures. 2015 Apr 1;48(4):835-62.
- [24] Adams, W.M. (2006). "The Future of Sustainability: Re-thinking Environment and Development in the Twenty-first Century." Report of the IUCN Renowned Thinkers Meeting, 29–31 January 2006.
- [25] M. C.G. Juenger, R. Siddique: Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. Cement and Concrete Research. Volume 78. 9 (2015). pp.71-80
- [26] Z.T. Yao, X.S. Ji, P.K. Sarker, J.H. Tang, L.Q. Ge, M.S. Xia, Y.Q. Xi: A comprehensive review on the applications of coal fly ash. Earth-Science Reviews. Volume 141. (2015). pp. 105-121
- [27] M. Ahmaruzzaman: A review on the utilization of fly ash. Progress in Energy and Combustion Science. Volume 36. Issue 3.(2010). pp. 327-363
- [28] T. Hemalatha, AnanthRamaswamy: A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. Journal of Cleaner Production. Volume 147. (2017). pp. 546-559
- [29] [http://www.b92.net/biz/vesti/srbija.php?yyyy=2015&mm=07&dd=02&nav\\_id=1010981](http://www.b92.net/biz/vesti/srbija.php?yyyy=2015&mm=07&dd=02&nav_id=1010981) (21.08. 2017.)
- [30] M.M. Životić, D. D. Stojiljković, A.M. Jovović, V. V. Ćudić: Mogućnost korišćenja pepela i šljake sa deponije termoelektrane „Nikola Tesla“ kao otpada sa upotrebnom vrednošću. Hemijska industrija. Volume 66 (3). (2012). pp. 403–412

- [31] M. Šešlja, A.Rosić, N.Radović, M. Vasić, M.Đogo,M.Jotić: Properties of fly ash and slag from the power plants. *Geologia Croatica.* Volume 69 (3). (2016). pp. 317–324
- [32] M. Šešlja, A. Rosić, N. Radović, M. Vasić, M. Đogo, M.Jotić: Laboratory testing of fly ash. *Tehnički vjesnik.* Volume 23(6). (2016).pp. 1839-1848
- [33] ASTM C618-15 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- [34] [30] S. Popovics: Concrete-making materials. McGrow-Hill Book Company. NewYork. (1979). pp. 118-121
- [35] R Helmuth: Fly ash in cement and concrete. Portland Cement Association. (1987).
- [36] P. Brzaković: Priručnik za proizvodnju i primenu građevinskih materijala nemetaličnog porekla. Knjiga 1. Orion Art. Beograd. (2000). pp.613-623
- [37] S. A.Mohammed,M. R. Karim: Review: Application of coal bottom ash as aggregate replacement in highway embankment, acoustic absorbing wall and asphalt mixtures. *Materials Science and Engineering.*Volume210. (2017). pp.1-4
- [38] J. R. Dungca1, J.A.Jao: Strength and permeability characteristics of road base materials blended with fly ash and bottom ash. *International Journal of GEOMATE.*Vol. 12. Issue 31. (2017). pp. 9-15
- [39] Glavind M, Munch-Petersen C. Green concrete in Denmark. *STRUCTURAL CONCRETE.* LONDON, THOMAS TELFORD LIMITED. (2000). pp.19-26
- [40] Damtoft J.S., Glavind M., Munch-Petersen C.: Danish Centre for Green Concrete. *Proceedings of Third CANMET/ACI International Symposium, Sustainable Development of Cement and Concrete, Supplementary Papers,* San Francisco, CA, USA. (2001). Volume 1619. pp. 401418
- [41] R. D. Hooton, J. A. Bickley: Design for durability: The key to improving concrete sustainability. *Construction and Building Materials.* Volume 67. Part C.(2014).pp. 422-430

- [42] E. P. Mora: Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment*. Volume 42. Issue 3.(2007)pp. 1329-1334
- [43] Hela R, Orsáková D.: The mechanical activation of fly ash. *Procedia Engineering*. Volume 65 (2013), pp.87-93.
- [44] Marjanović, N., Komljenović, M., Baščarević, Z. and Nikolić, V.: Improving reactivity of fly ash and properties of ensuing geopolymers through mechanical activation. *Construction and Building Materials*. Volume 57. (2014). pp.151-162.
- [45] Mucsi G., Csőke B.: Erőműi pernyék fizikai és kémiai tulajdonságai. CriticEI 6 - Erőműi pernye komplex hasznosítása, Miskolc. (2014). pp.67-81
- [46] Newman J., Choo B.S.: Advanced concrete technology 3: processes. Butterworth-Heinemann; 2003. pp.3/32
- [47] SRPS EN 934-2 Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labeling, Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd (2014)
- [48] Ramachandran VS. Concrete admixtures handbook: properties, science and technology. William Andrew; 1996 Dec 31.
- [49] D. Jeftić: Uticaj termohigrometrijskih parametara sredine na neka svojstva svežeg i očvrslog betona u funkciji primene superplastifikatora,čistog portland cementa i cementa sa dodatkom zgure, Doktorska disertacija, 1995.
- [50] Kong X, Zhang Y, Hou S. Study on the rheological properties of Portland cement pastes with polycarboxylate superplasticizers. *Rheologica Acta*. 2013 Jul 1;52(7):707-18.
- [51] Plank J., Hirsch C. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption. *Cement and Concrete Research*. 2007; 37:537–542
- [52] E. Sakai, K. Yamada, A. Ohta, Molecular structure and dispersion-adsorption mechanisms of comb-type superplasticizers used in Japan, *Journal of Advanced Concrete Technology* 1(1) (2003) 16-25.

- [53] Al-Neshawy F, Ojala T, Punkki J. Stability of Air Content in Fresh Concretes with PCE-Based Superplasticizers. *Nordic Concrete Research.* 2019 Jun 1;60(1):145-58.
- [54] Tamaki S, Saito K, Okada K, Atarashi D, Sakai E. Properties of a new type of polycarboxylate admixture for concrete using high volume blast furnace slag cement. *Special Publication.* 2015 Jun 1;302:113-24.
- [55] Habbaba A, Plank J. Interaction between polycarboxylate superplasticizers and amorphous ground granulated blast furnace slag. *Journal of the American Ceramic Society.* 2010 Sep;93(9):2857-63.
- [56] Quan H.Z., Hideo K.: Experimental study on effects of type and replacement ratio of fly ash on strength and durability of concrete. *The Open Civil Engineering Journal.* Volume 7. (2013). pp.93-100
- [57] Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Sinsiri T.: Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites.* Volume 27(4) (2005) pp. 425-428.
- [58] Lam L., Wong Y.L., Poon C.S.: Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete. *Cement and Concrete Research.* Volume 28(2). (1998)pp.271-283.
- [59] Siddique R.: Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research.* Volume 34(3). (2004) pp.487-493.
- [60] Bilodeau A., Malhotra V.M.: High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. *ACI Materials Journal.* Volume 97(1).(2000) pp.41-48.
- [61] Sivasundaram V., Carette G.G., Malhotra V.M.: Long-term strength development of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Composites.* Volume 12(4). (1990). pp. 263-270
- [62] Owaid H.M., Hamid R., Taha M.R.: Elevated Temperature Performance of Multiple-Blended Binder Concretes. *High Performance Concrete Technology and Applications.* InTech. (2016).

- [63] Xu G., Tian Q., Miao J., Liu J.: Early-age hydration and mechanical properties of high volume slag and fly ash concrete at different curing temperatures. *Construction and Building Materials.* Volume 149. (2017). pp. 367-377
- [64] Ramezanianpour A.A., Malhotra V.M.: Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. *Cement and concrete composites.* Volume 17(2). (1995). pp. 125-133
- [65] Aldea C.M., Young F., Wang K., Shah S.P.: Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement. *Cement and Concrete Research.* Volume 30(3). (2000). pp.465-472.
- [66] Popovics S. *Concrete-making materials.* New York, etc.: Hemisphere Publishing Corporation; 1979 Jan.
- [67] Hamzah S, Aprianti E. The Effect Of Thermal Activation Time and Type Of Fly Ash On The Compressive Strength Of High Volume Fly Ash-Bamboo Mortar. *Lowland Technology International.* 2019 Dec 4;21(3, Dec):159-71.
- [68] Aldea CM, Young F, Wang K, Shah SP. Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement. *Cement and Concrete Research.* 2000 Mar 1;30(3):465-72.
- [69] Aprianti E, Shafiq P, Zawawi R, Hassan ZF. Introducing an effective curing method for mortar containing high volume cementitious materials. *Construction and Building Materials.* 2016 Mar 15;107:365-77.
- [70] Yousuf S, Shafiq P, Ibrahim Z, Hashim H, Panjehpour M. Crossover Effect in Cement-Based Materials: A Review. *Applied Sciences.* 2019 Jan;9(14):2776.
- [71] Castellano CC, Bonavetti VL, Donza HA, Irassar EF. The effect of w/b and temperature on the hydration and strength of blastfurnace slag cements. *Construction and Building Materials.* 2016 May 15;111: 679-88.
- [72] Ramezanianpour A.A.: *Fly ash. Cement replacement materials.* Springer Berlin Heidelberg. (2014). pp. 47-156

- [73] Siddique R.: Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash. *Construction and Building Materials.* Volume 47. (2013). pp. 1444-1450
- [74] Leng F., Feng N., Lu X.: An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cement and Concrete Research.* Volume 30(6). (2000). pp. 989-992.
- [75] Bilodeau A., Malhotra V.M.: High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. *ACI Materials Journal.* Volume 97(1). (2000). pp.41-48
- [76] Wesche K. editor: *Fly ash in concrete: Properties and performance.* CRC Press.(2004)
- [77] SRPS EN 206 Beton – Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost, , Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd (2017)
- [78] DIN 1045-2:2008-08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN) (2008)
- [79] Fernandez L, Malhotra VM. Mechanical properties, abrasion resistance, and chloride permeability of concrete incorporating granulated blast-furnace slag. *Cement, concrete and aggregates.* 1990 Jan 1;12(2):87-100.
- [80] Rashad, Alaa M., Hosam El-Din H. Seleem, and Amr F. Shaheen. "Effect of silica fume and slag on compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete." *International Journal of Concrete Structures and Materials* 8.1 (2014): 69-81.
- [81] Osborne, G. J. "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete." *Cement and Concrete Composites* 21.1 (1999): 11-21.
- [82] Hasholt, Marianne Tange, Katja Udbye Christensen, and Claus Pade. "Frost resistance of concrete with high contents of fly ash-A study on how hollow fly ash particles distort the air void analysis." *Cement and Concrete Research* 119 (2019): 102-112.

- [83] Pigeon, M., et al. "Surface microstructure and scaling resistance of concrete." *Cement and Concrete Research* 26.10 (1996): 1555-1566.
- [84] NILI, Mahmoud; ZAHERI, M. Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 2011, 25.4: 1671-1676.
- [85] Sun, Cong Tao, Wei Hua Li, and Bao Rong Hou. "Study on frost-salt resistance of fly ash concrete." *Advanced Materials Research*. Vol. 598. Trans Tech Publications Ltd, 2012.
- [86] Rusin, Zbigniew. "Analysis of porosity and volumetric strains of freezing mortars of cements CEM I and CEM II/BV." *Cement Wapno Beton* 19.1 (2014): 23-28.
- [87] Nowak-Michta, Aneta. "Water-binder ratio influence on de-icing salt scaling of fly ash concretes." *Procedia Engineering* 57 (2013): 823-829.
- [88] Ueda H, Sakai Y, Kinomura K, Watanabe K, Ishida T, Kishi T. Durability Design Method Considering Reinforcement Corrosion due to Water Penetration. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2020 Jan 29;18(1):27-38.
- [89] Ramezanianpour AA, Ghiasvand E, Nickseresht I, Mahdikhani M, Moodi F. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. *Cement and Concrete Composites*. 2009 Nov 1;31(10):715-20.
- [90] Rostami M, Behfarnia K. The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*. 2017 Mar 1;134:262-8.
- [91] Cantero B, del Bosque IS, Matías A, de Rojas MS, Medina C. Water transport mechanisms in concretes bearing mixed recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2020 Mar 1;107:103486.
- [92] Hassani M, Vessalas K, Sirivivatnanon V, Baweja D. Influence of permeability-reducing admixtures on water penetration in concrete. *ACI Mater. J.* 2017 Nov 1;114:911-22.
- [93] Gleick P.H.: Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources. New York. Oxford University Press.(1993).

- [94] DIN EN 1008 Mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. Deutsches Institut für Normung (2002)
- [95] Mindess S, Young FJ, Darwin D. Concrete 2nd Edition. PrenticeHall, Upper Saddle River, New Jersey, 2003, 119 p.
- [96] Einav R, Harussi K, Perry D. The footprint of the desalination processes on the environment. Desalination. 2003 Feb 10;152(1-3):141-54.
- [97] Kopeckó K., Balázs G.L.: Concrete with Improved Chloride Binding and Chloride Resistivity by Blended Cements. Advances in Materials Science and Engineering. (2017). pp.1-14
- [98] Dhir R.K., El-Mohr M.A., Dyer T.D.: Chloride binding in GGBS concrete. Cement and Concrete Research. Volume 26(12). (1996). pp.1767-1773
- [99] Luo R., Cai Y., Wang C., Huang X.: Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. Cement and Concrete Research. Volume 33(1). (2003). pp.1-7
- [100] Stanton, T.E.: "Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate." Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1940; 66(10): 1781-1811
- [101] Buck, A.D., Houston, B.J. and Pepper, L. 1953. "Effectiveness of mineral admixtures in preventing excessive expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction." Journal of the American Concrete Institute, 30(10): 1160.
- [102] Saha AK, Khan MN, Sarker PK, Shaikh FA, Pramanik A. The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review. Construction and Building Materials. 2018 May 20;171:743-58.
- [103] Urhan S. Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism. Cement and concrete research. 1987 Jan 1;17(1):141-52.
- [104] Xu GJ, Watt DF, Hudec PP. Effectiveness of mineral admixtures in reducing ASR expansion. Cement and Concrete Research. 1995 Aug 1;25(6):1225-36.

- [105] Fernández-Jiménez A., Palomo A.: Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and concrete research.* Volume 35(10). (2005). pp. 1984-1992.
- [106] Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T. Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and concrete research.* Volume 29(8). (1999). pp.1323-1329
- [107] Garcia-Lodeiro I., Donatello S., Fernández-Jiménez A., Palomo Á. Hydration of hybrid alkaline cement containing a very large proportion of fly ash: A descriptive model. *Materials.* Volume 9(7). (2016). pp 605/ 1-16
- [108] K. Kopecskó, *Chloride ion binding capacity of clinker minerals and cements influenced by steam curing [Ph.D. thesis]*, in Hungarian, Budapest University of Technology and Economics, 2006.
- [109] The Alkali-silica reaction in concrete, R.N. Swamy, Glasgow : Blackie ; New York : Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [110] Frías M, Goñi S, García R, de La Villa RV. Seawater effect on durability of ternary cements. Synergy of chloride and sulphate ions. *Composites Part B: Engineering.* 2013 Mar 1;46:173-8.
- [111] Skenderović B., Kekanović M.: Građevinski materijali - struktura, osobine, tehnologija, korozija. AGM Knjiga, Beograd, 2011.
- [112] RILEM Committee. Terminology and definitions of lightweight concrete, Recommendation LCI, 1st edition, (1975)
- [113] Bentz, D.P., Halleck, P.M., Grader, A.S., and Roberts, J.W., Water Movement during Internal Curing: Direct Observation using X-ray Microtomography, *Concrete International*, 28 (10), 39-45, 2006
- [114] LIU, Jianhui, et al. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 2017, 146: 702-712.
- [115] HENKENSIEFKEN, Ryan, et al. Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31.7: 427-437.

- [116]LURA, Pietro. Internal water curing with Liapor aggregates. *Heron*, 50 (1), 2005.
- [117]Castro, J. (2011). Moisture Transport in Cement-Based Materials: Application to Transport Tests and Internal Curing, Ph.D. Thesis. West Lafayette: Purdue University
- [118]Bentz DP. Internal curing of high-performance blended cement mortars. *ACI Materials Journal*. 2007 Jul 1;104(4):408.
- [119]De la Varga I, Castro J, Bentz D, Weiss J. Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash. *Cement and Concrete Composites*. 2012 Oct 1;34(9):1001-8.
- [120]Mena J, González M, Remesar JC, Lopez M. Developing a very high-strength low-CO<sub>2</sub> cementitious matrix based on a multi-binder approach for structural lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2020 Feb 20;234:117830.
- [121]Balázs Gy. L., Nehme S.G., Nemes R., Ceh A., Kopeckó K.: Engineering the Way for Sustainability.II INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE SUSTAINABILITY - ICCS16. (2016). pp. 905-920
- [122]Janković, K., Nikolić, D., Bojović, D., & Lončar, L. (2010). Some properties of ultra-high strength concrete. *Materijali i konstrukcije*, 53(1), 43-51.
- [123]PIÉRARD, Julie; DOOMS, Bram; CAUBERG, Niki. Durability evaluation of different types of UHPC. In: *Proceedings of the RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete*. 2013. p. 275-284.
- [124]WANG, Dehui, et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 368-377.
- [125]Schneider U, Horvath J, König G, Dehn F. Material behavior of ultra high-strength concrete (UHPC). *Concrete and reinforced concrete construction*. 2001 Jul; 96 (7): 468-77.

- [126] Resplendino J. State of the Art of Design and Construction of UHPFRC Structures in France. Proceedings of Hipermat. (2012). pp. 27-41.
- [127] Alkaysi M, El-Tawil S. Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance. Materials and Structures. 2016 Oct 1;49(10):4185-200.
- [128] Wille K, Naaman AE, Parra-Montesinos GJ. Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. ACI materials journal. 2011 Jan 1;108(1).
- [129] Liew KM, Sojobi AO, Zhang LW. Green concrete: Prospects and challenges. Construction and building materials. 2017 Dec 15;156:1063-95.
- [130] García JA, López AM, Castellanos NT, Gómez JA. Factorial design of reactive concrete powder containing electric arc slag furnace and recycled glass powder. Dyna. 2020 Mar 31;87(213):42-51.
- [131] Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. Construction and Building Materials. 2015 Dec 30;101:741-51.
- [132] de Larrard F, Sedran T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. Cement and concrete research. 1994 Jan 1;24(6):997-1009.
- [133] Wong HH, Kwan AK. Packing density of cementitious materials: part 1—measurement using a wet packing method. Materials and structures. 2008 May 1;41(4):689-701.
- [134] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes. Cement and concrete research. 1995 Oct 1;25(7):1501-11.
- [135] de Larrard F, Sedran T (2002) Mixture-proportioning of high-performance concrete. Cem Concr Res 32(11):1699– 1704
- [136] Yazıcı H, Yardımcı MY, Yiğiter H, Aydin S, Türkel S. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. Cement and Concrete Composites. 2010 Sep 1;32(8):639-48.

- [137]Yazıcı H, Yardımcı MY, Aydın S, Karabulut AŞ. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials.* 2009 Mar 1;23(3):1223-31.
- [138]Azmee NM, Shafiq N. Preparation of low cement ultra-high performance concrete. In: *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure 2020* (pp. 331-336). Springer, Singapore.
- [139]Alsalman A, Dang CN, Martí-Vargas JR, Hale WM. Mixture-proportioning of economical UHPC mixtures. *Journal of Building Engineering.* 2020 Jan 1;27:100970.
- [140]Li PP, Brouwers HJ, Chen W, Yu Q. Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable Ultra-high Performance Concrete. *Construction and Building Materials.* 2020 May 10;242:118112.
- [141]Yang R, Yu R, Shui Z, Gao X, Han J, Lin G, Qian D, Liu Z, He Y. Environmental and economical friendly ultra-high performance-concrete incorporating appropriate quarry-stone powders. *Journal of Cleaner Production.* 2020 Mar 17:121112.
- [142]Mosaberpanah MA, Umar SA. Utilizing Rice Husk Ash as Supplement to Cementitious Materials on Performance of Ultra High Performance Concrete:-A review. *Materials Today Sustainability.* 2020 Mar 1;7:100030.
- [143]Ai̇tcin PC. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cement and Concrete research.* 2000 Sep 1;30(9):1349-59.]
- [144] Jovanović, Ivana et al. Assaying the Setting Time of Grinded Hydrated Mixtures Portland Cement – Fly Ash. *Proceedings of the International Conference on Renewable Electrical Power Sources – ICREPS, [S.I.], v. 6, n. 1, p. 239-244, 2018*
- [145] SRPS EN 450-1 Leteći pepeo za beton - Deo 1: Definicija, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti, Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd (2011)
- [146] SRPS EN 196-1 Metode ispitivanja cementa - Deo 1: Ispitivanje čvrstoće, Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd (2008)
- [147]Heikal M, Al-Duaij OK, Ibrahim NS. Microstructure of composite cements containing blast-furnace slag and silica nano-particles subjected to elevated

- thermally treatment temperature. Construction and Building Materials. 2015 Sep 15;93:1067-77.
- [148] Xi Y, Siemer DD, Scheetz BE. Strength development, hydration reaction and pore structure of autoclaved slag cement with added silica fume. Cement and Concrete Research. 1997 Jan 1;27(1):75-82.
- [149] Aitcin, P.C., Mindess, S. Sustainability of Concrete. London: CRC Press, (2011)
- [150] Czoboly O, Balázs GL. Are fibers sensitive to mixing?. Structural Concrete. 2017 Feb;18(1):19-28.
- [151] Shafieifar M, Farzad M, Azizinamini A. Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). Construction and Building Materials. 2017 Dec 15;156:402-11.
- [152] Cseh Á, Balázs GL, Kekanović M, Miličić IM. Effect of SCMs on heat transfer properties of LWAC. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020 Apr 5:1-4.
- [153] SRPS EN 197-1 Cement - Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente, Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd (2010)
- [154] SRPS EN 934-2 – Dodaci za beton, malter i injekcionu masu — Deo 2: Dodaci za beton — Definicije, zahtevi, usaglašenost, označavanje i obeležavanje, Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd (2014)
- [155] Soroka I, Setter N. The effect of fillers on strength of cement mortars. Cement and Concrete Research. 1977 Jul 1;7(4):449-56
- [156] SRPS EN 1339 - Betonske ploče za popločavanje - Zahtevi i metode ispitivanja, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd; 2008.
- [157] SRPS EN 1340 - Betonski ivičnjaci - Zahtevi i metode ispitivanja, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd; 2012.
- [158] SRPS EN 1338 - Betonski blokovi za popločavanje - Zahtevi i metode ispitivanja, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd; 2012.

[159] SRPS U.M1.206 - Beton — Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost — Pravila za primenu standarda SRPS EN 206-1, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd; 2013.

[160] SRPS EN 12390-8 Ispitivanje očvrslog betona – Deo 8: Dubina penetracije vode pod pritiskom, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd; 2008.

[161]SRPS U.M1.055 Beton - Ispitivanje otpornosti površine betona na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje, , Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd; 1984.

[162] SRPS EN 480-5 Dodaci betonu, malteru i injekcionoj masi - Metode ispitivanja - Deo 5: Određivanje kapilarnog upijanja, Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd, (2010)

[163] Sbia LA, Peyvandi A, Lu J, Abideen S, Weerasiri RR, Balachandra AM, Soroushian P. Production methods for reliable construction of ultra-high-performance concrete (UHPC) structures. Materials and Structures. 2017 Feb 1;50(1):7.

[164] SRPS EN 12350-2 - Ispitivanje svežeg betona - Deo 2: Ispitivanje sleganja, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd; 2010.

[165] SRPS ISO 4012 - Beton - Određivanje čvrstoće epruveta pri pritisku, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd; 2000

[166] SRPS EN 12390-5 - Ispitivanje očvrslog betona – Deo 5: Čvrstoća pri savijanju uzoraka za ispitivanje, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd; 2010.



PRILOZI



## PRILOG 4-1 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B

	CEM3	T031	T032	T033	T034	T035	T036	T037	T038
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		26.13	52.26	78.39	104.52	130.65	156.77	182.90	209.03
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	3.28	2.92	2.21	1.24				
Fcp2						3.27	2.21	1.51	1.01
Fcp7	17.30	13.71	11.93	7.87	5.97	5.79	4.37	3.41	2.33
Fcp28	36.70	31.06	26.90	19.80	14.91	12.35	9.24	6.49	3.81
Fbsz1	1.01	0.73	0.63	0.51	0.31				
Fbsz2						1.00	1.23	0.72	0.46
Fbsz7	5.42	4.81	4.26	3.40	2.64	1.54	1.13	0.73	0.50
Fbsz28	7.81	7.27	6.16	5.65	5.01	3.77	2.61	1.54	0.87
Yw1	2.282	2.292	2.268	2.205	2.11	2.095	2.065	2.02	1.95
Yw7	2.294	2.33	2.32	2.25	2.17	2.141	2.11	2.06	2.027
Yw28	2.309	2.34	2.325	2.289	2.19	2.15	2.131	2.089	2.054

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz - ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-2 ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM SA DEPONIJE TENT B

	CEM3	TB01	TB02	TB03	TB04	TB05	TB06	TB07	TB08
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		25.69	51.39	77.08	102.77	128.47	154.16	179.85	205.55
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	3.15	2.85	2.18	1.15				
Fcp2						2.45	1.59	0.75	0.13
Fcp7	17.30	14.58	11.85	8.45	6.45	5.12	4.02	3.25	2.21
Fcp28	36.70	29.21	24.15	19.54	15.87	11.54	8.21	4.95	3.09
Fbsz1	1.01	0.71	0.58	0.45	0.27				
Fbsz2						0.97	0.67	0.38	0.11
Fbsz7	5.42	4.79	3.99	3.17	2.51	1.54	1.15	0.69	0.21
Fbsz28	7.81	7.42	6.74	5.74	5.21	3.98	3.01	1.54	0.22
Yw1	2.282	2.258	2.186	2.131	2.115	2.077	2.010	1.945	1.910
Yw7	2.294	2.301	2.228	2.17	2.155	2.115	2.070	2.019	1.983
Yw28	2.309	2.316	2.252	2.187	2.165	2.132	2.091	2.041	2.005

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz - ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-3 ZAMENA CEM III/B OTPADNIM PEPELOM SA PEPELIŠTA TE MORAVA

	CEM3	C31	C32	C33	C34	C35	C36	C37	C38
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		26.13	52.26	78.39	104.52	130.65	156.77	182.90	209.03
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	3.55	2.99	2.37	1.47	0.10			
Fcp2							1.88	0.88	0.14
Fcp7	17.30	15.18	12.08	8.79	6.53	4.93	3.89	2.51	2.01
Fcp28	36.70	30.40	23.08	19.23	16.37	10.63	8.84	3.76	1.64
Fbsz1	1.01	0.75	0.56	0.41	0.29	0.27			
Fbsz2							0.42	0.23	0.11
Fbsz7	5.42	4.88	3.85	3.07	2.47	1.78	1.12	0.71	0.22
Fbsz28	7.81	7.54	6.87	6.07	5.33	5.01	2.67	1.19	0.23
Yw1	2.282	2.23	2.16	2.08	2.08	2.05	2.03	1.9	1.83
Yw7	2.294	2.26	2.2	2.11	2.11	2.09	2.08	2.01	1.94
Yw28	2.309	2.274	2.22	2.13	2.136	2.11	2.095	2.031	1.988

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

PRILOG 4-4 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 15 MINUTA  
MLEVENJA

	CEM3	T151	T152	T153	T154	T155	T156	T157	T158
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		29.61	59.23	88.84	118.45	148.06	177.68	207.29	236.90
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	3.79	3.23	2.52	1.71				
Fcp2						4.09	3.27	2.48	1.68
Fcp7	17.30	15.53	13.18	10.25	8.11	7.78	6.13	4.80	3.73
Fcp28	36.70	33.40	28.19	24.26	19.96	16.11	12.06	8.57	6.66
Fbsz1	1.01	0.78	0.65	0.51	0.39				
Fbsz2						1.86	1.47	1.23	1.08
Fbsz7	5.42	4.94	4.67	3.63	3.05	2.70	2.01	1.63	1.25
Fbsz28	7.81	7.8	7.35	6.85	6.09	4.37	3.12	2.86	2.47
Yw1	2.282	2.294	2.267	2.25	2.238	2.207	2.185	2.164	2.149
Yw7	2.294	2.324	2.295	2.278	2.267	2.249	2.227	2.204	2.175
Yw28	2.309	2.331	2.303	2.293	2.282	2.264	2.253	2.23	2.208

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

**PRILOG 4-5 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 60 MINUTA  
MLEVENJA**

	CEM3	T601	T602	T603	T604	T605	T606	T607	T608
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		34.69	69.39	104.08	138.77	173.47	208.16	242.85	277.55
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	5.3	4.8	3.67	3.57	2.72	1.75	0.95	0.64
Fcp2									
Fcp7	17.30	18.25	17.52	17.21	16.68	13.57	6.75	3.68	1.68
Fcp28	36.70	35.12	32.11	27.33	27.09	24.56	17.85	12.87	7.436
Fbsz1	1.01	1.1	1.02	0.97	0.89	0.69	0.246	0.12	0.08
Fbsz2									
Fbsz7	5.42	5.85	5.96	5.41	5.01	3.25	2.25	1.85	1.45
Fbsz28	7.81	8.13	7.65	7.41	6.78	5.35	3.72	3.21	2.71
Yw1	2.282	2.282	2.261	2.248	2.24	2.227	2.21	2.195	2.184
Yw7	2.294	2.3	2.281	2.27	2.266	2.257	2.237	2.213	2.205
Yw28	2.309	2.305	2.285	2.275	2.269	2.261	2.242	2.218	2.21

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz – ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

**PRILOG 4-6 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 120 MINUTA  
MLEVENJA**

	CEM3	T1210	T1220	T1230	T1240	T1250	T1260	T1270	T1280
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		36.15	72.29	108.44	144.58	180.73	216.87	253.02	289.16
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	4.71	4.31	4.21	3.93	3.53	2.75	1.88	1.11
Fcp2									
Fcp7	17.30	16.94	16.01	15.32	15.54	12.54	7.85	5.35	2.37
Fcp28	36.70	33.12	31.56	29.87	29.54	27.85	20.45	16.61	8.8
Fbsz1	1.01	1.21	1.05	1.01	0.958	0.919	0.42	0.17	0.1
Fbsz2									
Fbsz7	5.42	6.25	5.84	5.45	5.25	5.08	3.859	3.03	1.55
Fbsz28	7.81	8.37	8.21	7.29	7.11	7.15	5.21	4.29	2.85
Yw1	2.282	2.285	2.281	2.259	2.246	2.224	2.218	2.195	2.15
Yw7	2.294	2.318	2.315	2.299	2.276	2.261	2.255	2.241	2.207
Yw28	2.309	2.325	2.319	2.309	2.28	2.268	2.261	2.25	2.212

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

**PRILOG 4-7 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 240 MINUTA  
MLEVENJA**

	CEM3	T2410	T2420	T2430	T2440	T2450	T2460	T2470	T2480
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		37.60	75.19	112.79	150.39	187.98	225.58	263.18	300.77
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	4.85	5.01	4.42	3.86	2.94	1.91	1.54	0.615
Fcp2									
Fcp7	17.30	17.05	16.57	16.12	15.45	13.85	8.78	6.11	3.118
Fcp28	36.70	37.25	35.89	35.01	31.58	28.78	21.66	13.8	6.54
Fbsz1	1.01	1.15	1.12	1.05	0.94	0.89	0.67	0.45	0.36
Fbsz2									
Fbsz7	5.42	5.82	5.76	5.71	5.53	5.02	4.48	3.52	1.97
Fbsz28	7.81	9.02	9.02	8.3	8.02	7.67	7	6.01	3.1
Yw1	2.282	2.296	2.289	2.275	2.258	2.234	2.215	2.198	2.175
Yw7	2.294	2.325	2.32	2.304	2.285	2.26	2.239	2.22	2.202
Yw28	2.309	2.336	2.328	2.312	2.295	2.265	2.248	2.229	2.212

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz – ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-8 ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 15 MINUTA MLEVENJA

	CEM3	TB51	TB52	TB53	TB54	TB55	TB56	TB57	TB58
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		27.58	55.16	82.74	110.32	137.90	165.48	193.06	220.65
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	3.98	3.29	2.85	2.19	1.58			
Fcp2							3.19	2.04	1.36
Fcp7	17.30	14.15	11.67	9.74	7.99	6.45	4.78	2.89	1.88
Fcp28	36.70	30.28	25.14	21.87	18.45	14.55	10.28	6.87	4.68
Fbsz1	1.01	0.92	0.84	0.73	0.62	0.49			
Fbsz2							0.73	0.41	0.27
Fbsz7	5.42	5.35	5.16	4.92	3.82	2.74	1.32	0.94	0.6
Fbsz28	7.81	8.15	7.89	7.51	6.12	5.02	3.89	2.22	1.62
Yw1	2.282	2.287	2.261	2.235	2.201	2.169	2.14	2.132	2.117
Yw7	2.294	2.3	2.29	2.271	2.225	2.201	2.175	2.168	2.151
Yw28	2.309	2.311	2.298	2.285	2.245	2.221	2.188	2.175	2.166

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz – ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-9 ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 30 MINUTA MLEVENJA

	CEM3	TB31	TB32	TB33	TB34	TB35	TB36	TB37	TB38
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		32.08	64.16	96.24	128.32	160.40	192.48	224.56	256.65
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	4.28	3.84	3.05	2.68	2.25			
Fcp2							3.365	1.95	1.72
Fcp7	17.30	14.29	12.21	11.85	10.01	7.24	5.47	4.02	3.11
Fcp28	36.70	30.28	25.64	23.8	19.24	16.52	13.9	8.97	5.88
Fbsz1	1.01	0.99	0.85	0.79	0.69	0.51			
Fbsz2							1.01	0.65	0.45
Fbsz7	5.42	5.45	5.29	4.92	4.24	3.21	2.11	1.01	0.62
Fbsz28	7.81	8.05	8.01	7.82	7.21	6.25	4.41	2.84	1.54
Yw1	2.282	2.294	2.275	2.269	2.239	2.215	2.184	2.162	2.142
Yw7	2.294	2.305	2.295	2.285	2.265	2.245	2.215	2.194	2.176
Yw28	2.309	2.316	2.305	2.298	2.273	2.256	2.229	2.201	2.185

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz – ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw – ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-10 ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 60 MINUTA MLEVENJA

	CEM3	TB61	TB62	TB66	TB64	TB65	TB66	TB67	TB68
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		34.19	68.37	102.56	136.74	170.93	205.11	239.30	273.48
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	4.82	4.04	3.74	3.12	2.58	1.174	0.89	0.52
Fcp2									
Fcp7	17.30	15.79	14.95	13.44	11.36	9.79	6.04	4.61	3.33
Fcp28	36.70	32.96	29.87	26.22	22.79	19.25	13.58	9.25	6.45
Fbsz1	1.01	1.07	0.98	0.78	0.67	0.551	0.39	0.22	0.14
Fbsz2									
Fbsz7	5.42	5.89	5.45	5.15	4.85	4.59	3.35	1.85	0.98
Fbsz28	7.81	9.01	8.45	7.77	7.32	6.25	5.05	3.15	1.68
Yw1	2.282	2.266	2.255	2.248	2.225	2.215	2.176	2.162	2.151
Yw7	2.294	2.283	2.277	2.269	2.25	2.239	2.203	2.188	2.18
Yw28	2.309	2.297	2.291	2.28	2.258	2.249	2.212	2.198	2.189

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-11 ZAMENA CEM III/B SA OP TENT B NAKON 120 MINUTA MLEVENJA

	CEM3	TB1201	TB1202	TB1203	TB1204	TB1205	TB1206	TB1207	TB1208
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		37.02	74.03	111.05	148.06	185.08	222.10	259.11	296.13
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	4.98	4.39	3.87	3.36	2.89	2.22	2.09	1.69
Fcp2									
Fcp7	17.30	16.54	16.02	15.17	13.64	11.28	9.26	7.11	4.31
Fcp28	36.70	35.48	33.66	31.25	28.22	22.48	17.54	13.85	8.01
Fbsz1	1.01	1.12	1.05	0.98	0.76	0.56	0.44	0.28	0.15
Fbsz2									
Fbsz7	5.42	5.78	5.02	4.2	3.98	2.98	2.39	2.09	1.31
Fbsz28	7.81	8.95	8.69	7.89	7.45	6.59	4.98	3.59	2.58
Yw1	2.282	2.275	2.265	2.253	2.249	2.239	2.217	2.205	2.187
Yw7	2.294	2.302	2.291	2.281	2.278	2.271	2.25	2.24	2.224
Yw28	2.309	2.309	2.299	2.289	2.288	2.28	2.254	2.248	2.230

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz – ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw – ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-12 ZAMENA CEM III/B SA OP TE MORAVA NAKON 15 MINUTA MLEVENJA

	CEM3	1531	1532	1533	1534	1535	1536	1537	1538
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		32.81	65.61	98.42	131.23	164.03	196.84	229.65	262.45
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	4.69	4.26	3.17	2.40	1.73			
Fcp2							2.04	1.14	0.89
Fcp7	17.30	17.23	14.50	11.73	9.63	8.29	5.40	3.73	2.14
Fcp28	36.70	33.82	31.53	27.01	23.05	17.04	12.46	6.25	2.51
Fbsz1	1.01	1.10	0.87	0.64	0.51	0.37			
Fbsz2							0.60	0.43	0.24
Fbsz7	5.42	4.01	3.53	3.08	2.70	2.31	1.33	0.83	0.50
Fbsz28	7.81	8.45	8.08	7.08	6.75	6.25	3.68	1.85	0.37
Yw1	2.282	2.290	2.280	2.260	2.240	2.210	2.180	2.145	2.120
Yw7	2.294	2.304	2.294	2.285	2.275	2.265	2.235	2.200	2.165
Yw28	2.309	2.309	2.308	2.305	2.291	2.276	2.238	2.198	2.156

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-13 ZAMENA CEM III/B SA OP TE MORAVA NAKON 30 MINUTA MLEVENJA

	CEM3	3031	3032	3033	3034	3035	3036	3037	3038
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		34.84	69.68	104.52	139.35	174.19	209.03	243.87	278.71
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	3.89	3.61	3.05	2.09				
Fcp2						2.60	1.94	1.56	1.01
Fcp7	17.30	16.26	14.73	13.44	12.36	10.88	8.44	5.24	3.02
Fcp28	36.70	37.64	33.97	30.33	26.60	23.62	15.78	7.85	3.54
Fbsz1	1.01	1.05	0.88	0.79	0.65				
Fbsz2						1.33	1.17	0.95	0.74
Fbsz7	5.42	5.34	5.19	4.69	4.30	3.61	3.28	1.66	0.97
Fbsz28	7.81	8.55	8.11	7.54	7.35	6.90	3.86	2.15	1.10
Yw1	2.282	2.303	2.281	2.265	2.245	2.218	2.217	2.211	2.205
Yw7	2.294	2.332	2.315	2.294	2.274	2.245	2.243	2.232	2.226
Yw28	2.309	2.338	2.325	2.301	2.281	2.257	2.248	2.245	2.242

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz – ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw – ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-14 ZAMENA CEM III/B SA OP TE MORAVA NAKON 60 MINUTA MLEVENJA

	CEM3	6031	6032	6033	6034	6035	6036	6037	6038
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		35.13	70.26	105.39	140.52	175.65	210.77	245.90	281.03
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	4.40	3.84	3.06	2.33				
Fcp2						3.46	2.45	1.62	1.15
Fcp7	17.30	20.47	17.01	14.95	13.23	12.05	8.46	5.80	3.70
Fcp28	36.70	38.01	34.57	31.80	28.58	24.54	15.62	9.42	3.91
Fbsz1	1.01	0.90	0.82	0.60	0.43				
Fbsz2						1.80	1.52	1.06	0.74
Fbsz7	5.42	5.78	5.08	5.22	4.52	4.02	2.89	1.87	1.13
Fbsz28	7.81	8.51	7.89	7.66	7.32	6.25	4.60	2.25	1.14
Yw1	2.282	2.313	2.302	2.299	2.281	2.257	2.212	2.189	2.178
Yw7	2.294	2.34	2.322	2.312	2.305	2.297	2.248	2.22	2.21
Yw28	2.309	2.344	2.33	2.325	2.315	2.301	2.26	2.239	2.226

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-15 ZAMENA CEM III/B SA OP TE MORAVA NAKON 120 MINUTA MLEVENJA

	CEM3	1210	1220	1230	1240	1250	1260	1270	1280
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		36.15	72.29	108.44	144.58	180.73	216.87	253.02	289.16
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	4.48	3.84	3.67	3.58	3.33	2.12	1.58	0.45
Fcp2									
Fcp7	17.30	19.75	18.34	17.88	17.58	15.25	11.89	5.71	4.65
Fcp28	36.70	40.17	35.41	33.57	30.87	24.58	18.98	11.04	5.09
Fbsz1	1.01	1.12	1	0.81	0.7	0.69	0.38	0.29	0.15
Fbsz2									
Fbsz7	5.42	5.78	5.31	5.22	4.82	4.35	3.51	2.11	1.55
Fbsz28	7.81	8.97	7.96	6.91	6.35	5.99	4.98	2.45	1.99
Yw1	2.282	2.296	2.272	2.266	2.258	2.255	2.247	2.241	2.221
Yw7	2.294	2.317	2.298	2.29	2.286	2.286	2.278	2.265	2.26
Yw28	2.309	2.32	2.303	2.298	2.291	2.289	2.28	2.273	2.262

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz – ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw – ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-16 ZAMENA CEM III/B SA OP TE MORAVA NAKON 240 MINUTA MLEVENJA

	CEM3	2410	2420	2430	2440	2450	2460	2470	2480
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		37.31	74.61	111.92	149.23	186.53	223.84	261.15	298.45
V	225	225	225	225	225	225	225	225	225
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	4.40	5.63	5.39	4.79	3.87	4.07	3.22	2.55	2.36
Fcp2									
Fcp7	17.30	20.21	20.6	19.54	18.01	17.85	11.27	8.54	5.8
Fcp28	36.70	40.98	36.98	35.02	32.85	32.25	23.84	13.2	6.32
Fbsz1	1.01	1.19	1.21	1.09	1.1	1.25	0.81	0.62	0.51
Fbsz2									
Fbsz7	5.42	6.54	6.34	5.84	5.25	5.34	3.85	2.39	1.65
Fbsz28	7.81	9.12	8.28	8.12	7.71	7.65	5.49	2.98	2.15
Yw1	2.282	2.301	2.291	2.279	2.27	2.267	2.268	2.248	2.212
Yw7	2.294	2.317	2.314	2.301	2.292	2.285	2.285	2.265	2.225
Yw28	2.309	2.318	2.315	2.308	2.299	2.293	2.295	2.275	2.229

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz - ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

PRILOG 4-17 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B

	T0-0	T0-A	T0-B	T0-C
%	0	10	20	30
P	130.65	156.78	182.91	209.04
C	225	225	225	225
V	225	225	225	225
A	1350	1312	1275	1237
Fcp1				
Fcp2	3.63	4.09	3.95	3.78
Fcp7	4.84	5.64	5.55	5.03
Fcp28	10.11	11.71	10.98	9.93
Fbsz1				
Fbsz2	1.01	1.1	1.05	1.01
Fbsz7	1.38	1.95	1.82	1.62
Fbsz28	3.77	3.95	3.68	3.31
Yw1				
Yw2	2.08	2.105	2.055	1.95
Yw7	2.141	2.168	2.105	2.027
Yw28	2.15	2.188	2.125	2.047

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz – ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw – ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-18 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B-15

	T15-0	T15-A	T15-B	T15-C
%	0	10	20	30
P	148.06	177.67	207.28	236.90
C	225	225	225	225
V	225	225	225	225
A	1350	1312	1275	1237
Fcp1				
Fcp2	4.54	5.76	6.2	6.35
Fcp7	6.5	7.97	8.1	8.1
Fcp28	13.18	16.78	16.65	16
Fbsz1				
Fbsz2	1.29	1.562	1.67	1.75
Fbsz7	2.42	2.76	2.92	2.99
Fbsz28	4.37	4.97	5.18	5.24
Yw1				
Yw2	2.207	2.203	2.195	2.168
Yw7	2.249	2.262	2.245	2.207
Yw28	2.264	2.273	2.256	2.219

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-19 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B-60

	T60-0	T60-A	T60-B	T60-C
%	0	10	20	30
P	173.47	208.16	242.85	277.55
C	225	225	225	225
V	225	225	225	225
A	1350	1312	1275	1237
Fcp1	2.72	2.869	2.742	2.862
Fcp2				
Fcp7	12.52	15.71	13.25	13.45
Fcp28	21.15	22.71	20.79	20.63
Fbsz1	0.45	0.58	0.57	0.43
Fbsz2				
Fbsz7	3.25	3.95	4.25	3.87
Fbsz28	5.35	6.14	5.35	5.2
Yw1	2.191	2.192	2.211	2.211
Yw2				
Yw7	2.216	2.22	2.238	2.243
Yw28	2.231	2.237	2.246	2.249

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-20 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B-120

	T120-0	T120-A	T120-B	T120-C
%	0	10	20	30
P	180.73	216.87	253.02	289.16
C	225	225	225	225
V	225	225	225	225
A	1350	1312	1275	1237
Fcp1	1.89	2.23	2.02	2.64
Fcp2				
Fcp7	8.14	10.08	10.22	11.46
Fcp28	22.15	22.8	26.7	27.41
Fbsz1	0.341	0.45	0.44	0.455
Fbsz2				
Fbsz7	3.81	4.66	5.03	4.48
Fbsz28	7.81	9.05	8.57	8.01
Yw1	2.21	2.225	2.241	2.225
Yw2				
Yw7	2.238	2.252	2.27	2.249
Yw28	2.251	2.265	2.279	2.258

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-21 ZAMENA CEM III/B I AGREGATA SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B-240

	T4-0	T4-A	T4-B	T4-C
%	0	10	20	30
P	130.65	156.78	182.91	209.04
C	225	225	225	225
V	225	225	225	225
A	1350	1312	1275	1237
Fcp1				
Fcp2	3.63	4.09	3.95	3.78
Fcp7	4.84	5.64	5.55	5.03
Fcp28	10.11	11.71	10.98	9.93
Fbsz1				
Fbsz2	1.01	1.1	1.05	1.01
Fbsz7	1.38	1.95	1.82	1.62
Fbsz28	3.77	3.95	3.68	3.31
Yw1				
Yw2	2.08	2.105	2.055	1.95
Yw7	2.141	2.168	2.105	2.027
Yw28	2.15	2.188	2.125	2.047

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz – ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw – ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

**PRILOG 4-22 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 60 MINUTA  
MLEVENJA**

	E3	T11	T12	T13	T14	T15	T16
C	450	405	360	315	270	225	180
P		45.00	90.00	135.00	180.00	225.00	270.00
V	225	233	237	240	242	245	250
W [%]	100	103.6	105.3	106.7	107.6	108.9	111.1
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	7.619	6.98	5.74	4.6	4.12	3.6	2.48
Fcp7	23.84	22.54	20.62	17.53	16.01	13.48	8.01
Fcp28	32.73	33.87	30.25	26.11	23.45	21.76	11.95
Fbsz1	2.482	1.93	1.62	1.38	1.05	0.87	0.55
Fbsz7	6.71	6.71	6.28	5.33	4.38	3.77	2.35
Fbsz28	9.65	10.21	9.65	8.64	6.89	5.98	3.58
Yw1	2.252	2.258	2.224	2.2	2.191	2.183	2.171
Yw7	2.283	2.282	2.251	2.22	2.211	2.201	2.191
Yw28	2.287	2.284	2.255	2.23	2.225	2.216	2.205

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

PRILOG 4-23 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 120 MINUTA  
MLEVENJA

	E3	T21	T22	T23	T24	T25	T26
C	450	405	360	315	270	225	180
P		45.00	90.00	135.00	180.00	225.00	270.00
V	225	235	236	238	245	250	258
W [%]	100	104.4	104.9	105.8	108.9	111.1	114.7
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	7.619	7.21	6.45	5.83	4.78	4.21	2.58
Fcp7	23.84	23.82	22.08	19.8	17.36	15.81	10.85
Fcp28	32.73	36.04	33.85	30	25.47	21.7	14.95
Fbsz1	2.482	2.21	1.69	1.47	1.25	0.919	0.62
Fbsz7	6.71	6.99	7.12	6.65	5.45	4.87	2.52
Fbsz28	9.65	10.85	9.45	8.27	6.75	5.74	4.01
Yw1	2.252	2.25	2.252	2.248	2.231	2.166	2.145
Yw7	2.283	2.273	2.275	2.271	2.25	2.185	2.161
Yw28	2.287	2.276	2.279	2.276	2.255	2.193	2.171

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

PRILOG 4-24 ZAMENA CEM III/B SA LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B NAKON 240 MINUTA  
MLEVENJA

	E3	T41	T42	T43	T44	T45	T46
C	450	405	360	315	270	225	180
P		45.00	90.00	135.00	180.00	225.00	270.00
V	225	225	225	227	230	233	235
W [%]	100	100.0	100.0	100.9	102.2	103.6	104.4
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	7.619	8.54	6.87	5.85	5.62	5.52	3.99
Fcp7	23.84	26.58	24.85	23.59	22.85	22.25	13.45
Fcp28	32.73	38.57	36.16	30.77	28.07	27.58	18.79
Fbsz1	2.482	2.38	2.02	1.91	1.52	1.39	0.72
Fbsz7	6.71	7.55	7.38	7.35	6.67	6	2.85
Fbsz28	9.65	11.54	9.47	8.92	8.12	7.35	4.6
Yw1	2.252	2.272	2.268	2.252	2.259	2.214	2.217
Yw7	2.283	2.294	2.29	2.272	2.281	2.234	2.225
Yw28	2.287	2.296	2.292	2.274	2.284	2.241	2.233

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz - ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

**PRILOG 4-25 ZAMENA CEM III/B SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA NAKON 240  
MINUTA MLEVENJA**

	E3	M41	M42	M43	M44	M45	M46	M47	M48
C	450	405	360	315	270	225	180	135	90
P		45.00	90.00	135.00	180.00	225.00	270.00	315.00	360.00
V	225	218	225	225	225	225	225	230	233
W [%]	100	96.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	102.2	103.6
A	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Fcp1	7.619	9.02	8.03	6.31	5.09	4.82	4.51	3.94	2.71
Fcp7	23.84	26.84	28.19	25.63	23.42	21.94	15.01	9.07	3.61
Fcp28	32.73	46.71	39.47	36.65	30.52	27.55	19.8	9.93	5.1
Fbsz1	2.482	2.758	2.75	2.023	1.61	1.46	1.56	1.4	0.97
Fbsz7	6.71	7.4	8	8.37	7.38	6.21	4.41	2.67	1.29
Fbsz28	9.65	12.07	11.77	10.48	9.74	7.35	5.26	3.31	1.79
Yw1	2.252	2.288	2.29	2.292	2.234	2.223	2.222	2.21	2.212
Yw7	2.283	2.321	2.311	2.308	2.254	2.243	2.242	2.226	2.228
Yw28	2.287	2.33	2.321	2.317	2.258	2.248	2.247	2.232	2.233

C, P, V, A – MASA CEMENTA, PEPELA, VODE I AGREGATA IZRAŽENE U GRAMIMA

Fcp – ČVRSTOĆE PRI PRITISKU NAKON 1,2,7 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Fbsz- ČVRSTOĆE PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM NAKON 1,27 ILI 28 DANA, IZRAŽENE U MPa

Yw - ZAPREMINSKA MASA UZORKA NAKON 1,7 ILI 28 DANA IZRAŽENO U g/cm<sup>3</sup>

## PRILOG 4-26 NEGA BETONA SA CEM III/B NA 40°C

	ČVRSTOĆA PRI PRITISKU [MPa]					
SATI	0	6	12	24	48	72
20°C				5.5	11.8	17.5
40°C		12.25	22.34	36.875	38.7	39.4

## PRILOG 4-27 UTICAJ NEGE PRI 40°C ZA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA LP TENTB

	ČVRSTOĆA PRI PRITISKU				
	CEM III/B	ET15	ET25	ET45	ET85
3 D 40° C	36.53	18.76	20.96	19.85	20.84
3 D 40° C+4DW	30.77	17.04	20.1	22.67	20.59
3 D 40° C+365 DA	43.75	17.69	22.45	25.13	19.85
3 D 40° C+4DW +365 DA	59.37	16.85	20	28.68	18.26
3 D 40° C+365DW	62.54	27.77	30.89	34.57	34.45
3 D 40° C+365DWD	62.99	27.21	31.76	35.67	33.59
	ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM				
	CEM III/B	ET15	ET25	ET45	ET85
3 D 40° C	6.67	4.14	4.15	4.32	3.91
3 D 40° C+4DW	8.09	4.6	4.65	5.24	4.87
3 D 40° C+365DW	10.5	8.04	9.65	10.11	8.14

## PRILOG 4-28 UTICAJ NEGE PRI 40°C ZA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA OP TE MORAVA

	ČVRSTOĆA PRI PRITISKU [MPa]				
	CEM III/B	EM15	EM25	EM45	EM85
3 D 40° C	36.53	18.39	19.86	23.05	22
3 D 40° C+4DW	30.77	16.67	21.45	21.82	22.07
3 D 40° C+365 DA	43.75	16.79	19.25	21.08	19.61
3 D 40° C+4DW +365 DA	59.37	15.32	18.51	18.51	19.98
3 D 40° C+365DW	62.54	18.02	22.55	22.43	24.15
3 D 40° C+365DWD	62.99	15.56	18.02	22.06	19.49
	ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM [MPa]				
	CEM III/B	EM15	EM25	EM45	EM85
3 D 40° C	6.67	4.87	4.14	4.11	4.09
3 D 40° C+4DW	8.09	5.52	6.07	6.08	6.44
3 D 40° C+365DW	10.5	5.88	6.16	6.62	6.07

## PRILOG 5-1 ZBVPP SA SVEŽIM LETEĆIM PEPELOM IZ TENT B

Recepture ZBVPP sa pepelom LP TENTB 240 [kg/m <sup>3</sup> ]										
Oznaka	Voda	CEM III/B	PEPEO	0/4	4/8	8/16	Aditiv	Zapr.m.	Cem.klinker	W/B[kg/kg]
32T	130.0	420.0	180.0	634.4	493.5	634.4	12.0	2504.4	113.4	0.217
325T	130.0	364.0	156.0	658.9	509.6	658.9	9.6	2487.0	98.3	0.250
33T	135.0	315.0	135.0	664.0	517.8	664.0	6.3	2437.1	85.1	0.300
335T	157.5	315.0	135.0	640.2	494.5	640.2	4.9	2387.3	85.1	0.350
34T	180.0	315.0	135.0	619.4	481.2	619.4	3.2	2353.2	85.1	0.400
44T	180.0	270.0	180.0	609.0	474.0	609.0	3.1	2325.1	72.9	0.400
435T	157.5	270.0	180.0	630.0	490.0	630.0	5.5	2363.0	72.9	0.350
43T	145.0	288.0	192.0	631.0	491.0	631.0	7.2	2385.2	77.8	0.302
425T	125.0	300.0	200.0	640.0	497.0	640.0	11.0	2413.0	81.0	0.250
54T	180.0	225.0	225.0	608.3	474.3	608.3	3.9	2324.8	60.8	0.400
535T	157.5	225.0	225.0	627.9	488.4	627.9	6.7	2358.4	60.8	0.350
53T	135.0	225.0	225.0	649.0	505.0	649.0	10.0	2398.0	60.8	0.300

ČVRSTOCÉ PRI PRITISKU [MPa]

0.40      0.35      0.30      0.25      0.22

34T	335T	33T	325T	32T
52.15	65.45	80.24	89.65	95.24
50.14	68.57	81.69	90.52	96.85
53.41	67.21	81.88	92.58	96.35
51.90	67.08	81.27	90.92	96.15

34T	335T	33T	325T	32T
66.45	84.69	106.54	121.27	131.20
65.45	88.44	107.89	121.87	135.22
63.85	85.97	102.55	125.46	128.45
65.25	86.37	105.66	122.87	131.62

0.4      0.35      0.30      0.25

44T	435T	43T	425T
49.25	58.45	62.12	68.45
48.25	55.85	60.51	65.20
46.54	56.87	60.14	66.14
48.01	57.06	60.92	66.60

44T	435T	43T	425T
57.89	69.54	78.58	78.80
55.66	71.58	77.44	85.74
54.76	70.17	75.89	88.57
56.10	70.43	77.30	84.37

0.40	0.35	0.30
54T	535T	53T
49.88	52.24	61.45
44.25	57.84	60.87
48.47	53.08	62.58
47.53	54.39	61.63

54T	535T	53T
56.48	69.65	81.76
55.63	72.45	77.59
56.09	69.32	82.07
56.07	70.47	80.47

## ČVRSTOĆE PRIZATEZANJU SAVIJANJEM [MPa]

34T	335T	33T	325T	32T
5.87	8.25	10.28	11.95	12.97
5.99	7.94	11.35	12.77	13.54
5.54	8.89	10.87	12.99	14.01
5.80	8.36	10.83	12.57	13.51

44T	435T	43T	425T
5.45	8.54	10.54	12.78
6.01	8.10	10.22	12.35
5.25	8.78	9.85	12.81
5.57	8.47	10.20	12.65

54T	535T	53T
5.14	7.85	9.19
5.58	8.01	7.68
5.39	7.58	8.45
5.37	7.81	8.44

## PRILOG 5-2 ZBVPP SA OTPADNIM PEPELOM IZ TE MORAVA

Recepture ZBVPP sa pepelom OPTE Morava240 [kg/m <sup>3</sup> ]										
Oznaka	Voda	CEM III/B	PEPEO	0/4	4/8	8/16	Aditiv	Zapr.m.	Cem.klinker	W/B[kg/kg]
317M	100.0	420.0	180.0	655.0	510.0	655.0	15.0	2535.0	113.4	0.167
32M	120.0	420.0	180.0	644.0	429.0	715.0	11.6	2519.6	113.4	0.200
325M	130.0	364.0	156.0	633.0	422.0	704.0	9.6	2418.6	98.3	0.250
33M	135.0	315.0	135.0	655.7	436.0	724.5	6.3	2407.5	85.1	0.300
335M	157.5	315.0	135.0	633.2	422.1	703.5	3.9	2370.2	85.1	0.350
34M	180.0	315.0	135.0	615.7	410.0	684.0	2.2	2341.9	85.1	0.400
435M	157.5	270.0	180.0	630.0	490.0	630.0	5.5	2363.0	72.9	0.350
43M	135.0	270.0	180.0	631.0	491.0	631.0	7.2	2345.2	72.9	0.300
425M	125.0	300.0	200.0	640.0	497.0	640.0	9.1	2411.1	81.0	0.250
42M	120.0	360.0	240.0	629.0	429.0	692.0	11.5	2481.5	97.2	0.200
53M	135.0	225.0	225.0	649.0	505.0	649.0	4.0	2392.0	60.8	0.300
525M	125.0	250.0	250.0	638.4	425.6	709.3	6.8	2405.1	67.5	0.250
52M	120.0	300.0	300.0	628.0	419.0	698.0	11.9	2476.9	81.0	0.200

## ČVRSTOĆE PRI PRITISKU[MPa]

34M	335M	33M	325M	32M	317M
44.40	55.47	63.74	75.91	90.55	105.66
44.68	54.69	64.89	75.48	91.47	105.47
44.57	55.87	62.74	78.95	87.88	107.65
44.55	55.34	63.79	76.78	89.97	106.26

34M	335M	33M	325M	32M	317M
52.45	67.48	83.26	99.54	126.47	136.58
55.14	66.95	80.25	102.45	127.61	138.77
51.13	64.58	84.12	105.45	120.44	131.32
52.91	66.34	82.54	102.48	124.84	135.56

435M	43M	425M	42M
44.52	58.74	69.10	81.02
43.74	55.41	74.58	78.41
43.92	56.45	70.29	81.22
44.06	56.87	71.32	80.22

435M	43M	425M	42M
53.54	75.48	93.45	117.25
52.84	72.58	95.41	112.57
53.01	76.11	93.12	116.47
53.13	74.72	93.99	115.43

53M	525M	52M
44.80	59.65	73.80
44.25	60.89	73.58
45.34	58.40	74.01
44.80	59.65	73.80

53M	525M	52M
52.84	84.02	121.12
52.84	79.85	118.54
52.74	85.56	121.86
52.81	83.14	120.51

#### ČVRSTOĆE PRIZATEZANJU SAVIJANJEM [MPa]

34M	335M	33M	325M	32M	317M
5.84	8.54	10.85	12.45	14.52	14.52
6.02	8.12	10.92	12.12	14.25	14.98
5.65	8.74	9.85	12.75	13.29	15.01
5.84	8.47	10.54	12.44	14.02	14.84

435M	43M	425M	42M
5.85	10.05	13.51	14.85
5.96	9.86	12.87	14.20
6.04	9.67	12.45	14.94
5.95	9.86	12.94	14.66

53M	525M	52M
5.25	10.25	14.48
5.54	9.56	13.25
5.32	10.57	13.85
5.37	10.13	13.86

**PRILOG 5-3 OTPORNOST NA HABANJE ZBVP SA 30% OTPADNIM PEPELOM IZ TE  
MORAVA**

W/B=0.4				
1.uzorak	19.7	20.1	20.4	20.1
2.uzorak	19.9	20.1	20.4	20.1
3.uzorak	19.8	19.8	20.3	20.0
Prosečna vrednost				20.1

W/B=0.35				
1.uzorak	19.8	19.9	20.2	20.0
2.uzorak	19.9	19.5	19.2	19.5
3.uzorak	20.2	20.1	19.8	20.0
Prosečna vrednost				19.8

W/B=0.3				
1.uzorak	18.9	19.4	19.6	19.3
2.uzorak	19.4	19.5	19.8	19.6
3.uzorak	19.2	19.5	19.8	19.5
Prosečna vrednost				19.5

W/B=0.25				
1.uzorak	19.1	19.2	19.1	19.1
2.uzorak	19.2	19.4	19.5	19.4
3.uzorak	19.3	19.5	19.7	19.5
Prosečna vrednost				19.3

W/B=0.2				
1.uzorak	18.9	19	19.2	19.0
2.uzorak	19	19	19.3	19.1
3.uzorak	19.2	19.4	19.4	19.3
Prosečna vrednost				19.2

W/B=0.17				
1.uzorak	18.1	18	17.8	18.0
2.uzorak	17.9	17.8	18.1	17.9
3.uzorak	17.9	17.9	18.3	18.0
Prosečna vrednost				18.0

**PRILOG 5-4 OTPORNOST NA HABANJE ZBVPP SA 40% OTPADNIM PEPEЛОM IZ TE  
MORAVA**

W/B=0.35				
1.uzorak	22.1	22	22.3	22.1
2.uzorak	22	21.8	21.5	21.8
3.uzorak	22.1	22.1	21.8	22.0
Prosečna vrednost				22.0

W/B=0.30				
1.uzorak	20.3	20.3	21.4	20.7
2.uzorak	20.4	20.5	20.4	20.4
3.uzorak	20.7	20.8	20.7	20.7
Prosečna vrednost				20.6

W/B=0.25				
1.uzorak	19.6	19.5	19.1	19.4
2.uzorak	19.7	19.6	19.6	19.6
3.uzorak	19.1	19.3	19.4	19.3
Prosečna vrednost				19.4

W/B=0.20				
1.uzorak	18.4	18.4	18.2	18.3
2.uzorak	18.9	18.8	18.5	18.7
3.uzorak	18.6	18.8	18.9	18.8
Prosečna vrednost				18.6

PRILOG 5-5 OTPORNOST NA HABANJE ZBVP SA 50% OTPADNIM PEPELOM IZ TE  
MORAVA

W/B=0.30				
1.uzorak	23.7	23.7	23.7	23.7
2.uzorak	22.9	22.8	23.4	23.0
3.uzorak	23.7	23.4	23.8	23.6
Prosečna vrednost			23.5	

W/B=0.25				
1.uzorak	19.5	19.9	19.8	19.7
2.uzorak	19.9	20.1	19.9	20.0
3.uzorak	19.4	19.5	19.5	19.5
Prosečna vrednost			19.7	

W/B=0.20				
1.uzorak	18.6	18.6	18.7	18.6
2.uzorak	18.8	18.5	18.5	18.6
3.uzorak	18.5	18.5	18.9	18.6
Prosečna vrednost			18.6	

## PRILOG 5-6 OTPORNOST NA HABANJE ZBVPP SA 30% LETEĆIM PEPEЛОM IZ TENTB

W/B=0.40				
1.uzorak	20.7	20.6	20.5	20.6
2.uzorak	19.6	19.5	19.5	19.5
3.uzorak	19.5	19.7	19.9	19.7
Prosečna vrednost			19.9	

W/B=0.35				
1.uzorak	19.9	19.9	19.5	19.8
2.uzorak	19.4	19.9	19.8	19.7
3.uzorak	19.5	19.5	19.4	19.5
Prosečna vrednost			19.6	

W/B=0.30				
1.uzorak	19.9	19.9	19.9	19.9
2.uzorak	19.4	19.2	19.5	19.4
3.uzorak	19.2	19.2	19.5	19.3
Prosečna vrednost			19.5	

W/B=0.25				
1.uzorak	19.2	19.1	19	19.1
2.uzorak	18.6	18.9	18.9	18.8
3.uzorak	18.9	18.7	18.9	18.8
Prosečna vrednost			18.9	

W/B=0.20				
1.uzorak	18	18.2	18.1	18.1
2.uzorak	18.5	18	18.2	18.2
3.uzorak	18.5	18.5	18.2	18.4
Prosečna vrednost			18.2	

## PRILOG 5-7 OTPORNOST NA HABANJE ZBVP SA 40% LETEĆIM PEPELOM IZ TENTB

W/B=0.4				
1.uzorak	22.1	21.9	21.9	22.0
2.uzorak	21.6	21.7	21.7	21.7
3.uzorak	20.9	21.4	21.6	21.3
Prosečna vrednost			21.6	

W/B=0.35				
1.uzorak	21.4	21.5	21.4	21.4
2.uzorak	20.8	20.9	21	20.9
3.uzorak	21	21.1	21.1	21.1
Prosečna vrednost			21.1	

W/B=0.3				
1.uzorak	20.7	20.5	20.5	20.6
2.uzorak	20.2	20.3	20.4	20.3
3.uzorak	20.1	20.5	20.6	20.4
Prosečna vrednost			20.4	

W/B=0.25				
1.uzorak	20.6	20.5	20.1	20.4
2.uzorak	19.8	19.5	19.5	19.6
3.uzorak	19.8	19.6	19.6	19.7
Prosečna vrednost			19.9	

## PRILOG 5-8 OTPORNOST NA HABANJE ZBVPP SA 50% LETEĆIM PEPEЛОM IZ TENTB

W/B=0.4				
1.uzorak	22.4	22.2	22.2	22.3
2.uzorak	22	22.3	22.1	22.1
3.uzorak	22	21.9	22.3	22.1
Prosečna vrednost				22.2

W/B=0.35				
1.uzorak	21.2	21.4	21.4	21.3
2.uzorak	21.5	21.8	21	21.4
3.uzorak	20.9	20.5	20.5	20.6
Prosečna vrednost				21.1

W/B=0.3				
1.uzorak	20.4	20.5	20.1	20.3
2.uzorak	19.8	19.2	19.8	19.6
3.uzorak	19.6	19.5	19.5	19.5
Prosečna vrednost				19.8

**PRILOG 5-9 ISPITIVANJE DUBINE PRODORA VODE POD PRITISKOM ZBVP SA OPTE  
MORAVA**

Grupa	w/b	Rezultati merenja vodonepropusnosti betona [mm]			Pros. [mm]
M30	0.4	19	17	17	17.7
	0.3	12	15	15	14.0
	0.2	6	5	5	5.3
	0.17	3	2	5	3.3

30%

M40	0.3	13	15	17	15.0
	0.2	6	5	6	5.7

40%

M50	0.3	19	17	17	17.7
	0.2	4	8	8	6.7

50%

## PRILOG 5-10 ISPITIVANJE DUBINE PRODORA VODE POD PRITISKOM ZBVP SA LP

## TENTB

Grupa	w/b	Rezultati merenja vodonepropusnosti betona [mm]			Pros. [mm]
T30	0.4	9	13	12	11.3
	0.3	8	5	8	7.0
	0.25	4	3	3	3.3

30%

T40	0.4	18	16	15	16.3
	0.3	10	8	10	9.3

40%

T50	0.4	18	19	19	18.7
	0.3	15	12	13	13.3

50%

## PRILOG 5-11 UKUPNOUPIJANJE ZBVPP OPTE MORAVA-240

Grupa	w/b	Upijanje vode [g]						Prosek [%]
		zasićeno			SUVO			
M30	0.4	2473.4	2424.6	2421.1	2313.6	2267.4	2271.8	6.80
	0.3	2454.4	2432	2423.2	2337.9	2313.9	2323.1	4.80
	0.2	2481.4	2475.8	2472.8	2381.4	2378.9	2381.6	4.03
	0.17	2564.1	2561.8	2558.7	2491.2	2485.7	2481.5	3.03
30%								
M40	0.3	2441.2	2432.2	2442.1	2315.4	2301.2	2308.7	5.63
	0.2	2487.3	2501	2478	2393	2408	2384	3.92
40%								
M50	0.3	2398.4	2422.1	2415.7	2260	2284.7	2275.8	6.10
	0.2	2535.2	2531.2	2528.4	2438.9	2435.2	2437.1	3.88
50%								

## PRILOG 5-12 UKUPNOUPIJANJE ZBVPP LPTENTB-240

T30	0.4	2421.1	2412.2	2435.2	2295.6	2285.4	2307.5	5.52
	0.3	2473.6	2472.8	2474.8	2385	2380	2387	3.76
	0.22	2522.3	2518.4	2524.1	2442.5	2441.3	2444.3	3.23
T40	0.4	2412.5	2424.5	2408.7	2287.4	2295.6	2274.4	5.66
	0.3	2470	2465.8	2469.8	2375.2	2381.4	2373.4	3.87
	0.4	2398.4	2401.5	2389.7	2265.4	2268.7	2251.8	5.95
	0.3	2389	2395	2399	2275.4	2281.4	2298.4	4.78

## PRILOG 5-13 KAPILARNOUPIJANJE ZBVPP OPTE MORAVA-240

Grupa	w/b	Kapilarno upijanje vode nakon 7 dana [g]						Prosek [mg/mm <sup>2</sup> ]
		masa uzorka nakon 7 dana			masa uzorka pre početka			
M30	0.4	603.6	605.4	610.7	590.8	592.4	597.8	8.06
	0.3	611	615.3	614.4	601.4	605.8	603.9	6.17
	0.2	616	615.7	609.8	608.4	607.8	601.8	4.90
	0.17	618.8	620.7	625.8	614	616	621.4	2.90
30%								
M40	0.3	615.7	612.4	614.7	605.4	602.4	604.2	6.42
	0.2	652.8	647.8	649.4	646.2	641	642.9	4.15
40%								
M50	0.3	615	612.3	610.7	603.6	600.8	599.2	7.17
	0.2	619.6	622.7	625.3	613.6	616.5	619.8	3.69
50%								
CEM3	0.4	611.2	608.4	605.4	599.8	595.6	593.6	7.50

## PRILOG 5-14 KAPILARNO UPIJANJE ZBVPP LPTENTB-240

CEM3	0.4	611.2	608.4	605.4	599.8	595.6	593.6	7.50
T30	0.4	618.7	611.3	615.8	606.9	599.8	603.9	7.33
	0.3	631.8	625.3	628.4	625.2	619.1	622.1	3.98
	0.22	631.8	635.4	635.9	627.6	631.6	631.2	2.65
T40	0.4	609.2	609.2	602.5	596.8	597.6	590.2	7.56
	0.3	625.6	612.3	612.5	616.6	604.5	603.4	5.40
T50	0.4	594.5	592.4	591.7	581.3	580.2	579.4	7.85
	0.3	609.4	612.3	608.4	596.8	601.9	596.7	7.23

**PRILOG 6-1 UTICAJ KOLIČINE SOLI U VODI ZA PRIPREMU MALTERA SA TERNARNIM  
SISTEMOM VEZIVA**

**ČVSTOĆE PRI PRITISKU[MPa]**

SATI	6	12	24	48	72
50%M240	16.58	24.75	30.16	30.86	31.13
30% M240	21.87	30.54	44.38	45.45	47.05
CEM III	12.25	22.34	36.875	38.7	39.4

**PRILOG 6-2 UTICAJ HLORIDA I NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA OP TE  
MORAVA**

	ČVRSTOĆA PRI PRITISKU[MPa]				
	CEMIII/B-0C	EM45-0C	EM45-1C	EM45-3C	CEMIII/B-1C
3 D 40°C	36.53	23.05	28.81	24.82	37.98
3 D 40°C+4DW	30.77	21.82	31.13	27.32	36.78
3 D 40°C+365 DA	43.75	21.08	32.55	26	38.95
3 D 40°C+4DW +365 DA	59.37	18.51	36.58	30.54	37.85
3 D 40°C+365DW	62.54	22.43	44.38	49.65	39.84
3 D 40°C+365DWD	62.99	22.06	47.56	53.85	41.02
	ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM[MPa]				
	CEMIII/B-0C	EM45-0C	EM45-1C	EM45-3C	CEMIII/B-1C
3 D 40°C	6.67	4.11	6.89	6.32	6.94
3 D 40°C+4DW	8.09	6.08	7.49	7.08	8.27
3 D 40°C+365DW	10.5	6.62	11.27	11.35	9.65

PRILOG 6-3 UTICAJ HLORIDA I NEGE PRI 40°C NA TERNARNI SISTEM VEZIVA SA LP  
TENT B

	ČVRSTOĆA PRI PRITISKU [MPa]				
	CEMIII/B-0C	ET45-0C	ET45-1C	ET45-3C	CEMIII/B-1C
3 D 40°C	36.53	19.85	26.67	34.45	37.98
3 D 40°C+4DW	30.77	22.67	27.58	31.5	36.78
3 D 40°C+365 DA	43.75	25.13	29.29	29.78	38.95
3 D 40°C+4DW +365 DA	59.37	28.68	31.05	33.54	37.85
3 D 40°C+365DW	62.54	34.57	39.96	41.25	39.84
3 D 40°C+365DWD	62.99	35.67	39.47	35.67	41.02
	ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM [MPa]				
	CEMIII/B-0C	ET45-0C	ET45-1C	ET45-3C	CEMIII/B-1C
3 D 40°C	6.67	4.32	4.87	5.97	6.94
3 D 40°C+4DW	8.09	5.24	7.54	6.89	8.27
3 D 40°C+365DW	10.5	10.11	8.75	8.73	9.65

**PRILOG 6-4 KONTROLNA ISPITIVANJA UTICAJ HLORIDA I NEGE PRI 40°C NA TERNARNI  
SISTEM VEZIVA SA PEPELIMA IZ TE**

	ČVRSTOĆA PRI PRITISKU [MPa]						
	NC-	LF-	MN-	ML-	MLC	MLE	MLJ
3 D 40°C	66.12	70.5	66.45	64.8	67.82	65.35	66.11
3 D 40°C+365 DA	84.12	75.9	86.4	83	96.25	95.25	92.02
ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU SAVIJANJEM [MPa]							
	NC-	LF-	MN-	ML-	MLC	MLE	MLJ
3 D 40°C	7.72	7.30	8.25	8.07	8.35	8.09	8.38
3 D 40°C+365 DA	8.25	7.87	8.53	8.28	9.83	9.75	9.59

## PRILOG 7-1 UHPC

RECEPTURE MEŠAVINA [kg/m<sup>3</sup>]

Oznaka	Tip cem	Vrsta pepela	cem	pepeo	SF	Agregat	Vrsta A Kvarc	vlakna	tip vlakana	SP	voda
VCR	CEM I	-	900	0	90	1050	Sika Kvarc	300	Ind.	49	185
VCE	CEM I	-	900	0	90	1050	Sika Kvarc	300	Ind.	49	185
VCR/2	CEM I	-	900	0	90	1120	Sika Kvarc	150	ind.	41	185
T1	CEMIII	LP TENTB240	450	450	SP	1050	Sika Kvarc	300	recikl.	45	145
R1	CEMIII	OP TE M240	450	450	90	1050	Sika Kvarc	300	recikl.	45	135
V1	CEMIII	OP TE M240	450	450	90	1050	Sika	300	recikl.	42	135
D1	CEMIII	OP TE M240	450	450	90	1102	Dijabaz	300	recikl.	45	135
G1	CEMIII	OP TE M240	450	450	90	1073	Granit	300	recikl.	45	135
K1	CEMIII	OP TE M240	450	450	90	1046	Kvarc Ub	300	recikl.	45	135

Čvrstoća pri pritisku [MPa]		
Oznaka	3D 40°C	3D 40°C + 365D 20°C
VCE	127.5	170
VCR	130	191.25
VCR/2	91.25	185.3

Čvrstoća pri zatezanju savijanjem [MPa]	
Oznaka	3D 40°C
VCE	19.76
VCR	42.75
VCR/2	29.88

	Čvrstoća pri pritisku [MPa]	
Oznaka	3D 40°C	3D 40°C + 365D 20°C
V1	83.57	131.45
R1	105.89	166.87
T1	112.87	157.45

Čvrstoća pri zatezaju savijanjem [MPa]	
	3D 40°C
V1	22.52
R1	37.92
T1	34.56

	Čvrstoća pri pritisku [MPa]	
Oznaka	3D 40°C	3D 40°C + 365D 20°C
D1	115.75	180.74
G1	99.45	158.54
K1	111.45	162.45

Čvrstoća pri zatezaju savijanjem [MPa]	
	3D 40°C
D1	40.91
G1	29.88
K1	34.02

## PRILOG 8-1 LAKOAGREGATNI BETONI

Mešavine lakoagregatnih betona bez pepela [kg/m<sup>3</sup>]

Oznaka	Vrsta cementa	cement CEMIII/B	voda	pesak 0/4	Liapor 4/8	Superplast	Stabilizator
N11	1	400	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N21	2	400	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N31	3	400	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N41	4	400	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N51	5	400	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N61	6	400	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2

Mešavine lakoagregatnih betona sa otpadnim pepelom iz TE Morava [kg/m<sup>3</sup>]

Oznaka	Vrsta cementa	cement CEMIII/B	Otpadni pepeo	voda	pesak 0/4	Liapor 4/8	Superplast	Stabilazator
N17	1	200	200	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N27	2	200	200	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N37	3	200	200	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N47	4	200	200	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N57	5	200	200	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2
N67	6	200	200	160+37.1	926.9	231.7	3.9	2