



**UNIVERZITET U NIŠU**  
**GRAĐEVINSKO – ARHITEKTONSKI FAKULTET**

**Nenad S. Ristić, dipl. inž.građ.**

**HIDRO-ABRAZIVNA OTPORNOST BETONA  
SPRAVLJENOG SA RECIKLIRANIM MATERIJALIMA I  
OJAČANOG MIKROVLAKNIMA**

**– Doktorska disertacija –**



**Niš, 2015. godine**

**Mentor:** Prof. dr Zoran Grdić, dipl.inž.građ.

**Članovi komisije:**

1. Dr Zoran Grdić, redovni profesor  
Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu
2. Dr Vlastimir Radonjanin, redovni profesor  
Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu
3. Dr Mirjana Malešev, redovni profesor  
Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu
4. Dr Gordana Topličić-Ćurčić, vanredni profesor  
Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu
5. Dr Jelena Marković-Branković, docent  
Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu

## ZAHVALNOST

Ovom prilikom, želeo bih da izrazim veliku zahvalnost onima koji su dali nemerljiv doprinos izradi ove disertacije.

Pre svega, zahvaljujem se prof. dr Zoranu Grdiću, rukovodiocu ove doktorske disertacije na nesebičnoj pomoći, inovativnim idejama, korisnim savetima i sugestijama.

Takođe, zahvaljujem se dr Gordani Topličić-Ćurčić, van. prof. na korisnim savetima i sugestijama i podršci tokom izrade ovog rada.

Dr Jeleni Marković-Branković, docentu zahvaljujem na ideji i entuzijazmu za proučavanje problema hidro-abrazije betona, kao i na korisnim savetima i podršci prilikom izrade disertacije.

Kolegama iz Laboratorije za građevinske materijale, Dejanu Krstiću i Dušanu Grdiću, diplomiranim inženjerima, veliko hvala na saradnji tokom pripreme eksperimenta, izrade uzoraka i njihovog ispitivanja.

Posebno, jedno veliko hvala upućeno je prof. dr Goranu Radenkoviću na nesebičnoj pomoći i uloženom trudu prilikom izrade aparature za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona i druge prateće opreme neophodne za sprovođenje eksperimentalnog istraživanja. Takođe, zahvaljujem se i ostalim kolegama sa Mašinskog fakulteta na pomoći i to mr Slobodanu Jovanoviću, Petru Đekiću, Jeleni Stanojković i Igoru Ristiću, diplomiranim inženjerima.

Dr Slobodanu Rankoviću, docentu i inženjeru Draganu Antiću se zahvaljujem na stručnoj pomoći prilikom ispitivanja statičkog modula elastičnosti.

Svojim prijateljima, Branimiru Stankoviću, Predragu Gašiću, Zoranu Gligorovu i Milošu Stojanoviću, se zahvaljujem na fizičkoj pomoći oko eksperimenta.

Takođe, želeo bih da izrazim posebnu zahvalnost i onima koji su svojim priložima u materijalu pomogli izradi ove disertacije, pre svega firmama: „Sika“ d.o.o. Beograd, „Spajić“ d.o.o. Negotin, „Motvoz“ d.d. Grosuplje – Slovenija, „Tigar“ a.d. Pirot, „Holcim“ d.o.o. Popovac, „Vodogradnja“ d.o.o. Pukovac.

Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu, a posebno Laboratoriji za građevinske materijale, se zahvaljujem na finansijskoj podršci neophodnoj za realizaciju ovog rada.

Zahvaljujem se Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru čijih projekata TR 22002 – „Razrada i implementacija metodologije procene stanja i sanacije betonskih konstrukcija objekata vodoprivrednih sistema uzrokovana abrazijom“ i TR 36017 – „Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji“ je urađeno ovo istraživanje.

*Autor*

**SADRŽAJ**

1.	UVOD .....	1
1.1.	Osnove problema .....	1
1.2.	Ciljevi i pristup .....	3
1.3.	Struktura disertacije .....	4
2.	HABANJE BETONA .....	6
2.1.	Faktori koji utiču na otpornost betona prema habanju .....	8
2.2.	Habanje betona kod hidrotehničkih konstrukcija .....	14
2.3.	Kavitaciona erozija .....	15
2.4.	Hidro-abrazivna erozija .....	17
2.4.1.	Mehanizam nastanka hidro-abrazivnog oštećenja .....	18
2.4.2.	Faktori koji utiču na proces hidro-abrazivnog habanja .....	21
2.4.2.1.	Utjecaji od spoljašnjeg opterećenja .....	22
2.4.2.2.	Utjecaj strukture betona .....	25
2.4.3.	Pregled faktora i ocena uticaja na proces hidro-abrazivnog habanja .....	34
3.	UTICAJ DODATAKA BETONU NA NJEGOVE PERFORMANSE U SVEŽEM I OČVRSLOM STANJU .....	37
3.1.	Elektrofilterski pepeo .....	37
3.2.	Silikatna prašina .....	44
3.3.	Reciklirana granulirana guma .....	53
3.4.	Polipropilenska i čelična vlakna .....	64
3.4.1.	Vrste vlakana .....	65
3.4.2.	Utjecaj čeličnih i polipropilenskih vlakana na performanse betona u svežem i očvrsлом stanju .....	70
4.	STANJE STVARI U OBLASTI ISPITIVANJA HIDRO-ABRAZIVNE OTPORNOSTI BETONA .....	80
4.1.	Metoda habanja prema Böhme-u .....	80
4.2.	Metode habanja prema ASTM C779 .....	81
4.3.	Metoda habanja prema ASTM C418 .....	82
4.4.	Metoda habanja u rezervoaru .....	83
4.5.	Metoda habanja prema ASTM C 1138 .....	84
4.6.	Austrijska metoda habanja pomoću bubnja .....	84
4.7.	Dresdner metoda habanja pomoću bubnja .....	85
4.8.	Bania metoda habanja .....	86
4.9.	Metoda habanja mlazem mešavine vode i peska .....	86
5.	EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA .....	88
5.1.	Program istraživanja .....	88
5.2.	Svojstva komponentnih materijala .....	92
5.2.1.	Cement .....	92
5.2.2.	Agregat .....	94
5.2.3.	Voda .....	95
5.2.4.	Elektrofilterski pepeo .....	95

---

5.2.5.	Silikatna prašina .....	96
5.2.6.	Superplastifikator „Sika ViscoCrete 3070“ .....	97
5.2.7.	Reciklirana granulirana guma .....	99
5.2.8.	Polipropilenska vlakna .....	100
5.2.9.	Čelična vlakna .....	102
5.3.	Sastav betonskih mešavina korišćenih u eksperimentu .....	105
5.4.	Ispitivanje svojstava svežeg betona .....	107
5.4.1.	Spravljanje betona .....	108
5.4.2.	Ispitivanje konzistencije svežeg betona .....	110
5.4.3.	Ispitivanje zapreminske mase svežeg zbijenog betona .....	112
5.4.4.	Sadržaj vazduha u svežem betonu .....	114
5.5.	Ispitivanje svojstava očvrslog betona .....	115
5.5.1.	Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju .....	116
5.5.2.	Čvrstoća pri pritisku .....	118
5.5.3.	Čvrstoća pri savijanju .....	127
5.5.4.	Čvrstoća pri zatezanju cepanjem .....	132
5.5.5.	Čvrstoća pri zatezanju metodom „Pull-off“ .....	137
5.5.6.	Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton .....	141
5.5.7.	Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra .....	148
5.5.8.	Ispitivanje deformacionih svojstava betona – Statički modul elastičnosti .....	153
5.5.9.	Dinamičko ispitivanje duktilnosti – Ispitivanje udarne otpornosti putem metode udarne mase .....	159
5.5.10.	Otpornost prema habanju brušenjem .....	163
5.5.11.	Hidro-abrazivna otpornost betona .....	168
6.	ZAVRŠNA RAZMATRANJA I ZAKLJUČCI .....	180
6.1.	Analiza uticaja mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona .....	180
6.2.	Zaključci u vezi rezultata ispitivanja .....	191
6.3.	Mogućnosti praktične primene .....	198
6.4.	Pravci daljeg istraživanja .....	199
7.	LITERATURA .....	200
8.	PRILOZI .....	215
8.1.	Oznake korišćene u disertaciji .....	215
8.2.	Oštećenja hidrotehničkih objekata nastalih usled hidro-abrazivnog dejstva ..	218
8.3.	Foto prikaz betonskih uzoraka nakon ispitivanja udarne otpornosti .....	223
8.4.	Foto prikaz aparature za ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti .....	226
8.5.	Foto prikaz betonskih uzoraka nakon ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti ..	228

## **HIDRO-ABRAZIVNA OTPORNOST BETONA SPRAVLJENOG SA RECIKLIRANIM MATERIJALIMA I OJAČANOG MIKROVLAKNIMA**

### **REZIME**

Trajnost hidrotehničkih objekata u najvećoj meri zavisi od otpornosti površine betona prema mehaničkom habanju. Hidro-abrazija predstavlja površinsko oštećenje nastalo kontinuiranim uklanjanjem materijala usled udara čvrstih čestica nošenih vodom. Ovaj vid progresivne deterioracije površina betona javlja se u različitoj meri kod gotovo svih hidrotehničkih objekata. Stoga, hidro-abrazivno habanje betona generalno uzrokuje smanjenje upotrebnoog veka hidrotehničkog objekta, kao i povećanje troškova zbog neophodnih popravki i neaktivnosti objekta u periodu reparacije.

Generalno, malo se zna o mehanizmu nastanka hidro-abrazije betona i razvoja ovog oštećenja kroz vreme. Trenutno još uvek ne postoji standardna metoda za ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona u laboratorijskim uslovima koja u značajnoj meri simulira prirodne uslove habanja. Takođe, nedovoljno su istraženi faktori koji predstavljaju fizičke, mehaničke i strukturalne karakteristike betona, a koji utiču na njegovu otpornost prema habanju. U svetskoj literaturi uglavnom je obrađena hidro-abrazivna otpornost betona visokih čvrstoća, betona spravljenih sa prirodnim drobljenim ili rečnim agregatom, koji su ojačani dodavanjem silikatne prašine ili mikroarmaturom, sa velikom količinom cementa (većom od  $400 \text{ kg/m}^3$ ). U manjoj meri je prikazana mogućnost primene recikliranih materijala i smanjene količine cementa za izradu hidro-abrazivno otpornih betona.

U ovom radu su istražene i analizirane mogućnosti dobijanja cement betona u čijem je sastavu izvršena delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom i delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i dodata mikrovlakna (čelična ili polipropilenska), sa ciljem povećanja otpornosti prema hidro-abrazivnom dejstvu. Performanse ovih betona u svežem i očvrslom stanju su upoređivane sa performansama etalon betona spravljenog bez delimične zamene cementa i sitnog agregata i bez dodatka mikrovlakana. Ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona izvršeno je na originalnoj aparaturi izrađenoj u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, a koja omogućava da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom udara o betonsku ispitnu ploču. Izvršena je parametarska analiza uticaja pojedinih mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona.

Za potrebe istraživanja napravljeno je ukupno osamnaest vrsta betona koji se mogu razvrstati u tri grupe od po šest mešavina. Prvu grupu čine betonske mešavine kod kojih nije vršena delimična zamena cementa, drugu grupu čine betonske mešavine kod kojih je izvršena zamena cementa elektrofilterskim pepelom u iznosu od 20% u odnosu na masu cementa, dok treću grupu sačinjavaju betonske mešavine kod kojih je izvršena zamena cementa silikatnom prašinom u iznosu od 10% u odnosu na masu cementa. U okviru svake grupe nalazi se jedna mešavina u kojoj je izvršena delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom u iznosu od 10% u odnosu na zapreminu agregata, zatim dve betonske mešavine kojima su dodata polipropilenska vlakna (jednoj monofilamentna i drugoj fibrilirana), zatim dve mešavine u kojima su dodata čelična vlakna sa ojačanim krajevima (jednoj vlakna dužine 30 mm i drugoj vlakna dužine 50 mm) i na kraju betonska mešavina bez delimične zamene rečnog sitnog agregata recikliranom gumom i bez dodatka vlakana.

Na osnovu obrađenih i sistematizovanih rezultata eksperimentalnih istraživanja i izvršene parametarske analize uticaja pojedinih mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona formulisani su zaključci. Generalno, najveći efekat u smislu povećanja hidro-abrazivne otpornosti betona postiže se delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom. Takođe, ojačanje betona polipropilenskim vlaknima doprinosi značajnom povećanju hidro-abrazivne otpornosti betona, pri čemu se veći efekat postiže primenom fibriliranih vlakana. Dodavanjem čeličnih vlakana betonu ne postiže se značajno povećanje hidro-abrazivne otpornosti. Betoni spravljani sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskiim pepelom imaju manju hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton, dok dodatkom polipropilenskih vlakana njihova otpornost postaje približno jednaka otpornosti kod etalon betona. Delimična zamena cementa silikatnom prašinom doprinosi povećanju hidro-abrazivne otpornosti betona.

Parametri poput čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri savijanju, čvrstoće pri zatezanju cepanjem, čvrstoće pri zatezanju određenu metodom „Pull-off“, statičkog modula elastičnosti i otpornosti prema habanju brušenjem mogu biti faktori za predviđanje hidro-abrazivne otpornosti betona, zbog postojanja jake korelacione veze. Na osnovu ispitivanja udarne otpornosti betona metodom „Drop weight“ ne može se u potpunosti predvideti ponašanje betona prilikom izlaganja hidro-abrazivnom dejstvu.

Ubrzana metoda ispitivanja abrazije koja se primenjuje u istraživanju je podesna za utvrđivanje hidro-abrazivne otpornosti betona.

**Ključne reči:** beton, elektrofilterski pepeo, silikatna prašina, reciklirana granulisana guma, polipropilenska vlakna, čelična vlakna, hidro-abrazivna otpornost, fizičko-mehanička svojstva, udarna otpornost, parametarska analiza.

## **HYDRO-ABRASIVE RESISTANCE OF CONCRETE MADE WITH RECYCLED MATERIALS AND REINFORCED WITH MICRO-FIBERS**

### **ABSTRACT**

Durability of hydraulic engineering structures in most part depends on the resistance of concrete surface to mechanical abrasion. Hydro-abrasion represents a surface damage caused by continuous removal of material due to impact of waterborne hard particles. This form of progressive deterioration of concrete surface occurs, to a varying extent, in almost all hydraulic engineering structures. Therefore, hydro-abrasion wear of concrete in general causes reduction of the service life of a hydraulic engineering structure, as well as an increase in operating costs due to the necessary maintenance, and the downtime of the structure during the repair period.

In general, little is known about the onset of concrete hydro-abrasion and about development of this damage in time. Presently, there is no standard testing method for hydro-abrasive resistance of concrete in laboratory conditions, which can to a great extent simulate the natural abrasion conditions. Also, the factors representing the physical, mechanical and structural concrete characteristics, and which affect its resistance to wear have not been sufficiently investigated. In the literature is discussed mostly the hydro-abrasive resistance of high-strength concretes made with natural crushed or river aggregate, which are reinforced by addition of the silica powder or micro-reinforcement, with a high quantity of cement (higher than 400 kg/m<sup>3</sup>). The potential for application of recycled materials and reduced quantity of cement for production of the concretes resistant to hydro-abrasion is presented in a limited scope.

The paper investigates and analyzes the potential for production of cement concrete in which the cement content has been partially replaced by fly ash or silica powder, and where fine river aggregate has been partially replaced by recycled granulated rubbers, with the addition of micro-fiber (steel or polypropylene), with the aim to increase resistance to hydro-abrasive action. Performances of these concretes in fresh and hardened state were compared with the performances of reference concrete without the partial replacement of cement and fine aggregate and without micro-fibers. The tests of hydro-abrasive resistance of concrete was performed on the original apparatus constructed in the Laboratory of building materials at the Faculty of Civil Engineering and Architecture of Niš, which facilitates that the jet of water and sand mixture impacts the concrete tests slab at a high speed. The parametric analysis of the effects of individual mechanical characteristics on the hydro-abrasive resistance of concrete was done.

For the purposes of the research, a total of eighteen types of concrete was made, which can be divided into three groups of six mixtures. The first group consists of the concrete mixes where no partial substitution of cement was performed, the second group consists of the concrete mixtures where cement was substituted by filter ash, in the amount of 20% in respect to the cement mass, while the third group consists of the concrete mixes where the cement was substituted with the silica powder in the amount of 10% in respect to the cement mass. Within each group, there is a mixture where a part of fine river aggregate was replaced by the granulated recycled rubber in the amount of 10% in respect to the aggregate volume, followed by two concrete mixtures where polypropylene fibers have been added (monofilament to one and fibrillated to the other mixture), then two mixtures where



hooked end steel fibers were (in one those are fibers 30 mm long and in the other those are fibers 50 mm long) and finally, there is the concrete mix without partial replacement of the fine river aggregate with recycled rubber and without the addition of fibers.

The conclusions are formulated based on the processed and systematized results of the experimental research, and the performed parametric analysis of the effects of individual mechanical characteristics on the hydro-abrasive resistance of concrete. In general, the most intensive effect regarding increase of hydro-abrasive resistance of concrete is achieved by the partial replacement of the fine river aggregate by the recycled granulated rubber. Also, concrete reinforcement with polypropylene fibers contributes to the considerable increase of hydro-abrasive resistance of concrete, whereby the better effect is achieved using the fibrillated fibers. The addition of steel fibers in concrete does not result in a considerable increase of the hydro-abrasion resistance. The concretes made with the partial replacement of cement by fly ash have lower hydro-abrasive resistance in comparison to the reference concrete, while with the addition of polypropylene fibers, their resistance becomes approximately equal to the resistance of the reference concrete. Partial replacement of cement with silica powder contributes to the increase of hydro-abrasive resistance of concrete.

The parameters such as compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength, tensile strength determined using „Pull-off“ method, static modulus of elasticity and resistance to abrasion wear can be the factors for prediction of hydro-abrasive resistance of concrete, due to the existence of strong. The behavior of concrete exposed to hydro-abrasive action cannot be fully predicted based on the „Drop weight“ tests of the impact resistance of concrete.

The accelerate abrasion test method implemented in the research is suitable for analysis of hydro-abrasive resistance of concrete.

**Key words:** concrete, fly ash, silica powder, recycled granulated rubber, steel fibers, hydro-abrasive resistance, physical and mechanical properties, impact resistance, parametric analysis.

## **1. UVOD**

### **1.1. Osnove problema**

Pod pojmom hidro-abrazija podrazumeva se oštećenje betona nastalo usled udara čvrstih čestica o površinu betona i dejstva hidrotehničkih sila na beton. Oštećenja hidrotehničkih objekata od betona usled abrazije javljaju se u različitoj meri kod gotovo svih hidrotehničkih objekata. Kod hidrotehničkih konstrukcija to su najčešće prednji zid preлива, blago nagnute ploče bazena, kanali i bočni zidovi brana. U izvore abrazivnih čestica ubraja se i sama konstrukcija tj. njen otpali materijal, kameni nabačaj koji se vraća u bazen zbog dejstva vrtložnih struja nastalih usled nepovoljnog hidrauličkog režima i asimetričnog pražnjenja bazena, otpad koji baca stanovništvo i sl.

Abrazija betona je glavni problem hidrotehničkih objekata kroz koje, ili preko kojih, vodeni tok prenosi velike količine peska i šljunka. Čvrste čestice koje nosi voda kreću se rotaciono, translatorno ili skokovito ili u bilo kojoj kombinaciji ovih kretanja, što zavisi od strujne slike vodenog toka i hidrotehničkih procesa koji se odvijaju u njemu. Zbog udara čvrstih čestica u tvrdnu granicu javljaju se fine prsline na površini dodira sa vodom, unutar kojih potom počinju da deluju pulsirajuće hidrotehničke sile. Ukoliko pri tim uslovima dođe do prekoračenja napona pritiska i zatezanja doći će do loma materijala i razaranja njegove unutrašnje veze, a odlomljene deliće, koji su novi uzročnici habanja betona, voda odnosi nizvodno.

Kod betonskih površina prsline se najpre formiraju u cementnom kamenu koji prvi biva razoren i odnet nizvodno. Abrazija se zatim prenosi na agregat čije odvajanje od mase betona ubrzavaju hidrodinamičke sile vodenog toka. Jednom započeta abrazija se brzo širi u unutrašnjost betonske mase i oštećuje čeličnu armaturu zbog čega može da bude ugrožena trajnost i stabilnost celog hidrotehničkog objekta.

Abrazivna oštećenja izaziva kako vučeni tako i suspendovani nanos. Oštećenja od vučenog nanosa obično su po dnu provodnika ili na donjim delovima zidova i stubova, dok se abrazija suspendovanim nanosom može desiti skoro u svakom delu poprečnog preseka provodnika. Veličinu abrazije nanosom koju prenosi provodnik moguće je predvideti i uzeti u obzir pri projektovanju. Nasuprot tome, veličina abrazije zbog povratnog vrtloženja vode i čvrstog materijala u slapištu nije predvidiva, pa se u ovom slučaju preduzimaju preventivne mere zaštite.

Intezitet abrazivnog dejstva zavisi od hidrodinamičkih karakteristika vodnog toka (brzina vode, pulsacije pritisaka, turbulencija, prisustvo vrtloga, brzina udara čvrste čestice o tvrdnu granicu odnosno energija koju čestica izgubi pri sudaru, ugao pod kojim čestica udara u tvrdnu granicu), fizičkih karakteristika nanosa (oblik, veličina, težina, mineraloški sastav, odnosno tvrdoća), količine nanosa koji se prenosi, trajanja prenošenja nanosa i mehaničkih karakteristika betona ili betonske obloge (čvrstoće pri pritisku i zatezanju, otpornost na zamor, udar i habanje). Oštećenja su veća ukoliko je veća koncentracija nanosa i ukoliko su slabije mehaničke karakteristike betona.

Abrazivna oštećenja betona na hidrotehničkim konstrukcijama predstavljaju stalni tehnički problem, tako da u cilju povećanja trajnosti ovih konstrukcija treba projektovati betonske mešavine otporne na abrazivno-erozivna delovanja. Neophodno je detaljno proučiti mehanizam nastanka oštećenja, utvrditi metode istraživanja, testirati različite materijale na abrazivnu otpornost, dati predloge kako sanirati postojeće oštećene hidrotehničke objekte i kako izvoditi nove. Abrazioni proces je moguće usporiti, ali ne i eliminisati zaštitnom

oblogom betonske mase, planom manevrisanja hidromehaničkom opremom, periodičnim održavanjem i povremenim popravkama.

Rezultati dosadašnjih ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti različitih materijala pokazuju velike razlike u intezitetu erozije. Materijali moraju biti testirani i klasifikovani u skladu sa važećim standardima pre upotrebe u sanaciji hidrotehničkih objekata oštećenih abrazivnom erozijom. Abrazivno otporan beton treba da sadrži maksimalnu moguću količinu najtvrdog dostupnog krupnog agregata i najmanji vodocementni faktor. U slučajevima kada agregat velike tvrdoće nije dostupan koriste se superplastifikatori visokog učinka redukcije vode i silikatna prašina da bi se dobio beton visoke čvrstoće pri pritisku i kako bi se prevazišli problemi usled nezadovoljavajućeg kvaliteta agregata. Kod takvih betona očvrsla cementna pasta ima veću ulogu u pogledu otpornosti na abrazivno erozivna oštećenja u odnosu na agregat čija uloga postaje manje bitna. Abrazivno erozivna otpornost betona visokih čvrstoća, polimer betona, betona impregnisanim polimerima, kao i betona modifikovanih polimerima je potvrđeno bolja od klasičnog cement betona. Izbor materijala, proizvodnje i ugradnje prethodno navedenih ili drugih specijalnih betona u poređenju sa klasičnim betonom (koji se obično koristi kao etalon) utvrđuje se procenom isplativosti. Dodavanjem čeličnih i polipropilenskih vlakana u beton očekuje se povećanje otpornosti na udar, kao i povećanje abrazivne otpornosti. Takođe, sami hidrotehnički objekti odnosno njihovi delovi izloženi abrazivnom dejstvu izrađuju se od različitih vrsta betona visokih čvrstoća kao što su: betoni sa dodatkom silikatne prašine, aluminatni betoni, fero betoni, polimerni betoni, betoni sa dodatkom elektrofilterskog pepela, betoni sa dodatkom čeličnih vlakana.

U industrijskim razvijenim zemljama, godišnji troškovi održavanja betonskih površina kanala, tunela, prelivnih objekata ili temeljnih ispusta visokih brana su jako visoki. Kod nas su takođe evidentirana oštećenja hidrotehničkih konstrukcija različitog stepena koja zahtevaju sanaciju. Veliki broj hidrotehničkih objekata u Srbiji je upravo oštećen hidro-abrazivnim dejstvom. U projektnoj dokumentaciji ovih objekata se ne nalazi tehnički uslov vezan za hidro-abrazivnu otpornost betona. Takođe, u trenutku njihovog projektovanja, odnosno izvođenja nije postojao standard za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti (i danas u srpskim standardima vezanim za projektovanje i izvođenje hidrotehničkih objekata od betona nema ovog standarda, čak ni pozivanja na strani standard). U svetu postoje standardne metode za ispitivanje abrazije betona (ASTM C 1138-97, ASTM C 418-98, ASTM C 944-99) i različite druge metode koje simuliraju prirode uslove (npr. ubrzani test abrazije pomoću vodenog mlaza i peska).

U stranoj literaturi uglavnom je obrađena abrazivna otpornost betona visokih čvrstoća, betona spravljenih sa prirodnim drobljenim ili rečnim agregatom, koji su ojačani dodavanjem silikatne prašine ili mikroarmaturom, sa velikom količinom cementa ( $> 400 \text{ kg/m}^3$ ). Takođe se istražuju parametri kojima se se može izraziti abrazivna otpornost betona (čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju, modul elastičnosti, otpornost na habanje brušenjem...). U manjoj meri je prikazana mogućnost primene recikliranih materijala i smanjene količine cementa za izradu abrazivno otpornih betona.

Predmet ovog istraživanja je hidro-abrazija cement betona spravljenog sa recikliranim materijalom (reciklirana guma), delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom i ojačanog mikrovlaknima (čeličnim ili polipropilenskim), sa ciljem da se dobije beton otporan na hidro-abrazivno dejstvo, koji se može primeniti za izradu konstruktivnih elemenata izloženih abraziji kod hidrotehničkih konstrukcija.

## 1.2. Ciljevi i pristup

U ovom radu su istražene i analizirane mogućnosti dobijanja cement betona u čijem je sastavu izvršena delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom i delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i dodata mikrovlakna (čelična ili polipropilenska), sa ciljem povećanja otpornosti prema hidro-abrazivnom dejstvu. Performanse ovih betona u svežem i očvrslom stanju su upoređivane sa performansama etalon betona spravljenog bez delimične zamene cementa i sitnog agregata i bez dodatka mikrovlakana.

Pretpostavke od kojih se pošlo u okviru predmetnog istraživanja su:

1. Ojačanje betona čeličnim ili polipropilenskim vlaknima dovodi, u manjoj meri, do povećanja čvrstoće betona pri pritisku, zatezanju, savijanju i cepanju – u odnosu na etalon beton.
2. U znatnoj meri, mikroarmiranje doprinosi porastu žilavosti betonskih kompozita pri dinamičkim uticajima (kao što je npr. udarno opterećenje).
3. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) imaju približno iste ili bolje performanse pri delovanju statičkih ili dinamičkih opterećenja u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa i bez mikroarmature).
4. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) imaju bolje performanse pri delovanju statičkih ili dinamičkih opterećenja u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa i bez mikroarmature).
5. Delimična zamena rečnog sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinosi povećanju duktilnosti betona.
6. Mikroarmiranje (čeličnim ili polipropilenskim vlaknima) doprinosi porastu otpornosti betona prema habanju brušenjem i hidro-abrazivne otpornosti betona.
7. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) imaju približno istu ili veću hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa i bez mikroarmature).
8. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) imaju veću hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa i bez mikroarmature).
9. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom imaju veću hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa, bez delimične zamene sitnog agregata i bez mikroarmature).
10. Parametri poput čvrstoće pri pritisku, savijanju, cepanju, zatezanju metodom „Pull-off“, statičkog modula elastičnosti, udarne otpornosti i otpornosti prema habanju brušenjem mogu biti dobri pokazatelji hidro-abrazivne otpornosti betona.
11. Primenjena ubrzana metoda ispitivanja abrazije je podesna za utvrđivanje hidro-abrazivne otpornosti betona.

Osnovni ciljevi naučnog istraživanja prikazanog u ovom radu su:

- analiza postojećeg stanja u oblasti tehnologije hidrotehničkih betona otpornih na hidro-abrazivno dejstvo, uz poseban osvrt na različite tipove mikroarmiranih betona i betone u čijem sastavu učestvuje elektrofilterski pepeo, silikatna prašina i reciklirana granulirana guma;
- obavljanje sopstvenih eksperimentalnih istraživanja betona spravljenih sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom, delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) i poređenje njihovih karakteristika sa karakteristikama etalon betona;
- na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja, njihove obrade i sistematizacije, vršenje parametarske analize uticaja pojedinih mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona;
- na osnovu prethodne analize, formiranje zaključaka o ostalim relevantnim svojstvima istraživanih tipova kompozita i davanje ocene mogućnosti njihove praktične primene.

Rad na navedenoj temi je realizovan istovremenom primenom teorijskog pristupa oslonjenog na podatke dobijene iz literature i praktičnog pristupa zasnovanog na sopstvenim rezultatima ostvarenim u okviru eksperimentalnih istraživanja.

Eksperimentalna istraživanja koja su u radu prikazana obavljena su skoro u potpunosti u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, izuzev ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem koje je obavljeno u Institutu IMS u Beogradu. Ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona izvršeno je na originalnoj aparaturi izrađenoj u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, a koja omogućava da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom udara o betonsku ispitnu ploču.

### 1.3. Struktura disertacije

Što se tiče prethodno navedenih ciljeva istraživanja, u okviru poglavlja 1 („Uvodna razmatranja“), 2 („Habanje betona“), 3 („Uticaj dodatka betonu na njegove performanse u svežem i očvrslom stanju“) i 4 („Stanje stvari u oblasti ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona“), izvršena je analiza postojećeg stanja u oblasti tehnologije hidrotehničkih betona otpornih na hidro-abrazivno dejstvo, uz poseban osvrt na različite tipove mikroarmiranih betona i betone u čijem sastavu učestvuje elektrofilterski pepeo, silikatna prašina i reciklirana granulirana guma.

Obavljanje sopstvenih eksperimentalnih istraživanja različitih tipova mikroarmiranih betona (armiranih čeličnim i polipropilenskim vlaknima) i betone u čijem sastavu učestvuje elektrofilterski pepeo, silikatna prašina i reciklirana granulirana guma, bio je sledeći značajan cilj predmetnog istraživanja. Ovaj deo disertacije je najobimniji i najznačajniji i obrađen je u poglavlju 5 („Eksperimentalna istraživanja“), u okviru koga je izvršena i komparativna analiza određenih karakteristika betona koji su bili predmet ispitivanja sa karakteristikama etalon betona.

Parametarska analiza uticaja pojedinih mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona započeta je u poglavlju 4 (definisanjem različitih parametara koji utiču na hidro-abrazivnu otpornost betona), a završena u poglavlju 6 („Završna razmatranja i

zaključci“) – tačnije u tački 6.1 („Analiza uticaja mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona“).

Poslednji od gore navedenih ciljeva, formiranje zaključaka o ostalim relevantnim svojstvima istraživanih tipova kompozita i davanje ocene mogućnosti njihove praktične primene, predmet su tačke 6.2 („Zaključci u vezi rezultata ispitivanja“) i tačke 6.3 („Mogućnosti praktične primene“).

## 2. HABANJE BETONA

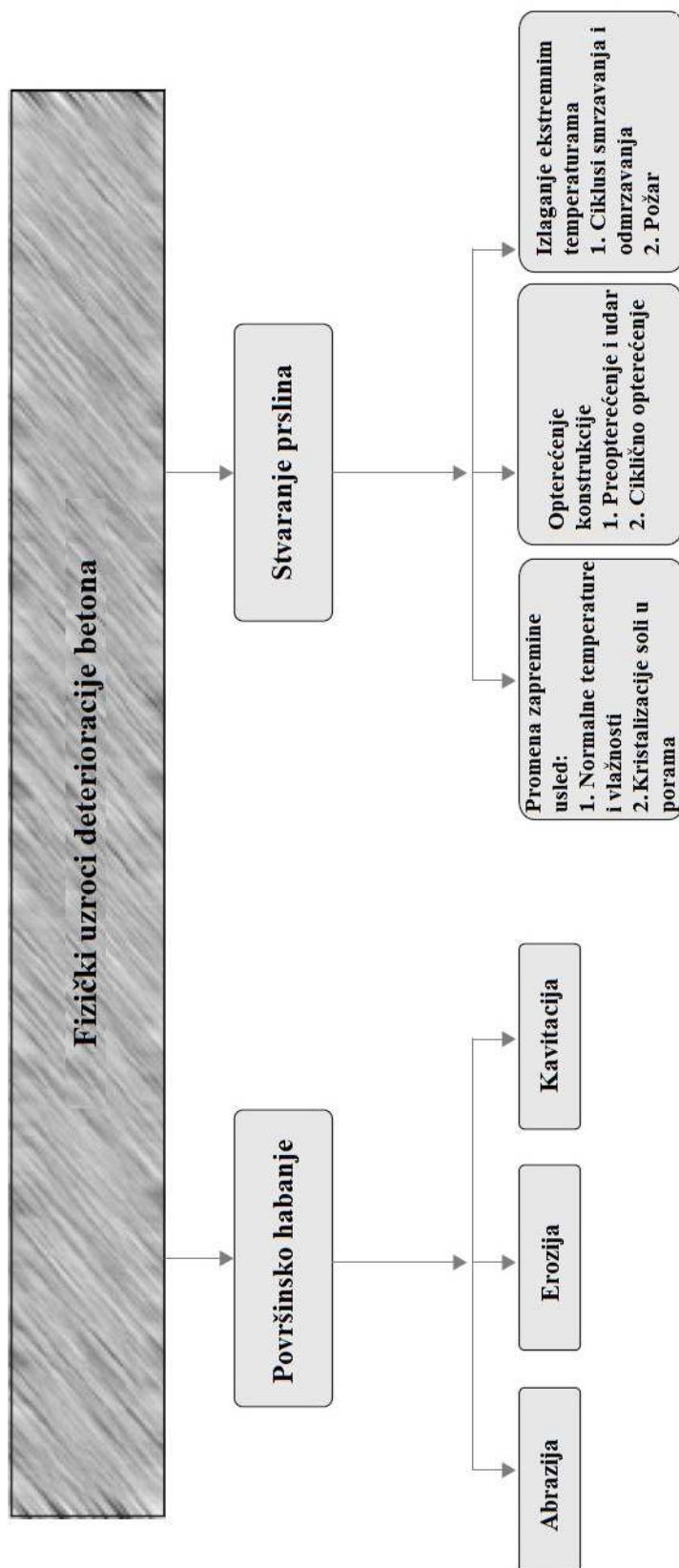
Životni vek konstrukcije je sinonim za trajnost. Ako je neki materijal trajan pod jednim uslovima, to ne mora nužno da znači da će biti trajan i pod drugim okolnostima. Prema ACI Committee 201.2R-08 [1], trajnost portland cementnog betona se definiše kao njegova sposobnost da se odupre uticaju iz atmosfere, hemijskoj agresiji, abraziji ili bilo kom drugom procesu degradacije. Drugim rečima, trajan beton će zadržati svoj prvobitni oblik, kvalitet i upotrebljivost kada bude bio izložen projektovanim uslovima eksploatacije i uslovima sredine.

Ne postoji materijal koji se ne degradira u toku eksploatacije. Kao rezultat interakcije sa okruženjem mikrostruktura, a samim tim i karakteristike betona se menjaju tokom vremena. Pretpostavlja se da je materijal stigao do kraja upotrebnog veka kada se njegove karakteristike, pod datim uslovima korišćenja, pogoršaju do te mere da je dalja njegova upotreba nesigurna ili neracionalna.

Mehta i Gerwick [2,3] su grupisali fizičke uzroke deterioracije betona u dve kategorije: (a) površinsko habanje ili gubitak mase usled erozije, abrazije ili kavitacije; (b) stvaranje prslina pri normalnim temperaturama i vlažnosti, usled kristalizacije soli u porama, opterećenja konstrukcije ili usled izlaganja eksternim temperaturama kao što je zamrzavanje ili požar, slika 2.1. Takođe, autori su grupisali hemijske uzroke deterioracije betona u tri grupe: (1) hidroliza mekom vodom komponenti cementne paste; (2) reakcija katjonske razmene između agresivnih tečnosti i cementne paste i (3) reakcije koje dovode do formiranja ekspanzivnih produkata, kao u slučaju sulfatne agresije, alkalno-agregatne reakcije i korozije armaturnog čelika u betonu.

Treba napomenuti da je razlika između fizičkih i hemijskih uzroka deterioracije betona čisto proizvoljna; u praksi, dva uticaja se obično superponiraju. Primera radi, gubitak mase površinskim habanjem i pojava prslina povećava propustljivost betona, koji time postaje primarni uzrok jednog ili više procesa hemijske deterioracije. Slično tome, štetni efekti hemijskih fenomena su fizički; npr. ispiranjem komponenti očvršle cementne paste mekom vodom ili kiselim rastvorima može se povećati poroznost betona, čime se stvara materijal osetljiv na habanje i eroziju.

Do progresivnog gubitka mase sa površine betona može doći usled abrazije, erozije ili kavitacije. Termin erozija se obično odnosi suvo habanje, kao u slučaju habanja betonskog kolovoza ili industrijskih podova. Abrazija se odnosi na habanje izazvano tvrdim česticama nošenih vodom. Abrazivna oštećenja se javljaju na elementima hidrotehničkih objekata, npr. oblogama kanala, prelivima, betonskim cevima za vodu ili kanalizacioni transport. Još jedno moguće oštećenje na hidrotehničkim objektima jeste kavitacija, koja se odnosi na gubitak mase usled formiranja mehurića pare i kasnijeg njihovog kolapsa usled nagle promene pravca i brzine vodenog toka.



Slika 2.1. Fizički uzroci deterioracije betona [2,3]



## 2.1. Faktori koji utiču na otpornost betona prema habanju

Otpornost na habanje je značajna karakteristika betona u pogledu trajnosti betonskih konstrukcija čije su površine izložene struganju, trljanju, klizanju ili udaru čvrstih čestica nošenih vodom. Postoje mnogi faktori koji utiču na otpornost na habanje betona. Na slici 2.2 je prikazano kako karakteristike komponentnih materijala betona i proces proizvodnje betona doprinose njegovoj otpornosti na habanje [4]. Evidentno je da su dva glavna atributa otpornosti na habanje – tvrdoća i veza između agregata i cementnog kamena. Ovi atributi se međusobno dopunjuju – tvrđi agregat štiti mekši cementni kamen, pod uslovom da je za dati agregat čvrstoća cementnog kamena takva da postoji adekvatna veza između njih, dovoljno jaka da sigurno zadrži ispadanje agregata usled direktnog dejstva habajućeg opterećenja.

Slika 2.2 pokazuje da je tvrdoća betona (1) u funkciji tvrdoće dve glavne komponente betonske mešavine, agregata (2) i cementnog kamena (3). Agregat igra daleko važniju ulogu od cementnog kamena jer, sa jedne strane, čini oko 80% zapremine i mase betona, dok je sa druge strane, većina komercijalnih agregata tvrđa i otpornija na habanje od očvršle cementne paste. Logično je da je tvrdoća agregata kompozit tvrdoće krupnog (4) i sitnog agregata (5). Tvrdoća se može shvatiti kao sposobnost betona da se suprostavi stvaranju udubljenja usled delovanja normalnih sila, ili stvaranju zareza usled dejstva tangencijalnih sila koje indukuju abraziv [5]. Iako tvrdi agregati imaju odličnu otpornost prema habanju, oni su generalno veoma krti. Postoje slučajevi gde je žilavost (6) agregata važnija od njegove tvrdoće. Žilavi agregati su manje krti i samim tim otporniji na udarna opterećenja.

Čvrstoća cementnog kamena (3) se može povećati primenom različitih površinskih tretmana (7), obično nakon očvršćavanja betona. Neki tretmani imaju mogućnost da značajno povećaju otpornost betona na habanje primenom raznih epoksida, poliuretana, rastvarača na bazi akrila i gume koji su dostupni na tržištu.

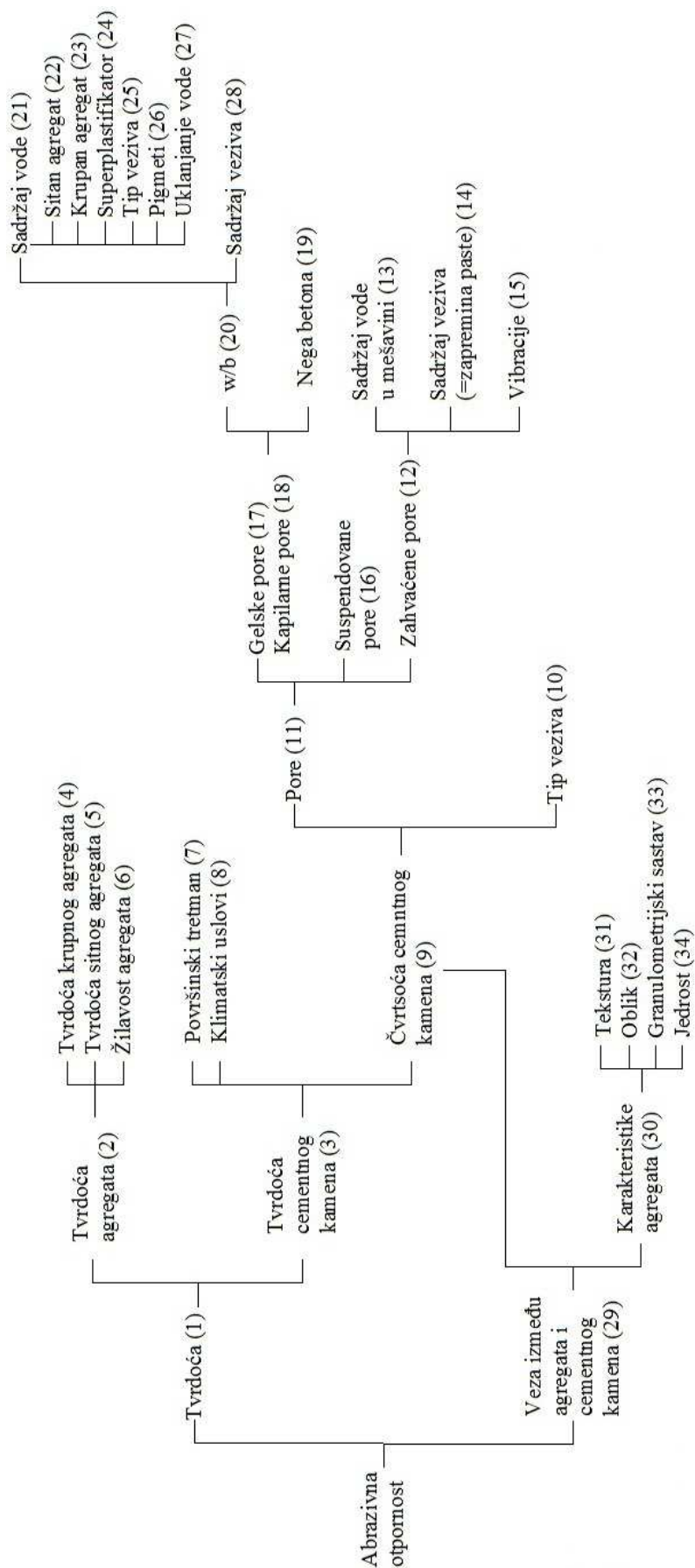
Klimatski uslovi (8) mogu da utiču na očvršćavanje površine betona, praveći je otpornijom na abrazivno dejstvo kao u slučaju karbonatizacije, ili da delovanjem na komponente veziva u betonu smanje otpornost površine prema habanju kao u slučaju kiselih kiša ili delovanja mekih voda.

Konačno, čvrstoća cementnog kamena (9) utiče na njegovu tvrdoću. Addis [6] je pokazao da ukoliko su veće čvrstoće cementnog kamena, utoliko je veća i njegova otpornost prema habanju, ali da je cementni kamen na svim nivoima čvrstoće značajno mekši u odnosu na ekvivalentni malter izrađen od komercijalnog agregata kakav je dolerit, andezit, granit, kvarcit itd.

Logično je da je čvrstoća cementnog kamena određena njegovom mikrostrukturom.

Kao prvo, na morfologiju mikrostrukture cementne paste utiče tip veziva (10), odnosno njegove fizičke karakteristike i hemijski sastav. Sve češće se vrši parcijalna zamena cementa materijalima koji takođe imaju hidraulička svojstva kao npr. mlevena granulirana zgora iz visokih peći i/ili alternativni materijali koji imaju pucolanska svojstva poput elektrofilterskog pepela i silikatne prašine. Ovi materijali imaju mehanizme koji poboljšavaju, odnosno usavršavaju mikrostrukturu cementnog kamena, a istraživanja Papenfus-a [5] su pokazala povećanje čvrstoća i abrazivne otpornosti betona kod kojeg je izvršena delimična zamena cementa sa 30% mlevene granulirane zgora iz visokih peći, 20% elektrofilterskim pepelom i 2% silikatnom prašinom.

Drugo, na morfologiju mikrostrukture cementnog kamena utiču pore. Mnoge studije su pokazale da bez obzira na način stvaranja, pore imaju štetan efekat na čvrstoću betona [5]. Generalno, na svaki 1% pora dolazi do pada čvrstoća, odnosno smanjenja otpornosti prema habanju za 5%.



Slika 2.2. Faktori koji utiču na abrazivnu otpornost betona [4]

Četiri vrste pora se mogu identifikovati u betonu:

1. Zahvaćene pore (12) – To su pore u betonu koje nastaju kao rezultat zarobljavanja vazduha koji nastaje u procesu spravljanja betona. Vazduh mikroskopskih razmera može biti zarobljen između zrna veziva, dok makroskopske pore mogu biti prečnika do 10 mm. Za određenu konzistenciju betona, prisustvo ovih pora se može smanjiti boljim kopaktiranjem betona. Prisustvo zarobljenog vazduha u betonu rezultira smanjenjem čvrstoće pri pritisku betona i abrazivne otpornosti, a njihovo prisustvo u betonu vezano je za tri faktora:
  - Prvi i najčešći razlog za zarobljavanje vazduha je neadekvatna količina vode (13) u betonskoj mešavini, jer voda deluje kao lubrikant, olakšavajući kompaktiranje.
  - Drugo, sadržaj veziva (14) takođe ima uticaj na proces olakšanog kompaktiranja betona, odnosno na eliminaciju zarobljenog vazduha. Sukander [7] navodi da visok sadržaj cementa poboljšava obradljivost i ugradljivost cementne matrice. Povećanje sadržaja cementa povećava debljinu sloja paste oko zrna agregata. Deblji sloj ima veću sposobnost podmazivanja i pokretljivosti u prisustvu vibracija. Prema tome, moguće je smanjiti vodovezivni faktor većom količinom paste i očuvati ugradljivost betona. Može se zaključiti da zapremina paste više utiče na reologiju polusuvih betona u odnosu na vodocementni faktor paste. Drugim rečima, veća količina viskozne cementne paste je sposobnija da smanji pore u odnosu na manju količinu fluidne paste. Veća količina viskozne paste je sposobna da upakuje zrna agregata dosta lako i sa malo pora.
  - Treće, za bilo koji sadržaj vode i cementa, udeo zarobljenog vazduha zavisi od magnitude i dužine trajanja vibracija (15). Jasno je da polusuve mešavine ili mešavine sa manje cementa zahtevaju produženo vibriranje.
2. Suspendovane pore (16) – Ponekad se vazduh namerno suspenduje u pastu u cilju postizanja određenih svojstava betona kao što je otpornost prema dejstvu mraza, poboljšanje pokretljivosti sveže betonske mešavine, smanjenja zapreminske mase i sl. U ovom slučaju mehurići vazduha nisu tako mali da zauzimaju prostor između čestica cementa kao što je slučaj sa gelskim i kapilarnim porama. Tačnije, suspendovane pore su okružene cementnom pastom. U stvari, ove pore se formiraju u očvrslj cementnoj pasti i reda su veličine kapilarnih pora.
3. Gelske pore (17) – Gel strukturu čine sub-mikroskopske čestice koji se zovi hidrati (proizvodi procesa hidratacije) odvojeni međuprostorom tj. gelskim porama. U izgledu hidrati su vlaknaste čestice sa ravnim ivicama i snopovi ovih vlakana formiraju unakrsno spojenu mrežu, a otvoreni prostori ispunjeni vodom oko ovih struktura su gelske pore. Hidrati i gelske pore zajedno čine gel.
4. Kapilarne pore (18) – formiraju se u očvrslj cementnoj pasti kao mikroskopski međusobno povezani kanali, ili nastaju spajanjem gelskih pora ako je struktura paste dovoljno zbijena. One predstavljaju prostor koji nije ispunjen gelom ili čvrstim komponentama sistema. Kapilarne pore su zapravo ostaci originalnih prostora ispunjenih vodom u svežoj cementnoj pasti i u očvrslj pasti mogu biti ispunjeni vodom ili vazduhom, u zavisnosti od faktora kao što su režim nege, prisustvo ili odsustvo spoljne vode itd.

Morfologija gelskih i kapilarnih pora definišu mikrostrukturu očvrslj paste. Dva faktora igraju glavnu ulogu u formiranju očvrslj paste.

Prvi faktor je nega betona (19). Dobro je poznato da pravilna nega betona ima značajan uticaj na čvrstoće betona i još više na otpornost prema habanju, jer hidratacija može da se nastavi samo u prisustvu vode ili vodene para sa relativnom vlažnošću vazduha

preko 90%. Prevrneno sušenje površine betona obustavlja hidrataciju veziva na zahvaćenom području i sprečava dalje napredovanje povećanja otpornosti prema habanju.

Faktori koji povećavaju brzinu kojom novi izliveni beton gubi slobodnu vodu procesom isparenja su niska relativna vlažnost vazduha, velika brzina vetra, visoka ambijentalna temperatura i povišena temperatura svežeg betona (usled primene toplog agregata ili vruće vode itd).

Nega pod povišenim temperaturama ubrzava proces hidratacije, ali rezultira grubljom strukturom gelskih pora i naravno sa odgovarajućim redukovanim potencijalnim čvrstoćama.

Važnost nege se ogleda u tome što od režima nega mnogo više zavisi abrazivna otpornost betona, nego čvrstoće. Površina betona koja se ne neguje će se brzo isušiti, što će dovesti do prekida hidratacije, dok sušenje cele zapremine betona traje znatno duže.

Sukander [7] je izvršio ispitivanje abrazivne otpornosti betonskog kolovoza prema standardu ASTM C779 Proc C (rotirajuće čelične kugle) [8]. Betonski kolovoz je izrađen od betona kod kojeg je variran odnos između agregata i cementa od 3 (25% cementa) do 9 (10%) cementa. Abrazivnim ispitivanjem betonskog kolovoza došlo se do zaključka da pri starosti betona od 24h, zaštićeni uzorci od isušivanja (umotani vodonepropusnom folijom) imaju za 75,5% veću abrazivnu otpornost u odnosu na uzorke negovanih na vazduhu.

Drugi faktor koji u značajnoj meri određuje prirodu mikrostrukture očvrstle paste (posebno zapreminu gelskih i kapilarnih pora) je relativno rastojanje između zrna cementa dispergovanih u pasti i odvojenih vodom. Ovo se može izraziti odnosom mase vode i mase cementa (vodocementnim faktorom), odnosno veziva  $w/b$  (vodovezivnim faktorom) (20). Ovaj odnos se najčešće koristi u industriji kao indikator kvaliteta cementne paste, čvrstoća betona, abrazivne otpornosti itd. Betoni sa niskim vodovezivnim faktorom su superiorniji u odnosu na betone sa visokim faktorom.

Za niski vodovezivni faktor dobijena cementna gelska struktura će biti gusta sa finijom strukturom pora. Za veoma niske vodovezivne faktore (Sukander [7] je radio sa vrlo niskim faktorom od 0,21 za eksperiment sa betonskim kolovozom) je moguće pakovanje cementnih čestica tako blizu tako da nema dovoljno vode između zrna cementa za potpuno pretvaranje svakog zrna cementa u gel. Zbog toga unutrašnja jezgra cementnih čestica ostaju nehidratirana, ali to nije štetno po čvrstoće, jer se unutrašnja nehidratirana jezgra mogu uporediti sa agregatom koji je veoma dobro vezan za okolnu pastu. Najvažnije je da su u početku cementna zrna blizu jedna do drugog, što uveliko povećava gustinu mikrostrukture i samim tim abrazivnu otpornost.

Jasno je da je odnos  $w/b$ , odnosno vodovezivni faktor jednostavna funkcija dva parametra: količine vode i količine veziva.

Iz ovoga sledi da je prvi način da se smanji vodovezivni faktor jeste smanjenje količine vode (21). Međutim, količina vode ne bi smela da se smanji ispod optimalne granice, odnosno do tačke kada betonska mešavina gubi viskoznost u meri koja je neophodna za uklanjanje zarobljenog vazduha. Odlika polusuvih mešavina je da nemaju sleganje, te zato imaju veliko unutrašnje trenje. Ovo čini kompaktiranje betona težim i zahteva posebnu opremu za ugrađivanje ovakvog betona. Lane [9] smatra da je optimalna količina vode maksimalna količina koja se može upotrebiti, a da neće imati negativan uticaj na proces proizvodnje.

Određeni proizvodni procesi i karakteristike komponentalnih materijala imaju uticaj na sadržaj vode u betonskoj mešavini.

- a) Sitan agregat (22) ima važan uticaj na potrebnu količinu vode u betonskoj mešavini koja zavisi od vrste agregata, njegovog mineraloškog i granulometrijskog sastava.

Dobro granulisan sitan agregat zahteva manju količinu vode, odnosno manji vodovezivni faktor za obezbeđenje pokretljivosti betonske mešavine. Loptasta ili kubičasta zrna sa glatkom površinskom teksturom doprinosi boljoj obradljivosti betonske mešavine takođe sa smanjenim vodovezivnim faktorom. Konačno, idealna betonska mešavina je ona u kojoj dominira krupniji agregat, što za posledicu ima smanjeni vodovezivni faktor.

- b) Krupan agregat (23) takođe utiče na sadržaj vode u betonskoj mešavini, ali u znatno manjoj meri zahvaljujući mnogo manjoj površini zrna agregata po jedinici mase. Kao u slučaju sitnog agregata, loptasta i kubičasta zrna sa glatkom površinskom teksturom povećavaju obradljivost i smanjuju w/b faktor.
- c) Superplastifikatori (24) su moćni reduktori vode i imaju široku primenu u tehnologiji betona. Oni značajno povećavaju fluidnost cementne paste, kao i smanjenje trenja između zrna agregata u betonskoj mešavini. Generalno, superplastifikatori omogućuju: (a) smanjenje količine veziva u betonu (bez gubitka čvrstoća); (b) povećanje čvrstoća betona (bez povećanja količine veziva) i (c) poboljšavanje ugradljivosti betona (bez dodatka vode). Navedeno plastifikator postiže: (a) smanjenjem količine veziva i količine vode, ali bez menjanja vodovezivnog faktora; (b) smanjenjem vodovezivnog faktora smanjenjem količine vode ostavljajući isti sadržaj veziva i (c) ostavljajući isti sadržaj vode i veziva, kao i isti vodovezivni faktor.
- d) Tip veziva (25) takođe utiče na zahtev betonske mešavine za vodom. Vezivo u betonskoj mešavini predstavlja najfiniji materijal i stoga ima najveću površinu po jedinici mase, a samim tim i potrebe za vodom po jedinici mase. To dalje znači da postoji potreba za većom količinom vode u slučaju primene veoma fino samlevenog cementa. Iako to potencijalno predstavlja povećanje vodovezivnog faktora, otpornost na habanje i čvrstoće betona su značajno povećani.

Tri najčešća dodatka cementu su mlevena granulisana zgura iz visokih peći, elektrofilterski pepeo i silikatna prašina.

Fizičke osobine (veličina i oblik zrna) mlevene granulisane zgre iz visokih peći su slične portland cementu, te će potrebe za vodom biti slične.

Zrna elektrofilterskog pepela su generalno sfernog oblika. To poboljšava lubrikantne osobine cementne paste što omogućava lakše pakovanje i konsolidovanje betonske mešavine prilikom vibriranja. Ako nije zahtevana povećana pokretljivost betonske mešavine, moguće je smanjenje sadržaja vode i veziva uz održanja istog vodovezivnog faktora. U velikoj meri zahvaljujući smanjenju količine vode, čvrstoće pri pritisku pri starosti od 28 dana betona spravljenog sa zamenom PC elektrofilterskim pepelom u iznosu od 30% su ekvivalentne čvrstoćama pri pritisku betona spravljenim bez zamene cementa.

Zrna silikatne prašine su izuzetno sitna, što je uzrokovalo da specifična površina ovog veziva iznosi 20000 m<sup>2</sup>/kg. Na nivou zamene cementa od 2% silikatna prašina deluje kao veoma efikasni punilac pora, povećavajući gustinu i čvrstoću cementnog kamena. Čestice silikatne prašine su toliko sitne (reda veličine stotog dela zrna cementa) da lako zauzimaju pore između ostalih čestica veziva, bez obzira da li je reč o cementu, elektrofilterskom pepelu ili mlevenoj granulisanjoj zguri, pa čak i prodiru u šupljine unutar flokula ovih čestica.

Međutim, ACI Committee 235 [10] navodi da procenat zamene cementa silikatnom prašinom većim od 5% zahteva povećanje potrebe za vodom koji raste sa povećanjem sadržaja silikatne prašine (čak i onda kada su u obzir uzeti i pucolanski

efekti silikatne prašine). Ovo je prvenstveno zbog velike specifične površine silikatne prašine i obično se kompenzuje primenom superplastifikatora. Ipak Papenfus [5] je postigao značajno poboljšanje abrazivne otpornosti betona pri starosti od 28 dana zamenom cementa silikatnom prašinom u iznosu od 5 i 10%. Ovaj eksperiment je izvršen na betonima za betonski kolovoz, iako je pravilo da se 5% zamene cementa silikatnom prašinom ne koristi za polusuve betone.

- e) Iz estetskih razloga, betonski kolovozi su najčešće obojeni. Pigmenti (26) su uglavnom praškaste materije (oksidi gvožđa, ugljena prašina) koje pospešuju otpornost betona na habanje.
- f) Napred u tekstu su navedene metode za smanjenje količine vode u betonskoj mešavini čime se smanjuje vodovezivni faktor i povećava abrazivna otpornost betona. Drugi pristup je uklanjanje vode (27) iz betonske mešavine pre nego što beton bude ugrađen. U tekstu koji sledi je opisano nekoliko mogućih tehnika uklanjanja vode iz gotove betonske mešavine.
  - Kod tehnike „vakuum odvodnjavanja“ vakuum prekrivač se postavlja preko površine betona. Materijal u kontaktu sa betonskom površinom je fini filteski papir koji omogućava da voda prođe kroz njega, ali sprečava prolazak cementa, različitih dodataka betonu i sitnog agregata usled dejstva vakuum pumpe. Ovaj proces smanjuje vodovezivni faktor i zahvaljujući pritisku na površini betona zatvaraju se kanali i kapilare odgovorne za proces „krvarenja betona“, što dovodi do povećanje površinske gustine betona.
  - „Revibriranje betona“ je proces ponovnog vibriranja izlivenog betona nakon određenog vremena (nekoliko sati). Ovim procesom se poremećuje rana gelska struktura, pri čemu se oslobađa voda zarobljena u gelskim porama. Revibriranje nije specijalni proces povećanja gustine površinskog dela betona, već omogućava povećanje gustine celokupne mase betona.
  - Ipak, najjednostavniji način ekstrakcije vode sa površine betona je odloženo i ponovljeno snažno glačanje. Snažnim glačanjem (primenom visokog ravnomernog pritiska) se zasićena površinska vezivna matrica (pozitivna posledica „krvavljenja“ betona) kompaktira, čime se zatvaraju površinske pore i mikroprrsline. Iako ova tehnika povećava gustinu gornjeg dela ploče od svega nekoliko milimetara, nastala površina je toliko tvrda da lako može izdržati predviđeni saobraćaj.

Drugi način da se smanji vodovezivni faktor jeste povećanje sadržaja veziva (29). Sa povećanjem sadržaja veziva u betonskoj mešavini, rastojanje između pojedinačnih zrna cementa se smanjuje što takođe dovodi do smanjenja broja gelskih i kapilarnih pora čime se povećava gustina mikrostrukture, a na taj način se povećavaju čvrstoća i otpornost na habanje betona.

U prethodno navedenom tekstu razmatrani su faktori koji utiču na tvrdoću površine betona. Tvrdoće materijala i veza između agregata i cementnog kamena (29) jednako se rangiraju u pogledu značajnosti za abrazivnu otpornost, kao što je jasno da je tvrdoća agregata nebitna ukoliko agregat nije čvrsto vezan za cementni kamen. U nastavku teksta su prikazani faktori koji utiču na vezu između agregata i cementnog kamena.

Određene fizičke karakteristike agregata (30) mogu da utiču na kvalitet ove veze.

- a) Prva i najvažnija fizička karakteristika je njegova površinska tekstura (31). Hrapavi agregat sa dosta uglova i raseda ima veću kontaktnu površinu sa cementnom pastom čime se umanjuje kontaktni napon. To ne mora obavezno da znači da agregati sa glatkom površinom zrna imaju slabiju vezu sa cementnim kamenom.

- b) Oblik zrna agregata (32) takođe utiče na vezu između agregata i cementnog kamena. Primera radi, adheziona veza između cementnog kamena i zrna agregata je jača ukoliko su zrna uglasta kao u slučaju drobljenog agregata, za razliku od obliha zrna rečnog agregata.
- c) Granulometrijski sastav (33) agregata takođe ima uticaj na vezu između agregata i cementnog kamena. Matematički je pokazano da je tangencijalni napon na kontaktu između cementnog kamena i agregata obrnuto proporcijalan kvadratu veličine zrna agregata. Tako je za krupniji agregat veza između agregata i cementne paste slabija u odnosu na sitniji agregat.
- d) Na kraju, jedrost zrna agregata (34) daje sposobnost povezivanja sa cementnim kamenom. Kod agregata sa puno mikroprslina, sa površinom koja se troši ili sadrži primese nečistoće, javiće se mikrolom na kontaktu između cementnog kamena i agregata usled dejstva normalnih i smičićih sila, što će na kraju dovesti do otkaza veze.

Evidentno je da i pored najpovoljnijih atributa agregata u pogledu površinske teksture, oblika zrna, granulometrijskog sastava i jedrosti zrna, cementni kamen neće sprečiti izvlačenje zrna agregata ukoliko nema dovoljnu čvrstoću. Stoga je čvrstoća cementnog kamena od vitalnog značaja za dobru abrazivnu otpornost betona.

## 2.2. Habanje betona kod hidrotehničkih konstrukcija

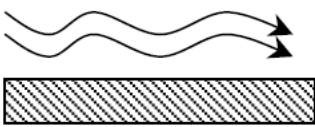

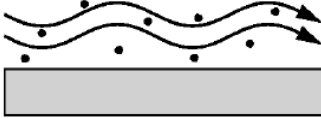
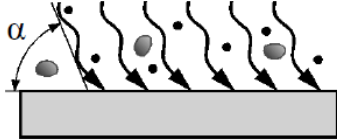
Hidrotehnički objekti su stalno ili povremeno izloženi delovanju stacionarnih ili tekućih voda i to najmanje po jednoj svojoj površini. Kako su oni obično izrađeni od betona, primenjeni beton koji se još naziva i „hidrotehnički beton“ mora imati specijalne performanse kako bi zadovoljio posebne uslove kvaliteta predviđene za ovakve objekte. Površine hidrotehničkih objekata (npr. preliva, otvorenih kanala, tunela za vodu, donjih ispusta) opterećene tekućom vodom su izložene dejstvu velikih sila čime se generiše mehanička erozija na površini betona. Tačnije, ova mehanička erozija površina hidrotehničkih objekata se sastoji od „kavitacije“ (izvlačenje delova betona sa njegove površine), „fluidne erozije“ i hidro-abrazije, tabela 2.1 [11]. Fluidna erozija je specijalni slučaj hidro-abrazije sa sadržajem transportovanog sedimenta u iznosu od 0%.

Pri standardnim uslovima uticaj fluidne erozije može se zanemariti, jer je njegovo dejstvo relativno malo. Kavitaciona erozija se može izbeći posebnim konstruktivnim oblikovanjem hidrotehničkih objekata. Hidro-abrazija se ne može u potpunosti eliminisati, ali se može ublažiti primenom kvalitetnih materijala otpornih na habanje, periodičnim održavanjem, povremenim popravkama i pravilnim upravljanjem hidrotehničkom opremom.

Prema ACI 210R-93(R2008) [12], pod erozijom betona kod hidrotehničkih konstrukcija podrazumeva se površinsko oštećenje betona koje prouzrokuju tri pojave: kavitacija, abrazija i hemijska agresija. Kavitacija je pojava isisavanja slabije vezanih čestica betona na hidrotehničkim građevinama na mestima gde pri proticaju vode velikom brzinom nastaje podpritisak. Abrazija je pojava trošenja površine betona koje nastaje kada zrna peska, šljunka, mulja, leda ili odlomaka nošenih vodom stružu i udaraju po betonskoj površini. Erozija betona koja nastaje hemijskom agresijom je pojava kada se beton degradira pod dejstvom hemijskih agenasa rastvorenih u vodi, dok je voda u stalnom kontaktu sa betonom. Ova erozija betona je u sprezi sa prethodnim, tj. sa kavitacijom i abrazijom: hemijski degradiran beton je potencijalno mesto na kome će doći do isisavanja čestica odnosno krunjenja površine betona.

Kako kavitaciona erozija, poput hidro-abrazivne, predstavlja mehaničko oštećenja betonskih površina kod hidrotehničkih objekata, u narednom tekstu biće reči i o ovom vidu deterioracije hidrotehničkog betona.

Tabela 2.1. Vrste habanja kod hidrotehničkih objekata prema Uetz [13] i Höcker [14], modifikovano

Komponente sistema	Tribološko (habajuće) opterećenje		Vrsta habanja	Primer
Čvrsta podloga – tečnost	Površinski paralelni tok - proticanje		Fluidna erozija	-
	Udar usled implozije vodene pare	brzina > 12-15m/s 	Kavitacija	prelivna brana
Čvrsta podloga – tečnost i čvrste čestice nošene tečnošću	Proticanje		Hidro-abrazija	prelivi, otvoreni kanali, tunela za vodu, donji ispusti kod brana
	Proticanje, udar	$\alpha$ – napadni ugao $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 		

### 2.3. Kavitaciona erozija

Kavitacija je pojava formiranja mehurića i šupljina u tečnosti. Kod hidrotehničkih konstrukcija, tečnost je voda, dok su šupljine ispunjene vodenom parom i vazduhom. Šupljine se formiraju na mestima gde lokalni pritisak opada do vrednosti koji će prouzrokovati isparavanje vode pri postojećoj temperaturi tečnosti. Pad pritiska uzrokovan ovim nepravilnostima je obično trenutni i izazvan je velikim lokalnim brzinama toka i zakrivljenim strujnicama. Kavitaciona oštećenja nastala pucanjem mehurića ispunjenih vodenom parom izazivaju veoma visoke trenutne pritiske koji deluju na betonsku površinu uzrokujući nagrivanje, brujanje i vibriranje. Nagrivanje od kavitacije je lako razlikovati od oštećenja nastalih abrazivnim habanjem, jer kavitacione jame zasecaju zrna čvrstog krupnog agregata i imaju nepravilne i neravne ivice.

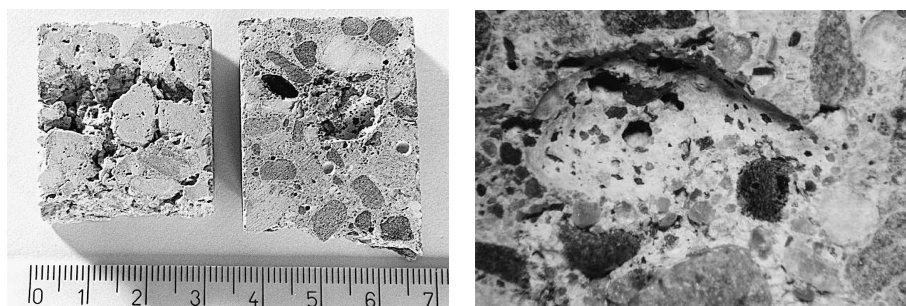
Kavitacija je posledica promene preseka, odnosno geometrije hidruličkog toka. Zapaža se na mestima gde se naglo menja pravac strujnica i brzina tečnosti. U slučaju velikih brzina na ovim mestima dolazi do pojave vrlo niskog pritiska u tečnosti (u skladu sa Bernulijevom jednačinom). Ako je ovaj statički pritisak niži od napona pare tečnosti, dolazi do ključanja. Nastali mehuri pare pomešani sa fluidom brzo uleću u područje višeg pritiska



gde se naglo kondezuju. Nastale kapi tečnosti velikom brzinom udaraju o betonsku površinu. Na mestima gde se javlja kavitacija lokalni pritisci mogu biti i do 200 bara, usled čega dolazi do mehaničkog razaranja materijala (stvaranja jamica i habanje uopšte). Kavitacija može nastati kada se prekorači brzina koja zavisi od ukupnog pritiska i osobina tečnosti (gustine i napona pare). Uslovi za dostizanje ove brzine se sprečavaju konstruktivnim oblikovanjem.

Kavitaciona erozija je rezultat relativno kompleksnih karakteristika tečenja vode preko betonskih površina. Postoji malo dokaza koji pokazuju da tečenje vode preko betonskih površina pri brzini manjoj od 12,2 m/s prouzrokuje bilo kakva kavitaciona oštećenja u betonu. Međutim, kada je tečenje dovoljno brzo (iznad 12,2 m/s) i gde postoje površinske nepravilnosti na betonu, mogu da se jave kavitaciona oštećenja. Kad god postoji površinska nepravilnost, tekuća voda će se odvojiti od površine betona. U oblasti odvajanja vode od betona, stvoriće se oblačići pare zbog smanjenog pritiska pare. Pošto su ti oblačići nizvodno orjentisani, oni će uskoro doći do područja normalnog pritiska. Ti oblačići će se izgubiti sa gotovo trenutnim smanjenjem zapremine. Ovaj kolaps ili implozija stvara udarni talas koji kada dođe do površine betona stvara veoma velike napone na maloj površini. Ponovljeni kolaps oblačića pare na, ili blizu površine betona, prouzrokuje nagrizanje. Betonski preliv i izlivi sa visokim pregradama su jako podložni oštećenjima od kavitacije [15].

Beton koji je oštećen kavitacionim dejstvom je nagrižen i vrlo grub, slika 2.3 [16]. Kako oštećenje raste, hrapavost oštećene površine može dovesti do dodatne kavitacije.



Slika 2.3. Kavitaciono oštećenje betona: makroskopski pogled (levo), mikroskopski pogled (desno) [16]

Čak ni najjači materijali nisu trajno imuni na sile kavitacije. Zato je veoma važno pravilno hidrauličko oblikovanje i korišćenje aeracije, radi smanjenja ili eliminacije parametara koji izazivaju kavitaciju.

Pošto pravilan izbor materijala može povećati otpornost betona na kavitaciju jedina potpuna delotvorna mogućnost je smanjenje ili eliminacija uzroka kavitacije [15]. Međutim, u slučaju postojećih konstrukcija i potrebe za njihovom sanacijom redukcija ili eliminacija kavitacije može biti teška i skupa. Sledeće najbolje rešenje je zamena oštećenog betona materijalima sa većom kavitacionom otpornošću. Kavitaciona otpornost betona može biti povećana upotrebom betona visokih čvrstoća sa malim vodocementnim faktorima. Povoljno je korišćenje agregata maksimalne nominalne veličine zrna do 31,5 mm. Takođe su preporučljive metode koje smanjuju sadržaj vode u mešavini, kao što je upotreba moćnih reduktora vode. Od velike važnosti za povećanu kavitacionu otpornost je upotreba agregata sa tvrdim zrnima, dobro granulisanog i obezbeđenje dobre prionljivost cementne paste i agregata. Obično materijali na bazi cementa pokazuju značajno manju kavitacionu otpornost u odnosu na materijale na bazi polimera [17].

Površine oštećene kavitacijom su bile uspešno sanirane betonom sa dodatkom čeličnih vlakana i polimernim betonom. Neke obloge kao što su neoprenske i poliuretanske smanjuju kavitaciona oštećenja betona, ali pošto je nemoguće dobiti skoro savršenu adheziju sa betonom, njihova upotreba nije uobičajena. Kada se jednom pojavi naprslina ili otpadne komadić najbolje je ukloniti celu oblogu i postaviti novu.

Pravilno izvođenje konstruktivnih elemenata hidrotehničkih objekata je od izuzetne važnosti u slučaju kada su betonske površine izložene dejstvu tekućih voda sa velikim proticajnim brzinama, posebno ako konstrukcija ne sadrži aeracijske uređaje. Takve površine moraju biti maksimalno glatke, koliko god je to praktično moguće [18]. Oštre prelome kod vodotoka i kanala treba izbegavati, bez obzira na upotrebu moderne opreme za aeraciju. Poprečne spojeve u betonskim vodovima ili kanalima treba svesti na minimum. Ovi spojevi su uglavnom na mestima gde je najveći problem održati kontinualnu, glatku hidrauličku površinu. Takođe, neophodno je i obezbediti pravilno očvršćavanje betonskih površina, pošto površinska tvrdoća povećava otpornost na kavitaciju.

#### 2.4. Hidro-abrazivna erozija

Nasuprot kavitaciji i fluidnoj eroziji, proces hidro-abrazije se može smatrati normalnom erozijom površine betona hidrotehničkih objekata izloženih dejstvu tekućih prirodnih voda. Hidro-abrazija predstavlja oštećenje betona nastalo usled udara čvrstih čestica nošenih vodom i dejstva hidrotehničkih sila na beton. Ona izaziva intenzivno razaranje površine betona i dovodi do povećanja njene hrapavosti. Ova vrsta razaranja deluje kao kombinacija peskarenja i klizanja [11,19-21] i najvažniji je tip mehaničke erozije, slika 2.4.



*Slika 2.4. Površine izložene hidro-abraziji sa vidljivim habajućim oštećenjem levo/desno: prečnik zrna manji ili jednak od 8/16mm [23]*

Hidro-abrazivna oštećenja izaziva kako vučeni tako i suspendovani nanos. Oštećenja od vučenog nanosa obično su po dnu provodnika ili na donjim delovima zidova i stubova, dok se abrazija suspendovanim nanosom može desiti skoro u svakom delu poprečnog preseka provodnika. Veličinu abrazije nanosom koju prenosi provodnik je moguće predvideti i uzeti je u obzir pri projektovanju. Nasuprot tome, veličina abrazije zbog povratnog vrtloženja vode i čvrstog materijala u slapištu nije predvidiva, pa se u ovom slučaju preduzimaju preventivne mere zaštite.

Šteta koja može nastati usled hidro-abrazivnog habanja je u rasponu od površinskog habanja betona direktno izloženog dejstvu vode do uništavanja armature i uklanjanja betona do nekoliko decimetara [22]. Posebno su ugroženi prelivevi, otvoreni kanali, tuneli za vodu, donji ispusti kod brana, akumulacioni bazeni [11]. Kod ovih konstrukcija je velika brzina

toka u kombinaciji sa velikom količinom taloga. Fotografije u Prilogu 8.2 („Oštećenja hidrotehničkih objekata nastala usled hidro-abrazivnog dejstva“) prikazuju tipične primere oštećenja betonskih površina usled hidro-abrazivnog dejstva.

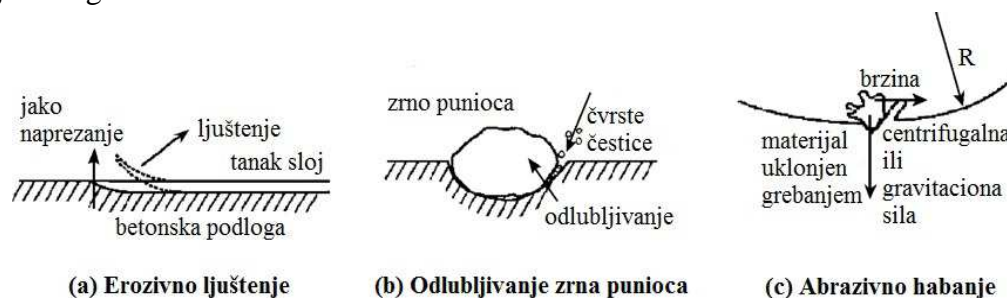
U evropskim i nemačkim standardima [24-26] mehanička erozija se klasifikuje za potrebe praktične primene u tri hijerarhijske „Klase izloženosti“ (XM 1,2,3). Ona se tretira kao „Korozija betona uzrokovana habajućim naprezanjem“, tabela 1. Klasifikacija bi se mogla napraviti i na osnovu dominantne izloženosti tokom predviđenog prosečnog veka trajanja hidrotehničke konstrukcije. Ali ova procena nije namenjena za praktičnu primenu.

Tabela 2.2. Klase izloženosti za mehaničku eroziju (hidro-abraziju) betonskih površina hidrotehničkih objekata [23]

Klasa	Opis sredine	Primer
XM 1	umereno habajuće opterećenje	habanje izazvano brodom (npr. unutar brodske prevodnice, iznad prelivne vode – 1,0 m); površine izložene umerenim sedimentnim transportom i umerenim brzinama protoka; komore za pesak; rečni objekti; struganje od leda
XM 2	jako habajuće opterećenje	ustave i mirni slivovi opterećeni umerenim sedimentnim transportom i protokom velike brzine; upravljanje bujicom
XM 3	vrlo jako habajuće opterećenje	mirni slivovi opterećeni velikim sedimentnim transportom i protokom velike brzine; bujični objekti; odvodni tuneli

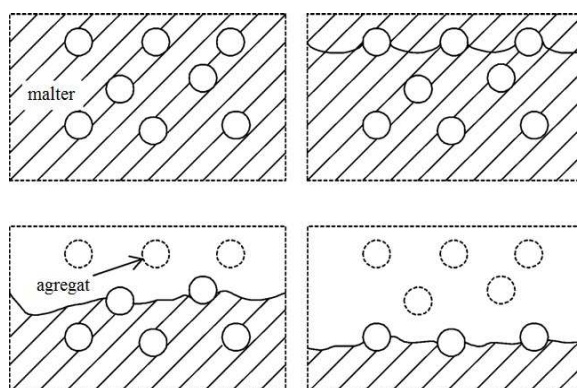
#### 2.4.1. Mehanizam nastanka hidro-abrazivnog oštećenja

Hidro-abrazivno oštećenje betonskih površina hidrotehničkih objekata odvija se u nekoliko faza. Lui i saradnici u svom istraživanju [27] navode da hronološki abrazija napreduje u tri faze kako je prikazano na slici 2.5. Najpre se javlja erozivno ljuštenje tankog sloja površine betona delovanjem molekula vode koje je u tesnoj vezi sa brzinom toka i odgovarajućim hidrauličkim pritiskom, slika 2.5 (a). Zatim, čvrste čestice nošene vodom deluju na zrna agregata iz betona stvarajući površinske prsline, slika 2.5 (b). I na kraju, nastupa abrazivno erozivni proces koji je blisko povezan sa tvrdoćom vodom nošenih čestica, brzinom toka i čvrstoće veze komponentalnih materijala betona, slika 2.5 (c). Dakle, hidro-abrazivna erozija nije uzrokovana samo delovanjem čestica nošenih vodom, već postoje i drugi činioci.



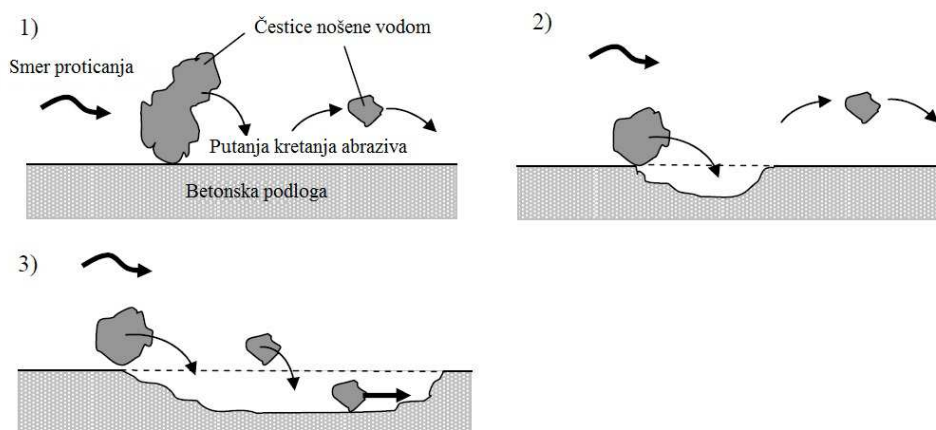
Slika 2.5. Naprezanja betonske podloge uzrokovana česticama nošenih vodom [27,28]

Slika 2.6 ilustruje hronološku abraziju površine betona izložene dugotrajnim hidrauličkim udarima čestica iz vode. U početku, površinski sloj maltera se postepeno troši sve dok krupan agregat ne bude direktno izložen delovanju abraziva. Dalje dolazi do loma ili čupanja krupnog agregata iz cementne matrice. Ovo rezultira formiranjem sitnih šupljina u malteru neposredno uz zrna agregata. Formiranje šupljina u velikoj meri zavisi od veličine krupnog agregata, vrste korišćenog peska i momenta rotacije vodenih mlazeva koji vremenom sve dublje prodiru u unutrašnjost betonske mase. Veličina sile prijanjanja između zrna krupnog agregata i maltera utiče na hidro-abrazivnu otpornost hidrotehničkog betona.




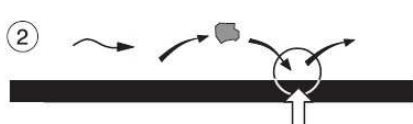
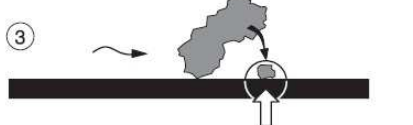
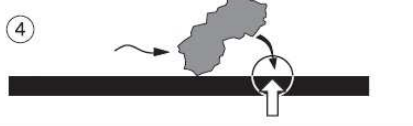
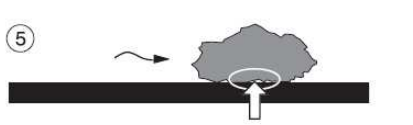
Slika 2.6. Proces hidro-abrazivnog habanja betonske površine [27]

Jacobs i saradnici [11] su takođe opisali mehanizam naprezanja betonske podloge usled dejstva abraziva iz vode. Na slici 2.7 prikazane su faze u procesu hidro-abrazivnog habanja betonske površine. U trenutku udara, kinetička energija čvrste čestice nošene vodom se troši na kidanje veze između komponentnih materijala u betonu. Međutim, energija prvog udara je najčešće nedovoljna za kidanje veze (slika 2.7, faza 1), ali superponirani uticaj više čestica dovešće do zamora materijala i pojave odvajanja delova betonske površine (slika 2.7, faza 2). Kako površina betona postaje hrapavija, efekat udara abrazivne čestice biće jači, te će i propagacija oštećenja biti progresivnija (slika 2.7, faza 3).



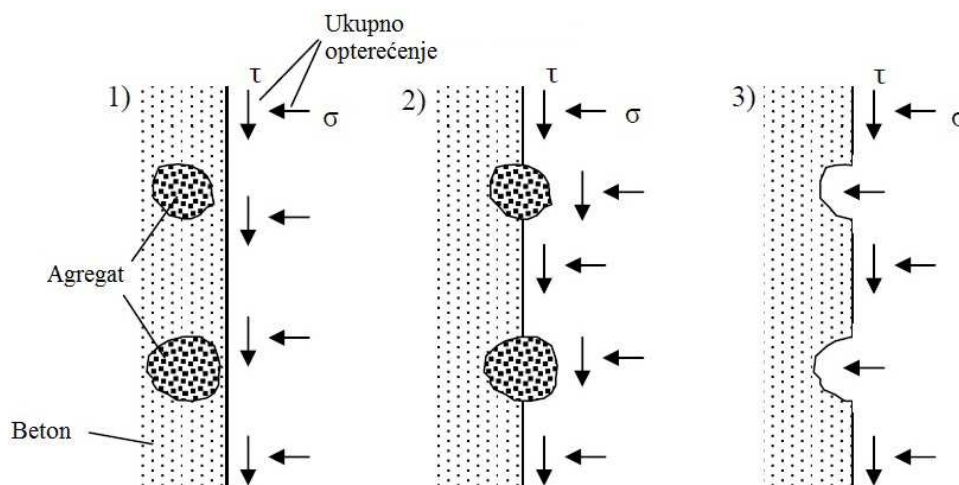
Slika 2.7. Inicijalno i naknadno oštećenje betonske površine usled hidro-abrazivnog habanja [11, 29]

Precizni opis kretanja čestica u vodi, odnosno određivanje njene putanje i napadnog ugla praktično nije poznat. Za bolje razumevanje mehanizma nastanka hidro-abrazivnog habanja, na slici 2.8 je sistematski prikazan pojednostavljen set mogućih situacija. Napravljena je jasna razlika između uticaja „udara“ i „klizanja“ čvrste čestice [11].

	1) Veliki broj sitnih čestica dovode do hidro-abrazivnog habanja
	2) Veći protok veći broj udara čestica o betonsku podlogu
	3, 4) Habanje usled rotacije čvrstih čestica
	
	5) Habanje klizanjem po relativno glatkoj podlozi

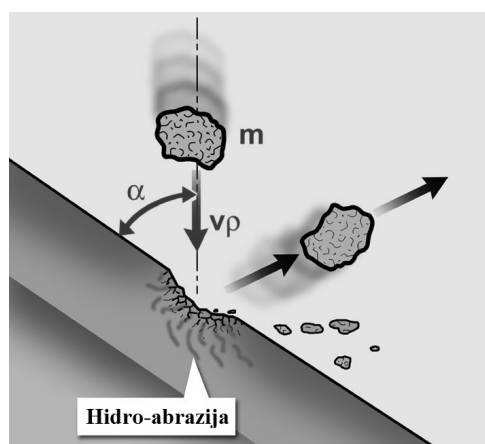
Slika 2.8. Klasifikacija različitih opterećenja na betonskoj površini usled dejstva abraziva iz vode [11]

Huovinen [30] koristi drugačiji pristup za objašnjenje mehanizma hidro-abrazivnog opterećenja betonske površine, slika 2.9. Osnove za ovaj model su opterećenja koja deluju na objekte u moru u regionu Arktika. Kod ove vrste erozije, habanje nastaje usled dejstva leda na betonsku površinu. Kao što se može videti, proces hidro-abrazivnog habanja se odvija u tri faze. U okviru prve faze dolazi do habanja površinskog sloja maltera usled normalnih i tangencijalnih naprezanja, pri čemu oštećenje propagira do pojave prvih krupnih zrna agregata. Za ovu fazu naprezanja veoma je bitan kvalitet cementnog kamena, odnosno njegova otpornost na habanje, jer što je veća otpornost propagacija oštećenja je sporija. U drugoj fazi, krupna zrna agregata iz betona preuzimaju hidro-abrazivno naprezanje i sprečavaju dalje napredovanje erozije sve dok ne nastupi njihov lom ili čupanje iz cementnog kamena. Kvalitet krupnog agregata je od velike važnosti za ovu fazu naprezanja, kao i kvalitet veze između cementnog kamena i agregata. U trećoj fazi dolazi do ubrzanog habanja betona usled nastalih udubljenja u betonu i povećane površine habanja. Proces habanja će se usporiti sa pojavom krupnih zrna agregata na površini betona. Propagacija hidro-abrazivnog habanja je znatno brža ukoliko betonska površina sadrži neke diskontinuitete ili spojnice [11,31].



Slika 2.9. Mehanizam opterećenja i habanja betonskih površina usled dejstva leda [22, 25]

Volkart u svom istraživanju [32] obrađuje uticaj udara čvrste čestice nošene vodom o betonsku površinu. On navodi da je moment čvrste čestice uglavnom definisan njenom masom, brzinom i napadnim uglom, pri čemu brzina i napadni ugao zavise od karakteristika vodenog toka, slika 2.10. Čvrstoća čestice i površinska čvrstoća betona, kao i oblik čestice takođe utiču na stepen abrazije betonske površine uzrokovane udarom. Prilikom analize hidro-abrazivnog habanja treba uzeti u obzir ukupan broj dinamičkih kontakata u jedinici vremena, koncentraciju čestica i raspodelu veličine i oblika čestica.



Slika 2.10. Uticaj čvrste čestice nošene vodom prilikom udara o betonsku površinu [32]

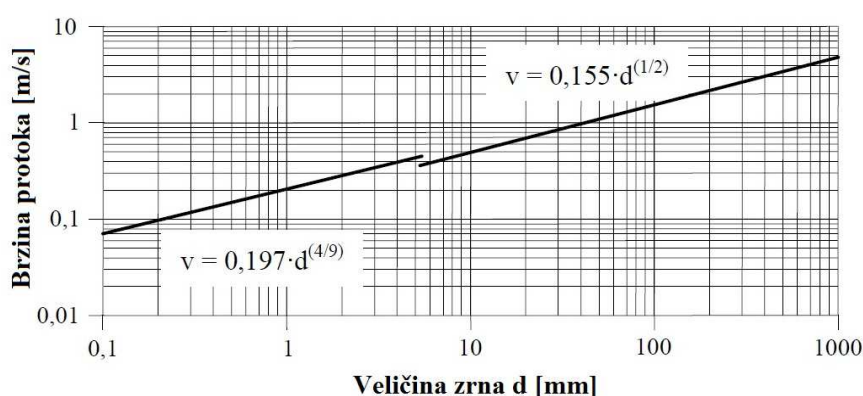
#### 2.4.2. Faktori koji utiču na proces hidro-abrazivnog habanja

Intezitet abrazivnog dejstva zavisi od hidrodinamičkih karakteristika vodnog toka (brzina vode, pulsacije pritisaka, turbulencija, prisustvo vrtloga, brzina udara čvrste čestice o tvrdu granicu odnosno energija koju čestica izgubi pri sudaru, ugao pod kojim čestica udara u tvrdu granicu), fizičkih karakteristika nanosa (oblik, veličina, težina, mineraloški sastav, odnosno tvrdoća), količine nanosa koji se prenosi, trajanja prenošenja nanosa i mehaničkih karakteristika betona ili betonske obloge (čvrstoće pri pritisku i zatezanju, otpornost na zamor, udar i habanje). Oštećenja su veća što je veća koncentracija nanosa i što su slabije mehaničke karakteristike betona.

## 2.4.2.1 Uticaji od spoljašnjeg opterećenja

**Brzina protoka**

Brzina protoka vode je bitan parametar u procesu habanja betona hidrotehničkih objekata. Generalno, sa povećanjem brzine protoka vode povećava se i habajuće opterećenje na betonsku površinu od strane čvrstih čestica nošenih vodom [21,33]. Promena brzine protoka i samim tim brzine habanja dovodi do promene tipa habajućeg opterećenja (brušenje/kotrljanje ili udarno habanje). Promena brzine protoka vode, takođe menja količinu čvrstog materijala koja se prenosi vodom [11,21,34]. Sa povećanjem brzine protoka vode povećava se i krupnoća sedimentnog materijala koji se transportuje vodom, slika 2.11. Podatke sa slike 2.11 treba smatrati približnim s obzirom da neki uticaji (npr. dubina vode, ravnost dna) nisu uzeti u obzir.



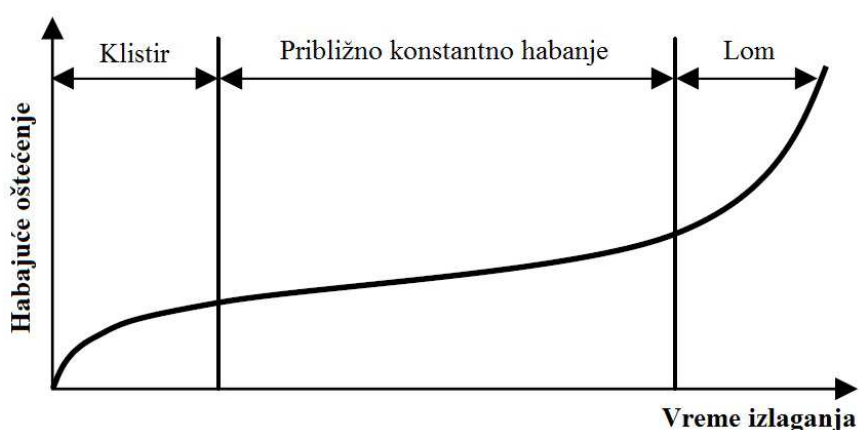
Slika 2.11. Zavisnost brzine protoka od veličine zrna sedimentnog materijala koji se transportuje vodom [12,21]

U osnovi postoji razlika između brzine protoka i brzine čvrstih čestica koje se prenose vodom. Brzina protoka vode i brzina čvrstih čestica nošenih vodom se najčešće izjednačuju u prvom koraku aproksimacije postupka modeliranja procesa hidro-abrazivnog habanja zbog složenosti problema [11]. Određivanje brzine protoka se vrši nekom od metoda hidrometrijskih merenja na prelivima ili primenom metode ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

Ispitivanja Helbig-a i Horlacher-a [33,35] su pokazala da je količina energije koju poseduju čvrste čestice nošene vodom stepena funkcija višeg reda brzine protoka vode. Ovde je u obzir uzeta kinetička energija čvrstih čestica nošenih vodom. Značajnu zavisnost između stepena hidro-abrazivnog habanja i brzine čvrstih čestica nošenih vodom su prikazali Hu i saradnici [36] u istraživanju otpornosti na habanje betona mikroarmiranih čeličnim vlaknima. Hidro-abrazivno opterećenje generisano je mlazom mešavine vode i abraziva koji velikim brzinom udara o betonsku površinu. Uticaj brzine protoka  $v_F$  i stepena erozije  $E_R$  dat je jednačinom  $E_R \approx v_F^n$ . Koeficijent n ima vrednost veću od 2. Obimna hidro-abrazivna ispitivanja od strane Bania [35] i Horszczaruk [37] na betonskim kockama i cilindrima pokazala su da se gubitak mase predmetnih betonskih uzoraka povećava sa povećanjem brzine njihovog prolaska kroz mešavinu vode i abraziva.

### Vreme izlaganja hidro-abrazivnom dejstvu

Intezitet habanja betonske površine varira tokom vremena prilikom njenog izlaganja hidro-abrazivnom naprezanju. Konkretno, mogu se jasno uočiti različite faze u procesu habanja tokom vremena. Na slici 2.12 prikazana je zavisnost između oštećenja nastalog habanjem i vremena izlaganja habajućeg naprezanja na kojoj su jasno definisana tri područja: prvo, početno habanje, proces habanja smanjenog inteziteta; drugo, habanje u stabilnom stanju, proces ravnomernog habanja u toku vremena i treće, intezivno habanje, proces habanja velikog inteziteta koji konačno dovodi do potpunog loma betonskog elementa.



Slika 2.12. Habajuće opterećenje u funkciji vremena izlaganja [29]

Bania [34], Ghafoori [38], Haroske [21] i Sadegzadeh [39] su nezavisno jedni od drugih došli do sličnih zapažanja prilikom ispitivanja habanja na betonskim telima: inicijalno oštećenje betona je malo i približno je konstantno u narednom periodu habanja (stabilizovan proces habanja). Cementna matrica kao završni sloj ne dozvoljava ubrzano habanje površine betona, dok u kasnijoj fazi habanja tvrdi agregat dodatno štiti cementnu matricu i stvara uslove za uravnoteženi habajući proces.

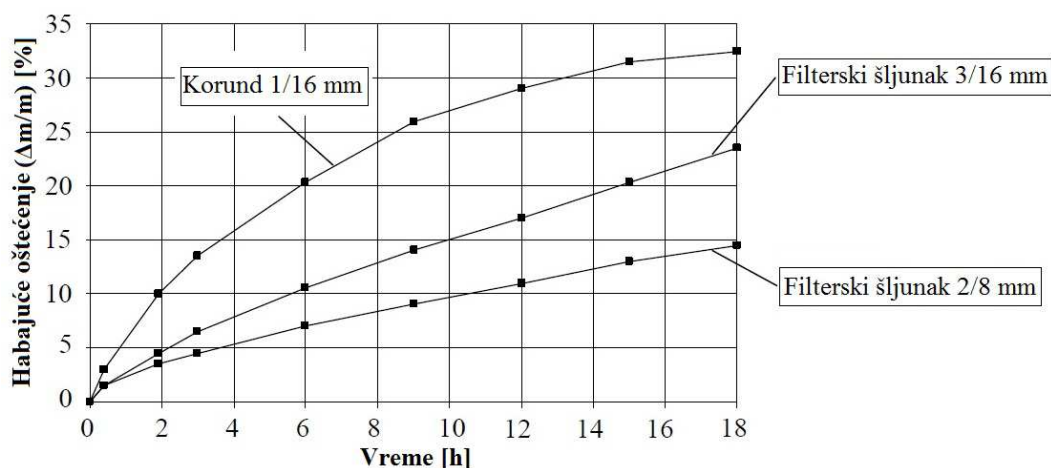
### Abraziv iz vode

Hidro-abrazivno habanje površine betona u značajnoj meri zavisi od vrste abraziva koji udara ili struže tvrdu podlogu, odnosno oblika, veličine i tvrdoće zrna, prisustvu oštrog uglova na zrnima [40]. U procesu hidro-abrazivnog habanja pored oštećenje betonske podloge, dolazi do trošenja ili zaobljavanja zrna čvrstih čestica nošenih vodom. Zrna abraziva sa oštrom uglovima u značajnoj meri uvećavaju oštećenje betona u odnosu na abraziv sa oblim zrnima.

Haroske [21] je istraživao uticaj različitih vrsta i veličine abraziva na hidro-abrazivnu otpornost betona, slika 2.13. Kao abraziv korišćene su dve frakcije filterskog šljunka (veličine zrna 2/8 mm i 3/16 mm) tvrdoće po Mosovoj skali 7 i korund (veličina zrna 1/16 mm) tvrdoće 9. Dok su oštroglasta i tvrda zrna korunda izazvala velika rana oštećenja površine betona, zrna filterskog šljunka frakcije 2/8 mm jedva da su bila u stanju da iščupaju koje zrno agregata iz cementne matrice betona.

Mombar i Kovacevic [41] su istraživali hidro-abrazivno habanje betona mlazom mešavine vode i čvrstih čestica koji velikom brzinom (700 m/s) udara u betonski uzorak. Oni su na osnovu analize abraziva nakon ispitivanja (granulometrijski sastav, specifična površina zrna, srednji prečnik zrna) procenjivali otpornost ispitivanog betona na habanje.



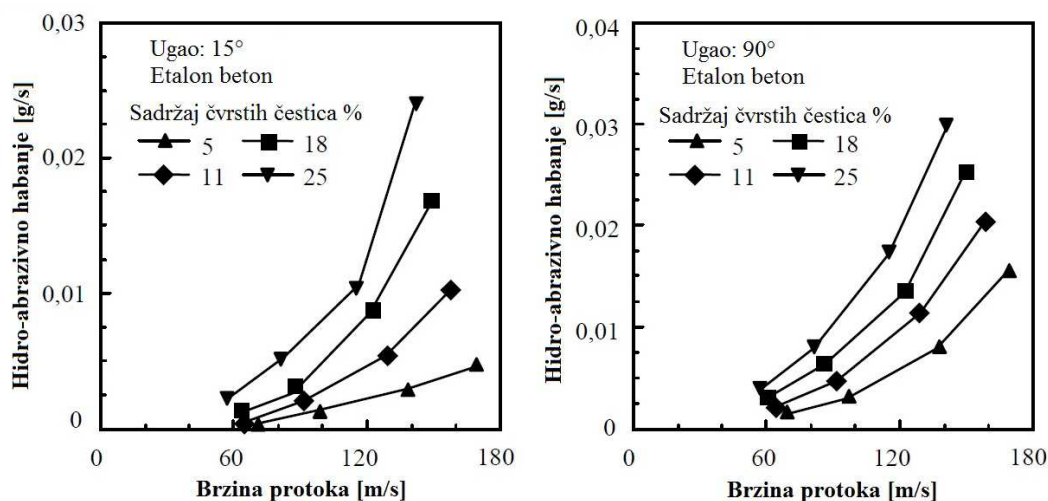


Slika 2.13. Erozivno oštećenje betona ( sa čvrstoćom pri pritisku od 50MPa) u zavisnosti od vrste i veličine zrna abraziva [21]

### Koncentracija čvrstih čestica (abraziva) iz vode

Veći stepen habanja površine betona u procesu hidro-abrazije treba očekivati sa povećanjem koncentracije abraziva u vodi. Stoga je koncentracija čvrstih čestica u vodi značajan parametar prilikom određivanja hidro-abrazivne otpornosti betona.

Hu i saradnicu [36,42] su vršili ispitivanje uticaja čvrstih čestica iz vode na otpornost betona prema habanju, slika 2.14. U ovom istraživanju ispitivanje hidro-abrazije vršeno je pomoću uređaja koji omogućava da mlaz vode sa određenim sadržajem peska (od 5 – 25%) udara u betonsku površinu pod različitim uglovima. Sa slike 2.14 se jasno vidi zavisnost hidro-abrazivnog habanja od brzine protoka vode sa različitim sadržajem čvrstih čestica.



Slika 2.14. Zavisnost između brzine protoka, sadržaja čvrstih čestica, napadnog ugla i erozivnog oštećenja betona [36,42]

### ***Napadni ugao abraziva iz vode***

Napadni ugao pod kojim abraziv iz vode udara betonsku površinu je začajan parametar prilikom ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona. Pri malim napadnim uglovima, oštećenje na betonu nastaje kombinacijom brušenja i udarnog habanja, dok za uglove približne 90° uglavnom preovlađuje udarno habanje. Efekat uticaja napadnog ugla na veličinu oštećenja usled habanja zavisi od karakteristika betonske površine. Pri manjim napadnim uglovima tvrđa podloga ima veću otpornost prema habanju u odnosu na mekšu, dok duktilniji materijali pokazuju bolju otpornost pri izlaganju udarnom habajućem opterećenju.

Hu i saradnicu [36,43] su istraživali uticaj dodavanja čeličnih vlakana betonu i napadnog ugla na vrednost hidro-abrazivnog habanja. Za male napadne uglove hidro-abrazivnog dejstva ( $\alpha=15^\circ$ ), mikroarmiranje betona čeličnim vlaknima doprinosi povećanju otpornosti prema habanju, dok za velike napadne uglove ( $\alpha=90^\circ$ ), ojačanje mikrovlaknima nije uvek delotvorno.

Bania [34] je u svom obimnom istraživanju, takođe potvrdio uticaj napadnog ugla na habanje betona usled hidro-abrazivnog dejstva. Došao je do zaključka da se najveće habanje javlja kod betonskih površina koji su izloženi dejstvu abraziva iz vode pod uglom od 50°.

### ***Temperatura***

Temperatura ima uticaj na veličinu habanja kod metalnih i plastičnih materijala. Nasuprot tome, ponašanje betona pri hidro-abrazivnom naprezanju u toku kojeg dolazi do variranja temperature skoro da ne zavisi od temperature [11].

### ***Konstruktivno oblikovanje***

Pored prethodno navedenih faktora, treba pomenuti i konstruktivno oblikovanje hidrotehničkih objekata koje takođe utiče na veličinu hidro-abrazivnog habanja betona [11,22]. Analizirajući postojeća hidro-abrazivna oštećenja na taložnici, došlo se do zaključka da je glavni uzrok njihovog nastanka konstruktivno oblikovanje taložnice [44]. Zbog visoko postavljenog praga, nošeni nanos iz vode se nije mogao ukloniti iz taložnice, te je usled vrtložnog kretanja čvrstih čestica nastalo habajuće oštećenje na zidovima objekta. Generalno, za smanjenje hidro-abrazivnog naprezanja betonskih površina kod hidrotehničkih objekata poželjno je obezbediti povoljan hidrodinamički oblik konstrukcije.

#### 2.4.2.2 Uticaj strukture betona

Kada se govori o uticaju strukture betona na njegovu hidro-abrazivnu otpornost uglavnom je reč o vrsti agregata, obliku i tvrdoći zrna, granulometrijskom sastavu, čvrstoći cementne matrice, vezi između zrna agregata i cementne matrice i završnom tretmanu površine betona.

### ***Agregat***

Kod klasičnih betona cementna pasta obično ima manju otpornost prema habanju u odnosu na agregat. Prema tome, agregat ima veliki uticaj na hidro-abrazivnu otpornost betona. Generalno, sa povećanjem veličine zrna agregata povećava se i otpornost betona prema habanju. [4,11,12,21]. Međutim, sa povećanjem prečnika najvećeg zrna agregata u mešavini, defekt kamena (prisustvo pora, kaverni i sl.) postaje izraženiji, tako da dolazi do

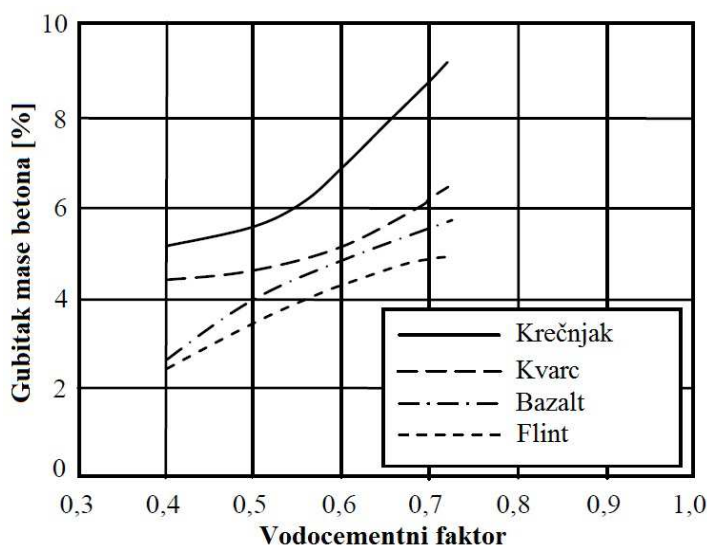
smanjenja specifične površine agregata. Ovo uzrokuje smanjenje prionljivosti između zrna agregata i cementne matrice [11]. Iz tih razloga preporučuje se da se maksimalno zrno agregata u betonskoj mešavini ograniči na 32 mm ili 16 mm [1,3,21].

Dhir i saradnici [45] su ispitivanjem otpornosti betona prema habanju metodom kombinovanog klizanja, kotrljanja i blagih udara utvrdili da betoni izrađeni sa maksimalnim zrnim agregata 5 mm i 40 mm nisu dovoljno otporni na habanje. Samo u oblasti srednjih veličina zrna između 10 i 20 mm dobijene su relativno mala oštećenja. Koristeći metodu podvodnog habanja Liu [46] je došao do zaključka da betoni izrađeni sa maksimalnim zrnim agregata većim od 13 mm imaju veću otpornost prema habanju u odnosu na betone sa maksimalnim zrnim manjim od 5 mm.

Otpornost betona prema habanju može se poboljšati primenom drobljenih agregata. Poređenjem rezultata ispitivanja otpornosti prema habanju betona spravljenih sa drobljenim i rečnim agregatom, bolji rezultati su postignuti sa drobljenim agregatom [47]. Za dobijanje betona otpornog na habanje treba koristiti drobljeni agregat čija je tvrdoća zrna po Mosovoj skali veća od 6, a minimalna čvrstoća pri pritisku kamena iz koga je dobijen agregat 150 MPa. I u slučaju betona sa drobljenim agregatima presudnu ulogu imaju krupna zrna. Za povećanje otpornosti prema habanju maltera treba koristiti kvarcni pesak ili drugi materijal iz iste kategorije tvrdoće zrna [48].

Rezultati ispitivanja Haroske [21] sugerišu da teški agregat u suštini povećava hidroabrazivnu otpornost betona. Ali, sa upotrebom teškog agregata u betonu preporučuje se da i čvrstoća cementne matrice bude shodno povećana.

Istraživanja Kiliç-a i saradnika [49] na različitim stenama (gabro, bazalt, kvarc, krečnjak i pešćar) su pokazala da tvrdoća stene od koje je napravljen agregat utiče na otpornost betona prema habanju, dok tvrdoća stene zavisi od tipa stene. Upotreba prirodnog drobljenog (bazalt i dijabaz) i sintetičkog (fajalit i spinel) agregata omogućila je dobijanje betona sa visokom otpornošću prema habanju koji je korišćen prilikom izgradnje austrijske hidroelektrane Langkampfen (Tiro) [50]. Na osnovu obimnih ispitivanja Liu [46] je pokazao da abrazivno habanje betona direktno zavisi od vrste i tvrdoće agregata koji se koristi za spravljanje betona. Sa slike 2.14 se može videti da sa povećanjem tvrdoće stene, polazeći od krečnjaka prema flintu, povećava se i otpornost prema habanju.



Slika 2.15. Zavisnost između gubitka mase i vodocementnog faktora betona sa različitim vrstama agregata [46]

Haroske [21] je istraživao uticaj granulometrijskog sastava agregata na hidro-abrazivnu otpornost betonskih površina. Rezultati istraživanja su pokazali da najmanje habanje imaju betoni gradacije agregata A, AB i U (standardne krive prema DIN 1045-2) i sa maksimalnom veličinom zrna većom od 16 mm. Nasuprot, betoni gradacije agregata B i sa maksimalnom veličinom zrna manjom od 8 mm imali su veći stepen habanje površine. Osim toga, Haroske [21] i Pat i Reinhardt [51] su ukazali na značajnost uticaja zapreminskog odnosa cementa i agregata u betonu na njegovu hidro-abrazivnu otpornost. Slično tome, vrlo značajan je i odnos između čvrstoće pri pritisku cementnog kamena i agregata za hidro-abrazivnu otpornost betona.

### **Sadržaj i vrsta cementa**

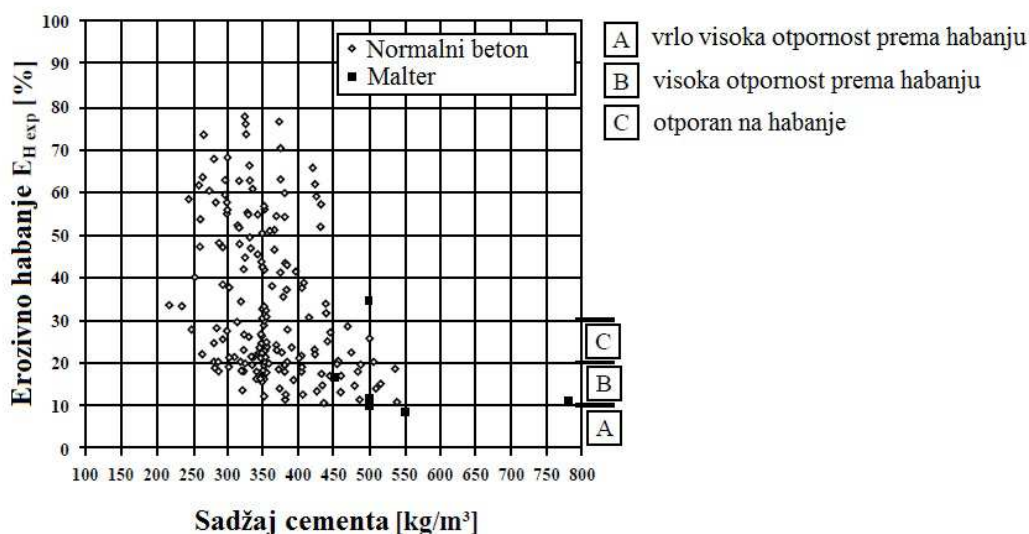
Standardima SRPS EN 206-1:2011 [24] i DIN 1045-2 [52] date su preporuke za minimalnu količinu cementa koja će sigurno obezbediti adekvatnu čvrstoću i kompaktnost očvrslje betonske paste betona koji treba da budu otporni na abraziju. U dokumentu koje je izdalo nemačko ministarstvo građevine ZTV-W LB 2019 (Dodatni tehnički uslovi u oblasti hidrotehnike, zaštite i snacije betonskih konstrukcija hidrotehničkih objekata) [26] dati su dodatni zahtevi o obaveznom minimalnom sadržaju cementa kod ovih vrsta betona. Važeći srpski standard SRPS U.E3.010:1987 [53] nema odredbu koja se odnosi na sadržaj cementa hidrotehničkih betona.

Za klasu izloženosti XM1 i XM2 minimalni sadržaj cementa u betonu je  $300 \text{ kg/m}^3$ , dok je za izloženost XM2 i XM3 minimalni sadržaj cementa  $320 \text{ kg/m}^3$ , tabela 2.3. Prema [48], minimalna količina cementa u betonu sa najvećom dimenzijom zrna agregata od 32 mm je  $300$  ili  $320 \text{ kg/m}^3$ . Sa druge strane, kako je očvrsla cementna pasta manje otporna na habanje u odnosu na agregat, potrebno je količinu cementa u betonu ograničiti na maksimalno  $350 \text{ kg/m}^3$  ukoliko se koristi agregat sa maksimalnim veličinom zrna od 32 mm.

Tabela 2.3. Granične vrednosti za sastav i svojstva betona [52], izvod

Klasa izloženosti	XM 1	XM 2		XM 3
Vodocementni faktor	0,55	0,55	0,45	0,45
Minimalna klasa (čvrstoća pri pritisku)	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 35/45
Minimalna količina cementa u $\text{kg/m}^3$	300	300	320	320
Minimalna količina cementa u $\text{kg/m}^3$ ako su uključeni hemijski dodaci	270	270	270	270
Ostali zahtevi	–	Površinski tretman betona	–	Čvrst materijal u skladu sa DIN 1100

Rezultati opsežnih istraživanja koji je sproveo Haroske [21] pokazali su da ne postoji značajna korelacija između sadržaja cementa i otpornosti prema habanju betona, slika 2.16. Betoni sa sadržajem cementa manjim od  $300 \text{ kg/m}^3$  i većim od  $320 \text{ kg/m}^3$  su postigli visoku otpornost prema habanju, što je u suprotnosti sa odredbama prethodno navedenih normativa. Takođe, treba napomenuti da su u ovim istraživanjima sadržaj paste u betonu i vodocementni faktor bili varirani, kao i granulometrijski sastav agregata.

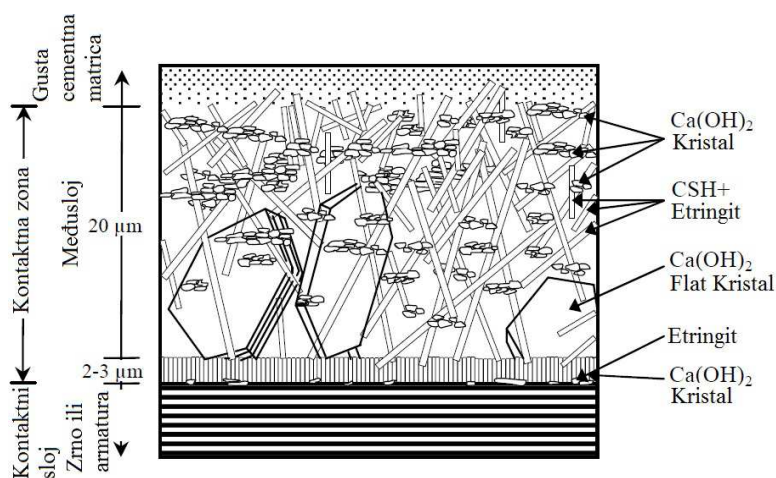


Slika 2.16. Zavisnost između sadržaja cimenta u betonu i erozivnog habanja betona [21]

Ispitivanja otpornosti prema habanju betona metodom bubnja koja je sproveo Haroske [21] su pokazala da beton spravljen sa portland cementom ima veću otpornost prema habanju u odnosu na beton spravljenim sa metalurškim cementom. Razlog za ovo verovatno leži u jačoj vezi između cementne matrice i površine zrna agregata u slučaju betona sa portland cementom. Međutim, ispitivanja otpornosti betona prema habanju metodom točka prema Böhme-u su pokazala da vrsta cimenta nema veliki uticaj na veličinu habanja.

### Čvrstoća veze između cementne matrice i agregata

Kao što je opisano u poglavlju 2.4.1, na veličinu hidro-abrazivnog habanja u velikoj meri utiče kvalitet veze između cementne matrice i agregata. Usled hidro-abrazivnog dejstva na spoju između cementne matrice i agregata javljaju se naponi zatezanja i smicanja. Rezultat ovih napreznja je nastanak mikroprrslina u zoni spoja (tzv. tranzitnoj zoni), što dovodi do raskidanja adhezione veze između cementne matrice i zrna agregata [21,27,28].



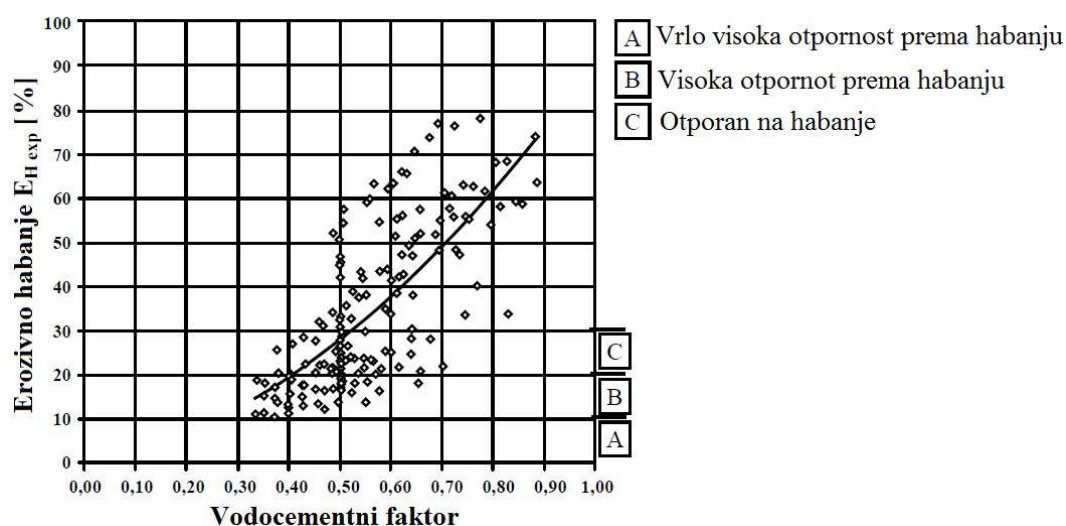
Slika 2.17. Šematski prikaz tranzitne zone između cementne matrice i zrna agregata [54]

Veza između agregata i očvršle cementne paste je u suštini prelazna (tranzitna) zona između zrna kamenog agregata i cementne matrice [4,54,55]. Kontaktna ili tranzitna zona između cementne matrice i agregata, za razliku od netaknute cementne matrice, je izrađena sa grubljim hidratima i ispunjena je krupnijim porama i generalno je poroznija [54], slika 2.17. Na površini zrna agregata se nalazi tanak sloj debljine od 2 do 3  $\mu\text{m}$  kalcijumhidroksid kristala koji stoji upravno na zrno. On se graniči sa 20  $\mu\text{m}$  debelim srednjim slojem koji čini prelaz ka gustijoj cementnoj matrici. Sa istim stepenom hidratacije, propustljivost tranzitne zone je značajno veća od susedne cementne matrice [56].

Istraživanja su pokazala da betoni spravljeni sa većim vodocementnim faktorom imaju porozniju tranzitnu zonu, ali je konstatovano da nema strukturnih promena unutar nje. Takođe, nije došlo do strukturnih promena u okviru tranzitne zone i prilikom zamene portlad cementa metalurškim cementom u betonu. Kontaktni sloj kod betona sa metalurškim cementom ima manju debljinu u odnosu na beton sa portland cementom [54]. Dodavanjem pucolanski reaktivnih materijala (npr. silikatne prašine) značajno se povećava čvrstoća veze između cementne matrice i zrna agregata [56].

### Vodocementni faktor

Uticaj vodocementnog faktora na otpornost betona prema habanju spada u red glavnih relevantnih faktora. Iz ovog razloga, prilikom proizvodnje betona preporučuje se primena nižeg vodocementnog faktora koji će obezbediti manju poroznost cementne matrice i jaču vezu između cementne matrice i agregata [3,48]. Što se tiče obezbeđenja otpornosti betona prema habanju, standardima SRPS EN 196-1 [24] i DIN 1045-2 [52] je definisana maksimalna vrednost vodocementnog faktora koji je u funkciji klase izloženosti betona (XM). Za umereno habajuće naprezanje (XM1 do XM2) maksimalni vodocementni faktor je 0,55, dok za vrlo velika habanja (XM2 do XM3) maksimalni vodocementni faktor 0,45 [42]. Za betone koji su izloženi jakim udarnim opterećenjima vodocementni faktor treba da bude manji od 0,45 [14].



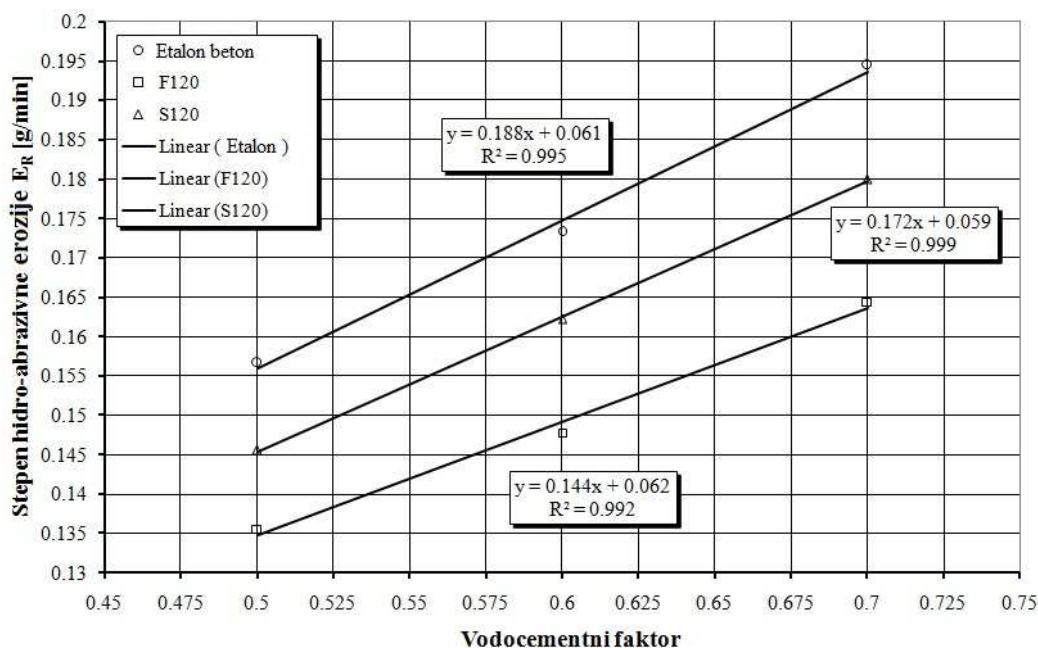
Slika 2.18. Zavisnost između vodocementnog faktora i erozivnog habanja betona [21]

Haroske [21] je samo identifikovao trend korelacije između erozivnog habanja i vodocementnog faktora. Treba napomenuti da su u ovim istraživanjima sadržaj paste u betonu i vodocementni faktor bili varirani, kao i granulometrijski sastav agregata. Između

ostalog, Haroske je došao do zaključka da su neki betoni spravljeni sa vodocementnim faktorom između 0,6 i 0,7 klasifikovani kao otporni prema habanju, dok su neki betoni spravljeni sa vodocementnim faktorom 0,5 klasifikovani kao nedovoljno otporni prema habanju, slika 2.18. Ovi eksperimentalni rezultati su u suprotnosti u odnosu na normativne uslove koji se odnose na pripremu betona sa visokom otpornosti prema habanju.

Rezultati studije koji je sproveo Liu [46] pokazuju značajnu zavisnost između habanja betona i vodocementnog faktora. Smanjenje vodocementnog faktora od 0,72 do 0,40 rezultiralo je poboljšanjem otpornosti betona prema habanju za oko 40%. Liu i saradnici [27] su takođe utvrdili da postoji jaka veza između vodocementnog faktora i otpornosti prema habanju koristeći metodu ispitivanja habanja peskarenjem. Porast vodocementnog faktora od 0,36 do 0,50 doveo je do povećanja abrazivnog habanja za oko 80%. Dhir i saradnici [45] su pokazali da ukoliko se vodocementni faktor smanji od 0,70 do 0,40 veličina habanja se smanjuje za oko 50%.

Autor disertacije je sa saradnicima u istraživanju [57] između ostalog ispitivao uticaj vodocementnog faktora na hidro-abrazivnu otpornost betona mikroarmiranog polipropilenskim vlaknima. Došao je do zaključka da se hidro-abrazivna otpornost betona smanjuje sa povećanjem vrednosti vodocementnog faktora što se ogleda u povećanju vrednosti stepena hidro-abrazivne erozije  $E_R$ . Promena vodocementnog faktora od 0,5 na 0,7 dovodi do smanjenja abrazivne otpornosti betona za 21% do 24%.



Slika 2.19. Zavisnost između vodocementnog faktora i stepena hidro-abrazivne erozije [57]

### Dodaci betonu

Brojna istraživanja su pokazala povoljan uticaj aditiva na otpornost betona prema habanju [58-60]. Korišćenjem odgovarajućih aditiva značajno se mogu izmeniti svojstva betona u svežem i očvrslom stanju. Ovi agensi se koriste pre svega da bi se poboljšala obradljivost sveže betonske mešavine i istovremeno smanjila količine vode, što na kraju rezultira povećanjem zapremiske mase i čvrstoće betona. Na ovaj način se generalno može očekivati i povećanje otpornosti betona prema habanju [4,38]. Potrebno je smanjiti upotrebu aeranata, jer značajno smanjuju otpornost prema habanju. Ovo je u suprotnosti sa

preporukom DIN 1045-2 [52] za betone opterećene habajućim naprezanjem i istovremeno izloženim dejstvu mraza (zahtev za klasu izloženosti betona XF) gde je naznačena primena aeranata.

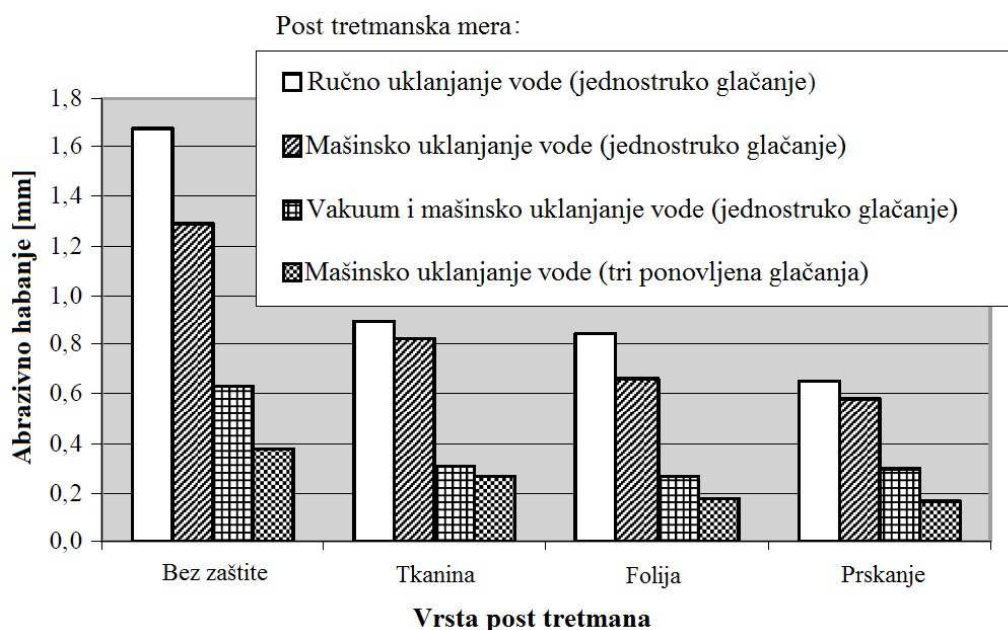
Dodavanje silikatne prašine i elektrofilterskog pepela betonu doprinosi jačanju veze između cementne matrice i agregata, tako da se prilikom hidro-abrazivnog dejstva na betonsku površinu zrna agregata znatno teže odvajaju od cementne matrice [4,21,61]. Dodatak čeličnih ili polipropilenskih vlakana doprinosi povećanju duktilnosti betona i otpornosti na udarna opterećenja [14,23,36,41]. Dodavanjem nanočestica (nano  $\text{TiO}_2$  i nano  $\text{SiO}_2$ ) u svež beton povećava se otpornost na habanje očvrslog betona [62].

Kako se istraživanje u ovoj disertaciji odnosi na uticaj dodavanja elektrofilterskog pepela, silikatne prašine, granulirane reciklirane gume, polipropilenskih vlakana i čeličnih vlakana na otpornost betona prema hidro-abrazivnom dejstvu, više reči o uticaju prethodno navedenih materijala na performanse betona u svežem i očvrsлом stanju biće reči u poglavlju 3.

### ***Završna obrada i post tretman površine betona***

Habajuće opterećenje deluje neposredno na površinu betona. Zato kvalitet površinskog sloja betona što je merodavni faktor otpornosti na habanje mora biti adekvatan što se postiže odgovarajućom završnom obradom i tretmanom nakon betoniranja [4,56,63]. Neadekvatan tretman nakon betoniranja dovodi do povećanja poroznosti gornjeg kontaktnog sloja betonske površine. Zato, sa povećanjem trajanja post tretmana betonske površine, povećava se i njena otpornost prema habanju.

Kunterding [64] je istraživao uticaj vrste tretmana (mokra čuvanje ili naknadno premazivanje površine betona filmom koji sprečava isparavanje vode) i trajanje tretmana (0, 1, 3 7 i 28 dana) na otpornost prema habanju portland cementnog betona i betona sa metalurškim cementom. Habanje betona je smanjeno sa povećanjem trajanja tretmana. Već posle tri dana, kod betona koji su nisu bili izloženi tretmanu konstatovan je značajan pad otpornosti prema habanju u odnosu na betone koji su imali post tretman.



*Slika 2.20. Srednja vrednost abrazivnog habanja normalnog betona (vodocementni faktor 0,65 ) sa različitim površinskim tretmanima i načinima nege površine betona [39]*

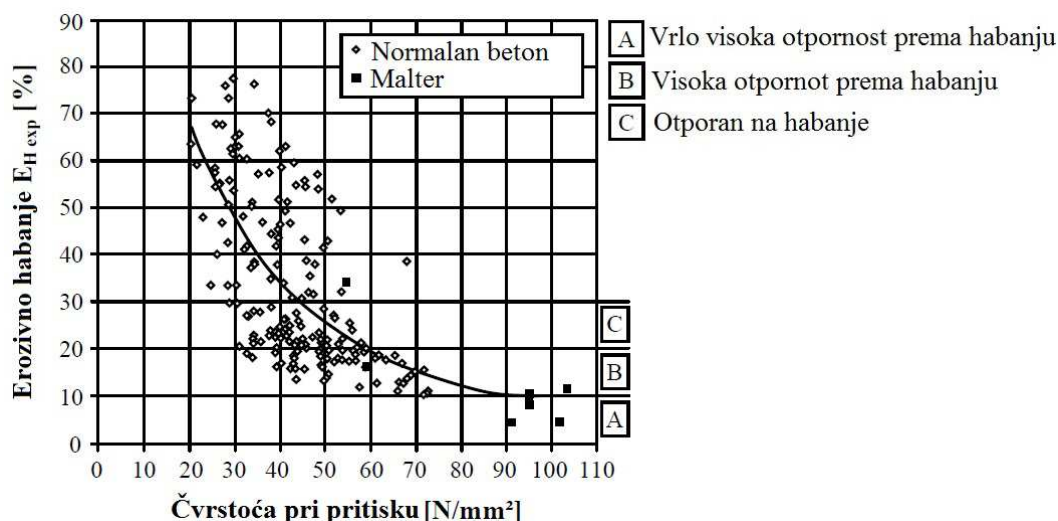


Patt i Reinhardt [65] i Dhir i saradnici [45] su došli do zaključka da je pozitivni efekat tretmana na povećanje otpornosti prema habanju posebno izražen kod betona sa niskim čvrstoćama. Sadegzadeh [39] je ispitivao uticaj različitih tipova tretmana na otpornost betona prema habanju uzrokovanog suvim trenjem. Upoređivanjem nastalog oštećenja, može se zaključiti da je kod uzoraka koji nisu naknadno tretirani oštećenje skoro dvostruko veće u odnosu na uzorke koji su bili podvrgnuti nekim od tretmana (prekrivanje vlažnom tkaninom ili plastičnom folijom, prskanje zaštitnim filmom), slika 2.20. Povećanje otpornosti prema habanju može se postići intezivnom obradom površine betona (procesom vakuum odvodnjavanja ili snažnim glačanjem). Korišćenje premaza na bazi silikata, takođe je uticalo na značajno smanjenje habanja ispitivanog betona [39].

### Performanse očvrstlog betona

U literaturi se često pominje da je otpornost betona prema habanju u tesnoj vezi sa čvrstoćom pri pritisku. Patt i Reinhardt [65] su ispitivali uticaj čvrstoće pri pritisku na otpornost betona prema habajućem naprežanju. Koristili su kružnu cev iz koje je mešavina vode i čvrstih čestica delovala preko lopatica na betonske uzorke. Rezultati ispitivanja su pokazali da je pre svega otpornost betona prema habanju u funkciji čvrstoće pri pritisku, tj. sa povećanjem čvrstoće pri pritisku betona povećava se i njegova otpornost prema habanju.

Takođe, u istraživanjima koji je izvršio Liu [46] čvrstoća pri pritisku je glavni faktor od kojeg zavisi otpornost betona prema habanju. Ovde je otpornost betona prema habanju, u zavisnosti od vrste korišćenog agregata, značajno poboljšana povećanjem čvrstoće pri pritisku. Höcker [14] i Bania [34] su istraživanjima utvrdila da je čvrstoća pri pritisku relevantni parametar za ocenu otpornosti betona prema habanju. Haroske [21] je naglasio da hidro-abrazivo habanje betonske površine značajno zavisi od vrednosti čvrstoće pri pritisku, ali visoka vrednost čvrstoće pri pritisku nije potpuna garancija za sprečavanje deterioracije betona usled habajućeg naprežanja, slika 2.21. U navedenim istraživanjima je prikazano da betoni u pogledu čvrstoće pri pritisku ispunjavaju zahteve standarda DIN 1045-2 [52], ali to nije dovoljno da se dokaže da je beton otporan na habanje.

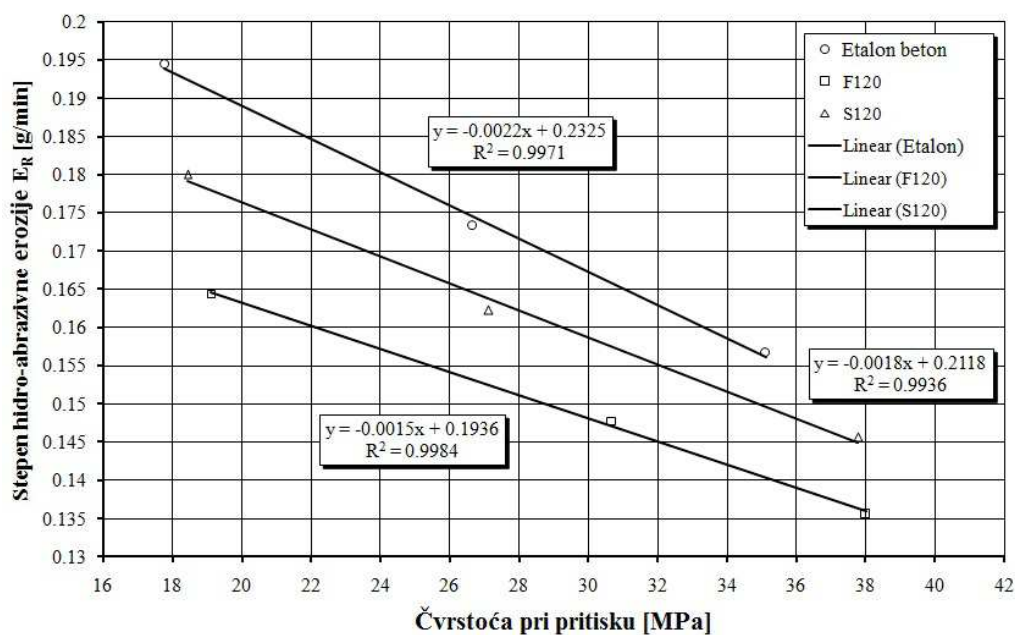


Slika 2.21. Zavisnost između čvrstoće pri pritisku i erozivnog habanja betona [21]

Autor disertacije je sa saradnicima [57] ispitivao hidro-abrazivno habanje betona mikroarmiranih polipropilenskim vlaknima koristeći uređaj koji omogućava da mlaz mešavine vode i peska preko mlaznice velikom brzinom udara o betonsku ispitnu ploču. Potom je pokazao da postoji značajna veza između čvrstoće pri pritisku i hidro-abrazivne

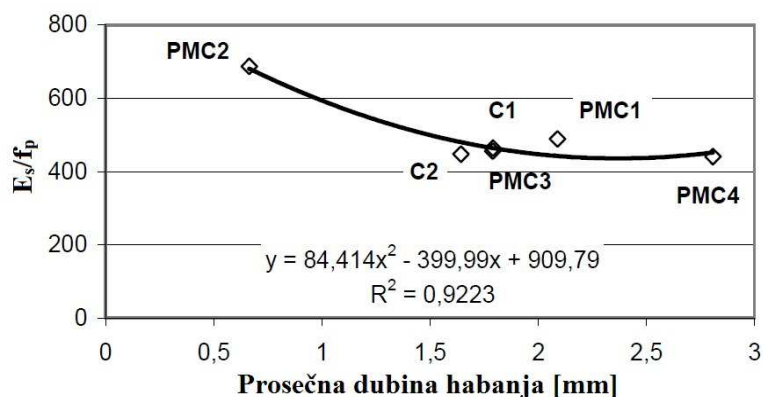
otpornosti betona. Habanje betonske ploče se smanjivalo sa povećanjem čvrstoće pri pritisku betona, dok se sve ovo dešavalo usled smanjenja vodocementnog faktora, slika 2.22.

Sadegzadeh [39] smatra da mikrostruktura i makrostruktura betona utiču na otpornost prema habanju betonskih podova. On je takođe ispitivao odnos između rezultata dobijenih nedestruktivnim metodama ispitivanja i habanja betona. Njegove analize uticaja mikrostrukture na habanje betona pokazale su da poroznost i tvrdoća cementne matrice imaju odlučujući uticaj na habanje. Dhir i saradnici [45] i Vassou i saradnici [66] su potvrdili zaključke Sadegzadeh-a [39].



Slika 2.22. Zavisnost između čvrstoće pri pritisku i stepena hidro-abrazivne erozije [57]

Liu i saradnici [27] proučavali su habanje različitih vrsta betona koristeći uređaj za ispitivanje koji omogućava da mlaz mešavine vode i peska preko mlaznice velikom brzinom i pod različitim uglovima udara o betonsku ispitnu ploču. U ovom eksperimentu pored habanja, određeni su još i čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cepanjem i savijanjem, kao i propustljivost vode pod pritiskom. Na osnovu analize zavisnosti između hidro-abrazivnog habanja i drugih ispitivanih karakteristika betona došli su do zaključka da je čvrstoća pri zatezanju cepanjem efikasniji faktor za predviđanje hidro-abrazivne otpornosti u odnosu na čvrstoću pri pritisku i čvrstoću pri savijanju.



Slika 2.23. Zavisnost između prosečne dubine habanja betona i odnosa  $E_s/f_p$  [67]

Jacobs i saradnici [11] su pokazali da su čvrstoća pri savijanju i utrošena energija prilikom habanja imaju veći uticaj na otpornost prema habanju betona u odnosu na čvrstoću pri pritisku. Atiş und Çelik [67] su potvrdili tezu da je čvrstoća pri savijanju efektivniji parametar za predviđanje otpornosti prema habanju betona u odnosu na čvrstoću pri pritisku. Osim toga, modul elastičnosti kao osnovna karakteristika betona je pogodan za procenu otpornosti prema habanju [11]. Šušteršič [68] je pokazao da odnos između statičkog modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku ( $E_s/f_p$ ) može biti dobar parametar za predviđanje hidro-abrazivne otpornosti betona. Sa povećanjem odnosa  $E_s/f_p$  smanjuje se veličina hidro-abrazivnog habanja, odnosno povećava se hidro-abrazivna otpornost betona, slika 2.23.

Prilikom ispitivanja betona visokih čvrstoća Horszczaruk [37] je došla do zaključka da je čvrstoća pri pritisku obično važan strukturni parametar za procenu otpornosti betona prema habanju, ali se ovaj zaključak ne odnosi na sve betone.

#### 2.4.3. Pregled faktora i ocena uticaja na proces hidro-abrazivnog habanja

Svi navedeni faktori iz predhodnog poglavlja (poglavljje 2.4.2) u manjoj ili većoj meri utiču na proces hidro-abrazivnog habanja betonske površine. U narednom tekstu biće dat sistematizovan pregled ovih faktora, kao i njihov pojedinačni uticaj na process habanja.

U tabelama 2.3 i 2.4 su prezentovani najvažniji faktori koji utiču na proces hidro-abrazivne erozije. U sklopu tabela prikazane su i preporuke za proizvodnju hidro-abrazivno otpornih betona.

*Tabela 2.3. Faktori koji utiču na proces hidroabrazivnog habanja i njihovi efekti – uticaji od spoljašnjeg opterećenja*

Faktor	Efekti
Brzina protoka	Veća brzina protoka vode sa čvrstim materijalom (abrazivom), veće habanje betona.
	Sa promenom brzine protoka menja se i vrsta naprezanja (brušenje, brušenje/udar (odskakivanje), udar (odskakivanje)).
Vreme izlaganja	Duže vreme izlaganja, veće habanje betona.
	Razlikuje se inicijalno habanje (proces habanje smanjenog inteziteta), habanje u stabilnom stanju (proces ravnomernog habanje) i intezivno habanje (proces progresivnog habanje).
Abraziv iz vode	Više uglastog abraziva sa oštrim ivicama, veće habanje. Krupniji abraziv, veće habanje. Tvrđi abraziv, veće habanje.
Koncentracija abraziva	Sa većom koncentracijom abraziva, očekuje se veći stepen habanja betona.
Napadni ugao abraziva	Napadni ugao abraziva i veličina opterećenja utiču na stepen hidro-abrazivne erozije. Pri malim napadnim uglovima dolazi do brušenja površine, dok pri većim dolazi do udarnog habanja. Za male napadne uglove pogodni su tvrdi betoni, dok za velike napadne uglove pogodni su duktilniji betoni.
Temperatura	Temperatura ima minornu ulogu u procesu hidro-abrazivnog habanja.
Konstruktivno oblikovanje	Poželjno je povoljno hidrodinamičko oblikovanje konstruktivnih elemenata hidrotehničkih objekata.

Tabela 2.4. Faktori koji utiču na proces hidroabrazivnog habanja i njihovi efekti – uticaji od strukture betona

Faktor	Efekti
Agregat	Agregat u betonskom kompozitu je otporniji na habanje od cementne matrice. Zrna treba da budu čvrsta i jedra. Preporučuje se primena drobljenih agregata. Poštovati pogodan odnos između čvrstoće cementnog kamena i agregata. Granulometrijski sastav agregata treba da bude blizak graničnoj krivi A. Treba izbegavati betone bogate sitnim agregatom.
Sadržaj (količina) cementa	Količina cementa u betonu treba da bude ograničena zbog cementne paste koja predstavlja osetljivu komponentu betona na habanje.
Vrsta cementa	Od vrste cementa zavisi jačina veze između cementne matrice i agregata.
Čvrstoća veze između cementne matrice i agregata	Čvrstoća veze između cementne matrice i agregata utiče na intezitet hidro-abrazivnog habanja, od nje zavisi mogućnost čupanja zrna agregata iz cementne matrice. Gusta cementna matrica i jedar i čvrst agregat, povećavaju otpornost na habanje.
Vodocementni faktor	Veći vodocementni faktor, veće hidro-abrazivno habanje.
Hemijski dodaci	Sa smanjenom količinom vode i kvalitetnim zbijanjem betona, očekuje se smanjena deterioracija betona.
Dodaci i ojačanja	Dodavanjem mineralnih dodataka (npr. elektrofilterskog pepela) povećava se kvalitet tranzitne zone i poboljšava se veza između cementne matrice i agregata.
Post tretman (nega betonske površine)	Adekvatan tretman povećava gustinu i čvrstoću površinskog sloja betona i na taj način se smanjuje habanje betona.
Završna obrada betonske površine	Glatka i gusta površina obezbeđuje manju poroznost površinskog sloja betona i na taj način se smanjuje habanje betona.

Performansama očvrslog betona koji utiču na hidro-abrazivnu otpornost betona, potrebno je posvetiti posebnu pažnju. U tabeli 2.5 prikazane su relevantne karakteristike očvrslog betona kao i njihov uticaj na hidro-abrazivnu otpornost betona. Ove karakteristike se mogu podeliti na čvrstoće, deformacione karakteristike i mikrostrukturne karakteristike.

Tabela 2.5. Faktori koji utiču na proces hidro-abrazivnog habanja i njihovi efekti – uticaji performansi očvrstlog betona

Tip performanse	Faktor	Efekti
Čvrstoće	Čvrstoća pri pritisku	U zavisnosti od vrste habanja (brušenje, udarno habanje ili njihova kombinacija) odabrati odgovarajuće čvrstoće betona. U slučaju čistog brušenja treba izabrati beton sa visokom vrednostima čvrstoće. Za slučaj udarnog habanja beton može imati niže čvrstoće nego što je u slučaju čistog brušenja. Uticaj udarne otpornosti je samo delimično proučavana.
	Čvrstoća pri zatezanju cepanjem	
	Čvrstoća pri savijanju	
	Energija loma – udarna otpornost	
Deformacione karakteristike	Modul elastičnosti	U zavisnosti od vrste habanja (brušenje, udarno habanje ili njihova kombinacija) odabrati odgovarajući modul elastičnosti betona. U slučaju brušenja treba izabrati beton sa visokom vrednosti modula elastičnosti. Za slučaj udarnog habanja izabrati betone sa nižim vrednostima modula elastičnosti.
Strukturne karakteristike	Poroznost	Generalno, ukoliko je poroznost cementne matrice visoka, očekuje se visoka vrednost hidro-abrazivnog habanja. Poroznost direktno utiče i na vrednost čvrstoće betona.

### 3. UTICAJ DODATAKA BETONU NA NJEGOVE PERFORMANSE U SVEŽEM I OČVRSLOM STANJU

Ovde se ne misli na hemijske dodatke odnosno aditive koji se dodaju betonu u malom procentu koji služe da promene i poboljšaju određena svojstva svežeg ili očvrslog betona, ili jednog i drugog. Reč je o dodacima betonu koji mogu da budu delimična zamena cementa (elektrofilterski pepeo, silikatna prašina), delimična zamena agregata (reciklirana granulirana guma, elektrofilterski pepeo) ili ojačanje betonskog kompozita (čelična i polipropilenska vlakna). U narednom tekstu biće reči o uticaju ovih dodataka na performanse betona u svežem i očvrsлом stanju, a posebno na otpornost prema habanju.

#### 3.1. Elektrofilterski pepeo

Elektrofilterski pepeo se dobija sagorevanjem ugljene prašine u kotlovima za sagorevanje uglja na temperature između 1250°C i 1600°C i predstavlja fino mleveni, praškasti materijal koji se prenosi dimnim gasom i taloži na elektrofilterima. Čestice elektrofilterskih pepela najčešće su staklaste strukture sferičnog oblika, čija veličina varira od 1 μm do oko 150 μm, a za tipičnu veličinu mogu se uzeti čestice ispod 20 μm. Elektrofilterski pepeo uglavnom čine oksidi SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO i drugi manje zastupljeni. Ovaj pepeo predstavlja oko 85% ukupne količine pepela u termoelektranama. Svetska proizvodnja elektrofilterskog pepela je oko 700 miliona tona godišnje, dok se samo 6% ovog otpadnog materijala koristi u proizvodnji cementa [69].

Elektrofilterski pepeo se koristi u proizvodnji betona kao mineralni dodatak, a u poslednjih 60 godina i kao komponenta nekih tipova cementa sa oznakom CEM II. Kao komponenta betona, pepeo se koristi za delimičnu zamenu Portland cementa ili kao mineralni dodatak koji se dodaje direktno u mešalicu prilikom spravljanja betona. Standardom ASTM C595 [70] su definisana dva tipa cementa koji sadrže elektrofilterski pepeo: 1) portland-pucolan cement (Tip IP), sadrži 15 do 40% pucolana i 2) pucolanski modifikovani portland cement (Tip I-PM), koji sadrži manje od 15% pucolana.

Standardom ASTM C618 [71] su definisane dve klase pepela koji se koriste u betonu: 1) klasa F sa niskim sadržajem CaO (sadržaj manje od 5% po masi), koji se obično dobija sagorevanjem antracita ili bitumeniziranog uglja i 2) klasa C sa visokim sadržajem CaO (sadržaj obično između 5 i 40% po masi), koji se obično dobija sagorevanjem lignita ili delimično bitumeniziranog uglja [72]. Ovim standardom su utvrđena fizička, hemijska i mehanička svojstva ove dve klase elektrofilterskog pepela. Klasa F je pucolan, koji samostalno ima veoma mala vezivna svojstva, ili ih nema uopšte. Klasa C ima karakteristiku samovezivanja, kao i pucolanske osobine.

Obe klase pepela hemijski reaguju sa krečom i predstavljaju vezivni materijal. S obzirom da se tokom hidratacije alita i belita kao jedan od produkata dobija Ca(OH)<sub>2</sub> sa njim reaguje elektrofilterski pepeo stvarajući pritom čvrste produkte veoma slične hidratima minerala cementa [73].

Prema standardu SRPS EN 197-1 [74] jedan od dodataka koji se koristi pri proizvodnji cementa je elektrofilterski pepeo koji po prirodi može biti silikatno-aluminatni ili silikatno-kalcijumski. Prvi ima pucolanske osobine, dok drugi mora imati i hidraulične osobine. Obe vrste pepela ne smeju imati gubitak žarenjem veći od 5 %. Prema istom standardu elektrofilterski pepeo je definisan kao materijal dobijen elektrostatičkim ili mehaničkim taloženjem praškastih čestica iz dimnih gasova peći loženih sprasnim ugljem.

Pepeo dobijen drugim metodama ne sme biti upotrebljen za proizvodnju cementa koji odgovara ovom evropskom standardu.

Praktično svi odseci za transport saveznih država u SAD (DOT) ukazuju da koriste elektrofilterski pepeo kao mineralni dodatak u betonu, kao delimičnu zamenu za portland cement ili u mešanom portland - pucolan cementu. Ovaj materijal se godinama koristi u izradi betonskih kolovoznih konstrukcija i stabilizovanih bankina i većina država ima zakonski regulisano korišćenje pepela kao delimične zamene za portland cement u betonu [75-76].

Najveće prednosti korišćenja elektrofilterskog pepela u betonu su bolja obradljivost, smanjena pojava viška vode pri ugradnji, povećana čvrstoća, manja vodopropusnost i smanjeno prodiranje jona hlorida, smanjena toplota hidratacije, veća otpornost na uticaje sulfata, veća otpornost na reaktivnost alkalnih agregata i smanjeno skupljanje pri sušenju [73].

Glavni nedostaci vezani za upotrebu elektrofilterskog pepela u betonu mogu biti sporiji rani razvoj čvrstoće, produženo početno vreme vezivanja, teškoće u kontroli sadržaja vazduha, sezonska ograničenja u toku zimskih meseci i kontrola kvaliteta izvora samog pepela [73]. Upotreba pepela klase F obično rezultira sporijim ranim prirastom čvrstoće, ali klasa C se ne ponaša tako i, nasuprot tome, može pojačati rani prirast čvrstoće.

Finoća je prvenstveno fizička karakteristika elektrofilterskog pepela koja se odnosi na pucolansku aktivnost. Sa porastom finoće može se očekivati i rast pucolanske aktivnosti. Pucolanska aktivnost ukazuje na mogućnost silicijum dioksida i aluminijum oksida sadržanih u elektrofilterskom pepelu da reaguju sa dostupnim kalcijumom i/ili magnezijumom iz hidratiranih proizvoda portland cementa. Elektrofilterski pepeo mora da ima dovoljno nisku vrednost gubitka pri žarenju, kako bi se postigao željeni kvalitet betona. Betonske mešavine koje sadrže elektrofilterski pepeo čija je vrednost gubitka pri žarenju veoma visoka mogu da naprave tamne površinske brazde, jer čestice ugljenika izbijaju na površinu tokom finiširanja betonom [73].

Pri datom vodocementnom faktoru, okrugle čestice, koje su pretežno zastupljene u elektrofilterskom pepelu, omogućava bolju ugradljivost nego kada su u pitanju obične betonske mešavine. Čestice elektrofilterskog pepela se ponašaju kao minijturni kuglični ležajevi unutar betonske mešavine, što daje efekat smanjenja unutrašnjeg trenja [73]. Kod primene elektrofilterskog pepela, ukupna količina cementa i dodatog pepela obično premašuje količinu cementa u standardnim betonskim mešavinama. Povećanjem zastupljenosti čvrste u odnosu na tečnu fazu dobija se mešavina koja ima bolju plastičnost i kompaktnost. Žitkost se povećava iz istih razloga kao i ugradljivost, naročito zbog efekta maziva koji poseduju okrugle čestice elektrofilterskog pepela i povećanog učešća čvrste u odnosu na tečnu fazu, što čini da beton bude manje sklon segregaciji. Pri zameni do 25% količine portland cementa u betonu, svi elektrofilterski pepeli iz klase F produžavaju vreme vezivanja betona. Odlaganje vremena vezivanja je naglašenije u odnosu na uobičajene betonske mešavine pri niskim temperaturama. Višak vode se obično redukuje kada se pepeo koristi u betonskoj mešavini zbog povećane zapremine finih čestica i nižeg sadržaja vode za zadata ugradljivost [77].

Prethodna proučavanja betonskih mešavina sa elektrofilterskim pepelom su potvrdila da većina onih koje sadrže elektrofilterski pepeo klase F, koji zamenjuje portland cement u razmeri 1:1 (jednaka težina), sporije razvijaju čvrstoću pri pritisku, kao i zateznu čvrstoću, od konvencionalnih betonskih mešavina u prvih 60 do 90 dana od ugradnje. Posle ovog vremena, betonske mešavine sa pepelom klase F premašuju čvrstoću konvencionalnih mešavina sa portland cementom. Kod mešavina kod kojih se portland cement zamenjuje

elektrofilterskim pepelom u masenoj razmeri 1:1 do 1.5:1, čvrstoća posle 28 dana je otprilike jednaka onoj kod konvencionalnog betona [73].

Elektrofilterski pepeo klase C obično pokazuje viši stepen reakcije u ranoj fazi u odnosu na onaj klase F. Pojedine vrste pepela klase C se ponašaju kao portland cement u prirastu čvrstoće posle 28 dana [78]. Obe klase pepela su povoljne za proizvodnju betona visoke čvrstoće. Ipak, Američki institut za beton (ACI) preporučuje da se 15 do 25% količine portland cementa menja pepelom klase F, a 20 do 35% pepelom klase C [79].

Podsticaj za korišćenje elektrofilterskog pepela u betonu potiče od činjenice da elektrofilterski pepeo koji sporo reaguje generiše manje toplote po jedinici vremena u odnosu na hidrataciju portland cementa koji brže reaguje. Zato, porast temperature u velikim betonskim masama (poput brana) može značajno da se smanji ako se cement zameni elektrofilterskim pepelom. Smanjuje se rizik nastanka prslina kod mladog masivnog betona usled prekomernog zagrevanja i dostiže se veća čvrstoća betona sa elektrofilterskim pepelom zbog pucolanske reakcije. Kod redukovanja temperature hidratacije, elektrofilterski pepeo klase F je efektivniji od klase C [77].

Elektrofilterski pepeo koji reaguje sa dostupnim krečom i alkalijama generiše dodatna jedinjenja koja popunjavaju pore i redukuju vodopropustljivost očvrstlog betona [80]. Pucolanska reakcija troši kalcijum hidroksid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), koji propušta procedne vode, zamenjujući ga sa nerastvorljivim hidratom kalcijum silikata (CSH) [77]. Povećana količina sitnih čestica i redukovan sadržaj vode takođe igraju ulogu u smanjivanju vodopropustljivost.

Kao i u slučaju svih betona, otpornost betona sa elektrofilterskim pepelom na oštećenja nastala usled naglog mržnjenja - kravljenja zavisi od količine, rasporeda i veličine pora, kao i drugih faktora poput prirasta čvrstoće, klime i upotrebe soli za odmrzavanje. Posebna pažnja se mora obratiti na količinu uvučenog vazduha i raspored mehurića vazduha, jer elektrofilterski pepeo može redukovati efikasnost dodataka za aeraciju betona [81]. Kada beton sa elektrofilterskim pepelom postigne adekvatnu čvrstoću, nema značajnih razlika u otpornosti betona na dejstvo mraza [77]. U slučaju izlaganja jednovremenom dejstvu mraza i soli za odmrzavanje, beton sa elektrofilterskim pepelom ne bi trebalo da ima veću tendenciju ljuštenja u odnosu na standardni beton, pod uslovom da je beton sa elektrofilterskim pepelom dostigao projektovanu čvrstoću i da ima odgovarajući sistem vazдушnih pora.

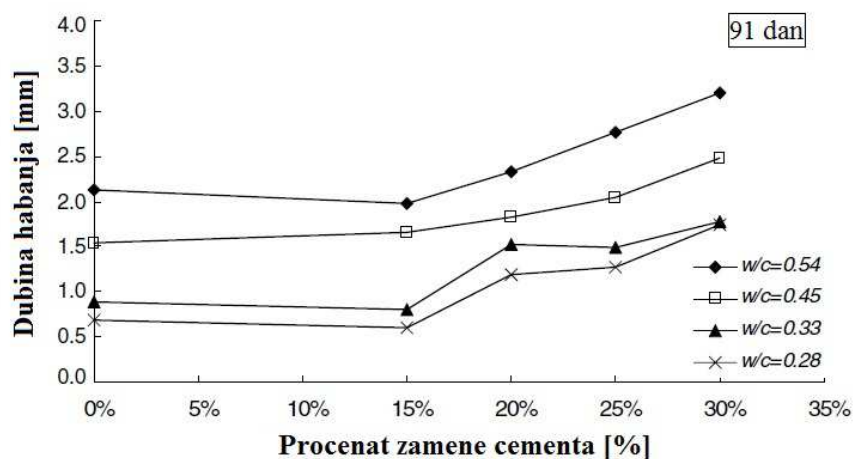
Klasa F elektrofilterskog pepela u betonu povećava otpornost na sulfatnu koroziju. Međutim, zamena elektrofilterskog pepela koji sadrži nizak nivo kalcijuma redukuje otpornost portland cementa na hemijsku agresiju kiselih rastvora [82-83]. Pojedini elektrofilterski pepeli iz klase C mogu povećati otpornost na sulfatnu koroziju, dok drugi mogu redukovati otpornost i ubrzati deformacije [84-85]. Elektrofilterske pepele klase C treba zasebno ispitati pre upotrebe u sulfatnom okruženju. Pretpostavlja se da je relativna otpornost elektrofilterskog pepela na sulfatnu koroziju rezultat odnosa kalcijum oksida („život“ kreča) i fero oksida.

Klasa F elektrofilterskog pepela je efikasna u sprečavanju ili ograničavanju ekspanzivnih delovanja koja su rezultat alkalnosilikatnih reakcija. U teoriji, reakcija između veoma malih amorfnih staklastih čestica silicijum dioksida u elektrofilterskom pepelu i alkalija u portland cementu, vezuje alkalije u neekspanzivni kalcijum - alkalni silika gel. Ovo sprečava alkalije da reaguju sa silicijum dioksidom iz agregata, što bi rezultiralo ekspanzivnom reakcijom. Ipak, pojedine vrste elektrofilterskog pepela (uključujući i one klase C) imaju primetne količine rastvorljivih alkalija, pa se preporučuje ispitivanje mešavine kako bi se utvrdilo da je ekspanzija nastala usled alkalno-silikatne reaktivnosti na prihvatljivom nivou [77,86].



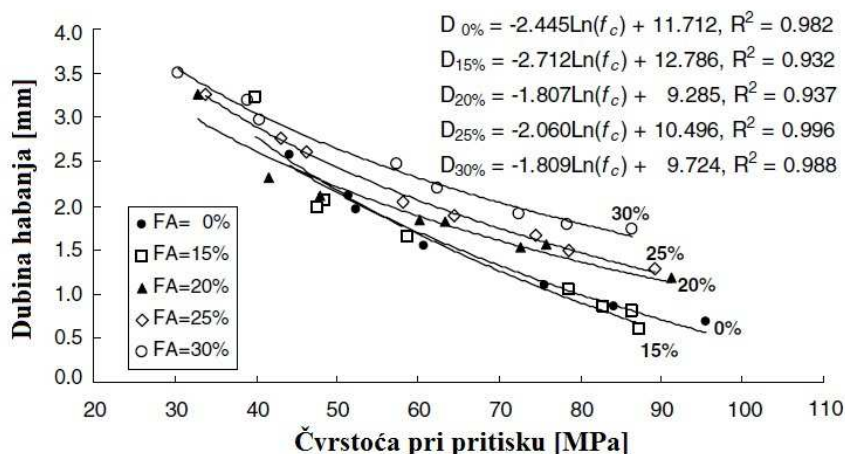
Elektrofilterski pepeo, naročito klase C, je na tri načina efikasan kada je u pitanju značajno redukovanje alkalno - silikatne ekspanzije: 1) daje zbijeniji, slabije propustljiv beton, 2) kada se koristi kao zamena za cement, smanjuje ukupni sadržaj alkalija redukovanjem portland cementa, i 3) alkalije reaguju sa njim umesto sa silikatnim agregatima. Elektrofilterski pepeo klase F je efektivniji od onog klase C zbog većeg sadržaja silicijum dioksida koji može da reaguje sa alkalijama.

Yen i saradnici [87] su izvršili istraživanje abrazivno-erozivne otpornosti betona visokih čvrstoća u kojima je cement delimično bio zamenjen elektrofilterskim pepelom klase F u iznosu od 15, 20, 25 i 30% u odnosu na masu. Ispitivanje abrazivno-erozivne otpornosti rađeno je prema standardu ASTM 1138 (metoda pod vodom) [88]. Rezultati ispitivanja su pokazali da beton sa 15% zamene cementa elektrofilterskim pepelom ima približno istu abrazivno-erozivnu otpornost kao i etalon beton spravljen bez zamene cementa pri starosti betona od 28 i 91 dan. Međutim, betoni sa sadržajem elektrofilterskog pepela većim od 15% pokazali su manju otpornost prema abrazivno-erozivnom dejstvu u odnosu na etalon. Takođe, pokazali su da sa smanjenjem vodocementnog faktora hidro-abrazivna otpornost betona raste, slika 3.1.



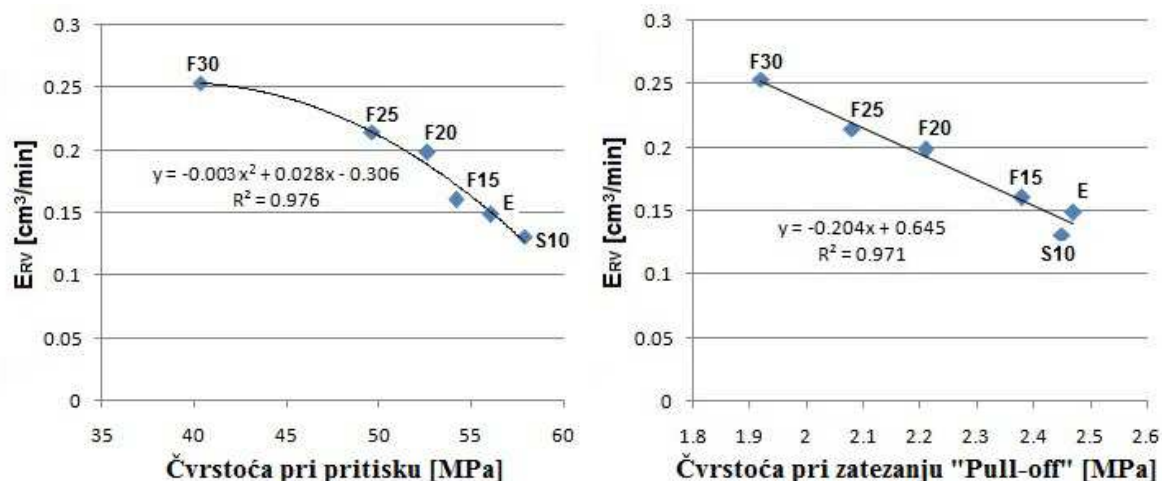
Slika 3.1. Efekat zamene cementa elektrofilterskim pepelom po masi na abrazivno-erozivnu otpornost betona [87]

Između ostalog, zaključili su da otpornost prema hidro-abrazivnom habanju betona raste sa povećanjem čvrstoće pri pritisku bez obzira na sadržaj elektrofilterskog pepela, čime su potvrdili rezultate drugih istraživača [59,61], slika 3.2. Modifikovane vrednosti čvrstoće pri pritisku i vodocementnog faktora „koeficijentom produktivnosti“ koji zavisi od procenta zamene cementa elektrofilterskim pepelom po masi, ostvaruju bolju zavisnost sa dubinom habanja betona.

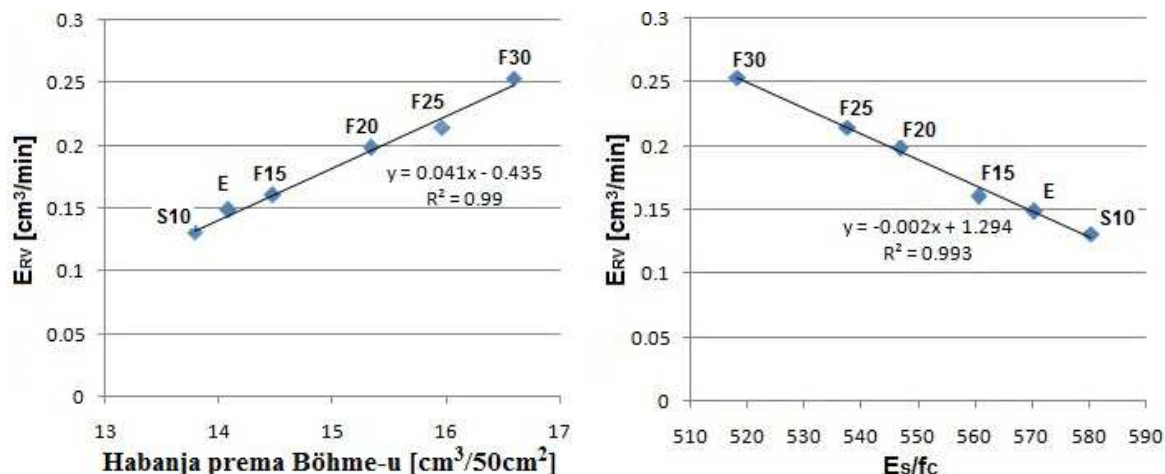


Slika 3.2. Zavisnost između abrazivno-erozivne otpornosti i čvrstoće pri pritisku betona sa različitim procentom zamene cementa elektrofilterskim pepelom po masi [86]

Autor je sa saradnicima [89] radio ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti na betonima kod kojih je izvršena delimična zamena mase cementa elektrofilterskim pepelom u iznosu od 15, 20, 25 i 30% i silikatnom prašinom u iznosu od 10%. Ispitivanje otpornosti betona prema hidro-abrazivnom dejstvu rađeno je na originalnom uređaju koji omogućava da mešavina vode i peska velikom brzinom udara o betonsku ispitnu ploču. Rezultati ispitivanja su pokazali da beton sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom ima najbolju hidro-abrazivnu otpornost. Beton sa 15% zamene elektrofilterskim pepelom ima približno istu otpornost kao i etalon beton bez zamene cementa, dok betoni sa većim sadržajem elektrofilterskog pepela od 15% imaju manju otpornost prema hidro-abrazivnom dejstvu u odnosu na etalon beton. Takođe, utvrdili su da postoji dobra korelacija između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini  $E_{R,V}$  sa jedne strane i čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“, odnosa statičkog modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku i habanja prema Böhme-u, sa druge strane, slike 3.3 i 3.4.

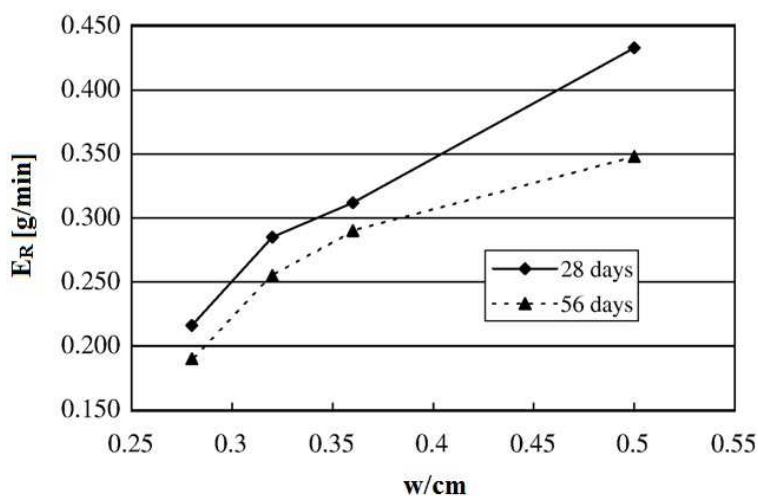


Slika 3.3. Zavisnost između stepena hidro-abrazivne erozije i čvrstoće pri pritisku betona (levo) i čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ (desno) sa različitim procentom zamene cementa elektrofilterskim pepelom (F15, F20, F25 i F30) i silikatnom prašinom (S10) po masi [89]



Slika 3.4. Zavisnost između stepena hidro-abrazivne erozije i habanja prema Böhme-u (levo) i odnosa modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku  $E_s/f_p$  (desno) sa različitim procentom zamene cementa elektrofilterskim pepelom (F15, F20, F25 i F30) i silikatnom prašinom (S10) po masi [89]

Liu i saradnici [27] su vršili ispitivanja uticaja dodatka elektrofilterskog pepela betonu na njegovu otpornost prema hidro-abrazivnom habanju. Došli su do zaključka da se dodavanjem mineralnog dodatka poput elektrofilterskog pepela u velikoj meri povećava otpornost betona prema habanju. Razlog tome jeste to što elektrofilterski pepeo povećava gustinu cementne paste, redukuje njenu poroznost i izdvajanje vode („krvarenje“) i povećava adhezionu vezu između cementne matrice i zrna agregata. Dobijeni rezultati ispitivanja pokazuju da se stepen hidro-abrazivne erozije povećava za približno 76% kada se vodovezivni faktor promeni od 0,28 do 0,50, slika 3.5. Takođe, utvrdili su da je čvrstoća pri zatezanju cepanjem efikasniji faktor predviđanja hidro-abrazivne otpornosti betona u odnosu na čvrstoću pri pritisku i čvrstoću pri savijanju. Za betone sa niskim vrednostima čvrstoće pri pritisku, upotreba krupnog agregata veličine do 13 mm utiče na povećanje hidro-abrazivne otpornosti betona.

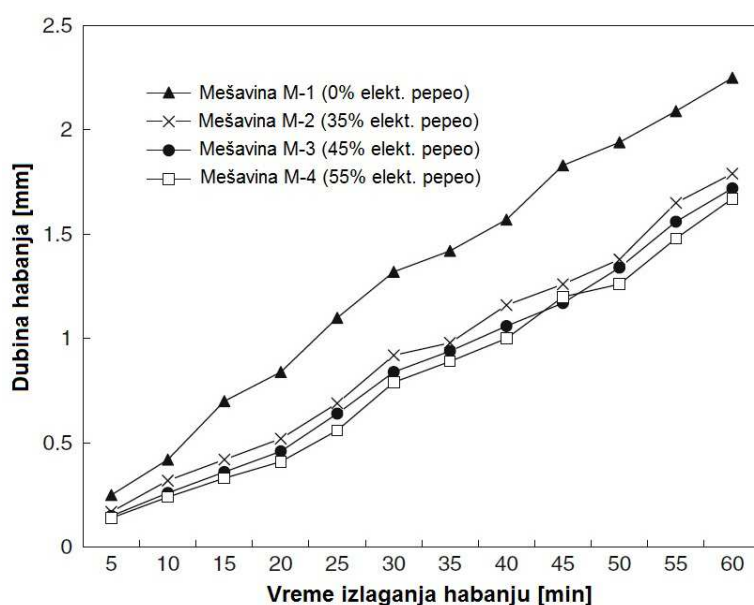


Slika 3.5. Zavisnost između stepena hidro-abrazivne erozije  $E_R$  i vodovezivnog faktora [27]

Choi i Bolander [90] su vršili ispitivanja abrazivne otpornosti betona u kojima je cement bio delimično zamenjen elektrofilterskim pepelom u iznosu od 10, 20 i 30% i

zgurom iz visokih peći u iznosu od 20, 40 i 60%. Otpornost prema habanju određena je metodom ispitivanja pod vodom. Rezultati ispitivanja su pokazali da betoni sa većim sadržajem elektrofilterskog pepela imaju manju otpornost prema habanju pri manjoj starosti betona u odnosu na etalon. Ali, sa nastavkom hidratacije tokom vremena, odnosno sa povećanjem čvrstoće cementne matrice smanjuje se i ova razlika. Sa povećanjem sadržaja zgure iz visokih peći u betonu iznad 20% smanjuje se abrazivna otpornost betona, dok je sa sadržajem zgure do 20% ova otpornost bila veća u odnosu na etalon beton. Za obe vrste mineralnih dodataka koji se dodaju betonu kao zamena za cement važi da se sa povećanjem čvrstoće pri pritisku betona povećava i otpornost prema habanju.

Naik i saradnici [59] su istraživali otpornost betona prema habanju sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela klase C. Procenat zamene cementa elektrofilterskim pepelom u betonu iznosio je 15, 30, 40, 50 i 70%. Ispitivanje abrazivne otpornosti vršeno je prema standardu ASTM C-944 [91]. Rezultati istraživanja su pokazali abrazivna otpornost betona sa zamenom cementa do 30% približno ista u odnosu na etalon beton bez zamene cementa pri starosti betona od 28, 91 i 365 dana. Betoni sa sadržajem elektrofilterskog pepela većim od 30% pokazali su manju otpornost prema habanju u odnosu na etalon beton. Otpornost betona prema habanju jako zavisi od njegove čvrstoće pri pritisku bez obzira na sadržaj elektrofilterskog pepela. Atiş i Celik [92] takođe su vršili ispitivanje abrazivne otpornosti betona sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela (50 i 70% zamene cementa). Došli su do zaključka da betoni sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela imaju veću abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton bez zamene cementa, a posebno pri visokim vrednostima čvrstoće pri savijanju (iznad 4 MPa). Jača je korelacija između abrazivne otpornosti betona i čvrstoće pri savijanju nego u slučaju abrazivne otpornosti i čvrstoće pri pritisku. Ramana i saradnici [93] su vršili istraživanje otpornosti prema habanju betona u kojima je cement bio menjan elektrofilterskim pepelom (20, 30 i 40%) i silikatnom prašinom (5 i 10%). Rezultati su pokazali da beton sa zamenom cementa do 30% elektrofilterskim pepelom imaju bolju abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton bez zamene cementa pri starosti betona od 91 dan. Do sličnih rezultata ispitivanja abrazivne otpornosti betona sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom došli su i Rashad i saradnici [94], Siddique [95] kao i Cavdar i Yetgin [96].



Slika 3.6. Dubina habanja tokom izlaganja habajućem naprezanju pri starosti betona od 91 dana [97]

Siddique i Khatib [97] su vršili istraživanje uticaja zamene sitnog rečnog agregata elektrofilterskim pepelom klase F u iznosu od 35, 45 i 55% na otpornost betona prema habanju i mehaničke karakteristike betona. Došli su do zaključka da sa povećanjem zamene rečnog sitnog agregata elektrofilterskim pepelom dolazi do povećanja otpornosti betona prema habanju, slika 3.5. Takođe sa povećanjem sadržaja elektrofilterskog pepela u betonu dolazi do povećanja čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri zatezanju cepanjem, čvrstoće pri savijanju i statičkog modula elastičnosti. Abrazivna otpornost betona je u jakoj korelaciji sa čvrstoćom pri pritisku, čvrstoćom pri zatezanju cepanjem, čvrstoćom pri savijanju i statičkim modulom elastičnosti bez obzira na sadržaj elektrofilterskog pepela u betonu i starost betona. Siddique [61] je proučavao abrazivnu otpornost betona sa malom vrednošću čvrstoće pri pritisku kod kojih je izvršena delimična zamena sitnog rečnog agregata elektrofilterskim pepelom klase F u iznosu od 10, 20, 30 i 40%. Došao je do zaključka da se otpornost prema habanju betona povećava pri povećanju sadržaja elektrofilterskog pepela u betonu. Abrazivna otpornost betona kod koga je izvršena delimična zamena sitnog agregata elektrofilterskim pepelom u iznosu od 40% se povećala za oko 40% u odnosu na etalon beton.

### 3.2. Silikatna prašina

Silikatna prašina je nusproizvod procesa topljenja u industriji silicijuma i ferosilicijuma. Redukcijom kvarca visoke čistoće u cilju dobijanja silicijuma na temperaturama do 2000°C dobija se  $\text{SiO}_2$  para koja oksidira i kondenzuje se u zonama niske temperature u sitne čestice nekristalnog silicijuma. Nusproizvodi proizvodnje silicijum metala i legura ferosilicijuma sa 75% i više silicijuma u sebi sadrže 85-95% nekristalnog silicijuma. Nusproizvod proizvodnje legure ferosilicijuma sa 50% silicijuma u sebi ima mnogo manji sadržaj silicijuma i manje izražena pucolanska svojstva. Zbog toga, sadržaj  $\text{SiO}_2$  u silikatnoj prašini zavisi od tipa legure koja se proizvodi.

Usvojeno je da se u cementnoj i betonskoj industriji koriste termini mikrosilika ili silikatna prašina, dok se u standardu SRPS EN 13263-1 [98] koristi samo termin silikatna prašina.

Američki institute za beton ACI 234R-96 [99] definiše silikatnu prašinu kao „veoma fin nekristalni silicijum dioksid nastao u električnim pećima kao nusproizvod proizvodnje čistog silicijuma ili legura koje sadrže silicijum“. To je obično sivi prah, donekle sličan portland cementu ili nekim elektrofilterskim pepelima, slika 3.7. Može pokazivati pucolanske ili cementne osobine.



Slika 3.7. Silikatna prašina [100]

Silikatna prašina je prepoznata kao pucolanski dodatak koji je efikasan u poboljšanju mehaničkih osobina betona u značajnoj meri. Relativno je lako dobiti čvrstoću pri pritisku betona od 100 – 150 MPa korišćenjem silikatne prašine zajedno sa superplastifikatorima.

Dodavanjem silikatne prašine betonu povećava se trajnost betona kroz redukciju propustljivosti, rekonstrukciju strukture pora, smanjenje sadržaja kalcijum hidroksida što rezultira većom otpornošću na dejstvo sulfata. Poboljšana trajnost betona sa dodatkom silikatne prašine utiče na poboljšanje zaštite čelične armature od korozije.

Čestice silikatne prašine su ekstremno male, sa više od 95% čestica finijih od 1 $\mu$ m. Silikatna prašina se prvenstveno sastoji od čistog silicijumdioksida u nekristalnom obliku. Rendgenska difrakciona analiza različitih silikatnih prašina otkriva da je materijal u osnovi staklast silicijum, uglavnom kristobalitinne forme. Silikatna prašina ima veoma veliki sadržaj amorfnog silicijum dioksida i čine je vrlo fine sferične čestice. Silikatna prašina uglavnom sadrži više od 90% SiO<sub>2</sub>. Takođe sadrži i male količine oksida gvožđa, magnezijuma i alkalnih oksida. Tipična fizička svojstva silikatne prašine, kao i sadržaj najvažnijih oksida dati su u tabeli 3.1. U istoj tabeli su date karakteristike portland cementa i elektrofilterskog pepela u cilju poređenja.

Tabela 3.1. Svojstva portland cementa, silikatne prašine i elektrofilterskog pepela [92,100]

Svojstvo	Jedinica mere	Portland cement	Silikatna prašina	Elektrofilterski pepeo
Specifična površina	m <sup>2</sup> /kg	350 – 500	13000 – 30000	300 – 600
Zapreminska masa	kg/m <sup>3</sup>	1300 – 1400	200 – 300	1000
Specifična masa	kg/m <sup>3</sup>	3120	2200	2900
SiO <sub>2</sub>	%	20	92	50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,5	1.2	10,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5,0	0,7	28
CaO	%	65	0,2	3,0
MgO	%	0,1	0,2	2,0
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	%	0,8	2,0	3,2

Zbog svoje izuzetne finoće i veoma velikog sadržaja amorfnog silicijum dioksida, silikatna prašina je veoma reaktivni pucolanski material. Kada portland cement u betonu počinje hemijski da reaguje, on oslobađa kalcijum dioksid. Silikatna prašina reaguje sa ovim kalcijum dioksidom formirajući dodatni vezivni material nazvan kalcijum silikatni hidrat koji je veoma sličan onom formiranom od strane portland cementa. Praktično, to je dodatno vezivo koje poboljšava svojstva betona. Mehanizam delovanja silikatne prašine u betonu se u osnovi može proučavati kroz tri uloge:

1. Smanjenje veličine pora i progušćavanje cementne matrice

Prisustvo silikatne prašine u portland cementnoj betonskoj mešavini uzrokuje vidno smanjenje zapremine krupnih pora pri svakoj starosti betona. Silikatna prašina hemijski reaguje i stvara hidrate kalcijum silikata čiji kristali ispunjavaju prostor između čestica cementa i zrna agregata, odnosno popunjavaju šupljine i pore u betonu na isti način na koji pesak popunjava prostor između zrna krupnog agregata, a zrna cementa prostor između zrna sitnog agregata. Ako se ovom efektu doda i samo fizičko prisustvo sitnih čestica silikatne prašine u betonskoj mešavini jasno je da će cementna matrica biti veoma homogena i gusta rezultujući poboljšane čvrstoće i vodonepropusnost betona.

2. Reakcija sa slobodnim krečom (produkt hidratacije cementa)

CH kristali u portland cementnoj matrici predstavljaju slaba mesta, jer prsline mogu lako propagirati kroz ili unutar ovih kristala što utiče na čvrstoću, trajnost i druga svojstva betona. Silikatna prašina reaguje sa CH usled čega se smanjuje njegov sadržaj i na taj način znatno poboljšava svojstva cementne matrice.

3. Poboljšanje karakteristika tranzitne zone između cementne matrice i agregata

Kod betona karakteristike tranzitne zone između zrna agregata i cementne matrice igraju značajnu ulogu u jačini veze cementna pasta – agregat. Dodavanje silikatne prašine utiče na debljinu tranzitne faze u malteru i stepena orijentacije CH kristala u njoj. U poređenju sa malterom koji sadrži samo običan portland cement, debljina tranzitne faze se smanjuje i dolazi do redukcije u stepenu orijentacije CH kristala u tranzitnoj fazi sa dodavanjem silikatne prašine. Otuda su mehanička svojstva i trajnost betona poboljšana zbog unapređenja u tranzitnoj zoni odnosno povećanja čvrstoće veze između cementne matrice i agregata.

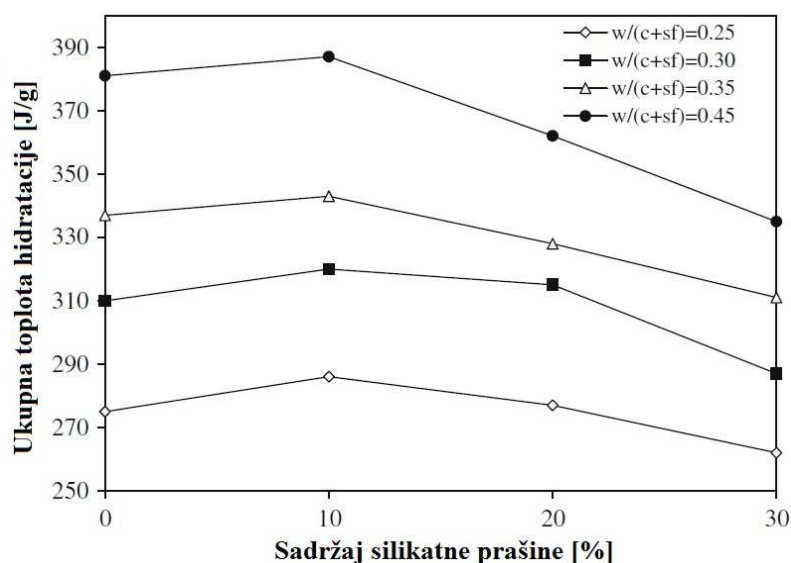
Silikatna prašina je amorfne prirode i može sadržati i izvesnu količinu kristalnog silicijuma u obliku kvarca ili kristobalita. Velika specifična površina i amorfna priroda silikatne prašine čine je veoma reaktivnom. Hidratacija  $C_3S$ ,  $C_2S$  i  $C_4AF$  je ubrzana u prisustvu silikatne prašine [101-102]. „Cementna aktivnost“ silikatne prašine je 4 do 5 puta veća u odnosu na portland cement što ukazuje na činjenicu da velike količine cementa mogu biti zamenjene malim dozama silikatne prašine, a da se pri tome postignu zahtevane čvrstoće. Međutim, smanjenje sadržaja cementa na veoma nizak nivo će imati nepovoljni efekat na trajnost betona bez obzira na koristi ostvarene dodavanjem silikatne prašine. Iako je brzina reakcije u početku veoma velika, sva silikatna prašina ne stupi u hemijsku reakciju. Istraživanja su pokazala prisustvo neizreagovanih zrna silikatne prašine u cementnoj matrici u kasnijim fazama očvršćavanja [100].

Generalno, razvoj toplote hidratacije betona sa silikatnom prašinom zavisi od sastava mešavine. Ukoliko je zahtevana rana visoka čvrstoća, dodavanje silikatne prašine sa velikom količinom cementa će stvoriti veću toplotu hidratacije u početku koja će se smanjivati sa slabljenjem reakcije. Dodavanje silikatne prašine betonima sa „normalnim“ količinama cementa obično značajno ne utiče na razvoj toplote.

Lohtia i Joshi [103] su zaključili da delimična zamena cementa silikatnom prašinom doprinosi smanjenju toplote hidratacije bez ikakvog smanjenja čvrstoća. Kod betona visoke čvrstoće sa sadržajem cementa od  $540 \text{ kg/m}^3$  i 10% zamene cementa silikatnom prašinom, oslobođena toplota je bila za 9% manja u poređenju sa mešavinom bez silikatne prašine. Dodavanje silikatne prašine može ubrzati porast temperature u toku prva 2 do 3 dana, dok u kasnijim fazama očvršćavanja (7 do 28 dana) porast temperature kod betona sa silikatnom prašinom je manji u odnosu na odgovarajući beton sa portland cementom. Zbog brze pucolanske reakcije silikatne prašine, u ranoj fazi očvršćavanja oslobodi se veća toplota hidratacije u poređenju sa portland cementom. Odnos između oslobođene količine toplote u toku prva 2 do 3 dana od pucolanske aktivnosti jednog grama silikatne prašine, sa jedne strane, i portland cementa, sa druge strane, je reda veličine od 1 do 2.

Langan i saradnici [104] proučavali su uticaj silikatne prašine na toplotu hidratacije portland cementa. Silikatna prašina je dodavana kao delimična zamena svih cementnih materijala u iznosu od 10%. Kalorimetrijski testovi su izvedeni na mešavinama sa vodocementnim faktorima 0,35, 0,40 i 0,50 i praćeni tokom prvih 24h, a neke mešavine su praćene 72h. Rezultati istraživanja su pokazali da prisustvo silikatne prašine evidentno povećava razvoj toplote u prvih 30 min hidratacije, kao i u periodu od 8 do 24h bez obzira

na vrednost vodocementnog faktora. Razvoj toplote tokom perioda mirovanja je gotovo bio konstantan za sve mešavine, dok je toplota tokom perioda od 2 do 8h smanjena. Ukupna toplota posle 1 i 3 dana nije povećana dodavanjem silikatne prašine u mešavini sa vodocementnim faktorom 0,35. Ukupna toplota posle jednog dana se povećava sa povećanjem vodocementnog faktora. Kadri i Duval [105] su takođe istraživali uticaj silikatne prašine na toplotu hidratacije betona. Zaključili su da stepen hidratacije betona sa silikatnom prašinom uglavnom zavisi od dva parametra: vodovezivnog faktora i sadržaja silikatne prašine, slika 3.8. Takođe, zaključili su da bez obzira na prisustvo silikatne prašine u betonu stepen hidratacije, tj. toplota hidratacije se smanjuje sa povećanjem vodovezivnog faktora.



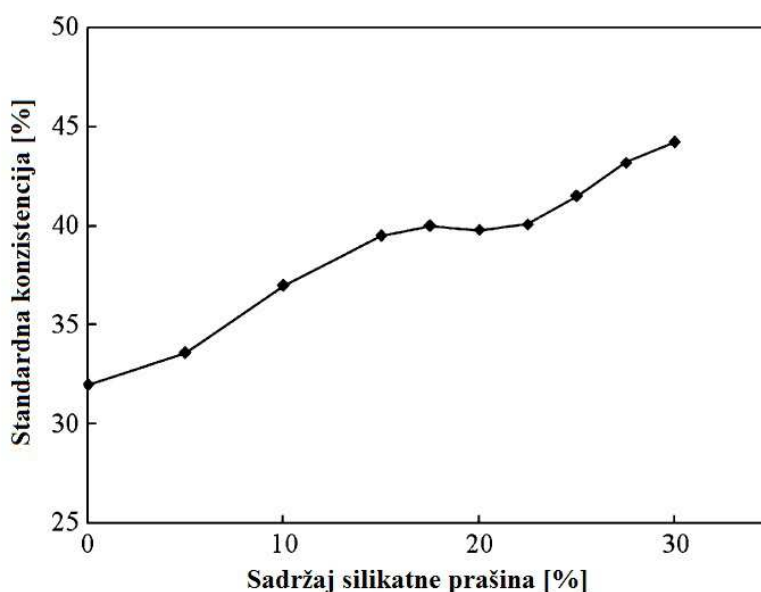
Slika 3.8. Ukupna toplota hidratacije betona tokom 10 dana u funkciji sadržaja silikatne prašine [100, 105]

Prednosti korišćenja silikatne prašine u proizvodnji betona su velike i ogledaju se u poboljšanju karakteristika betona u svežem i očvrslom stanju. Dodavanjem silikatne prašine betonu postiže se sledeće: poboljšana pokretljivost, obradljivost i ugradljivost sveže betonske mešavine; eliminacija izdvajanja vode (krvavljenja) svežeg betona; smanjenje sadržaja vazduha u svežem betonu i povećanje gustine; rane visoke čvrstoće pri pritisku; visoke vrednosti čvrstoće pri zatezanju, čvrstoće pri savijanju, statičkog modula elastičnosti; vrlo mala propustljivost za hloride i vodu pod pritiskom; povećana trajnost; povećana žilavost; povećana abrazivna otpornost ploča, podova, obloga, hidrotehničkih objekata, obalskih konstrukcija; velika otpornost prema hemijskoj agresiji preko hlorida, kiselina, nitrata i sulfata; veća čvrstoća prijanjanja; visoka električna otpornost i mala propustljivost. Iz navedenih razloga, silikatna prašina je našla primenu u proizvodnji betona visokih performansi, betona visokih čvrstoća, samougrađujućeg betona, torkret betona, injekcionih smeša, reparaturnih maltera i injekcionih smeša, vatrostalnih materijala i keramike.

Sveži beton koji sadrži silikatnu prašinu je kohezivniji i manje sklon segregaciji u odnosu na beton bez silikatne prašine. Kod betonskih mešavina sa silikatnom prašinom izraženo je značajno smanjenje izdvajanja vode, odnosno krvavljenja. Pored toga, silikatna prašina i ispunjava pore u svežem betonu i tako neznatno povećava zapreminsku masu betona.



Rao [106] je ispitivao uticaj dodavanja silikatne prašine na konzistenciju cementne paste i maltera. Silikatna prašina je dodavana u iznosu od 0 do 30%. Standardna konzistencija portland cementne paste iznosila je 31,5%, dok je sa 30% silikatne prašine ona iznosila 44,25%. Primećeno je da standardna konzistencija cementne paste raste sa povećanjem sadržaja silikatne prašine, što je logično jer su čestice silikatne prašine znatno finije u odnosu na čestice portland cementa i samim tim njihova specifična površina je znatno veća, slika 3.9. Qing i saradnici [107] su ispitivali uticaj dodatka nano  $\text{SiO}_2$  na konzistenciju cementne paste i upoređivali ga sa uticajem dodatka silikatne prašine. Došli su do zaključka da je prodor sonde kroz cementnu pastu sa dodatkom nano  $\text{SiO}_2$  manji u odnosu na cementnu pastu sa silikatnom prašinom.



Slika 3.9. Standardna konzistencija cementne paste u funkciji sadržaja silikatne prašine [106]

Wong and Razak [108] su ispitivali uticaj dodavanja silikatne prašine na čvrstoće betona. Betoni su rađeni sa tri različita vodovezivna faktora 0,27, 0,30 i 0,33, dok je cement delimično zamenjen silikatnom prašinom u iznosu od 0, 5, 10 i 15%. Ispitivanje konzistencije betona rađeno je metodom sleganja i WEBE metodom. Rezultati ispitivanja konzistencije betona pokazuju da sleganje betona postaje manje, odnosno Webe-ovo vreme raste sa povećanjem sadržaja silikatne prašine bez obzira na vrednost vodovezivnog faktora. Ovo ukazuje na činjenicu da kod betona sa većim sadržajem silikatne prašine treba povećati količinu vode ili superplastifikatora u cilju postizanja željene konzistencije u odnosu na beton koji sadrže samo portland cement.

Silikatna prašina obezbeđuje visoke vrednosti čvrstoće pri pritisku betona. Wong i Razak [108] su došli do sledećeg zaključka u vezi čvrstoće pri pritisku betona u kojima je izvršena delimična zamena cementa silikatnom prašinom u različitim procentima: silikatna prašina nije doprinela povećanju čvrstoće pri pritisku u prvim danima očvršćavanja u odnosu na etalon beton bez obzira na vrednost vodocementnog faktora; nakon 7 dana betoni sa silikatnom prašinom dostižu veće vrednosti čvrstoće pri pritisku u odnosu na etalon; čvrstoće pri pritisku su veće na betonima sa većim sadržajem silikatne prašine; betoni izrađeni sa manjim vodovezivnim faktorom imaju veće čvrstoće bez obzira na sadržaj silikatne prašine.

Mazloom i saradnici [109] ispitivali su čvrstoću pri pritiku betona visokih performansi koji u sebi sadrži silikatnu prašinu. Sadržaj silikatne prašine u betonu je bio 0, 6, 10 i 15%, a vodovezivni faktor je bio 0,35. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku su dati u tabeli 3.2. Na osnovu rezultata može se zaključiti sledeće: pri starosti od 28 dana betoni sa silikatnom prašinom imaju veću čvrstoću pri pritisku za 21% u odnosu na etalon; porast čvrstoće pri pritisku betona sa silikatnom prašinom je zanemarljiv nakon 90 dana, dok je kod etalon betona nakon godinu dana čvrstoća pri pritisku porasla za 14% u odnosu na čvrstoću posle 90 dana, odnosno za 26% u odnosu na čvrstoću posle 28 dana; čvrstoća pri pritisku posle 400 dana kod svih betona je približno ista. Slične rezultate ispitivanja betona sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom u iznosu od 10% dobio je autor disertacije pri istraživanju hidro-abrazivne otpornosti betona sa dodatkom elektrofilterskog pepela i silikatne prašine [89].

Tabela 3.2. Čvrstoće pri pritisku betona u funkciji starosti betona [109]

Oznaka uzorka	Silikatna prašina [%]	Čvrstoća pri pritisku [MPa]						
		7 dana	14 dana	28 dana	42 dana	90 dana	365 dana	400 dana
OPC	0	46	52	58	62	64	73	74
SF 6	6	50,5	58	65	69	71	73	73
SF 10	10	52	61	67,5	71	74	73	73
SF 15	15	53	63	70	73	76	75	76

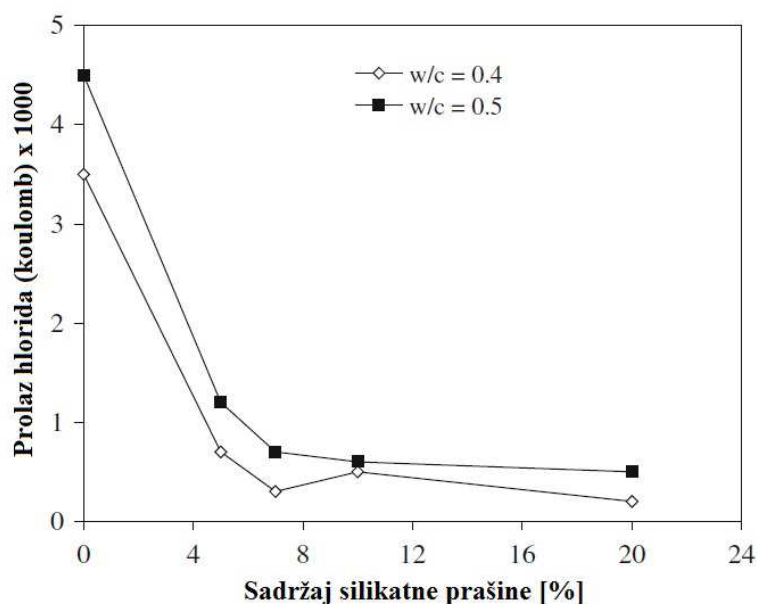
Odnos između čvrstoće pri pritisku, savijanju i zatezanju u betonu sa silikatnom prašinom je isti kao i kod običnog betona sa portlad cementom, te će povećanje čvrstoće pri pritisku dovesti do sličnog porasta i ostalih čvrstoća. Brojni autori su istraživali uticaj sadržaja silikatne prašine na čvrstoću pri zatezanju. Bhanja i Sengupta [110] i Hooton [111] došli do zaključka da silikatna prašina ne doprinosi značajnom povećanju čvrstoće pri zatezanju cepanjem, a posebno ako je sadržaj veći od 15%. Uticaj silikatne prašine na čvrstoću pri savijanju je bio veći u poređenju sa čvrstoćom pri zatezanju cepanjem u istraživanju Bhanja i Sengupta [110]. Utvrdili su da se sa povećanjem sadržaja silikatne prašine u betonu konstantno povećavala savojna čvrstoća. Ona se povećavala čak i pri većem sadržaju silikatne prašine.

Sa povećanjem čvrstoće pri pritisku beton postaje više krt, a ovo pravilo bez uzetka važi i za betone sa silikatnom prašinom. Modul elastičnosti betona ne prati porast zatezne čvrstoće, on se samo neznatno povećava u odnosu na porast čvrstoće pri pritisku. Zbog toga se betoni visokih i ultra visokih čvrstoća mogu koristiti za visoke konstrukcije bez gubitka duktilnosti. Hooton [111] je ispitivao modul elastičnosti betona sa silikatnom prašinom i došao do zaključka da je efekat dodavanja silikatne prašine primetan tek posle 28 dana. Naime, u tom period modul elastičnosti raste kod betona sa silikatnom prašinom. Mazloom i saradnici [109] su ispitivali sekantni modul elastičnosti na betonima visokih performansi sa različitim sadržajem silikatne prašine (0, 6, 10 i 15%). Zaključili su da sa povećanjem sadržaja silikatne prašine u betonu raste i vrednost sekantnog modula elastičnosti. Güneysi i saradnici [112] su ispitivali uticaj silikatne prašine (sadržaj variran između 5 i 20%) na modul elastičnosti betona izrađenog sa delimičnom zamenom agregata recikliranom gumom. Došli su do zaključka da sa povećanjem silikatne prašine dolazi do blagog povećanja modula elastičnosti betona sa dodatkom gume bez obzira na vrednost vodocementnog faktora.

Betoni sa silikatnom prašinom imaju mnogo finiju pastu, pa će i veza sa podlogom, starim betonom, armaturom, vlaknima i agregatom biti bolja. Ispitivanja su pokazala da je veza agregat – cement izmenjena u prisustvu silikatne prašine, dok „Pull-off“ test pokazuje veću čvrstoću pri zatezanju. Ovo je posebno korisno kod torkret betona sa mikrovlaknima i silikatnom prašinom čija je upotreba veoma rasprostranjena u Skandinaviji [113]. Upotreba mrežaste armature koja bi trebalo da bude fiksirana za podlogu je nepotrebna, a zbog velike reaktivnosti nema potrebe ni za akceleratorima.

Skupljanje u cementnoj pasti je povećano kada se koristi silikatna prašina o čemu se mora voditi računa. Mazloom i saradnici [109] su pokazali da je sa dodavanjem silikatne prašine betonu u iznosu od 10 i 15% došlo do povećanje skupljanja za 33%, odnosno 50%. Takođe, ispitivali su uticaj silikatne prašine na tečenje betona i utvrdili da je tečenje betona opalo za 20% pri sadržaju silikatne prašine od 15%.

Merenja propustljivosti betona sa silikatnom prašinom pokazala su malu propustljivost ili skoro nepropustljivost ovih betona. Mikroskopske analize su otkrile veoma gustu mikrostrukturu i praktično nepostojanje tranzitne zone koja obično okružuje zrna agregata. U svim ovim ispitivanjima velika pažnja je posvećena režimu nege, jer je utvrđeno da vreme negovanja betona utiče na rezultate testova. Perraton i saradnici [114] proučavali su uticaj silikatne prašine na propustljivost hlorida kroz beton. Konstatovali su da se sa povećanjem sadržaja silikatne prašine u betonu značajno smanjuje difuzija hloridnih jona kroz beton, slika 3.10. Do sličnih zaključaka je došao i Hooton [111].



Slika 3.10. Prodor hlorida kroz beton u funkciji sadržaja silikatne prašine [114]

Ispitivanja velikog broja istraživača pokazala su da dodatak silikatne prašine betonu doprinosi značajnom povećanju otpornosti prema mrazu i jednovremnom dejstvu mraza i soli za odmrzavanje [111, 115-116].

Prema ACI 234R [99], efekat silikatne prašine na sulfatnu otpornost betona više se odnosi na smanjenja propustljivosti betona nego na smanjenje sadržaja  $C_3A$  zbog relativno malih doza silikatne prašine koja se u praksi koristi. Brojna ispitivanja su potvrdila ovu tezu [111, 117-118]. U obimnom ispitivanju betona sa silikatnom prašinom koje je organizovano u Oslu, različiti uzorci su zakopani u tlo koje je bilo kiselo i veoma bogato sulfatima. Dvadesetogodišnje ispitivanje je pokazalo da se ovi betoni ponašaju jednako dobro kao i oni

napravljeni sa sulfatno-otpornim cementom, a da mešavine gde je uz silikatnu prašinu korišćen i elektrofilterski pepeo ili granulirana zgora imaju još bolje osobine.

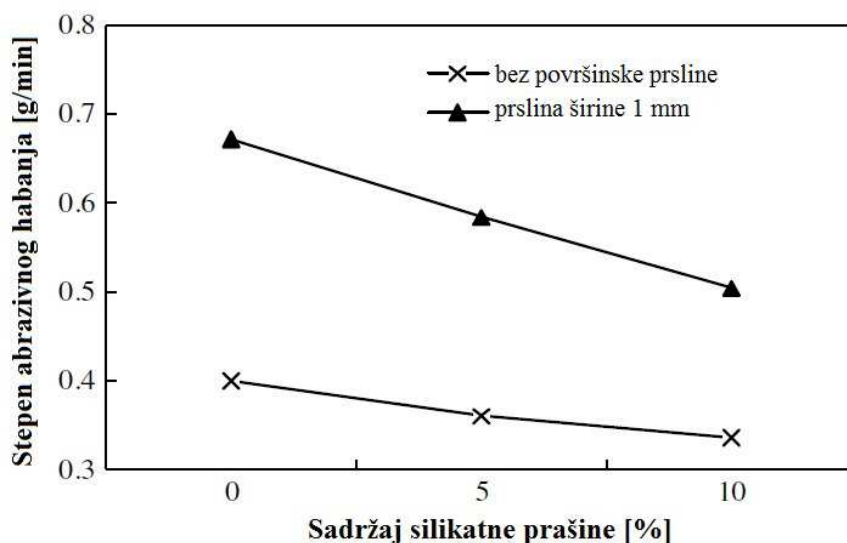
Hloridi mogu da prodru u beton iz nekog spoljašnjeg izvora ili da budu prisutni u nekoj od komponenti betona. Sposobnost betona da se „suprostaavlja” prodoru hlorida iz na primer, morske vode ili soli za odmrzavanje, je veoma važna baš kao i sposobnost da veže agregativne hloride prisutne u pornoj vodi. Eksperimenti su pokazali da što je niža pH vrednost u betonu, biće niži i prag za depasivizaciju čelika uzrokovanu dejstvom hlorida, ali se koeficijent prodora hlorida kod betona sa silikatnom prašinom takođe smanjuje, tako da će za istu čvrstoću dejstvo hlorida biti smanjeno, odnosno kasnije otpočeti kod betona sa silikatnom prašinom. Važno je obezbediti dovoljan zaštitni sloj armature, u protivnom smanjena brzina prodora hlorida neće imati efekta.

Skjolsvold [119] je istraživao dubinu karbonatizacije betona sa ili bez silikatne prašine. Rezultati ispitivanja su pokazali da pri datoj čvrstoći pri pritisku, betoni sa dodatkom silikatne prašine imaju veći stepen karbonatizacije nego betoni bez silikatne prašine. Schubert [120] pretpostavlja da utrošak  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  u pucolanskoj reakciji može da poveća stepen karbonatizacije, dok ga blokiranje kapilarnih pora smanjuje usled umanjene difuzije  $\text{CO}_2$ . Grimaldi i saradnici [121] su utvrdili da je dubina karbonatizacije bila veća kod maltera sa silikatnom prašinom nego na etalonu. Ovo objašnjavaju smanjenjem pH vrednosti betona izazvanog pucolanskom reakcijom.

Beton pripremljen sa peskom ili agregatom koji sadrži amorfni silicijum ili silikatni agregat (gnajs, škrljac) može pretrpeti značajna oštećenja usled formiranja ekspanzivnih alkalno silikatnih gelova. Alkalijske ( $\text{Na}_2\text{O}$  i  $\text{K}_2\text{O}$ ) iz cementa ili drugih izvora, sa hidrosilnim jonima i određenim silikatnim sastojcima dovode do formiranja posebnih želatinskih hidrata koji ekspandiraju i vrše pritisak na okolnu matricu. Pritisak generisan od bubrenja gela lomi delove agregata i stvara prsline koje se proširuju u okolni beton. Uobičajeno, alkalno-silikatna reakcija dovodi do formiranja mreže prslina u betonu. Optimalni metod za smanjenje alkalno-silikatne reakcije u betonu jeste da se deo portland cementa zameni nekim materijalima sa pucolanskim svojstvima poput elektrofilterskog pepela, silikatne prašine, granulirane zgora iz visokih peći, prirodnog pucolana, metakoalina. Silikatna prašina u betonu reaguje sa slobodnim kalcijum hidroksidom formirajući hidrate kalcijum silikata, a ova reakcija snižava pH vrednost i samim tim opasnost od počinjanja alkalno silikatne reakcije. Prilikom formiranja kalcijum silikata,  $\text{K}^+$  i  $\text{Na}^+$  joni su vezani u matrici i ne mogu da reaguju sa potencijalno silikatnim agregatom. Sitne čestice i pucolanska aktivnost silikatne prašine redefinišu pornu strukturu i smanjuju propustljivost tako da manje vode može da prođe kroz beton. Uobičajna doza za silikatne prašine od 10% može u potpunosti da inhibira alkalnosilikatnu reakciju. Hooton [111] je došao do zaključka da se ekspanzija maltera nastale alkalno-silikatnom reakcijom smanjuje sa povećanjem zamene cementa silikatnom prašinom.

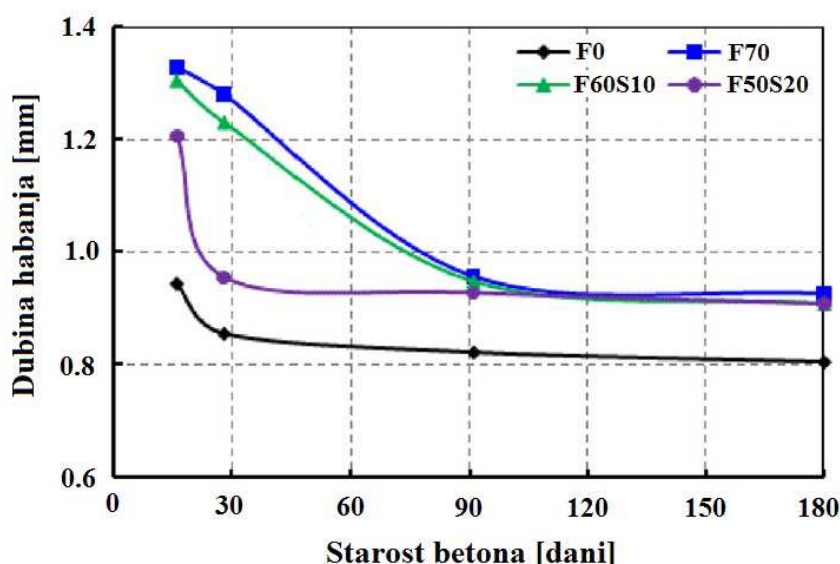
Liu [31] je vršio istraživanje uticaja površinskih prslina na hidro-abrazivnu otpornost betona sa različitim tipovima prslina i sadržajem silikatne prašine. Silikatna prašina je dodavana kao zamena cementu u iznosu od 0, 5 i 10%. Ispitivanje je izvedeno na uređaju koji omogućuje da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom i pod različitim uglovima udara betonsku ispitnu ploču. Između ostalog, zaključio je da se otpornost prema habanju povećala sa dodatkom silikatne prašine kod betona koji ima površinske prsline, slika 3.11. Za beton sa površinskom prslinom širine 1 mm i kada mlaz mešavine vode i peska direktno udara u prslinu, stepen abrazivnog destva se povećava za 13% do 25 % u odnosu na referentni beton. Takođe zaključio je da je abrazivno habanje veće kada mlaz vode direktno udara u prslinu nego iznad nje, zatim da povećana širina prsline smanjuje hidro-abrazivnu otpornost

betona i da sa povećanjem ugla udara mlaza mešavine vode i peska stepen abrazivnog dejstva raste.



Slika 3.11. Efekat dodatka silikatne prašine na stepen abrazivnog habanja [31]

Zhen i saradnici [122] su ispitivali hidro-abrazivnu otpornost betona kod koga je izvršena delimična zamena cementa nano-SiO<sub>2</sub> (5%) i super finom zgurom (40%) po masi. Korišćena je metoda peskarenja kvarcom ispitnog betonskog uzorka za utvrđivanje otpornosti prema habanju. Rezultati ispitivanja su pokazali da je beton sa nano-SiO<sub>2</sub> imao veću hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon i beton sa super finom zgurom. Razlika u odnosu na etalon beton iznosi 50%, odnosno 33% pri starosti betona od 28 i 90 dana.



Slika 3.12. Dubina habanja u funkciji starosti betona [94]

Rashad i saradnici [94] su vršili ispitivanje uticaja silikatne prašine na abrazivnu otpornost betona sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela. Kod ovih betona cement je bio zamenjen elektrofilterskim pepelom u iznosu od 70%, dok je silikatna prašina dodavana

u iznosu od 10% i 20%, odnosno u tom iznosu je menjala elektrofilterski pepeo. Rezultati ispitivanja su pokazali da zamena elektrofilterskog pepela silikatnom prašinom u iznosu od 10% povećava abrazivnu otpornost betona pri svim starostima u poređenju sa betonom koji sadrži 70% elektrofilterskog pepela. Najizraženiji porast abrazivne otpornosti zabeležen je u period između 7 i 28 dana. Posle 28 dana prirast abrazivne otpornosti betona je veoma mali. Povećanje sadržaja silikatne prašine na 20% dovodi do većeg povećanja otpornosti prema habanju. Kao što se sa slike 3.12 može videti, dubina habanja ovog betona tokom vremena pokazuje isti trend kao beton bez ikakve zamene cementa, značajno je smanjena u periodu od 7 do 28 dana, a zatim se postepeno smanjuje posle 28 dana.

Kryžanowski i saradnici [123] su vršili ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona sa dodatkom silikatne prašine koji je ugrađen u evakuacionim objektima hidroelektrane Vrhovo u Sloveniji. Upoređivali su rezultate dobijene laboratorijskim putem (koristili su metodu podvodnog ispitivanja habanje prema ASTM C1138 [88]) sa rezultatima merenja na samom terenu. Silikatna prašina je dodata betonu kao posebni dodatak, ne kao delimična zamena cementa, u iznosu od 5% u odnosu na masu. Rezultati ispitivanja su pokazali da je kod betona sa dodatkom silikatne prašine primećeno znatno smanjenje habanja u odnosu na etalon beton. Pri starosti od 90 dana to smanjenje iznosi 22%, a pri starosti od 900 dana smanjenje je 52%.

Li i saradnici [62] su vršili ispitivanje abrazivne otpornosti betona kod kojih je cement bio zamenjen nano-česticama (nano-SiO<sub>2</sub> i nano TiO<sub>2</sub>) u iznosu od 1% i 3%. Rezultati ispitivanja su pokazali da nano čestice značajno poboljšavaju otpornost betona prema habanju. Otpornost prema habanju betona koji sadrži nano-TiO<sub>2</sub> je veća u odnosu na beton koji sadrži istu količinu nano-SiO<sub>2</sub>. Međutim, sa povećanjem sadržaja nano čestica otpornost betona prema habanju se smanjuje. Kod betona sa sadržajem od 1% nano-SiO<sub>2</sub> otpornost prema habanju je poboljšana za 157%, dok je kod betona sa sadržajem od 3% nano-SiO<sub>2</sub> otpornost prema habanju je poboljšana za 101%. Ispitivanje abrazivne otpornosti betona sa nano česticama SiO<sub>2</sub> radili su Riahi i Nazari [124]. I oni su došli do sličnog zaključka, da dodatak nano čestica SiO<sub>2</sub> u iznosu do 2% u odnosu na masu cementa doprinosi povećanju otpornosti prema habanju i da se sa povećanjem sadržaja nano čestica povećava čvrstoća pri pritisku.

Brojna su istraživanja abrazivne otpornosti betona kod kojih je silikatna prašina standardna komponenta betona, dok se utvrđivao uticaj dodavanja drugih materijala na ovo svojstvo betona. Pre svega je reč o uticaju dodavanja mikrovlakana [37,125,126,127], reciklirane gume [68,123], drugih materijala sa pucolanskim svojstvima [93,96], uticaju vodocementnog faktora [128], uticaju vrste agregata [49], efekata kod uvaljanih betona [129] i dr.

### 3.3. Reciklirana granulirana guma

U današnje vreme se uspešno koriste velike količine otpadnih materijala ili industrijskih nusproizvoda kao rezultat napretka koji se beleži u tehnologiji izrade betona. Takvi se materijali mogu koristiti kao mineralni dodaci ili kao punioci-agregati, za delimičnu ili potpunu zamenu prirodnog kamenog agregata [130-132]. Otpadne automobilske gume postale su ekološki problem svetskih razmera. U svetu se godišnje proizvede 1,4 milijarde guma za potrebe automobilske industrije, a samo na području zemalja članica Evropske unije godišnje nastane gotovo 3,5 miliona tona otpadnih guma [133]. Novi podaci pokazuju da se u Evropi tokom protekle decenije znatno smanjila količina otpadnih guma koje se nekontrolirano odlažu, te danas iznosi samo četiri posto ukupne količine otpadnih guma. Isto tako, procenjuje se da se na području novih članica EU

i zemalja pristupnica nekontrolirano odlaže 29% nastalih otpadnih guma (oko 450000 t ili oko 42,5 miliona komada). Recikliranje gume pripada delatnosti održivog razvoja, jer se od neupotrebljivih proizvoda recikliranjem stvaraju vredne sirovine, koje se mogu koristiti za pripremu proizvoda s novom upotrebnom vrednošću. Mehaničkom reciklažom otpadnih guma dobijaju se tri sirovine: gumene granule, čelična vlakna i tekstilna vlakna. Trenutno se samo pet posto recikliranih otpadnih guma koristi za potrebe u građevinarstvu, mada su mogućnosti mnogo veće. Upravo je to razlog zašto je trebalo osmisliti nove tehnologije kako bi se guma reciklirala i služila kao sirovina za dobijanje novih proizvoda. U poslednje vreme guma je pronašla svoju upotrebu u industriji cementa kao energent prilikom proizvodnje portland cementnog klinkera, zatim kao podloga za igrališta i sportske terene, za razne obloge i pokrive. Ali pored toga, jedan od novijih pravaca koji se poslednjih godina istražuju jeste upotreba otpadne gume i njenih sastavnih komponenti u tehnologiji proizvodnje betona.

U većini izvršenih istraživanja uticaja dodatka reciklirane gume betonu na njegove performance u svežem i očvrslom stanju, reciklirana guma se koristila u tri oblika, slika 3.13:

1. Seckana guma koja se koristi kao zamena za krupan agregat. Za proizvodnju gume u ovom obliku, potrebno je sečenje gume u dve faze. U prvoj fazi guma se seče do dimenzija 300 – 400 mm u dužini i 100 – 230 mm u širini. U drugoj fazi, dimenzije delova gume postaju 100 – 150 mm. Ukoliko se sečenje i dalje nastavi, nastaju delovi krupnoće 13 – 76 mm koji se nazivaju „seckane čestice“.
2. Drobljena guma koja se koristi kao zamena za sitan agregat, odnosno pesak. Proizvodi se u posebnim mlinovima u kojima se krupna guma pretvara u sitne iskidane delove. Ovim postupkom mogu da se proizvode čumene čestice različitih dimenzija u zavisnosti od vrste mlinova i temperature sirovine, tj. krupnih delova gume. Prostim metodom proizvodnje, čestice gume se prave sa visokom nepravilnošću u opsegu od 0,425 – 4,75 mm.
3. Zemljana guma koja se može koristiti kao zamena za cement u zavisnosti od mogućnosti opreme za usitnjavanje, odnosno mlevenje. Obradena otpadna guma je obično podvrgnuta dvema fazama magnetne separacije i sortiranja. Frakcije gume različitih veličina su dobijene ponavljanjem više kompleksnih procesa. Procesom mikromlevenja dobijaju se čestice u opsegu od 0,075 – 0,475 mm.



Slika 3.13. Oblici reciklirane gume koji se koriste u tehnologiji proizvodnje betona: seckana guma (levo), drobljena guma (u sredini) i zemljana guma (desno)

Glavna obeležja koja recikliranu gumu čine atraktivnom za korišćenje u građevinarstvu su: mala specifična težina, nizak modul elastičnosti, izolacijska svojstva i sposobnost apsorpcije nastale energije usled opterećenja. Upravo zbog tih svojstava osnovni pravci istraživanja upotrebe gume u betonima idu prema razvoju proizvoda kod kojih se iskorišćavaju izolacijska i apsorpcijska svojstva gume [134], sposobnost apsorpcije energije

kod betona visokih čvrstoća [135-136] i kao zamena za hemijske dodatke koji povećavaju otpornost na smrzavanje i odmrzavanje [137-138].

Promena svojstava betona s dodatkom gume u svežem stanju zavisi od veličine, sadržaja i teksture gume koja se koristi za spravljanje betona. Jedna od prednosti gume kao zamene dela agregata odnosi se na smanjenje zapremninske mase betonske mešavine, jer je zapremninska masa gume znatno niža od zapremninske mase rečnog ili drobljenog agregata. Zapremninska masa svežeg betona spravljenog od prirodnog agregata iznosi  $\approx 2400 \text{ kg/m}^3$ , dok je zapremninska masa svežeg betona spravljenog sa dodatkom reciklirane gume niža i iznosi 1800 – 2100  $\text{kg/m}^3$ . To znači da zapremninska masa betona upotrebom gume kao parcijalnom zamenom agregata može biti smanjena za 20% do 30%, zavisno od sadržaja gume u betonskoj mešavini [139,143]. Dodatno, zbog nepolarnosti gume i hrapavosti njene površine, uvlači se dodatna količina vazduha zato što nepolarna guma odbija vodu i privlači vazduh [139,144-145]. Autor disertacije je sa saradnicima [139] ispitivao svojstva betona u kojima je izvršena delimična zamena rečnog sitnog agregata recikliranom gumom granulacije 0,5 – 4 mm u iznosu od 10, 20 i 30% po zapremini. Došli su do zaključka da se zapremninska masa betona smanjuje sa povećanjem sadržaja gume u betonu u iznosu od 4 do 13%. Takođe, konstatovali su da se sa povećanjem sadržaja gume u betonu značajno povećava i sadržaj uvučenog vazduha u svežem betonu. Poređenja radi sadržaj uvučenog vazduha kod etalon betona je bio 3,1%, dok je kod betona sa 10%, 20% i 30% reciklirane gume sadržaj uvučenog vazduha iznosio 3,5%, 5,2% i 7,2%, respektivno.

Dodatak gume u svežoj betonskoj mešavini smanjuje i obradljivost, posebno kada se radi o većem sadržaju (>30% na ukupnu zapreminu agregata) [146, 147]. U istraživanju [139] se primetilo da betonske mešavine u kojima je izvršena delimična zamena rečnog sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom zahtevaju veću količinu superplastifikatora kako bi se postigla projektovana konzistencija (90 – 110 mm). Cairns i saradnici [147] su koristili gumeni agregat u vidu traka maksimalne dužine 20 mm za dobijanje betona sa prihvatljivom ugradljivošću i obradljivošću i sa malim sadržajem gume. Konstatovali su smanjenu obradljivost betona sa većim sadržajem gumenog agregata, budući da je sadržaj gume u iznosu od 50% doveo do vrednosti sleganja nula. Guneyisi i saradnici [142] istraživali su betone koji sadrže silikatnu prašinu, granulisanu gumu i gumene opiljke i konstatovali da sa povećanjem sadržaja gume sleganje opada, budući da je pri sadržaju gume od 50% beton postao neobradljiv. Albano i saradnici [148] su menjali sitan agregat sa 5% i 10% komadićima gumenog otpada (veličina čestice 0,29 – 0,59 mm) i prijavili pad sleganja za 88%. Bignozzi i Sandrolini [149] su koristili gumene ljuspe (0,5 – 2,0 mm) i gumene granule (0,05 – 0,7 mm) prilikom zamene 22,2% i 33,3% sitnog agregata u samouradujućem betonu i konstatovali da gumene čestice značajno ne utiču na obradljivost ako se poveća doza superplastifikatora.

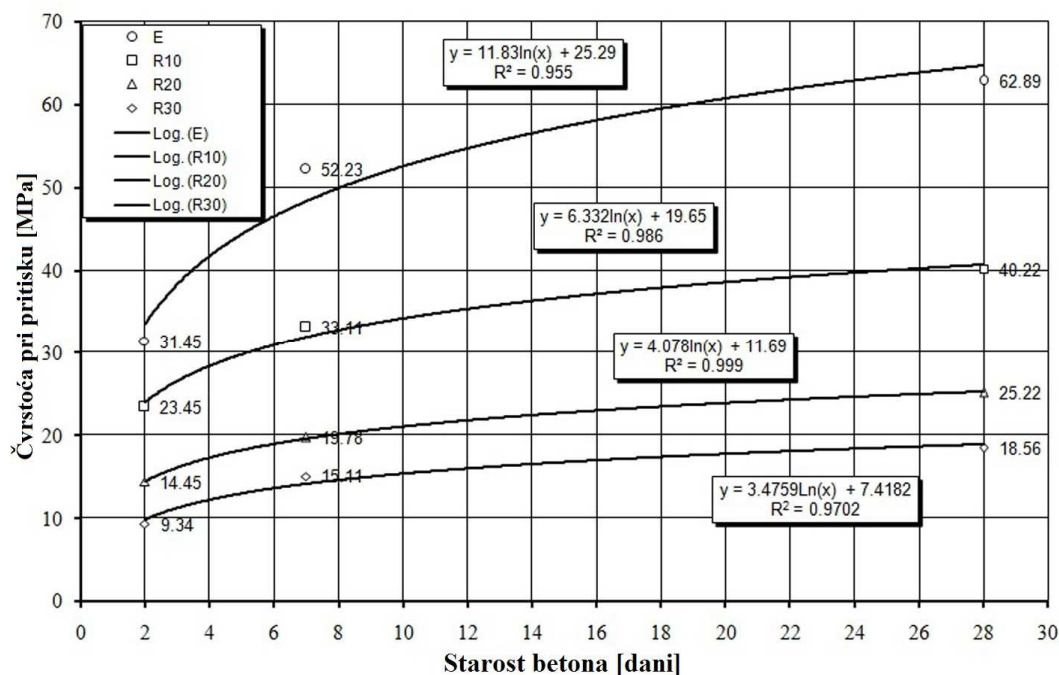
Zamena agregata recikliranom gumom utiče na smanjenje čvrstoće pri pritisku i krutosti kompozita, što je i očekivano s obzirom na fizičke i mehaničke karakteristike gume u odnosu na kameni agregat [150]. Poznato je da se usled pritisnog dejstva u betonu razvijaju zatezna naprezanja koja su u slučaju kompozita s dodatkom gume lokalizovana oko samih gumenih čestica. Nastala naprezanja uzrokuju razvoj mikropukotina koje se dalje šire cementnom matricom dok ne naiđu na sledeću gumenu česticu. Autor disertacije i saradnici [139] izvršili su istraživanje otpornosti na hidro-abraziju i mehanička svojstva betona sa delimičnom zamenom rečnog sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom u iznosu 10%, 20% i 30% po zapremini. Karakteristike očvrslog betona ispitivanih u ovom istraživanju prikazane su u tabeli 3.3. Etalon beton označen je sa „E“, beton sa 10% gume „R10“ i betoni sa 20% i 30% gume označeni su „R20“ i „R30“. Može se reći da je potpuno logično smanjenje zapremninske mase očvrslog betona uporedo s povećanjem udela gumenog



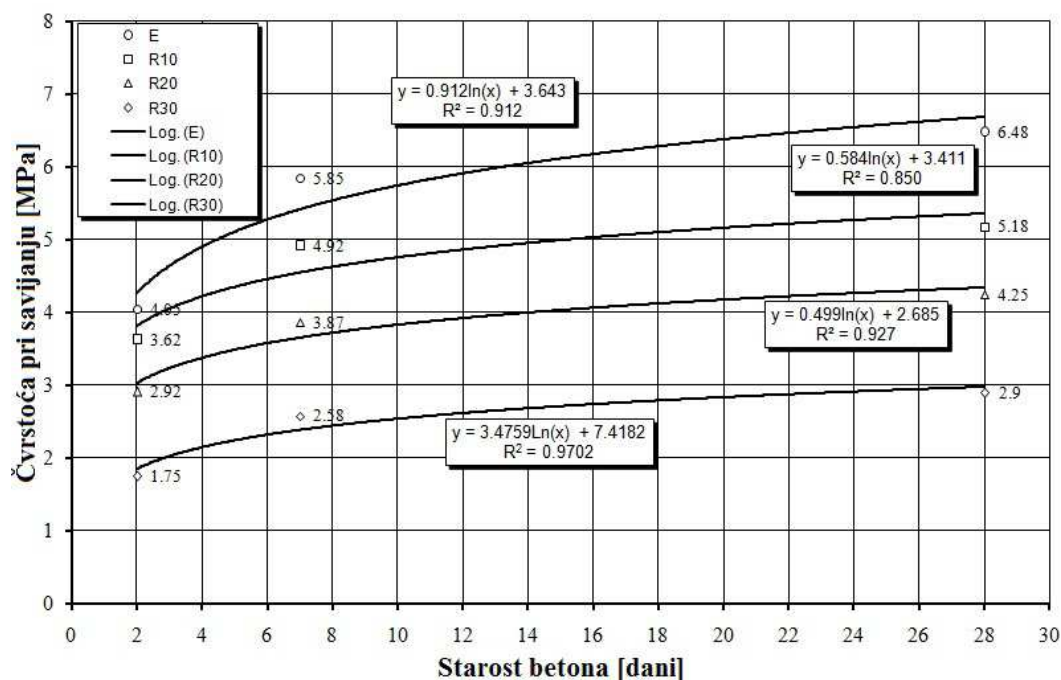
granulata, koje je istog reda veličine kao i kod svežeg betona, što je ujedno uticalo i na vrednosti čvrstoće pri pritisku. Vrednosti čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju betona sa recikliranom gumom bitno se smanjuju uporedo sa porastom količine gumenog granulata, nezavisno od starosti betonskih uzoraka. Pri starosti od 28 dana, smanjenje čvrstoće pri pritisku kod uzoraka sa 10 % reciklirane gume iznosi 36% u poređenju sa referentnim betonom, dok smanjenje čvrstoće pri pritisku uzoraka sa 20% i 30% reciklirane gume iznosi 60% u prvom slučaju i 70% u drugom. Smanjenje čvrstoće pri savijanju ispitano na uzorcima starosti od 28 dana iznosi 20%, 34% i 55% za uzorke sa 10%, 20% i 30% reciklirane gume. Sa druge strane, sadržaj recikliranog gumenog agregata u betonu nije uticao na trend rasta čvrstoće pri pritisku, slika 3.14.

Tabela 3.3. Karakteristike betona u očvrslom stanju [139]

Karakteristika	Jedinica mere	E	R10	R20	R30
Zapreminska masa	kg/m <sup>3</sup>	2370	2260	2145	2057
Čvrstoća pri pritisku	MPa	62,89	40,22	25,22	18,56
Čvrstoća pri savijanju	MPa	6,48	5,18	4,25	2,90
Odskok sklerometra	-	48,23	44,47	38,31	34,72
Brzina ultrazučnog impulsa	m/s	4733	4479	4073	3726
Statički modul elastičnosti	GPa	32,0	26,8	17,3	14,6
Čvrstoća prionljivosti „Pull-off“	MPa	2,47	2,11	1,72	1,21



Slika 3.14. Čvrstoća pri pritisku u zavisnosti od starosti betona [139]



Slika 3.15. Čvrstoća pri savijanju u zavisnosti od starosti betona [139]

Guneyisi i saradnici [142] napominju da čvrstoće betona sa silikatnom prašinom, granulama gume i gumenih opiljaka opadaju sa povećanjem sadržaja gume. Ovi autori ukazuju da je moguće proizvesti beton sa čvrstoćom pri pritisku od 40 MPa pri zamjeni agregata gumom u iznosu od 15%. Ghaly i Cahill [151] istraživali su beton sa različitim sadržajem gume (5%, 10% i 15%) po zapremini i došli do zaključka da sa povećanjem sadržaja gume čvrstoća pri pritisku opada. Ganjian i saradnici [152] su takođe utvrdili da čvrstoća pri pritisku opada sa porastom sadržaja gume u betonu, ali da je došlo do blagog povećanja čvrstoće pri pritisku kada je 5% krupnog agregata zamjenjeno gumenim opiljcima. On ovu pojavu objašnjava bolje ostvarenim kompaktiranjem agregata u betonskoj smeši.

Guneyisi i saradnici [142] su analizirali zateznu čvrstoću betona sa silikatnom prašinom, granulama gume i gumenih opiljaka i istakli da čvrstoća pri zatezanju opada sa povećanjem sadržaja gume i da je prisustvo silikatne prašine korisno, jer je odgovorna za veći efekat popunjavanja pora. Takođe, rezultati ispitivanja su pokazala da je smanjenje čvrstoće pri zatezanju pod uticajem sadržaja gume manje u odnosu na smanjenje čvrstoće pri pritisku. Ovaj efekat se javlja kao posledica činjenice da gumene čestice sprečavaju otvaranje prslina. Ganjian i saradnici [152] napominju da je čvrstoće pri zatezanju betona sa delimičnom zamenom agregata gumenim ljuspama znatno niža nego kod betona koji sadrži prašinstu gumu. U prvom slučaju to smanjenje iznosi između 30% i 60% za zamenu agregata u iznosu od 5 – 10%. Ovakvo ponašanje betona se objašnjava slabijom vezom između cementne matrice i zrna gumenog agregata.

Analize rezultata čvrstoće prionljivosti metodom „Pull-off“ dobijenih u istraživanju [139], tabela 3.3, pokazuju da se vrednosti takve čvrstoće smanjuju uporedo sa smanjenjem sadržaja reciklirane gume u betonu. Najviša vrednost dobijena je na referentnom uzorku E, dok je čvrstoće prionljivosti metodom „Pull-off“ uzorka s 10 % reciklirane gume (R10) manja za 15% u odnosu na referentni uzorak. Čvrstoće prionljivosti metodom „Pull-off“ uzorka s 20% reciklirane gume (R20) manja je za 30%, dok je čvrstoća uzorka sa 30% reciklirane gume (R30) manja za 51 % u odnosu na referentni beton. Tokom ispitivanja čvrstoće prionljivosti metodom „Pull-off“, slom betona nastao je između cementne paste i

zrna rečnog agregata, isto kao i na kontaktu gumenog granulata i cementne paste. Osnovni razlog za smanjenje čvrstoće prionljivosti metodom „Pull-off“ kod uzoraka s dodatkom gume u odnosu na referentni beton leži u slabijoj vezi između cementne paste i gumenog granulata, u poređenju sa kvalitetom veze između cementne paste i rečnog agregata.

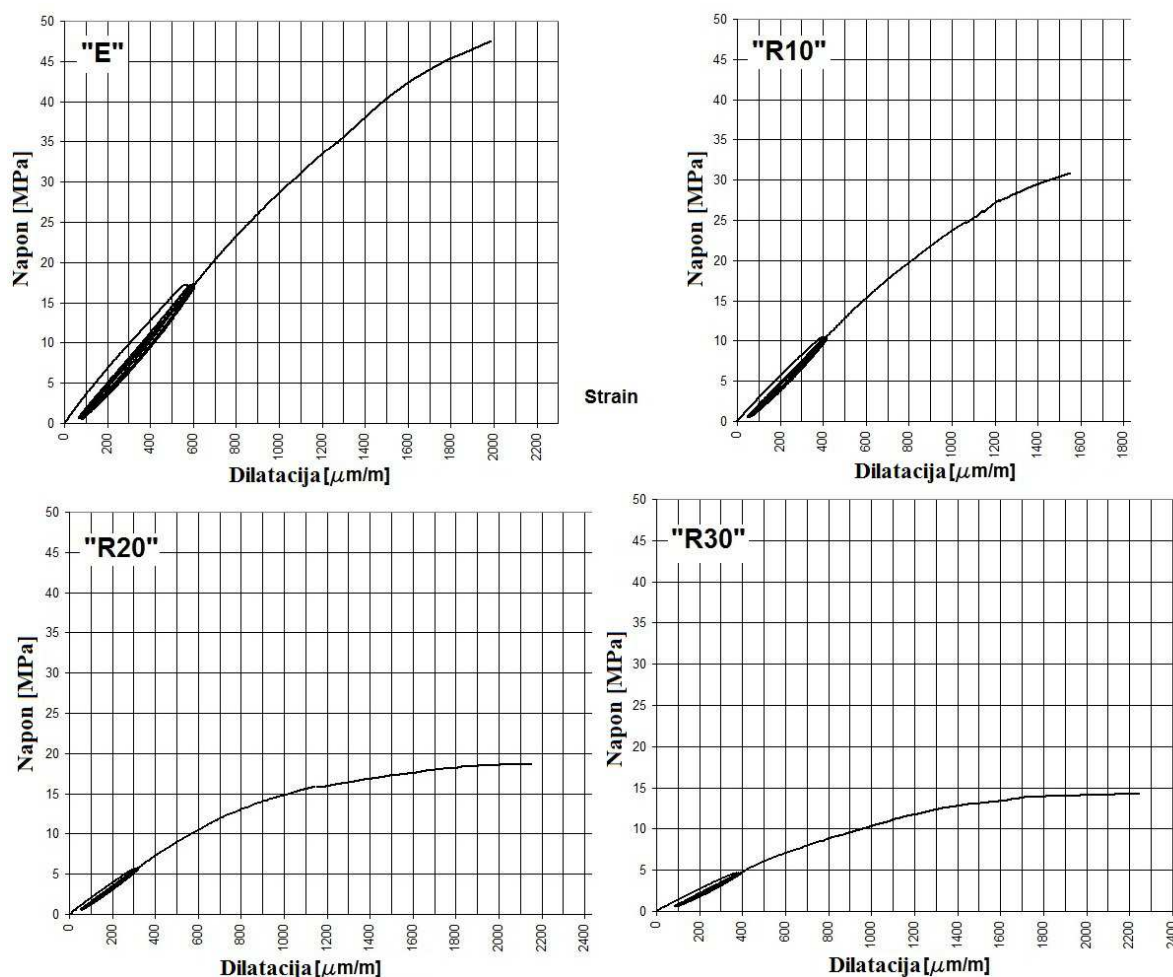
Brzine prolaska ultrazvučnih talasa kroz beton uglavnom zavisi od zapreminske mase betona. Logično je očekivati da se kod betona sa granulisanom gumom brzina prolaska ultrazvučnog talasa kroz beton biti manja u odnosu na beton bez gume. Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja [139], tabela 3.3, može se zaključiti da se brzina talasa u betonu smanjuje uporedo s povećanjem količine recikliranog gumenog agregata u betonu. Kod uzoraka betona sa 10% gumenog agregata, smanjenje brzine prolaska talasa iznosi 5% u poređenju s referentnom mešavinom, dok za betone sa 20%, tj. 30% gumenog agregata smanjenje iznosi 14% odnosno 21%. To pokazuje da su gumene granule u betonu slaba mesta, te da ne doprinose poboljšanju mehaničkih karakteristika betona, kao što to nesumnjivo pokazuju rezultati čvrstoće pri pritisku i zatezanju. Treba međutim napomenuti da se guma odlikuje sposobnošću apsorpcije zvuka, pa je to jedan od razloga manje brzine ultrazvučnih talasa kroz beton. Veći sadržaj uvučenog vazduha takođe utiče na smanjenje brzine ultrazvučnih talasa kroz beton koji sadrži gumene granule, a već je utvrđeno da se sadržaj uvučenog vazduha povećava uporedo sa povećanjem sadržaja gumenih granula u betonu. Khaloo i saradnici [153] došli su do sličnih zaključaka u svom istraživanju.

Zamena sitnog agregata gumenim granulama smanjuje termičku provodljivost betona [154]. Zamena do 30% sitnog agregata gumenim granulama smanjuje termičku provodljivost betona za više od 50% do minimuma od 0,241W/mK. Betoni sa granulisanom gumom pokazuju visok nivo apsorpcije zvuka visoke frekvencije (veće od 100Hz) u poređenju sa referentnim betonom. Koeficijent redukcije zvuka je veći za 36% kod betona sa granulisanom gumom. Ovo je idealna preporuka za izradu zvučnih barijera, a istraživanja na ovu temu radili su Serdar i saradnici [134]. Oni su za potrebe istraživanja izradili barijeru od betona koja sadrži 40% granulisanog gume. Ispitivanja su sprovedena na laboratorijskim uzorcima uz pomoć Kundtove cevi, a onda su na realnim uzorcima površine 10,0 m<sup>2</sup> sprovedena ispitivanja u zvučnoj komori. Na osnovi dobijenih rezultata, a u skladu s postojećim normama, ispitivana barijera svrstana je u razred A3 zvučne apsorpcije na osnovu jednobrojne vrednosti zvučne apsorpcije  $DL\alpha = 8,7$  dB. Osim izuzetno dobrih i konkurentnih svojstava zvučne apsorpcije, barijera ima poboljšana i ostala značajna svojstva poput otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje i vatrootpornost.

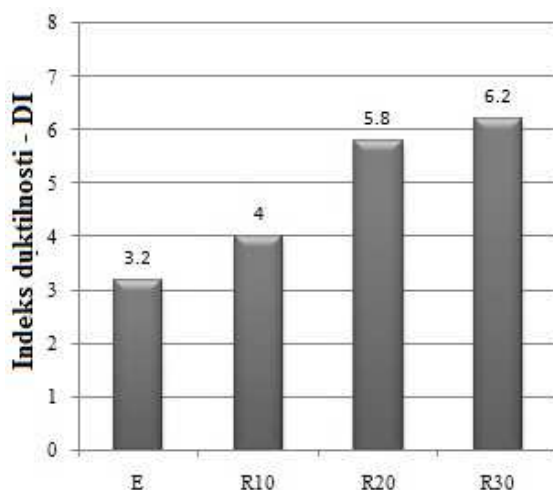
Površinska tvrdoća betona zavisi od njegove čvrstoće pri pritisku, tvrdoće cementne matrice i agregata. Rezultati ispitivanja istraživanja [139], tabela 3.3, su pokazali da se indeks odskoka sklerometra smanjuje sa povećanjem sadržaja gumenog agregata u betonu. Indeks odskoka sklerometra za beton sa 10%, 20% i 30% gumenog granulata manji je za 8%, 21% i 28% u poređenju sa referentnim betonom. Ovde treba napomenuti da guma sadržana u očvrslom betonu donekle amortizuje udare čekića, čime utiče na smanjenu vrednost indeksa sklerometra. Mohammed i saradnici [155] dobili su slične rezultate u svom radu.

Niske vrednost modula elastičnosti gume, 25 do 25000 puta niža u odnosu na agregat, omogućava značajnu deformaciju gume u poređenju sa uobičajeno korišćenim agregatom [156]. Sposobnost deformacije pri pritiscima bez otkazivanja utiče da se guma ponaša kao opruga u kompozitu i na taj način usporava dalji razvoj pukotina i potpunu dezintegraciju kompozita. Kompoziti sa gumom u poređenju sa običnim betonom ostvaruju duktilni lom zahvaljujući sposobnosti takvog kompozita da apsorbuje znatnu količinu energije usled plastičnog deformisanja, a istovremeno imaju i povećanu žilavost [150].

U istraživanju [139] ispitivan je statički modul elastičnosti betona sa različitim sadržajem gume. Na osnovu rezultata ispitivanja, tabela 3.3, zaključuje se da sa povećanjem sadržaja gume u betonu vrednost statičkog modula elastičnosti opada. Upoređivanjem dijagrama koji su prikazani na slici 3.16. može se zaključiti da nelinearnost između napona i deformacija raste pri višim stepenima opterećenja uporedo sa povećanjem količine gumenog materijala, pri čemu su izuzetak smanjenje čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti. To dovodi do povećanja duktilnosti ispitivanog betona, što je povoljno svojstvo u smislu ponašanja konstrukcije (naročito u slučaju aseizmičkih građevina) [153]. Indeks duktilnosti (DI) izračunat prema jednačini  $DI = \varepsilon_u / \varepsilon_e$  na osnovu odnosa deformacije pri slomu i vrednosti u elastičnoj zoni, pri 1/3 čvrstoće pi pritisku, prikazan je na slici 3.17. Kada je količina gume veća od 20%, tada vrednost deformacije prelazi 2%. Pad krive je lako uočljiv u elastičnom području kada količina gume iznosi više od 10%. Statički modul elastičnosti betona sa 10% recikliranog gumenog granulata manji je za 16 % u poređenju sa referentnim betonom, dok je statički modul elastičnosti niži za 46% i 54% za beton sa 20%, odnosno 30% gumenog materijala u poređenju sa referentnim betonom.



Slika 3.16. Dijagrami napon – deformacija pri ispitivanju statičkog modula elastičnosti betona [139]



Slika 3.17. Indeks duktilnosti – DI [139]

Mnoga istraživanja su potvrdila činjenicu da se sa povećanjem sadržaja gume u betonu vrednost statičkog modula elastičnosti smanjuje, odnosno da se smanjenjem čvrstoće pri pritisku betona smanjuje i statički modul elastičnosti. Međutim, Skripkiunas i saradnici [157] su upoređivali betone sa sličnim vrednostima čvrstoće pri pritisku (jedan referentni beton, drugi sa 3,3% sadržaja granulisanе gume) i dobili različite vrednosti statičkog modula elastičnosti, 33,2 GPa u odnosu na 29,6 GPa, što je značilo da referentni beton ima za 11% veću vrednost statičkog modula elastičnosti u odnosu na beton sa gumom. Objašnjenje za ovo leži u niskoj vrednosti modula elastičnosti gumenog agregata. Drugi autori [158] izveštavaju da se modul elastičnosti betona sa sadržajem gumenog granulata smanjuje za 40% kada se i čvrstoća pri pritisku smanji za istu vrednost. Khaloo i saradnici [153] potvrđuju da se prisustvo gume u betonu doprinosi povećanju duktilnosti betona. Zheng i saradnici [159-160] napominju da gumene granule (80% granula manja od 2,62 mm) imaju manji uticaj na modul elastičnosti betona u odnosu na krupne komade gume (15 – 40 mm).

Betonski kompoziti koji sadrže otpadnu gumu poznati su po svojoj velikoj žilavosti, odnosno otpornosti apsorpcije velike količine energije [161]. Neki autori [162] su prijavili povećanje od 63,2% stepena prigušenja (sopstveni kapacitet smanjenja amplitude slobodnih vibracija) za beton koji sadrži 20% gumenih čestica. Drugi autori [159-160] su potvrdili visoki potencijal prigušenja betona sa otpadnom gumom. Oni napominju da beton sa zemljanom gumom pokazuje 75,3% povećanja stepena prigušenja, dok je to povećanje kod betona sa granulisanom gumom 144%. Ling i saradnici [163] su istraživali performanse betonskog kolovoza sa gumenim granulama i zaključili da on ima veliku žilavost zbog visokog kapaciteta apsorpcije energije. Ovu osobinu betona sa recikliranom gumom potvrdili su Serdar i saradnici [134] u istraživanju betona sa dodatkom reciklirane gume za izradu betonskih pragova.

Sposobnost gume da odbija vodu, usled hidrofobnosti površine i posledičnog uvlačenja dodatne količine vazduha u mešavinu, osigurava veću količinu zatvorenih pora u strukturi kompozita koje nisu dostupne vodi [144-145]. Upravo zato takvi kompoziti imaju smanjenu sposobnost upijanja vode kapilarnim putem. Apsorbovana voda, usled hidrofobnosti gume, svoj put pronalazi zaobilazeći gumu kako bi dalje napredovala i time se usporava proces prodiranja vode u strukturu materijala. Smanjeno kapilarno upijanje osigurava veću trajnost kompozita i smanjenu verovatnoću korozije armature, posebno zbog prodora hlorida, pa takva vrsta materijala postaje zanimljiva za upotrebu u agresivnom morskom okruženju [150]. Povećana otpornost betona na prodor hlorida može se postići i povećanim sadržaja gume u kompozitu [164], ali i primenom mineralnih dodatka poput

silikatne prašine, posebno kada se radi o malom sadržaju gume (5 % na ukupnu zapreminu agregata, 0,1 – 3 mm) [165]. Uprkos smanjenom kapilarnom upijanju, prisustvo gumenih čestica utiče na povećani prodor vode pod pritiskom [132]. To je posledica slabijeg kvaliteta veze između gume i cementne matrice, ali i fizičkih karakteristika gume, jer se zbog delovanja vode pod pritiskom guma "stišće" i na taj način dopušta prodor vode pod pritiskom [132].

Sa obzirom da dodatak gume betonu smanjuje čvrstoću pri pritisku i zatezanju, logično je bilo očekivati da i trajnost betona opada sa povećanjem sadržaja gumenog otpada. Sukontasukkul i Chaikaew [143] napominju da betonski blokovi sa gumom pokazuju manju abrazivnu otpornost, kao i da se sa povećanjem sadržaja gume povećava habanje betona. Njihovi rezultati su potvrđeni od strane drugih istraživača [163]. Ling i saradnici [166] su ispitivali 348 betonskih blokova za popločavanje sa dodatkom gume i došli do zaključka da se sa povećanjem sadržaja gume otpornost prema habanju smanjuje. Freitas i saradnici [167] su ispitivali abraziju betona sa dodatkom gume pod vodom i zaključili da je kod betona sa 5% zamene krupnog agregata recikliranom gumom po masi manje habanje nego kod etalona. Ovaj rezultat je prilično zanimljiv iz razloga što se čvrstoća pri pritisku kod ovog betona smanjila za 30%. Međutim, čvrstoća pri zatezanju cepanjem (Brazilski test) se smanjila za 11% što pomaže u razumevanju veće otpornosti prema habanju. Autori su ovaj beton koristili prilikom sanacije objekata hidroelektrane.

Autor disertacije je sa saradnicima [139] ispitivao hidro-abrazivnu otpornost betona u kojima je izvršena delimična zamena rečnog sitnog agregata recikliranom gumom granulacije 0,5 – 4 mm u iznosu od 10, 20 i 30% po zapremini. Ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti vršeno je na uređaju koji omogućuje da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom udara o betonsku ispitnu ploču. Rezultati ispitivanja otpornosti betona na hidro-abrazivno dejstvo dati su u tabeli 3.4. Etalon beton označen je „E“, beton sa 10% gume „R10“ i betoni sa 20% i 30% gume označeni su „R20“ i „R30“. Stepen hidro-abrazivne otpornosti betona po masi računa se kao:

$$E_{R,m} = \frac{\Delta m}{t} = \frac{m_1 - m_2}{t} \text{ [g/min]},$$

gde je:

$m_1$  i  $m_2$  - masa ispitnog uzorka osušenog do konstantne mase pre odnosno posle dejstva mešavine vode i peska,

$t$  - vreme delovanja mešavine na ispitni uzorak ( $t=120 \text{ min}$ ).

dok se stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini računa po formuli:

$$E_{R,V} = \frac{\Delta V}{t} = \frac{m_1 - m_2}{t} \frac{\gamma_{ocv.bet}}{\rho} \text{ [cm}^3\text{/min]},$$

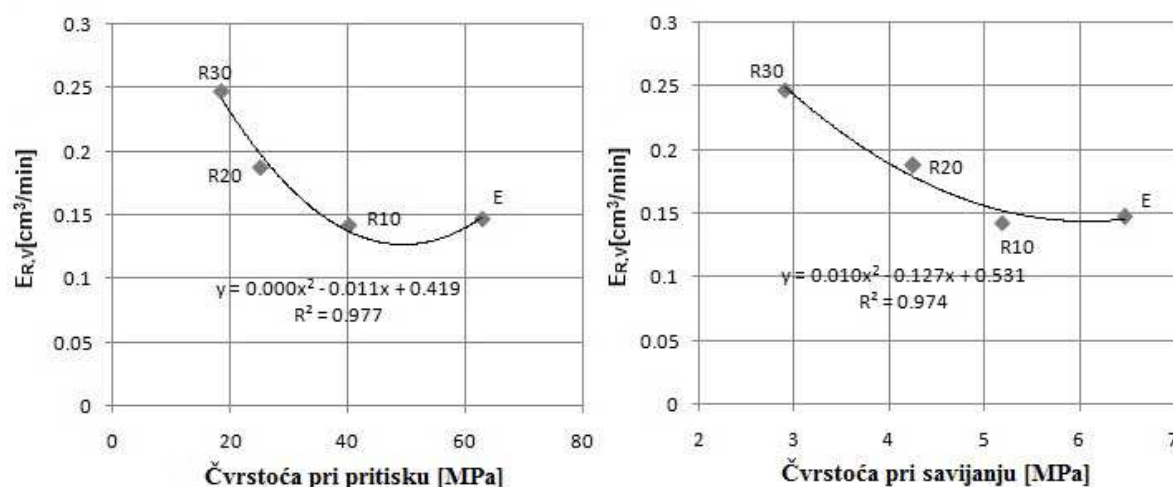
gde je:

$\gamma_{ocv.bet}$  - zapreminska masa uzorka betona osušenog do konstantne mase u  $\text{g/cm}^3$ .

Tabela 3.4. Gubitak mase i zapremine uzoraka i stepen hidro-abrazivne otpornosti [139]

Oznaka uzorka	Gubitak mase $\Delta m$ [g]	$E_{R,m}$ [g/min]	$\gamma_{ocv,bet}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Gubitak zapremine $\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	$E_{R,V}$ [cm <sup>3</sup> /min]
E	41,4	0,3450	2,340	17,69	0,1474
R10	36,5	0,3042	2,135	17,10	0,1425
R20	45,6	0,3800	2,025	22,52	0,1877
R30	57,7	0,4808	1,945	29,67	0,2473

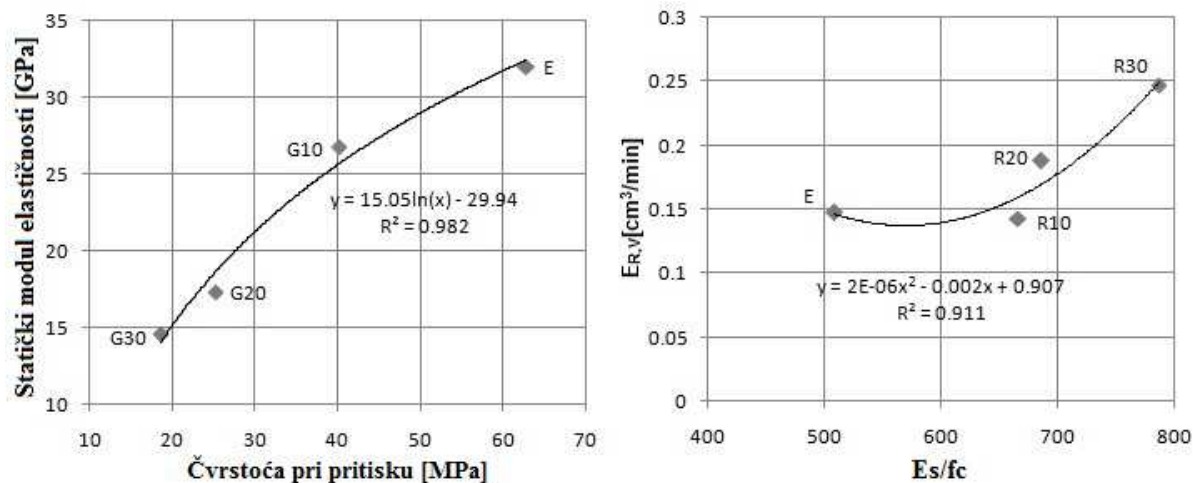
Analiza napredovanja oštećenja po zapremini pokazuje da je beton sa 10% zamene rečnog agregata recikliranim gumenim granulatom bolji od referentnog betona, bez obzira na činjenicu da su mu vrednosti pritise i savojne čvrstoće niže nego kod referentnog betona. Kako se na istom uzorku ne može ispitati nekoliko karakteristika betona, uzajamni odnos između otpornosti betona na hidro-abraziju i ostalih svojstava betona može se odrediti samo na bazi srednje vrednosti rezultata ispitivanja. Na dijagramu na kojem se pokazuje zavisnost između hidro-abrazivne erozije po zapremini i čvrstoće pri pritisku, odnosno čvrstoće pri savijanju, slika 3.18, može se uočiti da beton koji sadrži manje od 10% recikliranog gumenog agregata ima veću otpornost na abraziju nego beton koji sadrži više od 10 % gume, ali i u odnosu na običan beton bez gume. Korelacijska kriva dobijena na bazi rezultata ovog istraživanja pokazuje da beton ima najveću otpornost na hidro-abraziju u području između "E" i "R 10", ali bi se to ipak trebalo potvrditi dodatnim istraživanjima.



Slika 3.18. Zavisnost između čvrstoće pri pritisku (levo) i čvrstoće pri savijanju (desno) i stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini [139]

Ustanovljena je vrlo dobra korelacija između pritise čvrstoće uzoraka nakon 28 dana i statičkog modula elastičnosti određenog takođe nakon 28 dana, slika 3.19 levo. Statički modul elastičnosti smanjuje se sa smanjenjem čvrstoće pri pritisku betona, kao posledica povećanja sadržaja gumenog granulata u betonu. Postignuta je vrlo dobra podudarnost između odnosa statičkog modula elastičnosti i pritise čvrstoće ( $E_s/f_c$ ), sa jedne strane, i vrednosti  $E_{R,V}$  sa druge, slika 3.19 desno. Taj odnos pokazuje da je beton otporniji na hidro-abrazivno delovanje, tj. da će vrednost  $E_{R,V}$  biti manja ako se poveća odnos  $E_s/f_c$ , ali samo ako sadržaj recikliranog gumenog granulata ne bude veći od 10%. Beton sa većim odnosom  $E_s/f_c$  pokazuje tendenciju ka elastičnoj deformaciji kada čvrste čestice nošene

vodom abrazivno deluju na površinu betona, pa je stoga gubitak mase betona manji [68]. Trebalo bi se sprovesti dodatna istraživanja da bi se ova pojava detaljnije objasnila, tj. da bi se razvio beton trajno otporan na hidro-abrazivno delovanje.

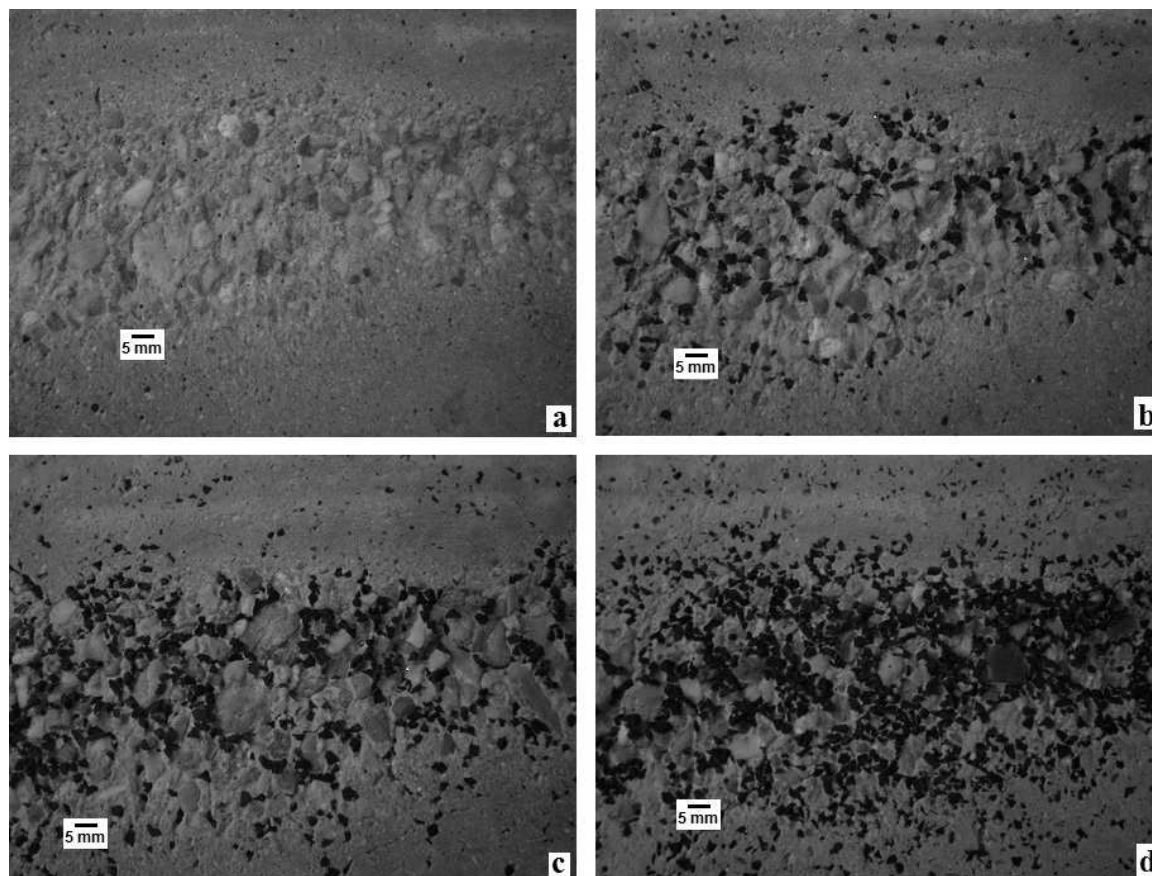


Slika 3.19. Zavisnost između čvrstoće pri pritisku i statičkog modula elastičnosti (levo) i odnosa statičkog modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku i stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini (desno) [139]

Međutim, kada je sadržaj gume veći od 10%, odnos  $E_s/f_c$  takođe raste, tj. površina betona postaje elastičnija, s tim da se smanjuje otpornost na hidro-abrazivno delovanje. U tom slučaju, beton može apsorbirati veću količinu energije prisutne usled delovanja krutih čestica nošenih vodom, ali je istovremeno zbog nekvalitetne veze potrebno manje energije za erodiranje površine betona. Razlog tome je činjenica da veza između cementa i agregata slabi pri većoj koncentraciji gumenog granulata, što se vidi iz rezultata prionjivosti dobijenih metodom ispitivanja čvrstoće metodom Pull-off, tabela 3.3. Prethodno je već navedeno da je kvalitet veze između granula gume i cementne matrice slabija u odnosu na kvalitet veze između cementne matrice i kamenog agregata što se povezuje sa karakteristikama površine gume.

Nakon ispitivanja otpornosti betona na hidro-abraziju, površina referentnog betona imala je manje nepravilnosti u odnosu na uzorke sa recikliranom gumom, s obzirom da je zbog neadekvatnog kvaliteta veze tokom ispitivanja došlo do odvajanja i ispadanja površinskih zrna agregata i gumenih granula iz betona. Izgled površina betonskih uzoraka nakon hidro-abrazivnog delovanja prikazan je na slici 3.20.





Slika 3.20. Izgled površine uzoraka betona nakon ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti: a) etalon beton, b) beton sa 10%, c) 20% i d) 30% reciklirane granulirane gume [139]

### 3.4. Polipropilenska i čelična vlakna

Generalno, mikroarmirani betoni i malteri predstavljaju kompozitne materijale dobijene ojačanjem cementne matrice pomoću ravnomerno raspoređenih - dispergovanih vlakana. S obzirom na već istaknutu činjenicu da beton slabije prima napone zatezanja, ima malu žilavost i izraženu deformabilnost usled skupljanja i tečenja, bilo je sasvim logično višedecenijsko nastojanje graditelja da pomenuta svojstva na neki način poboljšaju. Sa pozicija današnjeg stepena tehnološkog razvoja, rešenje ovog problema čini se mnogo jednostavnijim: dodavanjem određene, optimalne količine vlakana organskog ili neorganskog porekla u svežu mešavinu maltera ili betona, dobiće se kompozit sa povećanom trajnošću i unapređenim fizičko-mehaničkim svojstvima, kao što su na primer: čvrstoća (pri pritisku, zatezanju, savijanju ili smicanju), kontrola prslina, otpornost na različite uticaje (skupljanje, tečenje, ekspanzija, udar, abrazija, temperaturne promene, dejstvo mraza, požar, zamor, itd).

Mogućnosti upotrebe mikroarmiranih kompozita su široke. Neka najvažnija područja primene su: kod kolovoznih ploča i aerodromskih pista; kod izgradnje tunela i osiguranja podzemnih konstrukcija torkretiranjem; za cementne košuljice; za industrijske i druge vrste podova; za izradu sefova i trezora; kod dinamičkih opterećenih temelja mašina; kod prefabrikovanih betonskih elemenata (ploče, cevi, stubovi, železnički pragovi i dr.); za ljuske, rezervoare i silose; kod hidrotehničkih konstrukcija (brane, prelive, akvadukti, kanali i dr.); u oblasti stabilizacije tla; za različite sanacione radove; za izradu kontejnera za odlaganje radioaktivnog i hemijskog otpada; kod vojnih objekata (skloništa, rezervoari, magacini), itd.

### 3.4.1. Vrste vlakana

Osnovna podela mikroarmature izvršena je prema vrsti vlakana i poreklu materijala od kojeg su ona napravljena. U tom smislu, kao najšira mogla bi se dati podela na vlakna veštačkog i na vlakna prirodnog porekla. Vlakna veštačkog porekla mogu se, prema vrsti materijala od kog se proizvode, dalje podeliti u tri velike grupe:

1. čelična vlakna (od običnog ili nerđajućeg čelika);
2. polimerna vlakna (polipropilenska, polietilenska, najlonska, karbonska i dr.);
3. mineralna vlakna (staklena, azbestna, bazaltna i dr.).

Kao najvažnije vrste vlakana prirodnog porekla mogu se navesti: celulozna, pamučna, jutana i vlakna od konoplje.

#### *Čelična vlakna*

Postoji više vrsta čeličnih vlakana. Najčešće se upotrebljavaju vlakna sa oblicima prikazanim na slici 3.21. Potreba za korišćenjem posebnih oblika vlakana proistekla je iz zahteva njihovog dobrog sidrenja u betonskoj matrici, odnosno iz razloga prionljivosti između vlakana i betona, koja je neophodna za njihov zajednički rad. Ovo naročito dolazi do izražaja pri skupljanju i pojavi prslina, kada putem prionljivosti dolazi do prenosa naprezanja sa betonske matrice na vlakna i obratno. Proizvodnja pravih čeličnih vlakana je najjednostavnija, ali je kod njih efekat sidrenja najslabiji.



*Slika 3.21. Različiti tipovi čeličnih vlakana*

Čelična vlakna se najčešće proizvode putem tri procesa: sečenjem hladno vučene žice, rezanjem čeličnih ploča i "vučenjem" vlakana iz rastopljenog čelika. U eksperimentima su najčešće korišćena vlakna proizvedena od čelične žice zatezne čvrstoće 295 do 2367 N/mm<sup>2</sup>. Vlakna sa deformisanim krajevima imaju visoku otpornost na "izvlačenje" i mogu biti upotrebljena u manjim količinama u odnosu na prava vlakna, uz ostvarivanje istih fizičko-mehaničkih svojstava kompozita.

Vlakna koja se upotrebljavaju za normalne betone proizvode se od niskougljeničnog čelika, a za betone sa zahtevom otpornosti na visoke temperature (do 1595°C) upotrebljavaju se vlakna od nerđajuće žice. Za niže temperature (do 537°C), upotrebljavana su i vlakna od visokougljeničnih čeličnih žica.

U opisu vlakana koristi se parametar "faktor oblika" koji predstavlja količnik dužine  $l$  i prečnika vlakna  $d$ . Ovaj količnik je jedan od bitnih parametara koji utiče na pripremu, ugrađivanje, reološka svojstva svežeg betona i na svojstva očvrslog betona. Najprikladnije vrednosti faktora oblika iznose 50 do 100, dok šire upotrebljavano područje iznosi od 30 do 150. Prečnik čeličnih vlakana sa okruglim poprečnim presekom iznosi obično 0,25 do 0,76 mm, a ako je u pitanju pravougaoni presek, tada se dimenzije kreću u sledećim okvirima: debljina 0,15 do 0,41 mm, širina 0,25 do 0,90 mm. Što je manji faktor oblika, vlakna se lakše mešaju i raspoređuju u svežoj betonskoj matrici, ali je njihov uticaj na svojstva očvrslog betona manji od vlakana sa većim faktorom oblika. Vlakna sa većim faktorom oblika proizvode veće probleme pri mešanju, a ponekad se pri mešanju stvaraju i gnezda od vlakana.

Najčešće korišćena dozaža čeličnih vlakana je između 0,25 i 2,0% (zapreminski procenat koji se odnosi na ukupnu zapreminu betona). Čelična vlakna su po pravilu patentirani fabrički proizvodi koji nose posebna imena: "Dramix", "Harex", "ZP" i dr.

### ***Polipropilenska vlakna***

Mada se i danas u oblasti građevinske tehnike čelična vlakna najviše primenjuju, sve je izraženiji razvoj i upotreba drugih vrsta prirodnih i veštačkih vlakana. Veliku grupu veštačkih materijala koji se koriste u ove svrhe čine sintetički materijali tipa polimera. Primena vlakana na bazi polimera kao dodatka malterima i betonima datira s kraja 60-tih i početka 70-tih godina XX veka. Prednosti ovih vlakana u odnosu na čelična ogledaju se, pre svega, u značajnom smanjenju dilatacija skupljanja, redukciji izdvajanja vode na površini betona, odnosno maltera, lakšoj ugradljivosti i obradljivosti svežih mešavina i nižoj ceni. S druge strane, čelična vlakna imaju znatno bolje mehaničke karakteristike, a naročito modul elastičnosti, u poređenju sa većinom vrsta sintetičkih vlakana.

Iako je koncept korišćenja vlakana na bazi polimera isproban prvi put sredinom 1960-tih, masovnija primena ovih vlakana počela je tek u kasnim 1970-tim. Danas se polimerna (sintetička) vlakna koriste sve više, a raste i broj različitih mogućnosti za njihovu primenu. Karakteristična za ovaj tip mikroarmature je srazmerno mala količina vlakana u jedinici zapremine svežeg maltera ili betona, reda veličine oko 0,1%. To je znatno manje u odnosu na čelična vlakna, kod kojih je ova veličina u proseku bar 5 ili 10 puta veća.

Na početku, osnovna namena sintetičkih vlakana bila je vezana za smanjenje komponente plastičnog skupljanja, odnosno za kontrolu veličine i broja prslina koje nastaju u ranim fazama vezivanja cementa (tj. u prvih nekoliko časova nakon spravljanja svežeg maltera ili betona). Kasnije su brojna izvršena ispitivanja pokazala efikasnost ovih vlakana i u oblasti redukovanja hidrauličkog skupljanja, kao takođe veoma značajne komponente predmetnih reoloških deformacija.

Kada govorimo o sintetičkim vlaknima, najčešće se misli na polipropilenska ili polietilenska vlakna, mada su danas u širokoj upotrebi i mnogi drugi tipovi polimera, nastalih pre svega tokom ubrzanog razvoja petrohemijske i tekstilne industrije, kao što su: najlon, poliester, polivinilalkohol, aramid, poliamid, poliakrilnitril i dr. Na slici 3.22 prikazani su neki tipovi sintetičkih - u konkretnom slučaju polipropilenskih vlakana.

Takođe, primena karbonskih vlakana (koja takođe spadaju u grupu sintetičkih vlakana), doživela je naglu ekspanziju nakon pronalaska postupka dobijanja ovog materijala

iz nafte, što je višestruko snizilo proizvodne troškove. Ova vlakna privukla su naročitu pažnju stručnjaka zbog svojih visokih mehaničkih karakteristika (pre svega čvrstoće i modula elastičnosti) u odnosu na većinu drugih sintetičkih vlakana. Iako su mogućnosti primene karbonskih vlakana još uvek nedovoljno istražene, treba istaći činjenicu da su ona već uspešno korišćena, na primer u oblasti prefabrikacije betonskih fasadnih panela i zidnih platna ugrađenih u veći broj objekata u Japanu [168].



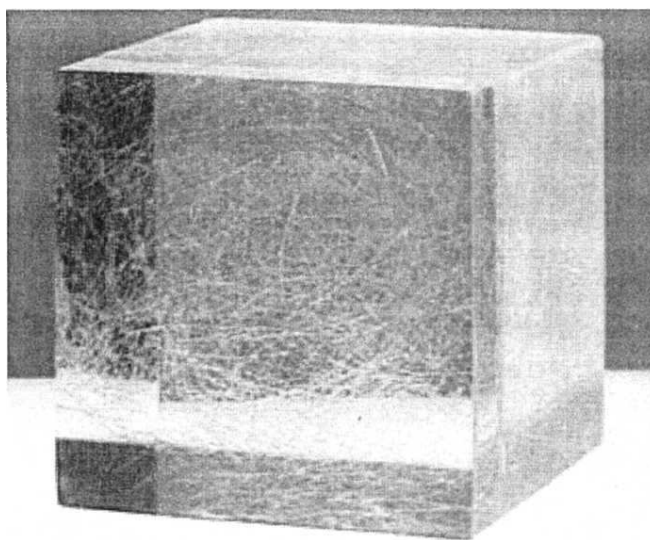
Slika 3.22. Različite vrste polipropilenskih vlakana

Kod polipropilenskih i drugih vrsta polimernih vlakana uobičajena su tri tipa mikroarmiranja: pomoću pojedinačnih (tzv. "monofilamentnih"), pomoću međusobno spojenih (tzv. "fibriliranih") vlakana ili pomoću trodimenzionalno prepletenih vlakana. Za razliku od čeličnih vlakana spojenih u pakete, fibrilirana polimerna vlakna se u toku mešanja ne razdvajaju, već se raspoređuju u vidu svojevrsnih mrežica i na taj način armiraju cementnu matricu. Pored mikroarmature u vidu monofilamentnih ili fibriliranih vlakana, sintetički materijali se ponekad primenjuju i u obliku tkanina, traka, filmova, voala ili mreža za ojačanje maltera, odnosno betona.

Polipropilen ima malu specifičnu masu i hemijski je inertan. Ima hidrofobnu površinu i ne apsorbuje vodu. Slaba strana ovih vlakana je nizak modul elastičnosti, slaba prionljivost za cementnu matricu, zapaljivost i niska tačka topljenja. Poprečni presek fibriliranih, kao i monofilamentnih polipropilenskih vlakana iznosi 0,08 do 0,38 mm. Dužina vlakana je najčešće od 5 do 60 mm.

Pri spravljanju mikroarmiranih maltera i betona polipropilenska vlakna se doziraju u količini od 0,1 do 0,6 zapreminskih procenata. Njihova prionljivost za cementnu matricu se obezbeđuje uvijanjem više vlakana zajedno, ili obradom površine vlakana. Mikroarmirani betoni sa ovakvim vlaknima nemaju zadovoljavajuće karakteristike pri dugotrajnim temperaturnim opterećenjima.

Što se tiče sintetičkih vlakana, ona se mogu razlikovati i prema tome da li su u procesu proizvodnje na neki način površinski obrađivana ili ne. Površinska obrada ovih vlakana podrazumeva, na primer, njihovo premazivanje različitim materijama ili mehaničku obradu ("orebravanje") u cilju poboljšanja athezije sa cementnom matricom, zatim njihovo naelektrisavanje površinskim statičkim elektricitetom radi efikasnijeg dispergovanja tokom mešanja, i sl. Kao ilustracija pojmova uniformnog rasporeda i pravilnog dispergovanja vlakana u okviru vezivne matrice može da posluži slika 3.23.



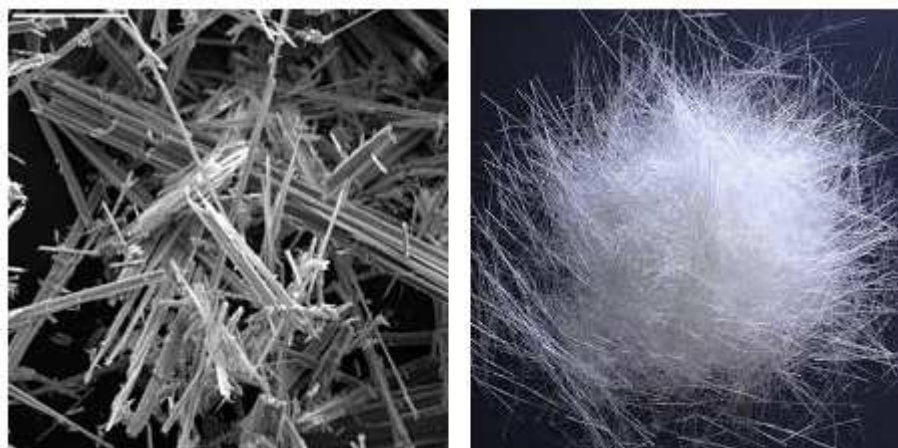
Slika 3.23. Raspored monofilamentnih polipropilenskih vlakana u okviru matrice

Kao najnovija generacija sintetičkih vlakana, poslednjih godina su se pojavila "mešana" vlakna (*Polymer Blend*) visoke čvrstoće, kod kojih se kombinovanjem dve vrste polimera (na primer polipropilena i polietilena) dobijaju vlakna poboljšanih mehaničkih i deformacionih svojstava. Pojava ovih vlakana dovela je i do najnovije podele sintetičkih vlakana na tzv. mikro vlakna i makro vlakna. Tako na primer, "mešana" polipropilensko/polietilenska makro sintetička vlakna postoje samo u monofilamentnoj verziji, njihova dužina kreće se između 35 i 50 mm (kod mikro vlakana ova vrednost je obično manja od 20 mm), a faktor oblika varira između 85 i 100. S obzirom na osnovnu ideju da predmetna makro sintetička vlakna budu zamena za čelična vlakna (kod određenih tipova aplikacija), njihova čvrstoća pri zatezanju je generalno veća od 600 MPa, a modul elastičnosti se kreće od 10 GPa pa naviše.

### ***Mineralna vlakna***

U poslednjih dvadesetak godina, u oblasti mikroarmiranja betona i maltera sve je šira primena vlakana mineralnog porekla, od kojih su svakako najznačajnija staklena vlakna (istraživanja u ovoj oblasti su započela još 1950-tih u SSSR-u). I ovde se, kao osnovni problem, javlja njihova trajnost u uslovima alkalne sredine, jer je dokazano da se dugotrajnim držanjem u vlažnoj sredini znatno smanjuje kako čvrstoća, tako i duktilnost betona armiranog običnim staklenim vlaknima. Problem je uspešno rešen razvojem novih vrsta alkalno-rezistentnog stakla, kao i novih tipova aditiva za modifikovanje pH vrednosti cementne matrice. Staklena vlakna se koriste kako u betonima tako i u malterima; ako je reč o malterima, najčešće se radi o malterima koji se ugrađuju prskanjem. Ova vlakna imaju dijemetre 0,005 do 0,015 mm i mogu da budu spojena i u snopove prečnika 0,013 do 1,3 mm.

Što se upotrebe azbestnih vlakana tiče ona je, nakon početnog naglog razvoja, danas drastično smanjena, a u mnogim zemljama i praktično ukinuta. Do ovoga nije došlo zbog lošeg kvaliteta ovog materijala, već zbog njegovog štetnog delovanja na zdravlje ljudi, koje se najčešće manifestovalo u vidu pojave ozbiljne plućne bolesti nazvane azbestoza. Zbog toga je veliki broj visoko industrijalizovanih, razvijenih država sveta i zakonski sankcionisao širu upotrebu azbestnih vlakana, zajedno sa mnogim drugim azbestnim proizvodima. Odsustvo ovih vlakana izuzetno visokih mehaničkih karakteristika, koja su pre svega korišćena za mikroarmiranje tankih betonskih elemenata, kao što su ploče, platna i ljuske, još uvek nije na pravi način supstituisano. U tom smislu, poslednjih godina se čine brojni pokušaji sa različitim vrstama polimernih vlakana koja se doziraju u mnogo većim količinama od uobičajenih (5-10% zapreminski), zatim celuloznim, kao i alkalno-otpornim staklenim vlaknima. Takođe, vrše se istraživanja kompozita baziranih na tzv. "koktelima" vlakana koji se dobijaju kombinovanjem različitih tipova mikroarmature (najčešće primenljivana kombinacija zasnovana je na simultanoj upotrebi čeličnih i polipropilenskih vlakana). Jedan od načina za rešavanje ovog problema mogla bi da bude primena napred pomenutih materijala u obliku mrežaste armature ili specijalnih tkanina-tekstila, ali idealna zamena za azbestna vlakna još uvek nije pronadena. Na slici 5.24 prikazan je izgled azbestnih i staklenih vlakana.



Slika 3.24. Izgled azbestnih (levo) i staklenih vlakana (desno)

### ***Prirodna vlakna***

Brojne vrste prirodnih materijala takođe se koriste, u većoj ili manjoj meri, u obliku vlakana koja se dodaju svežem malteru, odnosno betonu. Ovde se, pre svega, mogu da ubroji drvena (celulozna) vlakna kao tehnički i komercijalno najprihvatljivija, mada se u pojedinim zemljama sveta koriste i mnogi drugi tipovi prirodno dobijene mikroarmature na bazi pamuka, slame, jute, bambusa, trske, konoplje, kokosa, itd. Najveći problem vezan za prethodno nabrojane, kao i za ostale vrste vlakana prirodnog porekla, leži u njihovoj niskoj trajnosti u uslovima alkalne sredine koja vlada unutar cementnog kamena. To znači da ova vlakna pre upotrebe moraju biti površinski pripremljena, što podrazumeva različite tehnološke postupke, kao što je na primer mineralizacija.

Kao ilustracija svega što je u prethodnom tekstu rečeno o važnijim svojstvima mikroarmature, u okviru tabele 3.5 dat je uporedni pregled osnovnih fizičko-mehaničkih, deformacionih i eksploatacionih karakteristika najčešće korišćenih tipova prirodnih i veštačkih vlakana.

Tabela 3.5. Važnija svojstva različitih tipova vlakana [169-172]

Vrsta vlakna	Specifična masa $\gamma_{sv}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri zatezanju $f_{sv}$ [MPa]	Modul elastičnosti $E_v$ [GPa]	Dilatacija pri kidanju $\varepsilon_{uk}$ [%]	Max. temperatura $T_v$ [°C]	Otpornost u alkalnoj sredini
Čelična	7,8	500-2600	200	0,5-3,5	-	otporna
Staklena (AR)	2,5-2,7	1500-3700	75	1,5-3,5	-	otporna
Azbestna	3,2-3,4	550-3500	200	0,6-3,0	-	otporna
Polipropilenska	0,9	300-750	3,5-12,0	6,0-25,0	≈160	otporna
Poliesterska	1,4	800-1100	10,0-19,0	< 5,0	≈240	neutralna
Polietilenska	0,9	20-30	0,12-0,40	300-700	≈100	neutralna
Polivinilalkohol	1,3	800-900	26,0-30,0	5,0-7,5	≈240	otporna
Akrilna	1,1-1,2	600-1000	15,0-20,0	6,0-11,0	≈150	otporna
Najlonska	1,1-1,4	700-900	5,0-13,0	16,0-20,0	≈400	neutralna
Veštačka svila	1,5	400-600	6,0-7,0	10,0-25,0	-	-
Karbonska	1,6-1,9	550-3500	30-230	1,0-2,0	3000	otporna
Celulozna	1,2-1,5	200-500	5,0-40,0	< 3,0	-	neotporna
Pamučna	1,5	400-700	4,0-5,0	3,0-10,0	-	neotporna

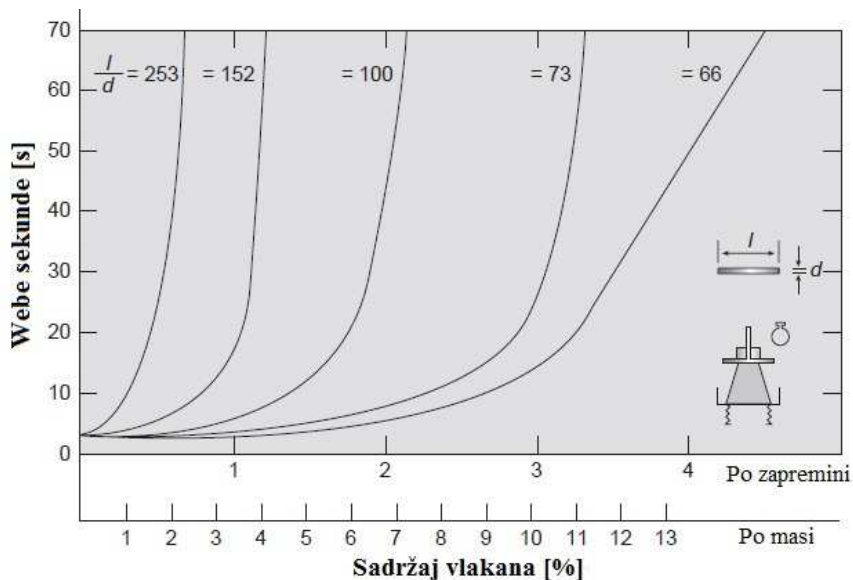
### 3.4.2. Uticaj čeličnih i polipropilenskih vlakana na performanse betona u svežem i očvrslom stanju

Fizičko-mehanička svojstva mikroarmiranih betona zavise od vrste i količine vlakana, faktora oblika vlakana, svojstava betonske matrice, kao i postupka ugrađivanja (kompaktiranja). Uopšteno govoreći, mikroarmirani beton ima poboljšana fizičko-mehanička svojstva u odnosu na beton istog sastava, ali bez vlakana. Poboljšanje se ogleda u povećanim čvrstoćama pri savijanju, smicanju, zatezanju i pritisku, u povećanoj žilavosti i apsorpciji energije, većoj izdržljivosti na dinamičke uticaje, povećanoj otpornosti na habanje i dr. Pojava i razvoj pukotina pri savijanju i zatezanju elemenata od mikroarmiranog betona su značajno redukovani u odnosu na betone bez vlakana.

Mehanizam nosivosti mikroarmiranih betona obuhvata prenos naprezanja sa betonske matrice na vlakna preko prionljivosti na njihovom spoju. Oba materijala (matrica i vlakno) zajednički prenose naprezanja sve dok se u betonskoj matrici ne pojave prsline. Posle ovoga, sva naprezanja na mestu prsline preuzimaju vlakna. Do loma redovno dolazi zbog popuštanja veze (spoja) između vlakana i matrice. Iz ovih razloga se i pridaje veliki značaj prionljivosti matrice i vlakana. Lom prema ovom mehanizmu je duktilan, što je i poželjno. Ako bi do loma došlo zbog prekoračenja nosivosti vlakana napregnutih na zatezanje, lom bi takođe bio duktilan zbog velikih mogućnosti plastičnog deformisanja vlakana. Međutim, lom može da bude i krt ako nema dovoljno vlakana, odnosno ako je površina vlakna manja od minimalno potrebne koja treba da zadovolji uslov da pri pojavi prsline vlakna prihvate sva zatežuća naprezanja, prethodno raspoređena na matricu i vlakna.

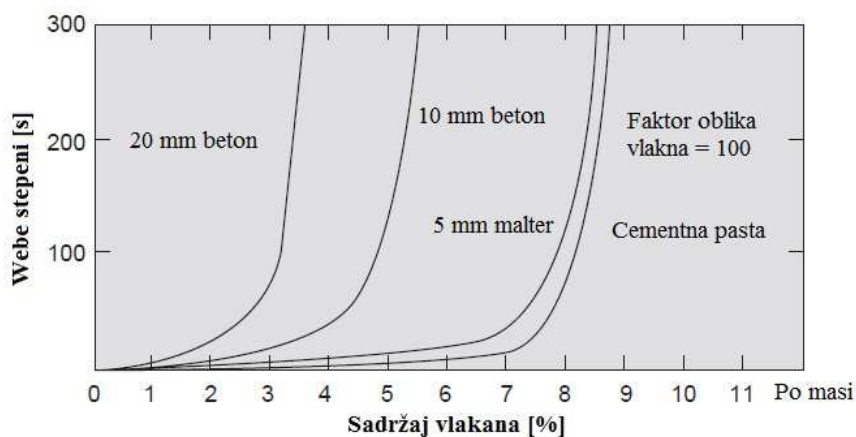
Poznato je da dodatak bilo koje vrste vlakana običnom betonu smanjuje njegovu obradljivost. Bez obzira na tip vlakana, gubitak obradljivosti je proporcionalan zapremini koncentracije vlakana u betonu. Pošto vlakna doprinose kohezivnosti sveže betonske mase,

metoda sleganja pomoću Abramsovog konusa nije pogodna za ocenu obradljivosti. Primera radi, dodatak 1,5% čeličnih ili staklenih vlakana doprineo je da se sleganje betona bez vlakana od 200 mm smanji na 25 mm. Iz ovih razloga se smatra da je Webe metoda pogodnija za procenu obradljivosti betona sa mikrovlaknima.



Slika 3.25. Uticaj faktora oblika vlakana na konzistenciju maltera [3,173]

Na slici 3.25 prikazan je uticaj sadržaja vlakana i faktora oblika vlakana na konzistenciju betona određenu Webe metodom [173]. Sa aspekta povećanja čvrstoće i žilavosti betona poželjno je da vlakna imaju visoku vrednost faktora oblika, kao i visoku koncentraciju vlakana. Ali sa druge strane, kao što se može videti na dijagramu, sa povećanjem ove dve varijable smanjuje se obradljivost betonske mešavine. Naime, rezultati ispitivanja Swamy i Mangat-a [174] ukazuju da čelična vlakna sa faktorom oblika većim od 100 imaju tendenciju da proizvedu efekat poznatog kao „uvijanja naviše“ pri koncentraciji vlakana od 1,13% po zapremini. Očigledno, kompromis se mora postići odgovarajućim izborom količine i faktora oblika vlakana. Generalno, količina čeličnih vlakana je ograničena na 2% po zapremini, sa maksimalnim faktorom oblika 100.



Slika 3.26. Uticaj krupnoće agregata i sadržaja vlakana na konzistenciju betona [3,173]



Čak i pri sadržaju vlakana od 2%, obradljivost betona i maltera se naglo smanjuje sa povećanjem krupnoće agregata, slika 3.26. Prema ACI 544.3R [175] agregati krupniji od 19 mm se ne preporučuju za korišćenje u betonima mikroarmiranih čeličnim vlaknima. Istraživači su na osnovu ranijih ispitivanja predložili da je poželjno koristiti više od 25% po masi agregata krupnijeg od 9 mm. Generalno, uslov postizanje dobre obradljivosti betonske mase koja sadrži vlakna postiže se primenom aeranata, plastifikatora, većom količinom cementne paste (sa ili bez pucolanskih materijala) i primenom spojenih vlakana.

Obradljivost betona se smanjuje sa povećanjem sadržaja polipropilenskih vlakana u betonu. Thirumurgan i Siva Kumar [176] su istraživanjem mikroarmiranih betona došli do zaključka da se sa dodatkom polipropilenskih vlakana obradljivost betona smanjuje, ali da se to može prevazići korišćenjem moćnih plastifikatora. Gencel i saradnici [177] su koristili monofilamentna vlakna u samougrađujućem betonu sa elektrofilterskim pepelom u istraživanju njegove obradljivosti i mehaničkih performansi. Korišćeni materijali nisu doprineli stvaranju problema u obradljivosti i segregaciji sveže betonske mase. Patel i saradnici [178] su izvestili da je došlo do smanjenja obradljivosti sa povećanjem sadržaja polipropilenskih vlakana. Ispitivanja Webe metodom ukazuju da je pri sadržaju vlakana od 0,5% obradljivost betona visoka, dok se za 1,0% može reći da je obradljivost srednja.

Dodavanje vlakana u betonu može doprineti do povećanja sadržaja uvučenog vazduha u svežem betonu [169]. To je primećeno kod većeg sadržaja pre svega polipropilenskih vlakana (iznad 0,5% po zapremini). Pri manjim količinama vlakana ova pojava je manje izražena.

Brojna ispitivanja čvrstoće pri pritisku na betonima sa čeličnim vlaknima ukazuju na izvesno poboljšanje ove karakteristike koja, međutim, vrlo retko prelazi 25%. U najvećem broju slučajeva ponašanje mikroarmiranih kompozita izloženih naponima pritiska praktično se uopšte ne razlikuje od onog koje odlikuje klasične betone bazirane na istoj cementnoj matrici. Što se tiče kompozita ojačanih polipropilenskim vlaknima, kod njih je povećanje čvrstoće pri pritisku (ako ga uopšte ima) još manje izraženo, što se objašnjava pre svega niskim procentualnim učešćem ovih vlakana u okviru mešavine [169]. Takođe, i promene vrednosti modula elastičnosti mikroarmiranih betona u načelu su zanemarljivo male u odnosu na kompozite spravljene bez vlakana, nezavisno od vrste i količine ovih dodataka. Sa druge strane, mikroarmatura uglavnom doprinosi značajnom porastu duktilnosti (žilavosti) betona, kako prilikom upotrebe čeličnih, tako i u slučaju primene polimernih, karbonskih, staklenih i drugih tipova vlakana. Eventualni porast čvrstoće pri pritisku uslovljen dodatkom vlakana zavisi od većeg broja parametara od kojih su najvažniji: vrsta vlakana, količina vlakana, faktor oblika ( $l/d$ ) i sastav matrice.

Patel i saradnici [178] su utvrdili da se čvrstoća pri pritisku, savijanju i zatezanju cepanjem betona povećala dodavanjem 1,5% polipropilenskih vlakana. Mehul i Kulkarni [2] su koristili fibrilirana polipropilenska vlakna dužine 12 mm i prečnika 34  $\mu$ m u procentu 0,5%, 1,0% i 1,5% u betonu visokih čvrstoća. Zapazili su da se sa povećanjem sadržaja vlakana povećava i čvrstoća pri pritisku. Zakić [172] je u svom istraživanju došao do zaključka da sa dodatkom polipropilenskih vlakana betonu u iznosu 0,55% po zapremini, čvrstoća pri pritisku povećava za oko 4%. Autor disertacije je sa saradnicima [57] istraživao uticaj dodavanja polipropilenskih vlakana na otpornost betona prema hidro-abrazivnom dejstvu i došao do zaključka da mikrovlakna doprinose povećanju čvrstoće pri pritisku za oko 8%. Gul i saradnici [179] su vršili ispitivanje modula elastičnosti betona mikroarmiranih čeličnim vlaknima. Korišćene su dve vrste vlakana istog prečnika, a različite dužine. Čelična vlakna su dodata betonu u količini od 0,5%, 1,0% i 1,5%. Došli su do zaključka da se sa povećanjem sadržaja vlakana povećava i čvrstoća pri pritisku. Blagojević [180] je istraživao fizičko – mehanička svojstva betona ojačanog metalnim

vlaknima (1,5% po zapremini) i došao do rezultata da se čvrstoća pri pritisku mikroarmiranog betona neznatno povećala (oko 3%) u odnosu na nearmirani beton. Takođe, autor disertacije [181] je istražujući uticaj dodavanja čeličnih vlakana na hidro-abrazivnu otpornost betona došao do zaključka da čelična vlakna doprinose neznatnom povećanju čvrstoće pri pritisku (za 4%).

Jedan od osnovnih razloga mikroarmiranja betona jeste nastojanje da se poboljša njegova čvrstoća pri zatezanju, odnosno čvrstoća pri savijanju. Slično kao i kod čvrstoće pri pritisku, najvažniji parametri koji utiču na čvrstoću pri savijanju, a koji se tiču samih vlakana, su: vrsta vlakana, količina vlakana, faktor oblika ( $l/d$ ) i sastav matrice.

Generalno, čelična vlakna više doprinose porastu čvrstoće pri savijanju nego polimerna, što je logično imajući u vidu njihova bolja mehanička svojstva. Vlakna veće dužine i viših vrednosti faktora oblika obezbeđuje u ovom smislu bolje performanse mikroarmiranih kompozita. Isto tako, povećanje količine vlakana u jedinici zapremine sveže mešavine, do određene mere doprinosi povećanju čvrstoće pri savijanju. Kod upotrebe polipropilenskih vlakana, doprinos povećanju čvrstoće pri savijanju je znatno manje nego u slučaju čeličnih vlakana. Međutim, primećeno je da se kod sitnozrnih betona ( $D=4$  mm ili 8 mm) spravljenih sa dodatkom polipropilenskih ili najlonskih vlakana generalno ostvaraju bolji efekti u smislu povećanja čvrstoće pri savijanju, nego kod betona spravljenih sa nominalno najkrupnijim zrnom agregata veličine 16 mm ili 31,5 mm. Ovo se objašnjava činjenicom da se u okviru sitnozrne matrice ostvaruje bolja veza – athezija sa vlaknima, što rezultuje većom otpornošću pri zatezanju, odnosno savijanju.

Ispitivanjem sitnozrnih betona ojačanih polipropilenskim vlaknima, Zakić [172] je utvrdio da se čvrstoća pri savijanju betona povećava za oko 9% u odnosu na etalon beton bez vlakana. Sa druge strane, čvrstoća pri direktnom aksijalnom zatezanju se povećala za 36% pri sadržaju vlakana od 0,55%, čvrstoća pri zatezanju cepanjem se povećala za 25%, dok se čvrstoća na zatezanje metodom „Pull-off“ povećala za 18%. U istraživanju [181] dodatak polipropilenskih vlakana doprineo je povećanju savojne čvrstoće u iznosu od 13%. Slični zaključci su proizašli i iz istraživanja [182-184]. Pajak i Ponikiewski [185] su ispitali dinamičke karakteristike samougrađujućih betona ojačanih čeličnim vlaknima i došli do zaključka da se sa povećanjem sadržaja čeličnih vlakana značajno povećava čvrstoća pri savijanju. Blagojević [180] je izvestio da se savojna čvrstoća betona armiranog sa 1,5% čeličnim vlaknima povećava za 35%. U istraživanju [181] čvrstoća pri savijanju betona sa čeličnim vlaknima se povećala za 9%, dok se čvrstoća pri zatezanju cepanjem povećala za 40%.

Dodatak vlakana betonu utiče i na vrednost statičkog modula elastičnosti. Zakić [172] je došao o zaključka da sa povećanjem sadržaja polipropilenskih vlakana dolazi do smanjenja statičkog modula elastičnosti. To smanjenje iznosi od 2 do 10%. Ovo se objašnjava činjenicom da je modul elastičnosti polipropilenskih vlakana znatno manji (oko 9 puta) od modula elastičnosti betona, odnosno cementne matrice. U prilog ovome ide i činjenica da su brojna ispitivanja betona mikroarmiranih vlaknima sa visokim modulom elastičnosti (čelična, azbestna, karbonska, staklena), pokazala izvesna povećanja statičkog modula elastičnosti [169]. Gul i saradnici [179] su ispitali modul elastičnosti betona mikroarmiranog čeličnim vlaknima i došli do zaključka da se modul elastičnosti povećava sa povećanjem sadržaja vlakana i da veći doprinos daju vlakna sa većim faktorom oblika. Blagojević [180] je ispitivanjem statičkog modula elastičnosti na betonima sa 1,5% dodatka čeličnih vlakana po zapremini zaključio da vlakna doprinose povećanju vrednosti ove performanse betona za 10% u odnosu na etalon beton bez vlakana. Da se sa povećanjem sadržaja čeličnih vlakana povećava i statički modul elastičnosti došli su Atis i Karahan [185] istraživajući performanse betona sa elektrofilterskim pepelom i čeličnim vlaknima.

Glavni doprinos mikroarmature betonu jeste povećanje otpornosti pri delovanju dinamičkih opterećenja. Kao što je poznato, beton spada u grupu izrazito krutih građevinskih materijala, sa relativno malom energijom deformacije, pa samim tim ima i srazmerno nisku otpornost pri dejstvu cikličnog ili udarnog dinamičkog opterećenja.

Poboljšane dinamičke čvrstoće betona pri visokocikličnom zamoru (više miliona ciklusa opterećenja) jedan je od razloga za sve širu primenu mikroarmature kod konstrukcija kao što su aerodromske piste, kolovozne ploče, mostovi, temelji mašina i sl. [169]. Najviše su korišćena čelična vlakna, mada su sve češći primeri primene polimernih vlakana, a neretke su i kombinacije ove dve armature u vidu tzv. „koktela“ (npr. čelična i polipropilenska vlakna). Takođe, mikroarmirani kompoziti se sve više koriste kod konstrukcija koje su izložene udarnim opterećenjima (kranske staze, lučni i obalski objekti, mostovski stubovi i dr.).

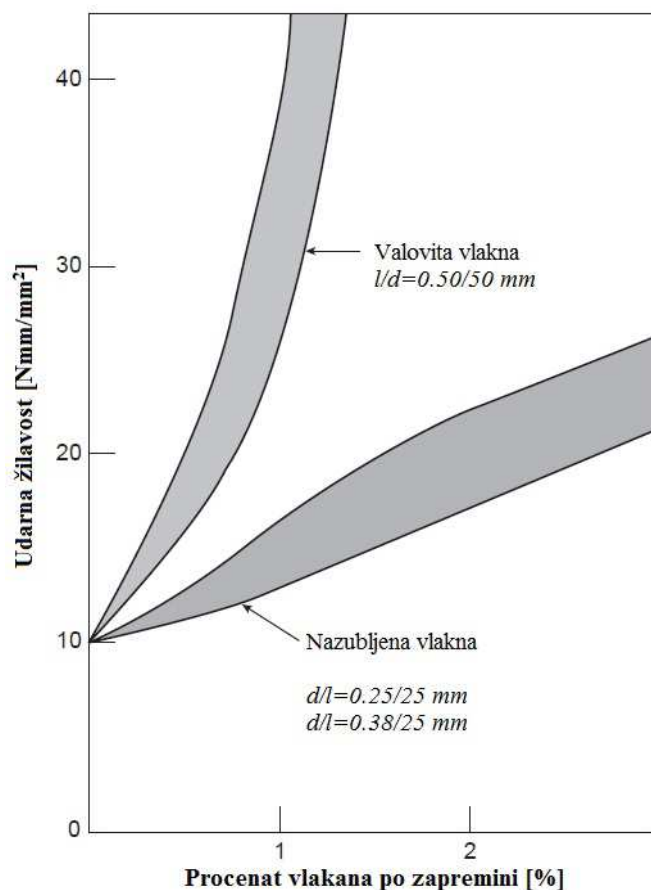
Testovi koji su vršeni na uzorcima betona spravljenim sa dodatkom 2-3% čeličnih vlakana pri delovanju visokocikličnog opterećenja na savijanje (2 miliona ciklusa do loma), pokazale su porast dinamičke čvrstoće od 60-85% u odnosu na etalonske uzorke bez vlakana. Veličina ovog porasta varirala je u zavisnosti od upotrebene količine vlakana, kao i od inteziteta opterećenja (odnosno raspona između minimalnog i maksimalnog napona) [169].

Slična ispitivanja vršena su i na betonima mikroarmiranim polimernim vlaknima (najlonskim, polipropilenskim i polietilenskim). I u ovom slučaju su zabeležena izvesna poboljšanja dinamičkih čvrstoća, ali u znatno manjem procentualnom iznosu nego u slučaju korišćenja čeličnih vlakana. Na primer, pri ispitivanju na visokociklični zamor (2 miliona ciklusa do loma) uzoraka betona spravljenih uz dodatak 0,2-0,3% fibriliranih polipropilenskih vlakana, ostvareni porast dinamičke čvrstoće kretao se između 25-30% u odnosu na etalon beton [169]. Slične rezultate, ali uz nešto veće učešće mikroarmature (0,5-1,0%), dobili su i drugi istraživači [186-187]. Pri ispitivanju duktilnosi betona mikroarmiranih polipropilenskim vlaknima putem savijanja [172], došlo se do zaključka da je žilavost mikroarmiranih betona porasla 6, odnosno 43 puta u odnosu na etalon beton pri količini vlakana od 1 kg/m<sup>3</sup>, odnosno 5 kg/m<sup>3</sup>. Takođe, u istom istraživanju pri ispitivanju duktilnosti betona cepanjem pomoću klina utvrđeno je da se količina apsorbovane energije povećala za 85%, odnosno 380% u odnosu na etalon beton pri količini vlakana od 1 kg/m<sup>3</sup>, odnosno 5 kg/m<sup>3</sup>. Kod oba ispitivanja veći doprinos su dala vlakna sa većim faktorom oblika. Khaloo i saradnici [188] su ispitivali mehanička svojstva samougrađujućeg betona armiranog čeličnim vlaknima i došli do zaključka da se žilavost betonskih greda pri savijanju povećava sa povećanjem procenta učešća vlakana. Pri malom sadržaju vlakana (0,5% i 1%), grede od samougrađujućeg betona srednjih čvrstoća imaju veću žilavost pri savijanju u odnosu na samougrađujući beton visokih čvrstoća, zato što je samougrađujući beton visokih čvrstoća krtiji, a vlakna ne mogu da poboljšaju duktilnost zbog male koncentracije vlakana u cementoj matrici. Međutim, pri većem sadržaju vlakana (1,5% i 2%), grede od samougrađujućeg betona srednjih čvrstoća imaju manju žilavost pri savijanju.

Što se tiče ispitivanja otpornosti kompozita pri udarnom opterećenju, podaci iz literature dosta variraju u zavisnosti od vrste i količine upotrebljenih vlakana, sastava kompozita, oblika i dimenzija uzoraka, usvojene metode ispitivanja itd. Ovde se navode rezultati ispitivanja uzoraka sitnozrnog betona ojačanog čeličnim, odnosno polipropilenskim vlaknima [169]. Testirani su prizmatični uzorci dimenzija 300×75×12 mm metodom Šarpijevog klatna. Kao što je poznato, kod ove metode meri se rad utrošen pri lomu epruvete pri savijanju, pod dejstvom udarnog opterećenja u sredini raspona. Kod sitnozrnih betona spravljenih sa dodatkom 1-3% čeličnih vlakana zabeležen je porast žilavosti čak nekoliko

stotina puta u odnosu na etalonske uzorke. Naravno, sa povećanjem procentualnog učešća mikroarmature, rastle su i dinamička čvrstoća i udarna žilavost kompozita.

Na slici 3.27 je prikazan dijagram sa tipičnim podacima koji pokazuju relativno poboljšanje nastalo zamenom valovitih čeličnih vlakana nazubljenim vlaknima [3,173].

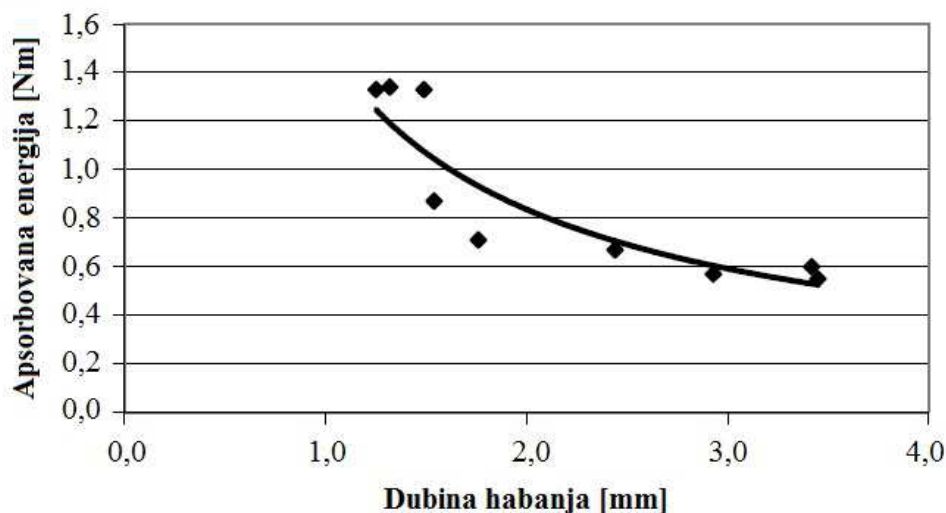


Slika 3.27. Uticaj valovitih i nazubljenih čeličnih vlakana na udarnu otpornost betona [3,173]

Prilikom upotrebe polipropilenskih i drugih vlakana polimernog tipa zabeležena su znatno manja poboljšanja dinamičkih karakteristika. Naime, pri korišćenju uobičajnih količina od 0,1% ovih vlakana, razlike u odnosu na etalon su bile veoma male. Tek pri učešću većem od 0,5% zabeležen je značajan porast udarne žilavosti koji se kretao od 32 do 80% [169]. Međutim, ovako velika količina vlakana nije uobičajna u praksi, prevashodno iz tehnoloških i ekonomskih razloga. Pri ispitivanju udarne duktilnosti betona mikroarmiranih polipropilenskim vlaknima metodom udarne mase (teg mase 3 kg pada sa visine od 30 cm i udara u betonsku ploču dimenzije 40×40×6 cm) [172] utvrđeno je da energija koja je utrošena za pojavu prvih prslina kod mikroarmiranih betona veća za 67-100% u odnosu na etalon beton, dok je utrošena energija za potpuni lom uzorka kod mikroarmiranih betona bila višestruko veća u odnosu na etalon beton bez vlakana.

Smatra se da je beton otporniji na abrazivne uticaje ukoliko ima veću čvrstoću pri pritisku i tvrdoću u površinskom sloju koji je izložen predmetnim uticajima. Da bi se ostvario zadovoljavajući kvalitet očvrstlog kompozita potrebno je sprečiti izdvajanje viška vode na površini, kao i onemogućiti pojavu segregacije agregata unutar sveže mešavine. Dodatak mikroarmature u velikoj meri može da doprinese rešavanju ovih problema.

U vezi sa abrazivnom otpornošću, vršena su određena ispitivanja betona spravljenih sa dodatkom čeličnih vlakana u slučaju delovanja abrazije izazvane trenjem tečnosti koja se kreće velikom brzinom (simulacija preliva kod betonskih brana). Pri ovim ispitivanjima zabeleženo je prosečno poboljšanje otpornosti na abraziju od 15% u odnosu na etalonske uzorke spravljene bez čelične mikroarmature [169]. Ispitivanja koja su vršili Šušteršič i saradnici [68] na hidrotehničkim betonima visokih performansi mikroarmiranim čeličnim vlaknima, pokazala su da podvodna abrazija proporcijalno raste sa povećanjem sposobnosti kompozita da apsorbuje energiju, slika 3.28.

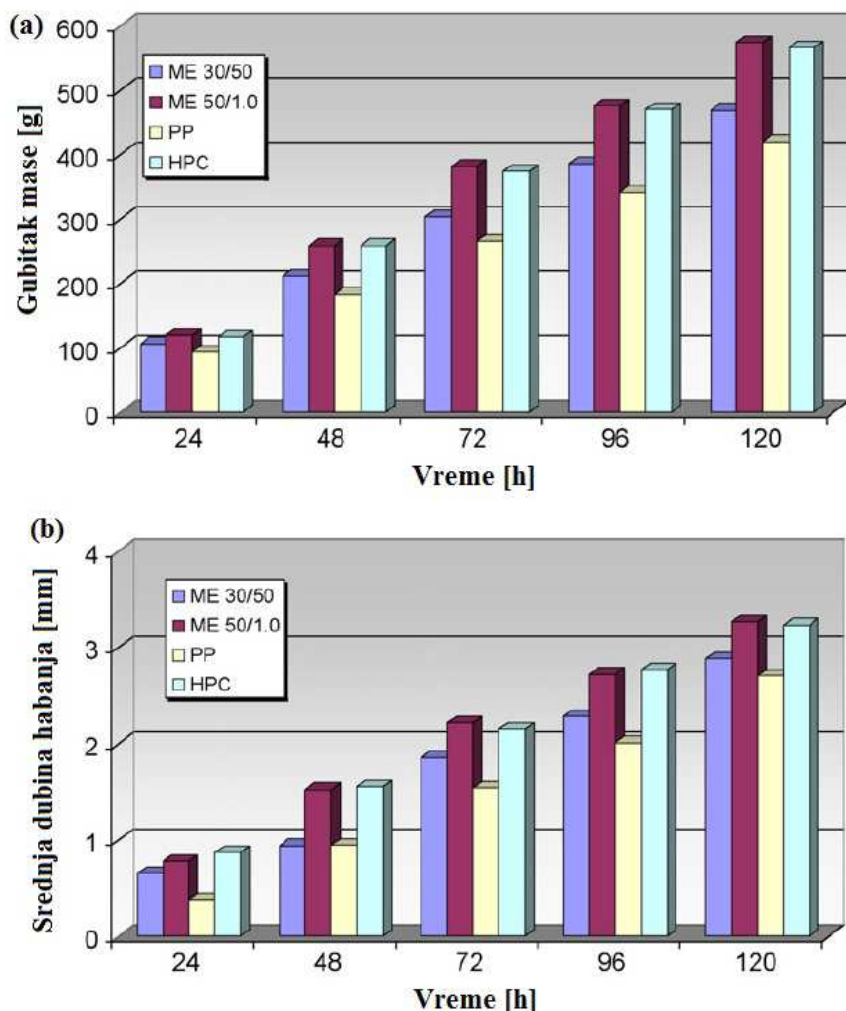


Slika 3.28. Zavisnost između abrazivnog habanja i apsorbovane energije betona mikroarmiranih čeličnim vlaknima [68]

Hu i saradnici [36,43] su istraživali hidro-abrazivnu otpornost običnog betona i betona mikroarmiranog čeličnim vlaknima. Ispitali su uticaj količine abraziva, brzine suspenzije (mešavine vode i abraziva) i napadnog ugla na veličinu habanja. Identifikovali su dva glavna modela nastanka erozije. Pri malim uglovima delovanja mlaza mešavine vode i abraziva ( $15^\circ$ ) oštećenje nastaje uglavnom zbog brušenja cementne matrice i direktnog izlaganja zrna agregata habajućem uticaju. Međutim, prilikom dejstva mlaza pod pravim uglom, oštećenje nastaje zbog formiranja i propagiranja prslina usled zamora materijala u betonu. Dodatak čeličnih vlakana doprinosi poboljšanju hidro-abrazivne otpornosti samo pri malim napadnim uglovima ( $15^\circ$ ). Pri malim brzinama suspenzije (oko 60 m/s), dodatak čeličnih vlakana betonu ne doprinosi smanjenju habajućeg oštećenja. Za veće brzine suspenzije, količina abraziva postaje bitan faktor koji utiče na veličinu habanja betona.

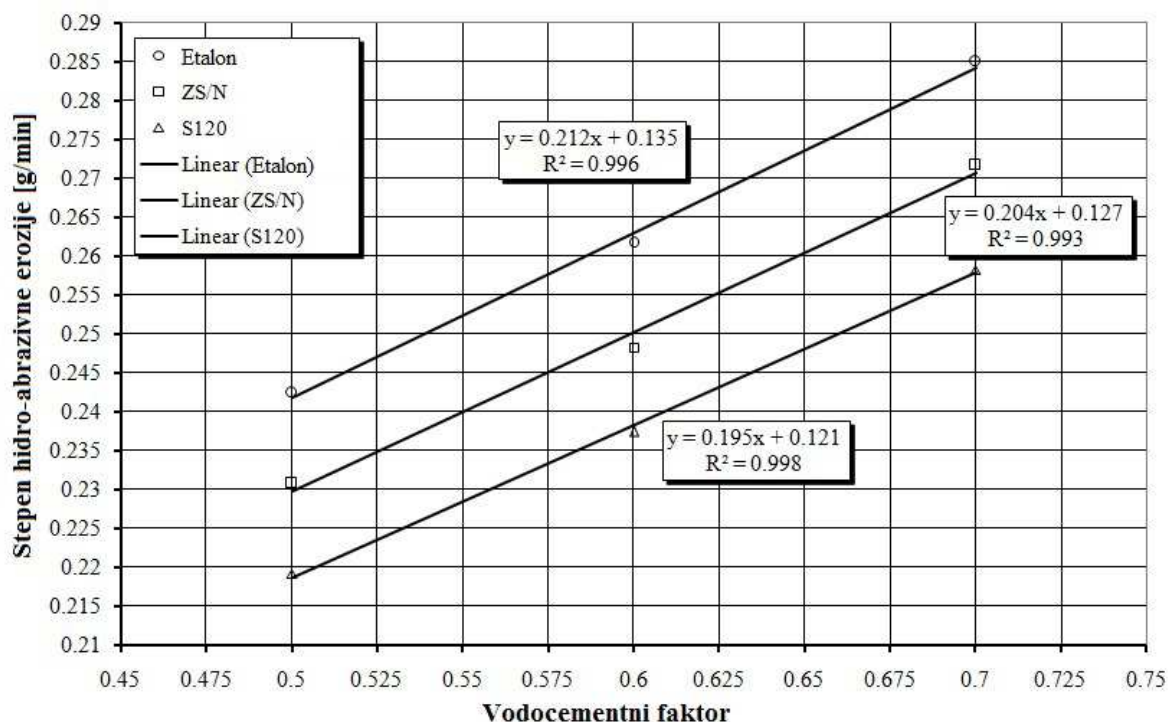
Horszczaruk [125] je ispitivala hidro-abrazivnu otpornost betona visokih performansi mikroarmiranih dvema vrstama čeličnih vlakana (dužina/prečnik=30/0,5 mm i l/d=50/1,0 mm) i polipropilenskim vlaknima (fibrilirana vlakna dužine 19 mm). Ispitivanje je rađeno podvodnim testom po metodi ASTM C 1138 [88]. Na osnovu rezultata ispitivanja došla je do zaključka da dodavanje čeličnih vlakana ne doprinosi poboljšanju abrazivne otpornosti betona visokih čvrstoća pri malim brzinama dejstva (ispod brzina kavitacije). Step en oštećenja površine mikroarmiranog betona čeličnim vlaknima zavisi od orijentacije vlakana u gornjem površinskom sloju betona. Primećeno je formiranje tzv. „zone senke“ u slučaju položaja čeličnih vlakana upravno na površinu betona. Ova zona prouzrokuje lokalno smanjenje habanja betona iza čeličnog vlakna. Veličina „zone senke“ zavisi od ugla napada abrazivnih čestica i položaja vlakana u površinskom sloju betona. Veću abrazivnu

otpornost su pokazali betoni sa kraćim čeličnim vlaknima (dužine 30 mm i prečnika 0,5 mm), odnosno sa većim faktorom oblika  $l/d=60$ . Dodatak polipropilenskih vlakana je doprineo smanjenju hidro-abrazivnog habanja, posebno u prvih 48h, slika 3.29.



Slika 3.29. Rezultati ispitivanja hidro-abrazivnog habanja: (a) gubitak mase, (b) srednja dubina habanja; ME 30/50 i ME 50/1.0 – betoni sa čeličnim vlaknima, PP – beton sa polipropilenskim vlaknima, HPC – beton bez mikroarmature [125]

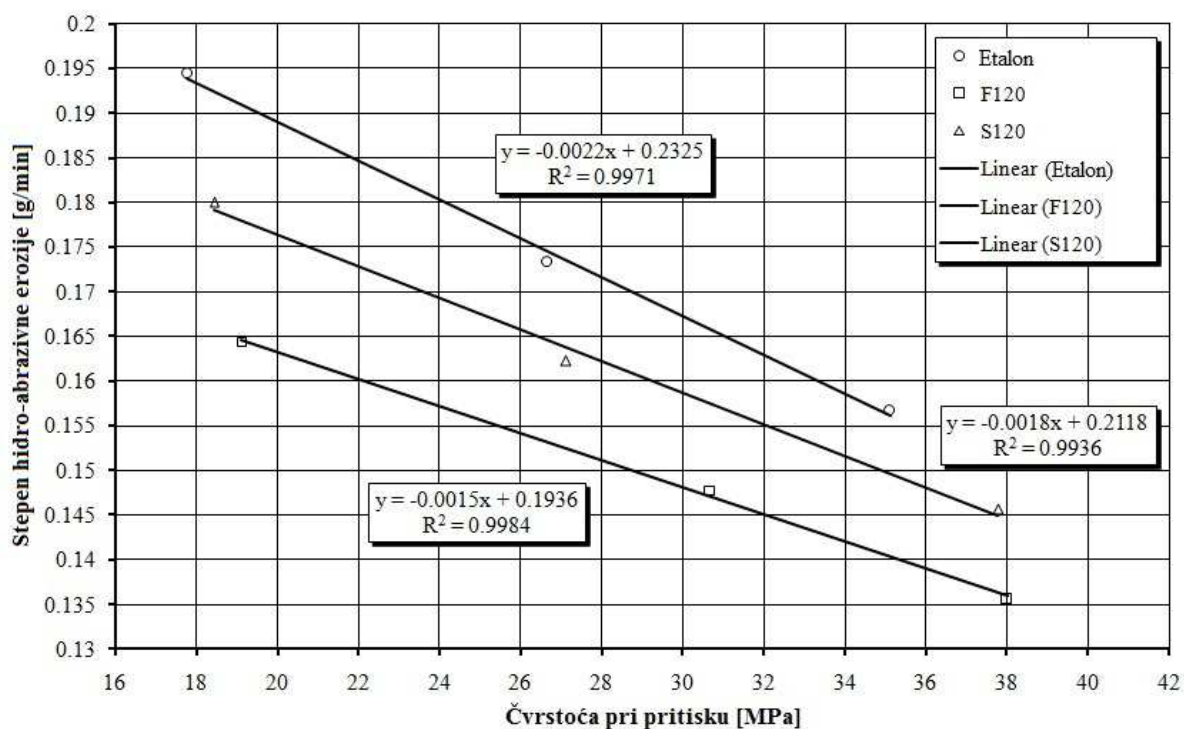
Autor disertacije je sa saradnicima [181] vršio ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona mikroarmiranih čeličnim (sa ojačanim krajevima ZS/N 0.5x30 mm) i polipropilenskim (monofilamentna vlakna dužine 12 mm i prečnika 0,037 mm) vlaknima. Ispitivanje je vršeno na aparaturi koja omogućava da mešavina vode i peska velikom brzinom udara o betonsku ispitnu ploču. Pored uticaja mikroarmature na veličinu habanja, proučavan je i uticaj vodocementnog faktora. Rezultati ispitivanja su pokazali da dodatak mikroarmature doprinosi poboljšanju hidro-abrazivne otpornosti betona, pri čemu su veći doprinos dala polipropilenska vlakna. Sa druge strane, sa povećanjem vodocementnog faktora hidro-abrazivna otpornost betona se smanjuje kod svih vrsta betona, slika 3.30.



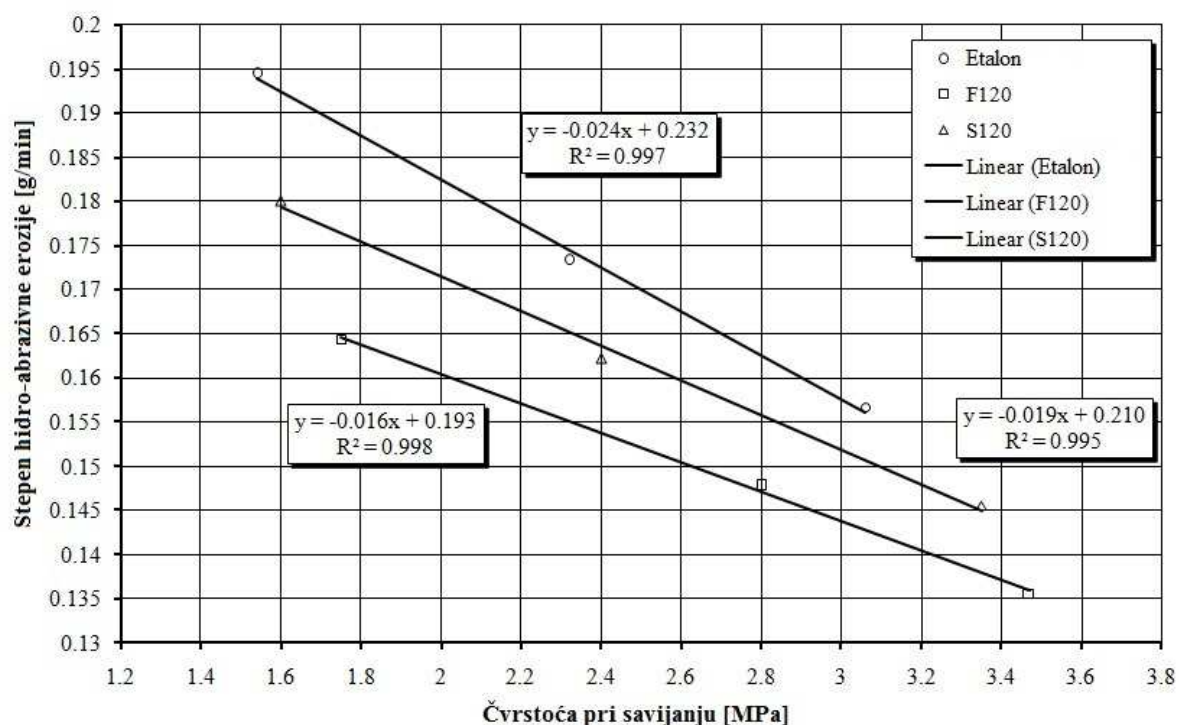
Slika 3.30. Uticaj vodocementnog faktora na stepen hidro-abrazivne erozije; ZS/N – beton sa čeličnim vlaknima, S120 – beton sa polipropilenskim vlaknima, Etalon – beton bez mikroarmature [181]

Autor disertacije je sa saradnicima [57] je vršio istraživanje uticaja dodavanja polipropilenskih vlakana na otpornost betona prema hidro-abrazivnom delovanju. Korišćena su monofilamentna vlakna dužine 12 mm i prečnika 0,037 mm i fibrilirana vlakna dužine 12 mm i ekvivalentnog prečnika 0,45 mm. Ispitivanje je vršeno na aparaturi koja omogućava da mešavina vode i peska velikom brzinom udara o betonsku ispitnu ploču. Ispitivan je uticaj vodocementnog faktora na hidro-abrazivnu otpornost betona, kao i mogućnost predviđanja ove otpornosti na osnovu nekih mehaničkih karakteristika betona. Rezultati ispitivanja su pokazali da polipropilenska vlakna doprinose poboljšanju hidro-abrazivne otpornosti betona, pri čemu su fibrilirana vlakna dala veći doprinos. Sa povećanjem vodocementnog faktora hidro-abrazivna otpornost betona se smanjila bez obzira na prisustvo mikroarmature. Betoni sa većom čvrstoćom pri pritisku i pri savijanju imali su veću hidro-abrazivnu otpornost, te tako ovi parametri mogu da posluže za predviđanje otpornosti betona prema hidro-abrazivnom dejstvu, slike 3.31 i 3.32.

Prema eksperimentalnim istraživanjima British Board of Agreement (BBA) [189] primena polipropilenskih vlakana takođe dovodi do izvesnog povećanja otpornosti na habanje i abraziju, naročito kod mladih betona. Tako pri starosti od jednog dana ovo povećanje iznosi od 10% do 30% u zavisnosti od upotrebene vrste i količine cementa, odnosno kvaliteta i granulometrijskog sastava agregata. Pri većim starostima, međutim, zabeležena su znatno manja poboljšanja kvaliteta betona, u smislu otpornosti na habanje i abraziju.



Slika 3.31. Zavisnost između čvrstoće pri pritisku i stepena hidro-abrazivne erozije; F120 – beton sa polipropilenskim fibriliranim vlaknima, S120 – beton sa polipropilenskim monofilamentnim vlaknima, Etalon – beton bez mikroarmature [57]



Slika 3.32. Zavisnost između čvrstoće pri savijanju i stepena hidro-abrazivne erozije; F120 – beton sa polipropilenskim fibriliranim vlaknima, S120 – beton sa polipropilenskim monofilamentnim vlaknima, Etalon – beton bez mikroarmature [57]



#### 4. STANJE STVARI U OBLASTI ISPITIVANJA HIDRO-ABRAZIVNE OTPORNOSTI BETONA

Kao što je već ranije napomenuto, zbog složenosti problema, mora se u obzir uzeti veliki broj parametara prilikom istraživanja otpornosti betona prema habanju. Veoma je bitan odabir naprezanja habanjem koje će se koristiti pri ispitivanju. Osim toga, prilikom izbora metodologije ispitivanja potrebno je naći razuman balans između kompleksnosti modela i praktične izvodljivosti. Posebno treba razmotriti sledeće uslove prilikom odabira metode ispitivanja habanja koji će simulirati realne uslove:

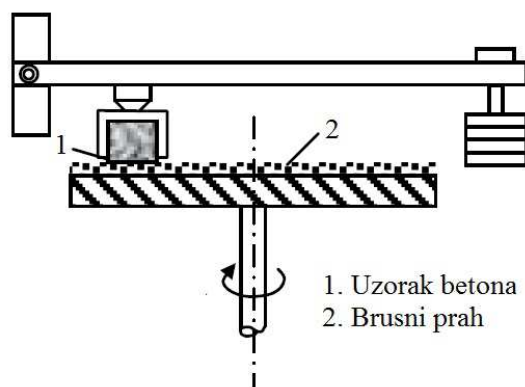
- uslovi habanja koji se simuliraju u kontrolisanim laboratorijskim uslovima treba da se u velikoj meri podudaraju sa uslovima u praksi,
- mešavina vode i abraziva koja se koristi prilikom ispitivanja treba da odgovara realnoj situaciji u praksi,
- glavni parametri koji utiču na proces habanja u praksi, takođe treba da budu dominantni i prilikom laboratorijskog ispitivanja što treba da omogući konstrukcija uređaja za testiranje,
- konstrukcija uređaja treba da omogući variranje napadnog ugla između abraziva i površine ispitnog uzorka,
- testovi habanja treba da budu vremenski kratki i jednostavni za izvođenje,
- mora biti osigurana laka reproduktivnost rezultata merenja oštećenja usled habanja.

Realno simuliranje hidro-abrazivnog habanja betonskih površina nije jednostavno. Danas postoji mali broj metoda ispitivanja otpornosti betona prema habanju koje su standardizovane i primenjuju na međunarodnom nivou. Međutim, postoje metode koje nisu svrstane u bilo koji nacionalni ili međunarodni standard, ali mogu da posluže za procenu ponašanja betona pri različitim oblicima habajućeg naprezanja. U daljem tekstu biće dat kratak opis nekih metoda ispitivanja, sa kritičkim osvrtom na prednosti i nedostatke uređaja za ispitivanje u pogledu približnosti simuliranja habanja u prirodnim uslovima.

##### 4.1. Metoda habanja prema Böhme-u

Kod metode ispitivanja otpornosti prema habanju brušenjem, tj. prema Böhme-u [190], koristi se uređaj koji omogućava da se uzorak betona izloži habajućem naprezanju putem trenja koje se javlja na kontaktu između uzorka i ravne brusne ploče koja rotira oko vertikalne osovine. Osušeni uzorak betona oblika kocke ivice 7,1 cm (površina izložena habanju je oko 50 cm<sup>2</sup>) stavlja se u držač uređaja za držanje epruveta i opterećuje se silom od 300 N. Po brusnoj putanji brusne ploče ravnomerno se razastre 20 g brusnog praha (elektrokorunda) i uređaj za obrtanje ploče se pušta u rad (brzina rotiranja je oko 30 obrtaja u minutu). Posle svaka 22 obrtaja menja se brusni prah, a na svakih 110 obrtaja uzorak betona se rotira oko vertikalne ose za 90°. Postupak se ponavlja još 3 puta, rotiranjem epruvete uvek za 90° u istom smeru. Na kraju, meri se masa uzorka nakon ispitivanja i računa gubitak mase, odnosno zapremine. Skica uređaja za ispitivanje otpornosti prema habanju brušenjem data je na slici 4.1.

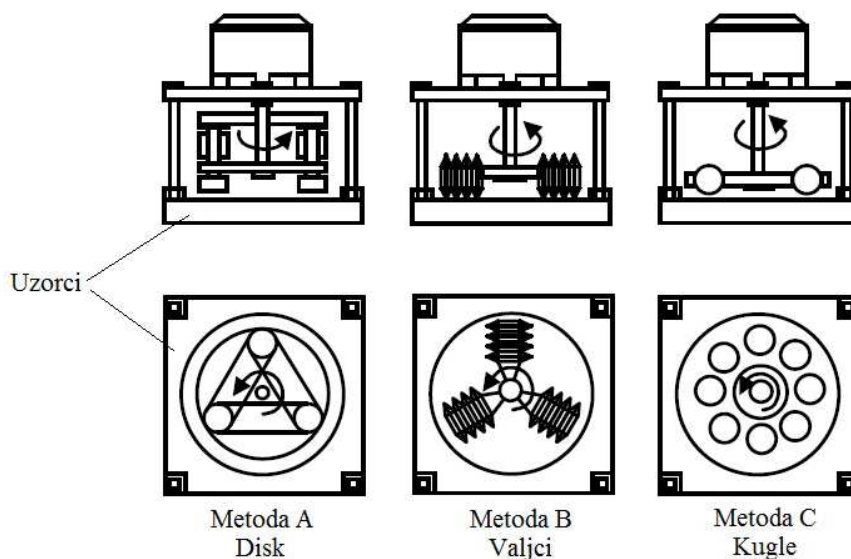
Metoda ispitivanja po Böhme-u se suštinski razlikuje od realnih uslova habanja betona izloženog hidro-abrazivnom dejstvu. Kod ove metode ispitivanja ne postoji mešavina vode i abraziva. Napadni ugao habajućeg optrećenja u odnosu na betonski površinu nije podesiv. Abraziv je brusni prah – elektrokorund čija je veličina zrna ujednačena, za razliku od hidro-abrazivnog habanja kod koga je abraziv različitog oblika i veličine. Način habanja betona kod ove metode ni približno ne odgovara uslovima u praksi.



Slika 4.1. Šematski prikaz metode habanja prema Böhme [190]

#### 4.2. Metode habanja prema ASTM C779

Prema ASTM C779 [8] postoje tri vrste standardizovanih postupka za ispitivanje otpornosti prema habanju horizontalnih betonskih površina: metoda A – pomoću mašine sa obrtnim diskovima, metoda B – pomoću mašine sa bodljikavim valjcima i metoda C – pomoću mašine sa čeličnim kuglicama, slika 4.2.



Slika 4.2 Šematski prikaz metoda A, B i C prema ASTM C779 [8]

Mašina s obrtnim diskovima aplicira trenje između diskova i betonskog uzorka brušenjem i trljanjem. Klizanje i habanje se postiže okretanjem čeličnih diskova zajedno sa abrazivnim peskom. Kao abrazivni pesak koristi se silicijum karbid u količini od 4 – 6 g/min. Period ispitivanja od 30 min proizvodi značajno habanje svih vrsta betona, ali je preporuka da se taj period produži na 60 min. Dubina habanja služi kao ocena otpornosti betona prema habajućem naprezanju.

Mašina sa bodljikavim valjcima je slična mašini sa obrtnim diskovima, samo što su tri rotirajuća diska zamenjena sa tri bodljikava valjka. Kod ove metode nije potreban abraziv. Prilikom ispitivanja valjci ostavljaju grubi trag po površini betona, tvrđi agregat se izvlači iz matrice, dok se cementna matrica i mekši agregat troše pri dodiru sa šiljcima. Mašina sa bodljikavim valjcima stvara oštećenje površine betona koje je skoro dvostruko

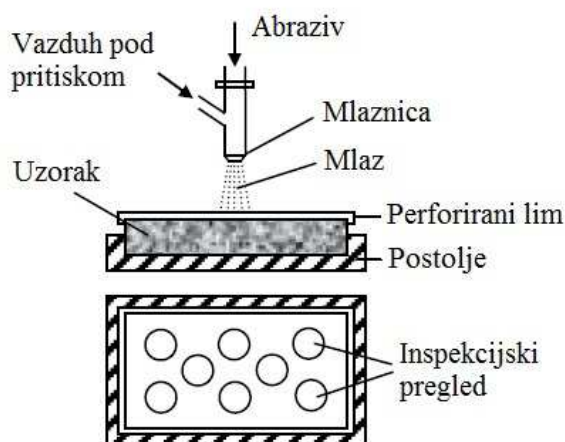
veće u pogledu dubine habanja u odnosu oštećenje nastalo mašinom sa rotirajućim diskovima za isti period ispitivanja. Abrazija betona prouzrokovana mašinom sa bodljikavim valjcima simulira realne uslove kotrljanja, udara i zasecanja čeličnog točka. I kod ove metode ispitivanja, meri se dubina oštećenja nastalog tokom ispitivanja.

Mašina sa čeličnim kuglicama radi na principu rotiranja seta od 8 čeličnih kuglica brzinom od 1000 obrtaja u minuti pod pritiskom preko betonske ispitne ploče koja je nakvašena. Voda služi za ispiranje izhabanog materijala i omogućava da abrazivni pesak i dalje pospešuje trenje između ispitne ploče i kuglica. Merenje dubine habanja se vrši na svakih 50 s, dok ukupno ispitivanje traje 1200 s ili se prekida kada je dubina habanja veća od 3 mm.

Realna simulacija hidro-abrazivnog habanja betona nije moguća primenom metoda ispitivanja prema ASTM C779 [8]. Alexander [191] preporučuje test metodu A za ispitivanje betonskih elemenata kod hidrotehničkih objekata, ali postoji dosta razloga koji su protiv njegove tvrdnje. Uređaji za ispitivanje mogu da simuliraju samo klizanje abraziva preko površine betona ili blage udare o betonsku površinu. Abraziv koji se koristi u testovima u potpunosti ne odgovara realnom abrazivu, u smislu veličine zrna i koncentracije. Takođe, napadni ugao habajućeg opterećenja nije podeseiv.

### 4.3. Metoda habanja prema ASTM C418

Test metoda prema ASTM C418 [192] zasniva se na principu izazivanja abrazije peskarenjem. Ova procedura simulira process prenošenja čvrstih čestica vodom preko površine betona. Veličina pritiska i tip abraziva se mogu varirati i na taj način uticati na veličinu habajućeg opterećenja. Uređaj za ispitivanje je opremljen injektorom tipa vazdušnog pištolja koji ispušta mlaz velike brzine, slika 4.3. Parametri koji mogu de se podese prilikom ispitivanja su granulacija peska, pritisak vazduha, količina abrazivnog punjenja i udaljenost mlaznice od površine betona. Uobičajno je da mlaznica bude udaljena 75 mm od betonske površine i da mlaz peska deluje upravno na površinu. Kao abraziv se koristi silikatni pesak veličine zrna od 0,60 do 0,85 mm. U roku od 60 s preko mlaznice se izbacilo 600 g peska pod pritiskom od 410 kPa. Prati se promena zapremine uzorka u suvom stanju. Alexander [191] preporučuje i ovu metodu za ispitivanje otpornosti betona prema hidro-abrazivnom dejstvu.



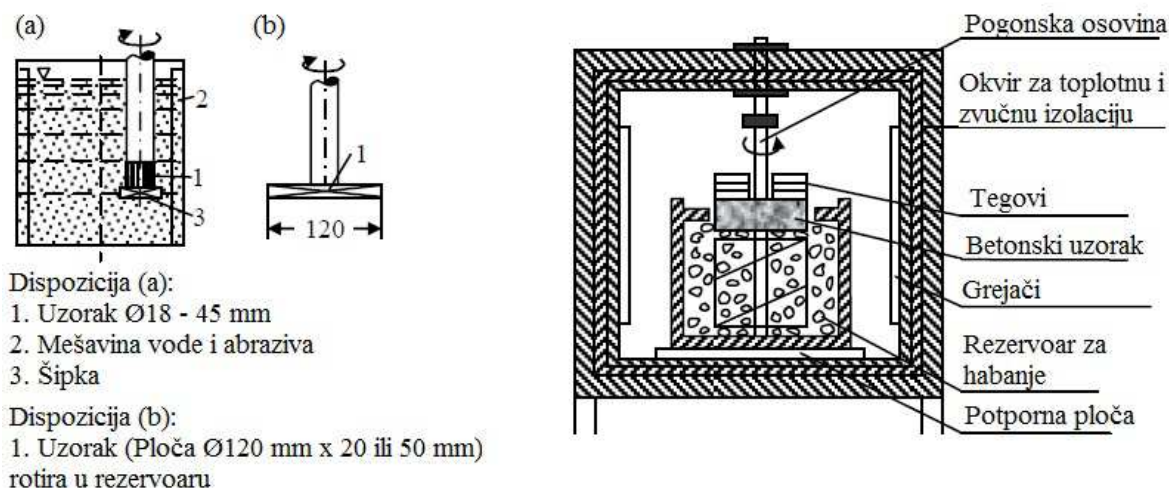
Slika 4.3 Šematski prikaz metode habanja peskarenjem prema ASTM C418 [192]

Ova test metoda omogućava promenu napadnog ugla delovanja mlaza peska na betonsku površinu. Vrsta i količina abraziva koji se koristi u ovom ispitivanju u nekoj meri može biti kompatibilna sa realnim uslovima. Ali habajuće naprezanje se vrši samo u suvom stanju, ne postoji delovanje mešavine vode i abraziva. Generalno, ova metoda ispitivanja u veoma maloj meri može da simulira realnu situaciju u praksi. Dobijene rezultate ispitivanja je teško interpretirati i preneti na situaciju u stvarnosti.

#### 4.4. Metoda habanja u rezervoaru

Još jedna metoda za simulaciju oštećenja betona jeste habanje u rezervoaru [13,64]. Uzorak za ispitivanje je oslonjen na šipku koja je povezana za pogonsku osovinu na njenom donjem kraju. Ovaj sistem je uronjen u rezervoar koji je ispunjen mešavinom vode i abraziva. Usled rotiranja osovine dolazi do homogenizacije mešavine u rezervoaru, slika 4.4 levo. Abraziv iz mešavine velikom brzinom udara u betonski uzorak, a jedan od razloga postignute velike brzine jeste ekscentrični položaj osovine u rezervoaru. Usled konstantnih udara abraziva iz mešavine dolazi do oštećenja betonskog uzorka.

Kunterding [64] je razvio modifikovanu proceduru ispitivanja habanja u rezervoaru u kojoj je betonski uzorak izložen dejstvu krupnih čestica iz vode, slika 4.4 desno. Na pogonskoj osovini pričvršćena je spirala koja prilikom rotacije osovine izbacuje abraziv (šljunak) prema gore, odnosno prema cilindričnom betonskom uzorku prečnika 150 mm i visine 50 mm. Habanje se vrši tako što abraziv udara u donji kraj betonskog uzorka i pada na dno rezervoara, spirala ga podiže sa dna i on ponovo udara o betonski uzorak i tako u krug. Brzina udara abraziva je podešena i iznosi 6 m/s. Temperatura sistema se kreće u rasponu od 20°C do 200°C. Ispitivanje traje 90 minuta, pri čemu se na svakih 30 minuta menja abraziv. Parametar za ocenu habanja jeste gubitak mase betonskog uzorka nakon ispitivanja.

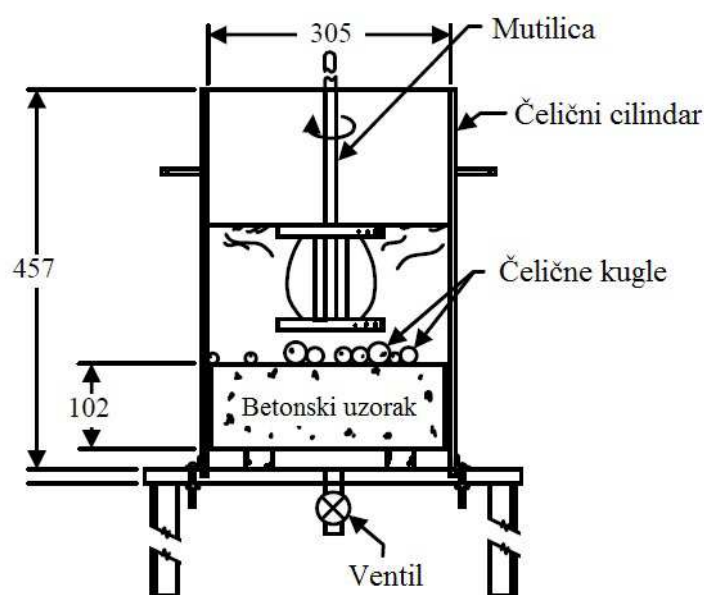


Slika 4.4 Šematski prikaz metode habanja u rezervoaru prema Uetz [13], levo i prema Kunterding [64], desno

I ova metoda ispitivanja teško može da simulira realne uslove habanja betona usled dejstva hidro-abrazivnog opterećenja. Abraziv koji se koristi u ispitivanju je delimično sličan onom u stvarnosti. Vreme izlaganja abrazivnom delovanju je ograničeno na 90 minuta, što nije dovoljno za neku ozbiljnu procenu otpornosti betona prema habanju.

#### 4.5. Metoda habanja prema ASTM C 1138

Postupak ispitivanja abrazivne otpornosti betona prema ASTM C1138 [88] tzv. podvodni test razvio je Liu [46] za potrebe ocene otpornosti betonskih površina podvrgnute dejstvu abraziva iz vode kod hidrotehničkih objekata poput akumulacionih bazena, preliva i sl. Uređaj za ispitivanje se sastoji od cilindričnog čeličnog bazena prečnika oko 305 mm i visine oko 457 mm, mutilice za vodu i 70 čeličnih kugli za brušenje različitih prečnika, slika 4.5. Betonski ispitni uzorak prečnika 305 mm i visine oko 100 mm je postavljen na dnu bazena. Čelični bazen je napunjen vodom do propisane visine, a čelične kugle su spuštene na površinu ispitnog uzorka. Mutilica koja je uronjena u vodu okreće se brzinom od 1200 obrtaja u minuti, pobuđuje vodu i pokreće čelične kugle koje udaraju o betonsku površinu. Ispitivanje traje 6 puta po 12 sati koliko iznosi jedan period ispitivanja, ukupno 72 sata. Kao ocena otpornosti betona prema habanju daje se prosečna dubina oštećenja.



Slika 4.5 Šematski prikaz metode habanja prema ASTM C1138 [88] i Liu [46],  
dimenzije su u mm

Kod ove metode ispitivanja, oštećenje nastaje usled klizanja ili udaranja čeličnih kugli o betonsku površinu. Čelične kugle koje se koriste u ispitivanju u potpunosti ne odgovaraju abrazivu iz vode u realnim uslovima. Trajanje ispitivanja je predugo, za ozbiljna istraživanja potrebna je upotreba više uređaja.

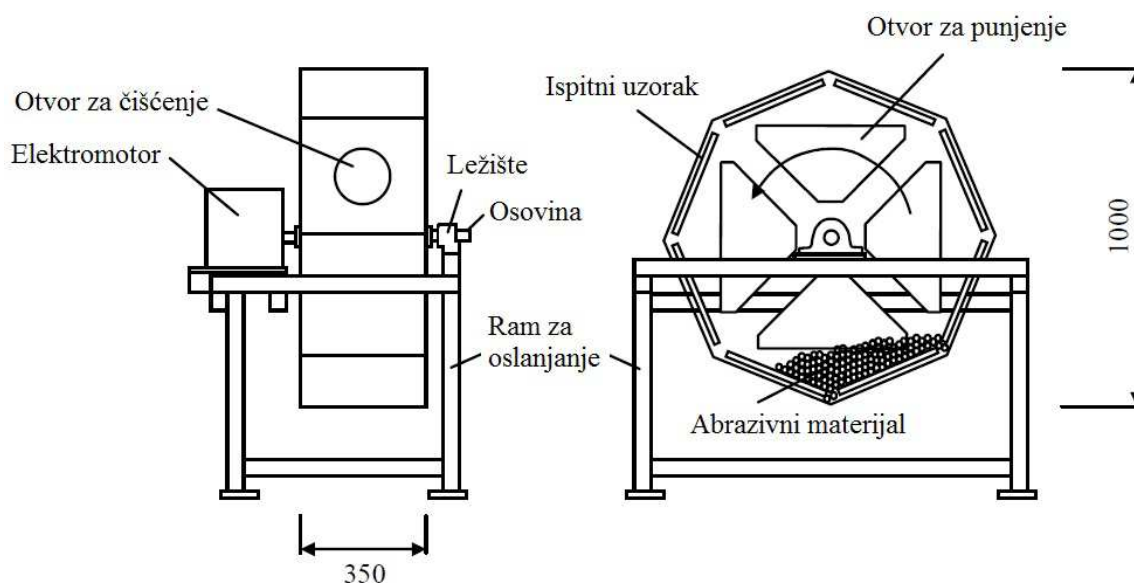
#### 4.6. Austrijska metoda habanja pomoću bubnja

Huber i Rozinski [193] su razvili metodu ispitivanja otpornosti betona prema habanju pomoću bubnja. Bubanj je približno prečnika 1 m i rotira oko horizontalne ose brzinom oko 46 obrtaja u minutu. Smer okretanja bubnja se menja na svakih pola sata. Kao abraziv koristi se kvarcni pesak prečnika zrna do 50 mm. Bubanj je napunjen sa 30 litara vode. Ispitne ploče su dimezija 47 × 47 cm i pričvršćene su na zid bubnja. Usled okretanja bubnja, betonske ploče prolaze kroz mešavinu vode i abraziva pri čemu dolazi do njihovog habanja. Kompletno ispitivanje traje 24 h. Oštećenje koje nastaje u toku laboratorijskog ispitivanja ekvivalentno je oštećenju koje nastaje u prirodnim uslovima za period od 10 godina.

Ova metoda ispitivanja prilično realno simulira prirodne uslove u kojima se odvija hidro-abrazivno habanje betona. Međutim, postoje i brojni nedostaci kao što je debljina ispitne ploče. Ograničena debljina ploče ujednom znači i ograničenu maksimalnu dimenziju zrna agregata od kojeg je napravljen beton. Osim toga, velike ispitne ploče su teške za rukovanje prilikom postavljanja i uklanjanja iz bubnja. Pri većim uticajima može doći i do preloma ploče. Takođe, abraziv u potpunosti ne odgovara onom koji se javlja u praksi. Promena napadnog ugla opterećenja u ovom ispitivanju nije obezbeđena.

#### 4.7. Dresdner metoda habanja pomoću bubnja

Dresdner metoda habanja pomoću bubnja je slična metodi koju je razvila Federalna agencija za hidrotehničko inženjerstvo Nemačke [194] koja se koristi za testiranje habanja geotekstila. Osmougaoni bubanj je napravljen od nerđajućeg čelika, slika 4.6. Elektromotor okreće bubanj koji uz pomoć konvertora može da podesi brzinu okretanja do 33 obrtaja u minutu. Unutar bubnja se postavlja 8 betonskih ispitnih uzoraka dimenzija  $300 \times 300 \times 20$  mm. Ulogu abraziva ima 8 kg čeličnih kugli, odnosno 6000 čeličnih kugli prečnika 7,0 mm. Vreme izlaganja iznosi 50 hiljada ciklusnih opterećenja pri brzini okretanja bubnja od 0,16 obrtaja u sekundi. Ova brzina okretanja bubnja omogućuje habanje betona kombinacijom klizanja čeličnih kugli po površini betona i udara čeličnih kugli o betonsku površinu. Kod ove metode, ispitivanje otpornosti betona prema habanju se vrši bez prisustva vode. Sličan heksagonalni bubanj za habanje korišćen je u istraživanju [50]. Ovde su dimenzije betonskog uzorka bile  $200 \times 200 \times 50$  mm, a abraziv su činile četiri čelične kuglice prečnika 40 mm. U ovom istraživanju bubanj je bio ispunjen vodom prilikom ispitivanja.

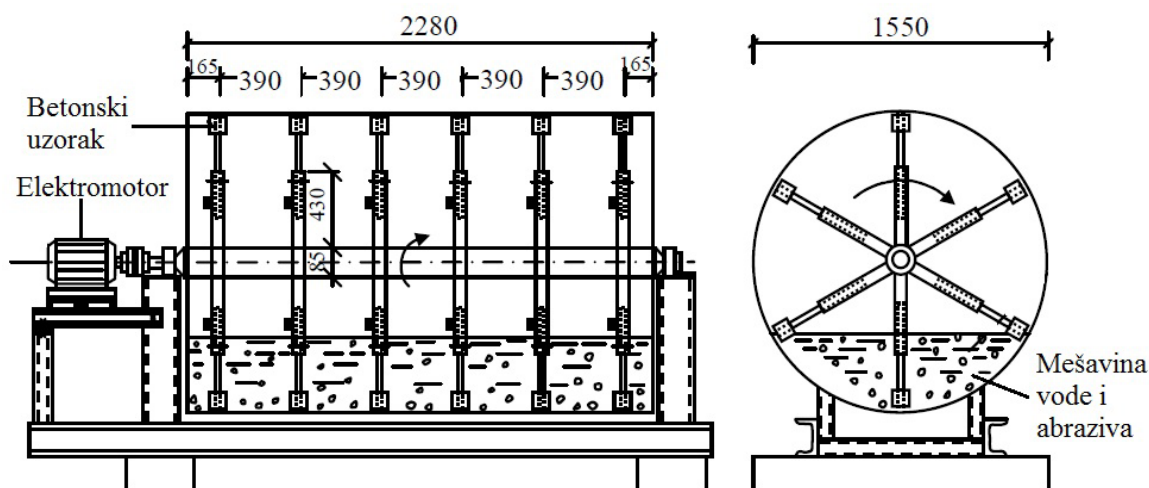


Slika 4.6 Šematski prikaz Dresdner metode habanja pomoću bubnja [195],  
dimenzije su u mm

Osnovni nedostaci ove metode slične su kao i kod austrijske metode habanja pomoću bubnja: ograničena debljina uzorka, rizik od preloma ploče, komplikovano postavljanje i skidanje pločastih uzoraka, nemogućnost promene napadnog ugla dejstva abrazivnog opterećenja, habanje bez prisustva vode. Ova metoda ispitivanja habanja betona u veoma maloj meri može da simulira prirodne uslove. Čelične kugle ni najmanje nisu nalik abrazivu iz rečnih tokova.

#### 4.8. Bania metoda habanja

Bubanj za habanje prema Bania metodi [34] se sastoji od horizontalnog cilindra prečnika 1,55 m i dužine 2,28 m, slika 4.7. Na osovini se nalazi 36 štapova za koje se pričvršćuju betonski ispitni uzorci. Uzorci mogu biti cilindričnog oblika prečnika 80 mm i visine 80 mm ili oblika kocke ivice 100 mm. Elektromotor okreće osovinu sa upravno postavljenim štapovima i uzorcima za ispitivanje. Brzina rotacije može varirati, a maksimalna je 50 obrtaja u minutu. Mešavina vode i abraziva se sastoji od 300 kg šljunka frakcije 2/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm i 300 litara vode. Betonski uzorci prolaze kroz mešavinu vode i abraziva i na ovaj način habanje se vrši kombinacijom trljanja abraziva preko površine uzoraka i udara abraziva o površinu betonskih uzoraka. Vreme izlaganja betonskih uzoraka abrazivnom dejstvu nije strogo definisano i može se menjati (Bania je dugotrajne eksperimente vršio u trajanju od 120 sati). Procena otpornosti betona prema habanju zasniva se na određivanju gubitka mase.



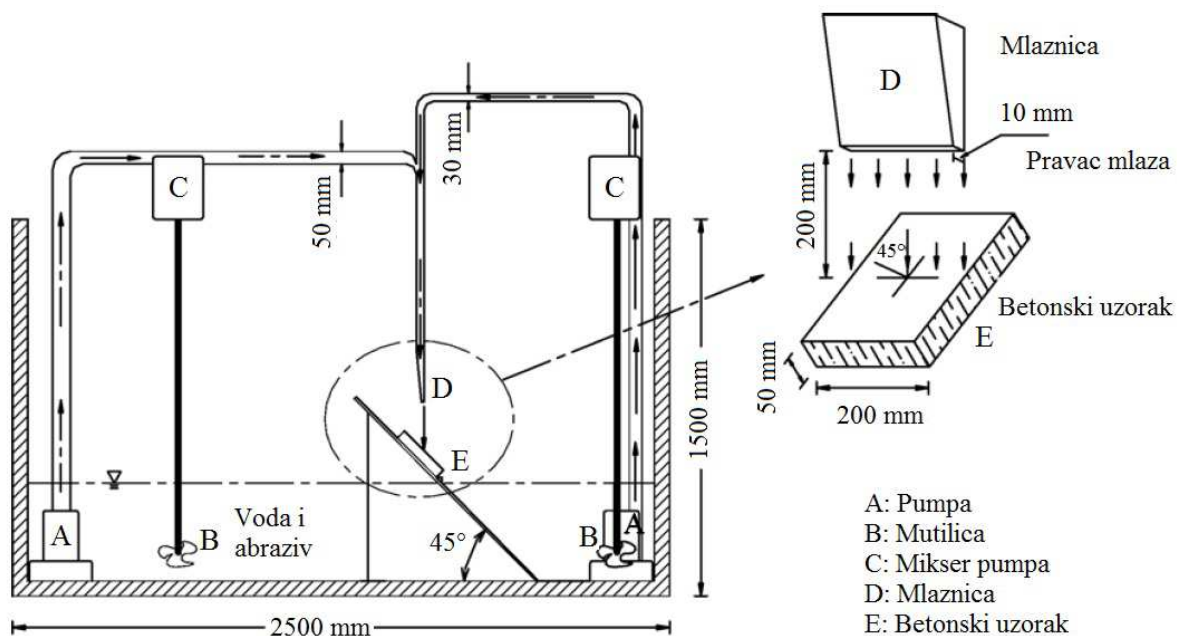
Slika 4.7 Šematski prikaz metode habanja Bania [34],  
dimenzije su u mm

Ova metoda ispitivanja habanja u velikoj meri simulira realne prirodne uslove. Osnovni nedostatak jesu male dimezije ispitnih uzoraka. Treba napomenuti da je ovaj uređaj koristio Haroske [21,196] za ispitivanje habanja svojih uzoraka.

#### 4.9. Metoda habanja mlazem mešavine vode i peska

Ovu metodu ispitivanja habanja betona koristili su Liu i saradnici [27,31] prilikom istraživanja hidro-abrazivne otpornosti različitih vrsta betona. Uređaj za ispitivanje se sastoji od limenog bazena dimenzija 2500×1800×1500 mm, slika 4.8. Bazen je napunjen vodom do trećine visine. U vodi je sipan abraziv, odnosno silikatni pesak čija je maksimalna veličine zrna 5 mm. Sadržaj abraziva u mešavini je 400 kg/m<sup>3</sup>. Relativno homogenu mešavinu vode i abraziva obezbeđuju mutilice (propeleri) koje se nalaze u bazenu, a pokreće ih mikser pumpe. Takođe, unutar bazena se nalaze četiri pumpe koje sa različitih mesta uvlače mešavinu vode i abraziva. Pumpama zahvaćena mešavina se skuplja u jednu cev koja se završava mlaznicom pravugaonog otvora 200×10 mm preko koje se bombarduje betonska ispitna ploča koja se nalazi ispod mlaznice, ali i iznad vode. Brzina mešavine vode i abraziva na izlazu iz mlaznice se kontroliše i iznosi 10 m/s što odgovara pritisku od 0,17 MPa. Temperatura vode se održava na 30°C. Napadni ugao mlaza mešavine vode i peska u

odnosu na betonsku ploču može da se menja, a obično se koristi ugao od  $45^\circ$ . Betonska ispitna ploča je dimenzija  $200 \times 200 \times 50$  mm i nalazi se na 200 mm ispod mlaznice. Vreme izlaganja uzorka hidro-abrazivnom delovanju iznosi 180 minuta. Ocena otpornosti betona prema habanju se vrši na osnovu gubitka mase uzorka u jedinici vremena (g/min).



Slika 4.8 Šematski prikaz metode habanja mlazem mešavine vode i abraziva [27,31]

Za potrebe ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona korišćenim u istraživanju u okviru ove doktorske disertacije korišćen je sličan uređaj koji su koristili Liu i saradnici [27,31], delimično modifikovan i prilagođen drugačijim uslovima ispitivanja. Više reči o ovome biće u poglavlju 5.5.11. („Hidro-abrazivne otpornosti betona“).



## 5. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Radi utvrđivanja bilo koje osobine građevinskog materijala, bilo da je reč o reološkoj, fizičko-mehaničkoj, tehnološkoj ili drugoj osobini, neophodno je uraditi eksperimentalno istraživanje. Naime, sam naučni eksperiment se definiše kao plansko, organizovano i metodsko proizvođenje ili menjanje realnih pojava u cilju otkrića nepoznatih predmeta ili njihovih svojstava. Značajna odlika eksperimenta je mogućnost da se iz kompleksa prirodnih pojava mogu izdvojiti one koje imaju presudnu važnost za određeni naučni cilj. Željeni uticaji se mogu proizvoditi koliko god puta je to potrebno, a uslove eksperimenta je moguće menjati ukoliko je to potrebno s obzirom na postavljeni zadatak.

Karakteristike kompozitnih građevinskih materijala, kakav je beton, mogu se utvrditi različitim metodama ispitivanja na različitim aparaturama u skladu sa važećim standardima (SRPS, EN, ASTM, ISO i dr). Takođe mogu se primeniti i nestandardne metode ispitivanja usled nedostatka odgovarajuće opreme, usled razvoja novih metoda u ispitivanju materijala ili usled želje da se što realnije simuliraju eksploatacioni uslovi u kojima se nalazi predmetni materijal, kao što je slučaj ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona obrađenog u ovoj disertaciji.

Eksperimentalno istraživanje, kao najbitiniji deo celokupnog rada obuhvata spravljanje i ispitivanje više vrsta cement betona izrađenih od cementa kao veziva, elektrofilterskog pepela i silikatne prašine kao delimične zamene cementa, standardnih frakcija rečnog agregata I (0/4 mm), II (4/8 mm) i III (8/16 mm), reciklirane granulirane gume kao delimična zamene sitnog rečnog agregata, vode, aditiva za beton tipa superplastifikatora, dva tipa polipropilenska vlakana (monofilamentnih i fibriliranih) i dva tipa čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 30 mm i 50 mm.

### 5.1. Program istraživanja

Na osnovu analize postojećeg stanja u svetu u oblasti istraživanja hidro-abrazivne otpornosti betona, kao i na osnovu pretpostavki i ciljeva od kojih se pošlo u ovom istraživanju, formulisan je program eksperimentalnog istraživanja. Za potrebe ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona napravljeno je ukupno osamnaest vrsta betona i to:

- Etalon beton, beton bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata i bez dodatka vlakana (oznaka „E“);
- Beton bez delimične zamene cementa, sa delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i bez dodatka vlakana (oznaka „ER“);
- Beton bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata i sa dodatkom polipropilenskih monofilamentnih vlakana (oznaka „EPM“);
- Beton bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata i sa dodatkom polipropilenskih fibriliranih vlakana (oznaka „EPF“);
- Beton bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata i sa dodatkom čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 30 mm – kraća vlakna (oznaka „ESS“);
- Beton bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata i sa dodatkom čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 50 mm – duža vlakna (oznaka „ESL“);

- Etalon beton sa elektrofilterskim pepelom, beton sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom, bez delimične zamene rečnog sitnog agregata i bez dodatka vlakana (oznaka „EF“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom, delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i bez dodatka vlakana (oznaka „FR“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom, bez delimične zamene sitnog rečnog agregata i sa dodatkom polipropilenskih monofilamentnih vlakana (oznaka „FPM“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom, bez delimične zamene sitnog rečnog agregata i sa dodatkom polipropilenskih fibriliranih vlakana (oznaka „FPF“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom, bez delimične zamene sitnog rečnog agregata i sa dodatkom čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 30 mm – kraća vlakna (oznaka „FSS“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom, bez delimične zamene sitnog rečnog agregata i sa dodatkom čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 50 mm – duža vlakna (oznaka „FSL“);
- Etalon beton sa silikatnom prašinom, beton sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom, bez delimične zamene rečnog sitnog agregata i bez dodatka vlakana (oznaka „ES“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom, delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i bez dodatka vlakana (oznaka „SR“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom, bez delimične zamene sitnog rečnog agregata i sa dodatkom polipropilenskih monofilamentnih vlakana (oznaka „SPM“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom, bez delimične zamene sitnog rečnog agregata i sa dodatkom polipropilenskih fibriliranih vlakana (oznaka „SPF“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom, bez delimične zamene sitnog rečnog agregata i sa dodatkom čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 30 mm – kraća vlakna (oznaka „SSS“);
- Beton sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom, bez delimične zamene sitnog rečnog agregata i sa dodatkom čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 50 mm – duža vlakna (oznaka „SSL“).

Sve navedene betonske mešavine mogu se razvrstati u tri grupe od po šest mešavina. Prvu grupu čine betonske mešavine kod kojih nije vršena delimična zamena cementa, drugu grupu čine betonske mešavine kod kojih je izvršena zamena cementa elektrofilterskim pepelom u iznosu od 20% u odnosu na masu cementa, dok treću grupu sačinjavaju betonske mešavine kod kojih je izvršena zamena cementa silikatnom prašinom u iznosu od 10% u odnosu na masu cementa. U okviru svake grupe nalazi se jedna mešavina u kojoj je izvršena delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom u iznosu od 10% u odnosu na zapreminu agregata, zatim dve betonske mešavine kojima su dodata polipropilenska vlakna (u jednoj monofilamentna i u drugoj fibrilirana), zatim dve mešavine u kojima su dodata čelična vlakna sa ojačanim krajevima (u jednoj vlakna dužine 30 mm i u

drugoj vlakna dužine 50 mm) i na kraju betonska mešavina bez delimične zamene rečnog sitnog agregata recikliranom gumom i bez dodatka vlakana. Tabelarni prikaz betonskih mešavina spravljenih i ispitivanih u ovoj disertaciji dat je u tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Vrste betonskih mešavina korišćenih u istraživanju

<b>Betonske mešavine</b>	Bez delimične zamene cementa i dodatkom	bez dodatka (E)
		granulisane reciklirane gume (ER)
		polipropilenskih monofilamentnih vlakana (EPM)
		polipropilenskih fibriliranih vlakana (EPF)
		čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 30 mm (ESS)
		čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 50 mm (ESL)
	Sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i dodatkom	bez dodatka (EF)
		granulisane reciklirane gume (FR)
		polipropilenskih monofilamentnih vlakana (FPM)
		polipropilenskih fibriliranih vlakana (FPF)
		čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 30 mm (FSS)
		čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 50 mm (FSL)
	Sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i dodatkom	bez dodatka (ES)
		granulisane reciklirane gume (SR)
		polipropilenskih monofilamentnih vlakana (SPM)
		polipropilenskih fibriliranih vlakana (SPF)
		čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 30 mm (SSS)
		čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima dužine 50 mm (SSL)

Za izradu betonskih mešavina korišćen je čist portland cement CEM I 42,5 R proizvođača „Holicm“ Novi Popovac, separisani agregat iz reke Južne Morave sa sepracije „Vodogradnja“ Pukovac sa maksimalnom veličinom zrna 16 mm, voda iz gradskog vodovoda, aditiv za beton tipa superplastifikator Sika Viscocrete 3070. Takođe, korišćena su polipropilenska vlakna i to: fibrilirana (mrežasta) vlakna FIBRILs F120 i monofilamentna vlakna FIBRILs S120 pravougaonog, odnosno kružnog poprečnog preseka i glatke obrade površine proizvođača „Motvoz“ Grosuplje, Slovenija. Upotrebljene su dve vrste čeličnih vlakana proizvođača „Spajić“ d.o.o. Negotin i to: čelična vlakna sa ojačanim krajevima dužine 30 mm sa oznakom ZS/N 0.5×30 mm i čelična vlakna sa ojačanim krajevima dužine 50 mm sa oznakom ZS/N 1.05×50 mm. Korišćena je, takođe, reciklirana granulisana guma granulacije 0,5 do 4 mm proizvođača „Tigar“ a.d. Pirot. Korišćeni elektrofilterski pepeo je iz termoelektrane „Kostolac“, dok je silikatna prašina „SikaFume“ proizvod kompanije „Sika“.

Količine materijala za spravljanje betona su određena na osnovu proučavanja strane literature i iskustava brojnih istraživača, kao i na osnovu dosadašnjeg iskustva autora disertacije na polju ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona. Količina cementa za spravljanje betonskih mešavina u kojima nije izvršena delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom iznosila je 400 kg. Delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom izvršena je u količini od 20% u odnosu na masu cementa, dok je delimična zamena cementa silikatnom prašinom iznosila 10% u odnosu na masu

cementa. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom izvršena je u količini od 10% u odnosu na zapreminu agregata. Količina upotrebljenih polipropilenskih vlakana (monofilamentnih i polipropilenskih) usvojena je na osnovu preporuke proizvođača i iznosi 0,91 kg za 1 m<sup>3</sup> betona. Količina upotrebljenih čeličnih vlakana (kraćih i dužih) usvojena na osnovu iskustva stranih istraživača i iznosi 25 kg po 1m<sup>3</sup> betona. Količina agregata i granulometrijski sastav su usvojeni tako da se dobije beton zapreminske mase  $\approx 2350 \text{ kg/m}^3$ .

U prethodnim istraživanjima [89] autor je utvrdio da delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom u iznosu od 15, 20, 25 i 30% u odnosu na masu cementa utiče na promenu hidro-abrazivne otpornosti betona, tako što smanjuje otpornost sa povećanjem procenta zamene cementa. Takođe je utvrđeno da beton sa zamenom cementa elektrofilterskim pepelom u iznosu od 15% ima približnu istu hidro-abrazivnu otpornost kao etalon beton bez zamene cementa. Za istraživanje u ovoj disertaciji je usvojena vrednost zamene cementa elektrofilterskim pepelom 20% u odnosu na masu cementa iz razloga što se htelo pokazati da se ojačanjem betona mikroarmaturom ili dodavanjem reciklirane granulisane gume može poboljšati hidro-abrazivna otpornost betona tako da ona bude približno ista kao kod etalon betona.

Takođe, u istom istraživanju [89] utvrđeno je da zamena cementa silikatnom prašinom u iznosu od 10% u odnosu na masu cementa doprinela poboljšanju hidro-abrazivne otpornosti betona, ali i drugih fizičko-mehaničkih osobina. Uzimajući u obzir i faktor koštanja silikatne prašine, autor je smatrao da je usvojeni procenat optimalan za dublju analizu efekta zamene cementa silikatnom prašinom u betonu na njegove karakteristike.

U ranije sprovedenom istraživanju [139] autor je došao do zaključka da zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom u velikoj meri utiče na fizičko-mehanička svojstva betona, pa i na njegovu hidro-abrazivnu otpornost. Istraživanjem je utvrđeno da beton koji je spravljen sa 10% zamene sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom u odnosu na zapreminu agregata ima bolju hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton spravljenog bez zamene rečnog agregata. Međutim, sa povećanjem procenta zamene agregata (20% i 30%) hidro-abrazivna otpornost se smanjuje. Iz ovih razloga usvojeni procenat zamene sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom u zapreminskim delovima iznosi 10%.

Predviđeno je da sve betonske mešavine budu izrađene sa istim odnosom mase vode i mase veziva ( $w/b=0,45$ ) i sa približno istom konzistencijom (sleganje 90-110 mm mereno Abramsovim konusom) što bi se ostvarilo korišćenjem superplastifikatora „Sika ViscoCrete 3070“. Granulometrijski sastav mešavine osnovnih frakcija agregata se nalazi između standardnih krivi „A“ i „B“ prema standardu SRPS U.M1.057:1984 [197] i isti je za sve mešavine, sa minimalnom razlikom za one mešavine u kojima se deo sitnog rečnog agregata menja recikliranom granulisanom gumom.

Ispitivanje osnovnih svojstava svežeg i očvrslog betona rađena su prema važećim srpskim (SRPS) odnosno evropskim (EN) standardima, dok su ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona i udarne otpornosti betona metodom „Drop-weight test“ rađena na originalnim aparaturama napravljenim u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu.

Na svežem betonu urađena su sledeća ispitivanja:

- određivanje konzistencije metodom sleganja (Abramsov konus) – SRPS EN 12350-2:2010 [198];

- odeđivanje zapreminske mase u svežem ugrađenom stanju – SRPS EN 12350-6:2010 [199];
- određivanje sadržaja uvučenog vazduha – SRPS EN 12350-7:2010 [200].  
Na očvrslom betonu urađena su sledeća ispitivanja:
- određivanje zapreminske mase očvrsllog betona – SRPS EN 12390-7:2010 [201];
- odeđivanje čvrstoće pri pritisku – SRPS EN 12390-3:2010 [202];
- određivanje čvrstoće pri savijanju – SRPS EN 12390-5:2010 [203];
- određivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem – SRPS EN 12390-6:2012 [204];
- određivanje veličine odskoka sklerometrom – SRPS EN 12504-2:2008 [205];
- određivanje brzine ultrazvučnog impulsa – SRPS EN 12504-4:2008 [206];
- određivanje statičkog modula elastičnosti pri pritisku – SRPS ISO 6784:2000 [207];
- određivanje čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom – SRPS EN 1542:2010 [208];
- ispitivanje otpornosti prema habanju brušenjem SRPS B.B8.015:1984 [190];
- ispitivanje udarne otpornosti betona, metoda „Drop-weight test“ prema preporukama profesora Ukrainczyka [209] – modifikovan za potrebe disertacije (teg mase 3 kg pada sa visine od 30 cm na betonsku ploču dimenzija 40×40×6 cm, pri čemu se meri broj udaraca do nastanka prve prsline, kao i broj udaraca do loma ploče);
- ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona – ubrzani test koji omogućava da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom udara o površinu ispitne betonske ploče, najznačajnije ispitivanje u ovom istraživanju.

## 5.2. Svojstva komponentnih materijala

Za potrebe eksperimentalnih istraživanja predviđeno je da se izvrši spravljanje i ispitivanje osamnaest različitih vrsta betona pri čemu je od materijala korišćeno rečni agregat, cement, voda, superplastifikator, elektrofilterski pepeo, silikatna prašina, granulirana reciklirana guma, dve vrste polipropilenskih vlakana (monofilamentna označenih kao FIBRILs S120 i fibrilirana sa oznakom FIBRILs F120) i dve vrste čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima (vlakna dužine 30 mm sa oznakom ZS/N 0.5×30 mm i vlakna dužine 50 mm sa oznakom ZS/N 1.05×50 mm).

U daljem tekstu biće prikazani rezultati ispitivanja svojstava komponentnih materijala korišćenih za spravljanje predmetnih betonskih mešavina. Biće prezentovane samo one karakteristike materijala koje mogu imati značajan uticaj na fizičko-mehanička svojstva ispitivanih betona. Rezultati ispitivanja pojedinih karakteristika polipropilenskih i čeličnih vlakana preuzeti su od proizvođača predmetnih vlakana.

### 5.2.1. Cement

Za potrebe spravljanja betonskih mešavina korišćen je čist portland cement, odnosno PC bez mineralnih dodataka, CEM I 42,5 R proizvođača „Holcim“ Novi Popovac. Ovaj cement je odabran, jer se u istraživanju između ostalog htelo pokazati kakav uticaj ima delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom na fizičko-mehanička svojstva betona. U Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu izvršena su ispitivanja svojstava koja predstavljaju osnovne uslove kvaliteta cementa, a u svemu prema odredbama važećih standarda iz ove oblasti SRPS EN 197-1:2013 [74], SRPS EN 196-1:2008 [210], SRPS EN 196-3:2010 [211], SRPS EN 196-6:2011 [212], SRPS B.C8.023:1997 [213]. Hemijski sastav cementa za potrebe

predmetnog istraživanja dostavio je proizvođač cementa i prikazan je u tabeli 5.2. Rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika cementa prikazani su u tabeli 5.3.

Tabela 5.2. Hemijski sastav cementa CEM I 42,5 R proizvođača „Holcim“ Novi Popovac

Parametar	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	S	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	CO <sub>2</sub>	Cl	Slo. CaO	Ner. ost.	Gubitak žarenjem
Vrednost	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	21,62	2,60	7,00	60,16	2,34	2,55	0,12	0,33	0,66	0,13	0,80	0,01	1,25	0,30	2,68

Tabela 5.3. Fizičko-mehaničke karakteristike cementa CEM I 42,5 R proizvođača „Holcim“ Novi Popovac

Vrsta ispitivanja	Jed. mere	Rezultat ispitivanja	Uslov kvaliteta SRPS EN 197-1:2013	Zaključak (ocena)
1. Standardna kohezivnost SRPS EN 196-3	%	28,0	max. 31 – 32 %	zadovoljava
2. Vreme vezivanja SRPS EN 196-3	sati min	почетак – 3h 05' крај – 4h 00'	početak ≥ 50 min kraj ≤ 10h	zadovoljava
3. Stalnost zapremine SRPS EN 196-3	mm	1,0	max. 10 mm	zadovoljava
4. Finoća mliva SRPS EN 196-6	%	Остатак на сити 0,09 mm 2,0%	na situ 0,09 mm 10%	zadovoljava
5. Zapreminska masa u rastresitom stanju SRPS B.C8.023	kg/m <sup>3</sup>	925	nije propisan	–
6. Zapreminska masa u zbijenom stanju SRPS B.C8.023	kg/m <sup>3</sup>	1521	nije propisan	–
7. Specifična masa SRPS EN 196-6	g/cm <sup>3</sup>	3,150	min. 3,0	zadovoljava
8. Specifična površina po Blenu SRPS EN 196-6	cm <sup>2</sup> /g	3640	min. 2400	zadovoljava
9. Čvrstoća pri savijanju SRPS EN 196-1	MPa	nakon 2 dana – 6,8 nakon 28 dana – 9,1	nije propisan	–
10. Čvrstoća pri pritisku SRPS EN 196-1	MPa	nakon 2 dana – 32,5 nakon 28 dana – 57,3	min. 20 min. 42,5	zadovoljava

Rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika cementa označenog kao CEM I 42,5 R prikazani u tabeli 5.3 pokazuju da ispitani cement u potpunosti ispunjava uslove propisane važećim domaćim i evropskim standardima.

## 5.2.2. Agregat

Za eksperimentalna istraživanja korišćen je rečni agregat iz reke Južne Morave sa separacije „Vodogradnja“ Pukovac frakcionisan u tri osnovne frakcije I (0/4 mm), II (4/8 mm) i III (8/16 mm). To znači da je veličina nominalno najkrupnijeg zrna iznosila  $D=16$  mm. Jedan od razloga izbora najkrupnijeg zrna agregata od 16 mm jeste mala debljina ploče za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona (dimenzije ploče  $20 \times 20 \times 5$  cm). Izvršena su ispitivanja određenih svojstava frakcija rečnog agregata čiji su rezultati prikazani u tabeli 5.4.

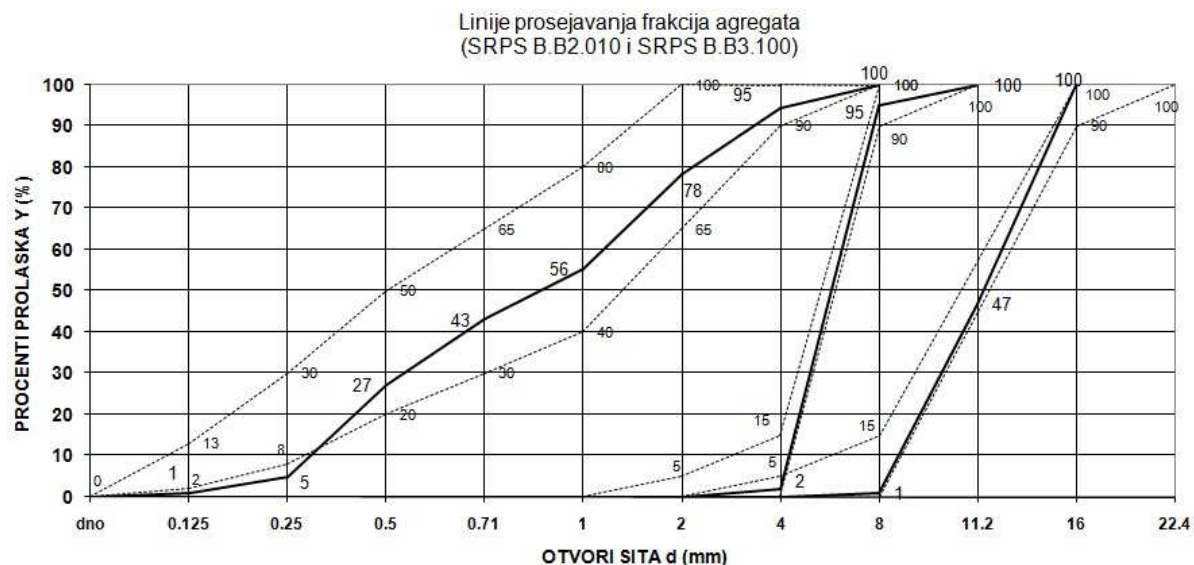
Tabela 5.4. Rezultati ispitivanja nekih svojstava pojedinačnih frakcija rečnog agregata

Karakteristika	Jed. mere	Frakcija I (0/4 mm)	Frakcija II (4/8 mm)	Frakcija III (8/16 mm)	Uslov kvaliteta SRPS B.B2.010
1. Stvarna zapreminska masa SRPS ISO 6786	kg/m <sup>3</sup>	2630	2650	2650	2000 – 3000
2. Zapreminska masa u rastresitom stanju SRPS ISO 6782	kg/m <sup>3</sup>	1480	1480	1460	nije propisan
3. Zapreminska masa u zbijenom stanju SRPS ISO 6782	kg/m <sup>3</sup>	1730	1610	1640	nije propisan
4. Sadržaj sitnih čestica SRPS B.B8.036	%	2,36	0,19	0,14	≤ 5 ситан ≤ 1 крупан
5. Sadržaj grudvi gline SRPS B.B8.038	%	0,06	0,01	0,02	≤ 0,5 sitan ≤ 0,25 krupan
6. Sadržaj organskih materija SRPS B.B8.039	–	boja tečnosti iznad agregata svetlija od etalona		–	tečnost svetlija od etalona
7. Oblik zrna (zapreminski koeficient) SRPS B.B8.049	–	–	0,24	0,26	≥ 0,18
8. Oblik zrna (kljunasto merilo) SRPS B.B8.048	%	–	16,25	17,82	≤ 20
9. Upijanje vode SRPS ISO 6786	%	–	0,89	0,87	nije propisan

Granulometrijski sastav frakcija agregata je određen metodom suvog sejanja prema odredbama standarda SRPS EN 933-1:2013 [214]. Procenti prolaska pojedinih frakcija dati su u tabeli 5.5, dok je granulometrijski sastav prikazan na slici 5.1.

Tabela 5.5. Granulometrijski sastav frakcija agregata

Frakcija	Procenat prolaska na situ [mm]:											
	0,125	0,25	0,50	0,71	1	2	4	8	11,2	16	22,4	31,5
0/4 mm	1	5	27	43	56	78	95	100	100	100	100	100
4/8 mm	0	0	0	0	0	0	2	95	100	100	100	100
8/16 mm	0	0	0	0	0	0	0	1	47	100	100	100



Slika 5.1. Granulometrijske krive upotrebljenih frakcija rečnog agregata

Na osnovu rezultata ispitivanja datih u tabelama 5.4 i 5.5 i na slici 5.1 može se zaključiti da ispitane frakcije rečnog agregata ispunjavaju uslove kvaliteta propisanih standardima SRPS B.B2.010:1986 [215] i SRPS B.B3.100:1983 [216] izuzev u pogledu sadržaja podmernih zrna frakcije 0/4 mm na sitima otvora 0,125 i 0,25 mm i frakcije 4/8 mm na situ 4 mm (što je uobičajeno za agregat iz reke Južne Morave).

### 5.2.3. Voda

Za spravljanje betona korišćena je voda iz gradskog vodovoda tako da posebna ispitivanja njenih karakteristika nisu rađena.

### 5.2.4. Elektrofilterski pepeo

Za potrebe eksperimentalnih istraživanja korišćen je elektrofilterski pepeo iz termoelektrane „Kostolac“. Uzorkovanje pepela je izvršeno direktno sa filtra i na taj način se sačuvala njegova pucolanska aktivnost, što nije slučaj sa deponovanim pepelom. Ovaj elektrofilterski pepeo prema hemijskom sastavu pripada silikatnim pepelima, a prema standardu ASTM C-618:1990 [217] spada u klasu F, odnosno u kisele pepela. Hemijski sastav korišćenog elektrofilterskog pepela dat je u tabeli 5.6.



Tabela 5.6. Hemijski sastav elektrofilterskog pepela iz termoelektrane „Kostolac“

Parametar	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Gubitak žarenjem
Karakteristika	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	51,68	11,58	20,16	7,43	2,41	1,02	0,12	1,04	0,88	1,04	2,57

Ispitivanja nekih fizičkih osobina korišćenog elektrofilterskog pepela izvršena su u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu prema odredbama važećeg standarda iz ove oblasti SRPS B.C1.018:2001 [218]. Rezultati ispitivanja dati su u tabeli 5.7.

Tabela 5.7. Fizička svojstva elektrofilterskog pepela iz termoelektrane „Kostolac“

Vrsta ispitivanja	Jed. mere	Rezultat ispitivanja
1. Zapreminska masa u rastresitom stanju	kg/m <sup>3</sup>	637
2. Zapreminska masa u zbijenom stanju	kg/m <sup>3</sup>	763
3. Specifična masa	g/cm <sup>3</sup>	2,130
4. Specifična površina po Blenu	cm <sup>2</sup> /g	4230
5. Ostatak na situ 0,09 mm	%	6,1

#### 5.2.5. Silikatna prašina

Za potrebe eksperimentalnih istraživanja korišćena je silikatna prašina „SikaFume“ proizvođača Sika. Prema prospektu proizvođača „SikaFume“ se definiše kao aditiv za beton u obliku praha koji se primenjuje kod konstrukcijskih betona i betona za sanaciju. U ovom istraživanju silikatna prašina je korišćena kao zamena cementa u iznosu od 10% u odnosu na masu cementa, a ne kao posebni dodatak betonu.

Kako se ovaj proizvod uveliko koristi u istraživanjima i aplikacijama širom sveta, osnovne karakteristike silikatne prašine preuzete su sa prospekta proizvođača [219]. SikaFume sadrži izuzetno fin (veličina zrna 0,1 μm), amorfan, latentno reaktivan silicijum dioksid. Deluje tako da postiže jaku unutrašnju koheziju i veliku sposobnost zadržavanja vode. Svežem betonu pospešuje plastičnost i sposobnost pumpanja. U očvrslom betonu uspostavlja latentno reaktivnu hemijsku vezu sa oslobođenim krečom. Usled dodatnog stvaranja čvrstih produkata hidratacije cementna matrica postaje znatno gušća. Upotrebom „SikaFuma“ postiže se sledeće:

- povećava se plastičnost svežeg betona;
- povećava se trajnost betona;
- povećava se otpornost na hemijsku agresiju;
- visoka postojanost na mraz i jednovremeno dejstvo mraza i soli;
- visoke rane čvrstoće;
- povećavaju se krajnje čvrstoće;
- povećava se otpornost na abraziju;
- povećava se otpornost na prodor hlorida i gasova;
- povećava se vodonepropustnost betona.

Hemijski sastav korišćenog elektrofilterskog pepela „SikaFume“ dat je u tabeli 5.8.

Tabela 5.8. Hemijski sastav silikatne prašina „SilikaFume“ proizvođača „Sika“

Parametar	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C	Loss on ignition
Karakteristika	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	93,6	0,21	0,27	0,05	0,05	0,8	0,23	0,5	1,82	2,40

Ispitivanja nekih fizičkih osobina korišćene silikatne prašine izvršena su u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu čiji su rezultati dati u tabeli 5.9.

Tabela 5.9. Neka fizička svojstva silikatne prašine „SikaFume“ proizvođača „Sika“

Vrsta ispitivanja	Jed. mere	Rezultat ispitivanja
1. Zapreminska masa u rastresitom stanju	kg/m <sup>3</sup>	585
2. Zapreminska masa u zbijenom stanju	kg/m <sup>3</sup>	737
3. Specifična masa	g/cm <sup>3</sup>	2,210
4. Specifična površina po Blenu	cm <sup>2</sup> /g	210000
5. Ostatak na situ 0,09 mm	%	0,2

#### 5.2.6. Superplastifikator „Sika ViscoCrete 3070“

U cilju obezbeđenja približno iste konzistencije za sve betonske mešavine (veličina sleganja 90-110 mm pomoću Abramsovog konusa) korišćen je posebni dodatak za beton tipa superplastifikator komercijalnog naziva „Sika ViscoCrete 3070“. Prema prospektu proizvođača „Sika ViscoCrete 3070“ [220] se definiše kao dodatak betonu bez sadržaja formaldehida i hlorida, na bazi modifikovanih polikarboksilata, koji omogućuje spravljanje cementnih mešavina visokih performansi sa očuvanjem tečne konzistencije u toplim klimatskim uslovima ili pri transportu na veće udaljenosti. Takođe, omogućava značajno smanjenje skupljanja usled gubitka vode iz betona i plastičnog skupljanja, utiče na povećanje ranih i konačnih čvrstoća, kao i na povećanje trajnosti betona. Dozira se u rasponu od 0,5 do 1,2% u odnosu na masu cementa. Rezultati ispitivanja uticaja dodatka na svojstva cementne paste i maltera dati su u tabeli 5.10.

Tabela 5.10. Rezultati ispitivanja uticaja dodatka „Sika ViscoCrete 3070“ na svojstva cementne paste i maltera

Vrsta ispitivanja	Jed. mere	Rezultat ispitivanja			Uslov kvaliteta SRPS U.M1.035: 1996
		Etalon	Količina dodatka % (m/m)		
			0,85	2,40	
1. Standardna kohezivnost	%	28,0	26,8	24,0	–
2. Vreme vezivanja - početak - kraj	min	185 240	225 310	245 340	min. 50 max. 600
3. Stalnost zapremine	mm	1,0	1,0	1,0	max. 10
4. Smanjenje količine potrebne vode	%	–	13,3	19,1	min. 12
5. Rasprostiranje	mm	195	> 250	> 250	–
6. Sadržaj vazduha	%	6,2	8,0	8,4	–
7. Povećanje sadržaja vazduha u odnosu na etalon	%	–	+1,8	+2,2	max. +2
8. Savojna čvrstoća - 1 dan - 3 dana - 7 dana - 28 dana	MPa	5,3±0,6 7,0±0,3 8,1±0,5 9,1±0,8	6,3±0,4 7,3±0,3 8,8±0,4 9,5±0,2	– 7,9±0,3 8,5±0,4 10,0±0,2	– – – –
9. Pritisna čvrstoća - 1 dan - 3 dana - 7 dana - 28 dana	MPa	23,7±0,8 40,6±0,8 47,0±0,8 57,3±1,4	30,0±0,2 50,5±0,7 56,9±0,8 67,3±0,9	– 44,0±0,7 55,1±0,5 68,8±0,5	– – – –
10. Pritisna čvrstoća, % od etalona - 1 dan - 3 dana - 7 dana - 28 dana	%	– – – –	126,6 124,4 121,1 117,5	– 108,4 117,2 120,1	– min. 90 min. 90 min. 90
10. Linearne deformacije, (mm/m) - 4 dana - 7 dana - 14 dana - 21 dan - 28 dana	–	-0,125 -0,250 -0,375 -0,500 -0,625	-0,100 -0,225 -0,300 -0,400 -0,525	– – – – –	– – – – –

## 5.2.7. Reciklirana granulirana guma

U eksperimentalnom istraživanju korišćena je reciklirana granulirana guma proizvođača „Tigar“ Pirot, slika 5.2.



Slika 5.2. Reciklirana granulirana guma korišćena u istraživanju

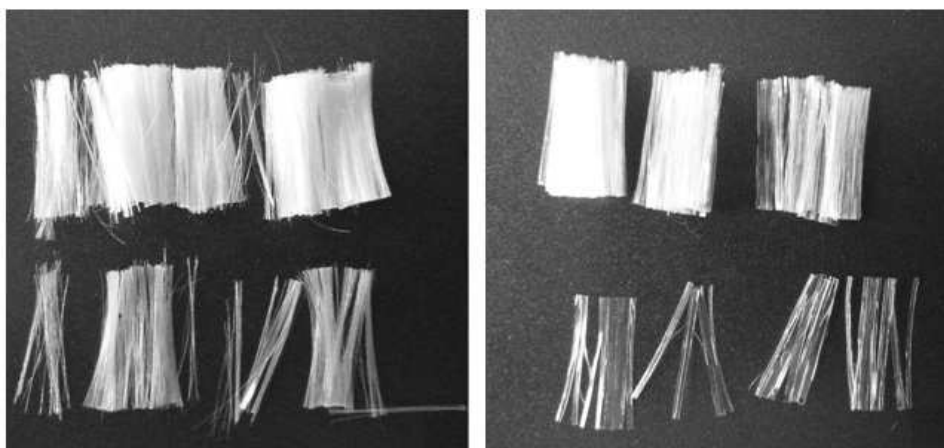
Gumeni granulati dobijeni su recikliranjem starih automobilskih guma, pri čemu je izvršeno odvajanje i uklanjanje čeličnih i platnenih delova. Gumeni agregat je granulacije 0,5 do 4 mm i njegov granulometrijski sastav prikazan je na slici 5.3. Zapreminska masa zrna agregata i zapreminska masa agregata određene su prema standardu SRPS ISO 6783:1999 [221] i iznose  $1150 \text{ kg/m}^3$  i  $480 \text{ kg/m}^3$ , respektivno.



Slika 5.3. Granulometrijska kriva upotrebljene reciklirane granulirane gume

## 5.2.8. Polipropilenska vlakna

Za potrebe eksperimentalnih istraživanja korišćene su dve vrste polipropilenskih vlakana: fibrilirana (mrežasta) vlakna FIBRILs F120 i monofilamentna vlakna FIBRILs S120 proizvođača „Motvoz“ Grosuplje, Slovenija, slika 5.4. Fibrilirana vlakna su dužine 12 mm i ekvivalentnog prečnika 0,45 mm (faktor oblika  $l/d=27$ ), dok su monofilamentna vlakna dužine 12 mm i prečnika 0,037 mm (faktor oblika  $l/d=324$ ). Pojam ekvivalentnog prečnika ovde je uveden s obzirom da se radi o mikroarmaturi pravougaonog poprečnog preseka, a on se dobija kada se stvarna površina poprečnog preseka vlakna izjednači sa površinom ekvivalentnog kruga, prečnika  $d$ .



Slika 5.4. Polipropilenska vlakna korišćena za armiranje betona: FIBRILs F120 (levo) i FIBRILs S120 (desno)

Osnovni materijal od koga su napravljena polipropilenska vlakna je čist polipropilen (100%). Vlakna su sa glatkom obradom površina koja omogućava bolju ugradljivost i obradljivost sveže betonske mešavine i ravnomerno dispergovanje vlakana u svim pravcima. Za razliku od monofilamentnih vlakana koja su nezavisna jedna od drugih, fibrilirana vlakna su međusobno povezana tanjim poprečnim vlaknima. Zbog svoje povezanosti fibrilirana vlakna uključuju veći broj susednih vlakana u prihvatanju nekog uticaja u betonu.

Optimalno doziranje ovih vlakana je prema preporuci proizvođača je  $0,91 \text{ kg/m}^3$ , mada se ostavlja mogućnost da se ova količina poveća u zavisnosti od zahteva i namene betona. Svi ostali dodaci betonu ne utiču na kvalitet vlakana i jednako se upotrebljavaju kao kod običnog betona.

Takođe, u prospektnim materijalima firme „Motvoz“ navode se prednosti koje ova vlakna mogu da donesu betonima u odnosu na klasične betone bez mikroarmature [222]. Prema ovom izvoru, upotrebom fibriliranih FIBRILs F120 i monofilamentnih vlakana FIBRILs S120 postže se sledeće:

- istovremeno rešavanje više građevinskih problema;
- smanjenje nastanka prslina i mikropora u betonu;
- porast čvrstoće pri pritisku betona;
- porast čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona;
- smanjenje propusnosti betona;
- povećanje žilavosti, otpornosti na mraz, udar, abraziju i habanje;
- povećanje otpornosti na kiseline, alkalije i rđu;

- smanjenje modula elastičnosti (beton je elastičniji);
- visoka protivpožarna otpornost;
- smanjenje rizika segregacije i pojave „krvaranja“ betona;
- potpuna ili delimična zamena čelične armature;
- dobra sposobnost disperzije;
- smanjenje broja dilatacionih spojnica;
- bezopasan po zdravlje (polipropilen je inertan materijal);
- jednostavna upotreba;
- smanjenje troškova gradnje;
- ne šteti okolini;
- široka upotreba.

Prema uputstvima proizvođača, moguća područja primene predmetnih vlakana su sledeća: za industrijske podove, cementne košuljice, otvorene betonske ploče, injekcione maltere, tunele (torkret betoni), protivpožarne bazene, puteve, aerodrome, silose, brane, potporne zidove, potporne stubove, ivice mostova, fasade, prefabrikovane betonske elemente, maltere i betone sa povećanom otpornošću pri dejstvu požara i sl.

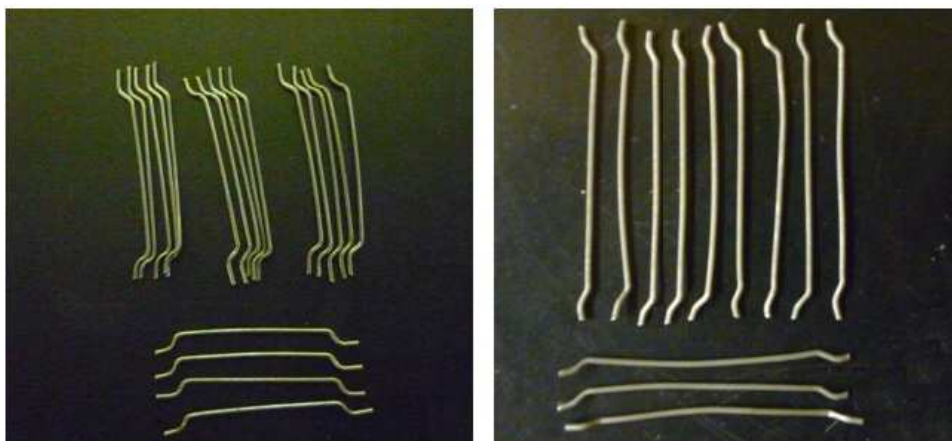
Za potrebe ovog istraživanja nisu vršena ispitivanja pojedinih svojstava osnovnog materijala – polipropilena od kojih su napravljena vlakna, kao što je bio slučaj sa drugim komponentnim materijalima, jer postoji izveštaj o ispitivanju predmetnih vlakana od strane Laboratorije za beton Zavoda za gradbeništvo Slovenije iz Ljubljane [223]. Pošto je reč o ozbiljnoj akreditovanoj laboratoriji priznatoj u EU, rezultate ispitivanja se mogu smatrati relevantnim. Rezultati ispitivanja polipropilenskih vlakana dati su u tabeli 5.11.

Tabela 5.11. Karakteristike polipropilenskih vlakana FIBRILs F120 i FIBRILs S120 [223]

Karakteristika	Polipropilenska vlakna „Motvoz“ Grosuplje	
	Fibrilirana FIBRILs F120	Monofilamentna FIBRILs S120
Osnovni materijal	Polipropilen (100%)	Polipropilen (100%)
Način proizvodnje	Ekstrudiranjem	Ekstrudiranjem
Tip vlakna	Fibrilirana (mrežasta)	Monofilamentna, glatka
Poprečni presek	Pravougaoni	Kružni
Prečnik (ekvivalentni)	0,45 mm	0,037 mm
Dužina	12 mm	12 mm
Faktor oblika	27	324
Podužna masa	144 tex ( $10^{-6}$ kg/m)	0,99 tex ( $10^{-6}$ kg/m)
Čvrstoća pri zatezanju	274,0±26,9 N/mm <sup>2</sup>	300,7±31,7 N/mm <sup>2</sup>
Temperatura topljenja	160,0 °C	163,1 °C
Entalpija topljenja	82,3 J/g	104,3 J/g
Preporučeno doziranje	0,91 kg/m <sup>3</sup>	0,91 kg/m <sup>3</sup>

## 5.2.9. Čelična vlakna

U eksperimentalnom istraživanju korišćene su dve vrste čeličnih vlakana: čelična vlakna sa ojačanim krajevima oznake ZS/N – 0,50×30 mm i čelična vlakna sa ojačanim krajevima oznake ZS/N – 1,05×50 mm proizvođača „Spajić“ d.o.o. Negotin, Srbija, slika 5.5. Čelična vlakna sa oznakom ZS/N – 0,50×30 mm su dužine 30 mm i prečnika 0,50 mm (faktor oblika  $l/d=60$ ), dok su čelična vlakna sa oznakom ZS/N – 1,05×50 mm dužine 50 mm i prečnika 1,05 mm (faktor oblika  $l/d=48$ ).



Slika 5.5. Čelična vlakna sa ojačanim krajevima koršćena za armiranje betona: ZS/N – 0,50×30 mm (levo) i ZS/N – 1,05×50 mm (desno)

Osnovni materijal od koga su napravljena čelična vlakna je nelegirani čelik oznake C7D (broj 1.0313) prema standardu SRPS EN 10016-2:2008 [224]. Hemijski sastav valjane žice od nelegiranog čelika za izvlačenje i/ili hladno valjanje oznake C7D u % dat je u tabeli 5.12.

Tabela 5.12. Hemijski sastav nelegiranog čelika klase C7D (1.0313) u %

Može se prihvatiti: Cu<0,2; 0,02<Al<0,06; Si<0,1									
C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	AL	Cu
0,05-0,09	max. 0,3	0,3-0,6	max. 0,25	max. 0,035	max. 0,035	max. 0,2	max. 0,05	max. 0,01	max. 0,3

Površina čeličnih vlakana je glatka čime je obezbeđena jaka veza između vlakana i cementnog kamena. Optimalno doziranje čeličnih vlakana je prema preporuci proizvođača je između 20 i 50 kg/m<sup>3</sup>, mada se ostavlja mogućnost da se ova količina poveća u zavisnosti od zahteva i namene betona do 100 kg/m<sup>3</sup>. Svi ostali dodaci betonu ne utiču na kvalitet vlakana i jednako se upotrebljavaju kao kod običnog betona.

Karakteristike čeličnih vlakana korišćenih u istraživanju dati su u tabeli 5.13.

Tabela 5.13. Karakteristike čeličnih vlakana ZS/N 0,5×30 mm i ZS/N 1,05×50 mm

Karakteristika	Čelična vlakna sa ojačanim krajevima „Spajić“ d.o.o. Negotin	
	ZS/N 0.5x30 mm	ZS/N 1.05x30 mm
Osnovni materijal	Nelegirani čelik	Nelegirani čelik
Način proizvodnje	Hladno vučena žica	Hladno vučena žica
Tip vlakna	Sa ojačanim krajevima	Sa ojačanim krajevima
Poprečni presek	Kružni	Kružni
Prečnik	0,50 mm	1,05 mm
Dužina	30 mm	50 mm
Faktor oblika	60	48
Čvrstoća pri zatezanju	1100±165 N/mm <sup>2</sup>	1100±165 N/mm <sup>2</sup>
Preporučeno doziranje	20 – 50 kg/m <sup>3</sup>	20 – 50 kg/m <sup>3</sup>

Prema prospektu firme „Spajić“ d.o.o. Negotin [225], upotrebom čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima oznake ZS/N – 0,50×30 mm i ZS/N – 1,05×50 mm postiže se:

- povećanje čvrstoće pri pritisku betona;
- povećanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem betona;
- smanjenje propusnosti betona;
- smanjuje se potreba za klasičnim armaturom;
- sprečavanje pojave pukotina i prslina u betonu;
- povećanje duktilnosti betona;
- povećanje udarne otpornosti betona;
- povećanje otpornosti na ciklično opterećenje (efekat zamora);
- povećanje otpornosti na abraziju;
- povećanje otpornosti na mraz;
- jednostavna i brza ugradnja betona;
- smanjeni troškovi ugradnje;
- dobra disperzija vlakana u betonskoj smeši;
- jednostavna upotreba.

Korišćena čelična vlakna kompanije „Spajić“ d.o.o. Negotin, ZS/N – 0,50×30 mm i ZS/N 1,05×50 mm su usaglašena sa standardom SRPS EN 14889-1:2006 [226]. Sertifikat o usaglašenosti je izdala akreditovana laboratorija u sklopu Instituta za istraživanje i ispitivanje konstrukcija u Bratislavi, Slovačka. Efekat dodavanja čeličnih vlakana ZS/N – 0,50×30 mm i ZS/N 1,05×50 mm na karakteristike betona dati su u tabelama 5.14 i 5.15 [227].



Tabela 5.14. Efekat dodavanja čeličnih vlakana ZS/N 0,5×30 mm na karakteristike betona [227]

Karakteristike		Odredba za procenu usaglašenosti: SRPS EN 14889-1 [226] i kriterijumi	Podatak merenja	Interpretacija
Efekat čeličnih vlakana na osobine betonskog bloka:  Prosečna rezidualna zatezna čvrstoća na savijanje betona sa čeličnim vlaknima za 12 uzoraka (greda) posle 28 dana [MPa]  Za betonsku mešavinu koje sadrže 25 kg/m <sup>3</sup> vlakana		SRPS EN 14845-2 [228] član 4 i član 5  za prslinu na gredi CMOD=0,5mm i vertikalno savijanje 0,47mm  Prosečna rezidualna zatezna čvrstoća na savijanje > 1,5MPa	min ÷ max 1,45 ÷ 3,11 MPa  srednja vrednost 2,26 MPa	Zadovoljava
		SRPS EN 14845-2 [228] član 4 i član 5  za prslinu na gredi CMOD=3,5mm i vertikalno savijanje 3,02mm  Prosečna rezidualna zatezna čvrstoća na savijanje > 1,0MPa	min ÷ max 1,20 ÷ 2,67 MPa  srednja vrednost 2,03 MPa	Zadovoljava
Efekat čeličnih vlakana na konzistenciju betona WEBE [sec]	Beton bez vlakana	SRPS EN 12350-3 [229] Konzistencija betona vreme po WEBE-u 5 ÷ 10 s	Srednja vrednost 7 s	Zadovoljava
	Betonska mešavina sa 25 kg/m <sup>3</sup> vlakana	SRPS EN 12350-3 [229] Konzistencija betona vreme po WEBE-u 5 ÷ 10 s	Srednja vrednost 10 s	Zadovoljava

Tabela 5.15. Efekat dodavanja čeličnih vlakana ZS/N 1,05×50 mm na karakteristike betona [227]

Karakteristike		Odredba za procenu usaglašenosti: SRPS EN 14889-1 [226] i kriterijumi	Podatak merenja	Interpretacija
Efekat čeličnih vlakana na osobine betonskog bloka:  Prosečna rezidualna zatezna čvrstoća na savijanje betona sa čeličnim vlaknima za 12 uzoraka (greda) posle 28 dana [MPa]  Za betonsku mešavinu koje sadrže 25 kg/m <sup>3</sup> vlakana		SRPS EN 14845-2 [228] član 4 i član 5  za prslinu na gredi CMOD=0,5mm i vertikalno savijanje 0,47mm  Prosečna rezidualna zatezna čvrstoća na savijanje > 1,5MPa	min ÷ max 1,83 ÷ 3,04 MPa  srednja vrednost 2,39 MPa	Zadovoljava
		SRPS EN 14845-2 [228] član 4 i član 5  za prslinu na gredi CMOD=3,5mm i vertikalno savijanje 3,02mm  Prosečna rezidualna zatezna čvrstoća na savijanje > 1,0MPa	min ÷ max 1,88 ÷ 3,97 MPa  srednja vrednost 3,10 MPa	Zadovoljava
Efekat čeličnih vlakana na konzistenciju betona WEBE [sec]	Beton bez vlakana	SRPS EN 12350-3 [229] Konzistencija betona vreme po WEBE-u 5 ÷ 10 s	Srednja vrednost 7 s	Zadovoljava
	Betonska mešavina sa 25 kg/m <sup>3</sup> vlakana	SRPS EN 12350-3 [229] Konzistencija betona vreme po WEBE-u 5 ÷ 10 s	Srednja vrednost 11 s	Zadovoljava

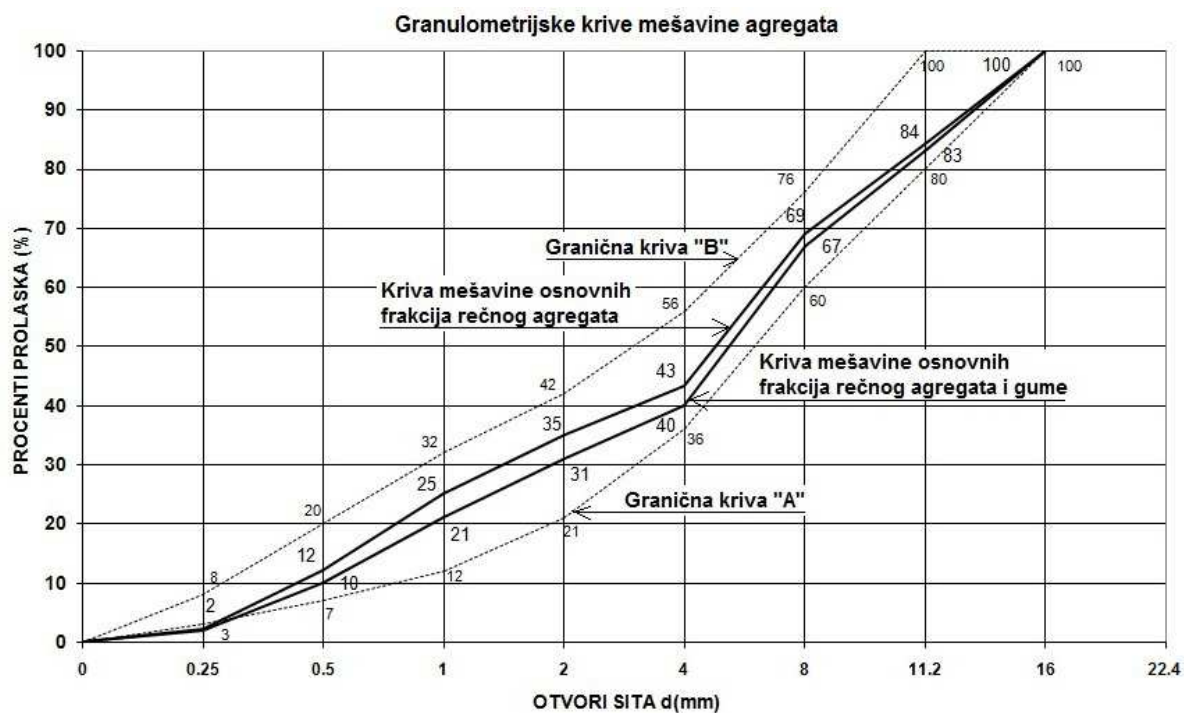
### 5.3. Sastav betonskih mešavina korišćenih u eksperimentu

Kako je poglavlju 5.1 već rečeno, za potrebe eksperimentalnih istraživanja napravljeno je ukupno 18 različitih betonskih mešavina. Šest betonskih mešavina je spravljeno bez delimične zamene cementa, a po šest sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom, odnosno silikatnom prašinom. Samo kod tri betonske mešavine je izvršena delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom. Što se tiče dodatka mikro vlakana, kod šest mešavina su dodata polipropilenska vlakna, a takođe kod šest mešavina su dodata čelična vlakna.

Sve betonske mešavine su izrađene sa istim odnosom mase vode (uključujući i masu superplastifikatora) i mase veziva ( $m_w/m_b=0,45$ ) i istim odnosom mase agregata i mase veziva ( $m_a/m_b=4,425$ ), izuzev kod mešavina koje sadrže granulisanu gumu iz razloga velike razlike zapremine mase između prirodnog i gumenog agregata. Takođe, sve betonske mešavine su imale približno istu konzistenciju (sleganje 90-110 mm pomoću Abramsovog konusa) što je ostvareno primenom superplastifikatora „Sika ViscoCrete 3070“. Korišćen je portland cement oznake CEM I 42,5 R proizvođača „Holcim“ Novi Popovac, elektrofilterski pepeo sa filtra termoelektrane „Kostolac“ i silikatna prašina „SikaFume“ proizvođača „Sika“ d.o.o. Srbija. Korišćen je rečni agregat iz Južne Morave frakcionisan u tri osnovne frakcije 0/4mm, 4/8mm i 8/16mm u razmeri mešanja 45%, 25% i 30%. Granulometrijski sastav mešavine osnovnih frakcija agregata se nalazio između standardnih krivi „A“ i „B“ prema standardu SRPS U.M1.057:1984 [197] i bio je isti za sve mešavine, sa minimalnom razlikom za one mešavine u kojima se deo sitnog rečnog agregata menjao recikliranom granulisanom gumom, tabela 5.16 i slika 5.6.

Tabela 5.16. Granulometrijski sastav mešavine agregata korišćenih u eksperimentu

Mešavina agregata	Procenat prolaska na situ [mm]:							
	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	11,2	16
Granična kriva „A“	3	7	12	21	36	60	(80)	100
Granična kriva „B“	8	20	32	42	56	76	(88)	100
Osnovne frakcije prirodnog rečnog agregata	2	12	25	35	43	69	84	100
Osnovne frakcije rečnog agregata i gume	2	10	21	31	40	67	83	100



Slika 5.6. Granulometrijske krive mešavine osnovnih frakcija rečnog agregata i mešavine osnovnih frakcija rečnog agregata i reciklirane granulisanog gume

Korišćena su polipropilenska vlakna i to: fibrilirana (mrežasta) vlakna FIBRILs F120 i monofilamentna vlakna FIBRILs S120 pravougaonog, odnosno kružnog poprečnog preseka i glatke obrade površine proizvođača „Motvoz“ Grosuplje, Slovenija. Količina polipropilenskih vlakana je usvojena na bazi preporuke proizvođača i iznosi 0,91 kg/m<sup>3</sup> ili 0,1% po zapremini. Upotrebene su dve vrste čeličnih vlakana proizvođača „Spajić“ d.o.o. Negotin i to: čelična vlakna sa ojačanim krajevima dužine 30 mm sa oznakom ZS/N 0.5×30 mm i čelična vlakna sa ojačanim krajevima dužine 50 mm sa oznakom ZS/N 1.05×50 mm. Takođe je i količina čeličnih vlakana usvojena na bazi preporuke proizvođača i iznosi 25,0 kg/m<sup>3</sup> ili 0,32% po zapremini. I na kraju, korišćena je reciklirana granulirana guma granulacije 0,5 do 4 mm proizvođača „Tigar“ a.d. Pirot. U mešavinama koje sadrže gumu, izvršena je 10% zamene sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom u odnosu na zapreminu agregata.

Sastavi betonskih mešavina korišćeni u eksperimentalnom istraživanju prikazani su u tabeli 5.17.

Tabela 5.17. Sastav betonskih mešavina korišćeni u eksperimentalnom istraživanju za 1m<sup>3</sup>

Oznaka mešavine	Agregat			Guma	Cement	Elekt. pepeo	Silikat. prašina	Voda	Sika VSC 3070	Polipropilenska vlakna		Čelična vlakna	
	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm							Fibrils S 120	Fibrils F 120	ZS/N 0.5x30	ZS/N 1.05x50
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>							kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
E	806	447	537	-	400	-	-	177,6	2,40	-	-	-	-
ER	631	449	540	78	404	-	-	178,8	3,03	-	-	-	-
EPM	806	447	537	-	400	-	-	177,4	2,60	0,91	-	-	-
EPF	808	448	538	-	401	-	-	177,9	2,60	-	0,91	-	-
ESS	803	446	536	-	399	-	-	176,8	2,80	-	-	25,0	-
ESL	801	445	534	-	398	-	-	176,3	2,80	-	-	-	25,0
EF	774	430	516	-	308	77	-	169,4	3,85	-	-	-	-
FR	610	434	521	76	311	78	-	170,6	4,47	-	-	-	-
FPM	774	430	516	-	308	77	-	169,2	4,04	0,91	-	-	-
FPF	776	431	517	-	308	77	-	169,2	4,04	-	0,91	-	-
FSS	772	429	515	-	308	77	-	169,0	4,24	-	-	25,0	-
FSL	771	428	514	-	307	76	-	168,1	4,21	-	-	-	25,0
ES	802	445	535	-	358	-	40	175,9	3,18	-	-	-	-
SR	629	447	537	77	360	-	40	176,2	3,80	-	-	-	-
SPM	802	445	535	-	358	-	40	175,7	3,38	0,91	-	-	-
SPF	803	446	536	-	359	-	40	176,2	3,39	-	0,91	-	-
SSS	797	442	532	-	356	-	39	174,2	3,56	-	-	25,0	-
SSL	799	443	533	-	357	-	40	175,1	3,57	-	-	-	25,0

#### 5.4. Ispitivanje svojstava svežeg betona

Spravljanje betonskih mešavina i ispitivanje svojstava svežeg betona radeno je na osnovu ranijih iskustava i preporuka stručnjaka preuzetih iz poznatih naučnih i stručnih radova objavljenih u relevantnim naučnim časopisima iz oblasti tehnologije abrazivno-otpornih betona. Imajući u vidu sve što je rečeno u okviru tačke 5.1, a s obzirom da je

istraživanje bili tako organizovano da u najvećoj mogućoj meri smanji uticaj karakteristika svežeg betona na njegovu hidro-abrazivnu otpornost, urađena su samo pojedina ispitivanja svežeg betona i to:

- određivanje konzistencije metodom sleganja (Abramsov konus) – SRPS EN 12350-2:2010 [198];
- određivanje zapreminske mase u svežem ugrađenom stanju – SRPS EN 12350-6:2010 [199];
- određivanje sadržaja uvučenog vazduha – SRPS EN 12350-7:2010 [200].

Osim navedenih ispitivanja, vizuelnim pregledom svake mešavine kontrolisana su i druga relevantna svojstva svežeg betona kao što su homogenost mešavine, ugradljivost, obradljivost, tiskotropnost, eventualna pojava nagomilavanja vlakana i sl.

#### 5.4.1. Spravljanje betona

Spravljanje betonskih mešavina urađeno je u laboratorijskoj protivstrujnoj mešalici sa vertikalnom osovinom proizvođača „Metalika“ Sopot, zapremine bubnja 100 litara i efektivnog kapaciteta mešanja 50 litara, slika 5.7. Komponente betona su dozirane na sledeći način: u mešalicu su prvo zasebno sipane prethodno izmerene frakcije agregata i to najpre najkrupnija, a kao poslednja najsitnija frakcija. Zatim je dozirana polovina količina predviđene vode za spravljanje betona i izvršeno mešanje agregata i vode u trajanju od 30 sekundi. Pre doziranja cementa, čekalo se 3 minuta da bi agregat upio izvesnu količinu vode. Zatim je doziran cement i preostala količina vode i tokom prvog minuta mešanja dozirana je potrebna količina superplastifikatora. Ukupno vreme mešanja iznosilo je 5 minuta. Postupak mešanja betona koji sadrži polipropilenska ili čelična vlakna je bio indentičan prethodno opisanom, razlika je samo u doziranju vlakana. Naime, prva polovina ukupne količine vlakana je dozirana odmah nakon sipanja cementa u mešalicu, a druga nakon 30 sekundi mešanja mešavine agregata, cementa i vode. Na kraju je dozirana potrebna količina superplastifikatora.



Slika 5.7. Laboratorijska protivstrujna mešalica „Metalika“ Sopot

Temperatura vode sa kojom je spravljan beton kretala se u granicama od 16 do 18°C. Temperature agregata, cementa i vazduha su odgovarale laboratorijskim uslovima i kretale su se u granicama od 19 do 24°C. Neposredno posle spravljanja merena je temperatura betona koja se kretala između 21 i 26°C.

Odmah nakon spravljanja betonskih mešavina, slika 5.8, vršena su ispitivanja prethodno navedenih svojstava svežeg betona. O rezultatima predmetnih ispitivanja biće više reči u narednim tačkama ovog poglavlja.

Ugrađivanje svežeg betona u kalupe različitih oblika i dimenzija (u zavisnosti od predviđene metode ispitivanja na očvrslom betonu) vršeno je pomoću pervibratora čiji je prečnik igle 25 mm i frekvencija vibriranja 300 Hz. Na slici 5.9 je prikazan sveži beton ugrađen u kalupe pomoću pervibratora.



*Slika 5.8. Svež beton nakon mešanja u laboratorijskoj mešalici*



*Slika 5.9. Svež beton ugrađen u kalupe*

Pre samog spravljanja, odlučeno je da se u jednom ciklusu mešanja pravi po 50 litara ( $0,050 \text{ m}^3$ ) svežeg betona. Za svaku od 18 serija betona, napravljeno je po tri mešunga, odnosno 150 litara svežeg betona. Nakon spravljanja i ispitivanja svojstava u svežem stanju, beton je ugrađivan u kalupe određenih dimenzija i oblika. Za svaku od 18 serija betona, napravljeno je ukupno 30 uzoraka i to:

- 12 kocki ivice 15 cm;
- 3 prizme dimenzija  $20 \times 20 \times 15$  cm;
- 3 prizme dimenzija  $10 \times 10 \times 40$  cm;
- 6 cilindra prečnika 15 cm i visine 30 cm;
- 3 ploče  $20 \times 20 \times 5$  cm;
- 3 ploče dimenzija  $40 \times 40 \times 6$  cm.

#### 5.4.2. Ispitivanje konzistencije svežeg betona

Pod konzistencijom betona podrazumeva se stepen povezanosti komponenata sveže betonske mešavine koji utiče na veličinu unutrašnjeg trenja u masi. Konzistencija betonske mešavine je, pored ugradljivosti, obradljivosti i tiksotropnosti, veoma bitna tehnološka karakteristika svežeg betona.

Konzistencija svežeg betona je određena metodom sleganja pomoću Abramsovog konusa prema standardu SRPS EN 12350-2:2010 [198], slika 5.10. Postizanje konzistencije betonskih mešavina u predviđenim granicama sleganja (90 do 110 mm), ostvareno je primenom superplastifikatora Sika ViscoCrete 3070.



Slika 5.10. Ispitivanje konzistencije betona metodom sleganja (pomoću Abramsovog konusa)

Kao što se iz tabele 5.19. može videti, najveću potrebu za superplastifikatorom, u cilju ostvarenja predviđene mere sleganja, imale su betonske mešavine u kojima je izvršena delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom. To je logična posledica smanjenja učešća čestica agregata sitnijih od 0,5 mm, jer je zamena prirodnog agregata frakcije 0-4 mm izvršena recikliranom granulisanom gumom frakcije 0,5-4 mm. Takođe, na povećanje trenja u betonskoj mešavini utiče i oblik zrna gumenog agregata koji svojim izgledom više podseća na drobljeni agregat (ravne strane, oštre ivice). Betonske mešavine kod kojih je izvršena delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom i

silikatnom prašinom takođe su zahtevale povećanje količine superplastifikatora. To je posledica veće količine praškastog vezivnog materijala u mešavinama u kojima je izvršena delimična zamena cementa u odnosu na mešavine spravljene sa 100% cementa, imajući u vidu da su specifične mase elektrofilterskog pepela i silikatne prašine manje u odnosu na cement. Na povećanje količine superplastifikatora utiče i veća specifična površina elektrofilterskog pepela i silikatne prašine u odnosu na cement. Upoređujući količine upotrebljenog superplastifikatora kod mešavina sa elektrofilterskim pepelom i mešavina sa silikatnom prašinom, uočava se da je masa superplastifikatora veća kod mešavine sa elektrofilterskim pepelom, što je logično jer je procenat zamene cementa elektrofilterskim pepelom 20%, a zamena cementa silikatnom prašinom 10%. Iz tabele 5.19. može se uočiti da je kod svake vrste betonskih mešavina (bilo da je reč o betonima bez zamene cementa ili delimične zamene cementa elektrofilterskim pepelom i silikatnom prašinom) postojala veća potreba za superplastifikatorom ukoliko su betoni mikroarmirani i to više kod betona sa čeličnim vlaknima. Objašnjenje treba naći u činjenici da vlakna betonu daju veću kompaktnost i smanjuju rasturanje odnosno sleganje svežeg betonskog kompozita. Zbog veće dužine i završne obrade krajeva, čelična vlakna sa ojačanim krajevima su u većoj meri smanjila sleganje, te se zbog toga javila potreba za većom količinom superplastifikatora radi postizanje željene konzistencije. Polipropilenska vlakna imaju sposobnost da po svojoj površini zadržavaju određenu količinu vode, ali imajući u vidu malu količinu korišćenih vlakana, ne može se reći da ovaj efekat u velikoj meri uticao na veličinu sleganja svežeg betona, a samim tim i količinu upotrebljenog superplastifikatora.

Rezultati ispitivanja konzistencije betona metodom sleganja za sve betonske mešavine dati su u tabeli 5.18. Prikazani rezultati predstavljaju srednje vrednosti sleganja  $\Delta h$ , dobijene na osnovu ispitivanja tri uzorka svežeg betona (od kojih je svaki uzet iz posebnog mešung).

Tabela 5.18. Rezultati ispitivanja konzistencije betona metodom sleganja (pomoću Abramsovog konusa)

Oznaka mešavine	$\Delta h_{sr}$ [mm]
E	110
ER	105
EPM	100
EPF	95
ESS	90
ESL	100
EF	90
FR	110
FPM	90
FPF	100
FSS	110
FSL	95
ES	100
SR	110
SPM	110
SPF	105
SSS	110
SSL	95



### 5.4.3. Ispitivanje zapreminske mase svežeg zbijenog betona

Ispitivanje zapreminske mase zbijenog svežeg betona ( $\gamma_{b,sv}$ ) izvršeno je prema standardu SRPS EN 12350-6:2010 [199], slika 5.11. Prilikom ispitivanja korišćen je lonac zapremine 8000 cm<sup>3</sup>, pervibrator prečnika igle 25 mm i frekvencije vibriranja 300 Hz i elektronska precizna vaga Fuzhou Kerndy Electronics (merni opseg 0 – 60 kg, tačnost ±10 g). Rezultati merenja zapreminske mase svežeg zbijenog betona dati su u tabeli 5.19, a dobijeni na bazi srednjih vrednosti po tri rezultata ispitivanja.



Slika 5.11. Ispitivanje zapreminske mase zbijenog svežeg betona

Tabela 5.19. Rezultati ispitivanja zapreminske mase zbijenog svežeg betona

Oznaka mešavine	$\bar{\gamma}_{b,sv}$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
E	2370
ER	2285
EPM	2370
EPF	2375
ESS	2390
ESL	2385
EF	2280
FR	2205
FPM	2280
FPF	2285
FSS	2300
FSL	2295
ES	2360
SR	2270
SPM	2360
SPF	2365
SSS	2370
SSL	2375

Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da je delimična zamena prirodnog sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom u velikoj meri uticala na smanjenje zapreminske mase zbijenog svežeg betona (od 3,29% do 3,81% u odnosu na odgovarajuće etalone). Razlog tome je znatno manja zapreminska masa reciklirane granulirane gume ( $1150 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) u odnosu na zapreminsku masu zamenjenog sitnog rečnog agregata ( $2630 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), kao i nešto veći procenat uvučenog vazduha u svežoj betonskoj mešavini (više o ovome videti u odeljku 5.4.4).

Delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom takođe je značajno uticala na smanjenje zapreminske mase zbijenog svežeg betona (smanjenje u iznosu od 3,80%), dok je u slučaju delimične zamene cementa silikatnom prašinom smanjenje znatno manje (svega 0,42%). Razlog smanjenja treba tražiti u činjenici da su specifične mase elektrofilterskog pepela i silikatne prašine ( $\gamma_{s,FA} = 2.130 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,  $\gamma_{s,SF} = 2.210 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) daleko manje od specifične mase zamenjenog cementa ( $\gamma_{s,C} = 3.150 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) i da je zamena cementa izvršena po masi.

Dodatak polipropilenskih vlakana imao je zanemarljiv uticaj na promenu zapreminske mase zbijenog svežeg betona. Ovo je očekivano, s obzirom na vrlo malu količinu vlakana ( $0,91 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), kao i mali doprinos ovih vlakana ukupnoj količini uvučenog vazduha u svežoj betonskoj mešavini (više o ovome videti u odeljku 5.4.4). Dodatak čeličnih vlakana doprineo je malom povećanju zapreminske mase zbijenog svežeg betona, s obzirom da je dozaža ovih vlakana  $25 \text{ kg}/\text{m}^3$  betona.

## 5.4.4. Sadržaj vazduha u svežem betonu

Ovo ispitivanje se vrši u cilju određivanja procentualnog sadržaja vazduha uvučenog u strukturu betona. Ono se uobičajno vrši ukoliko su korišćeni hemijski dodaci tipa aeranata, ili u slučajevima kada se betonu dodaju neki specifični dodaci (granulisana guma, polipropilenska ili čelična vlakna) koji mogu doprineti dodatnom uvlačenju mehurića vazduha u betonsku mešavinu.

Ispitivanje sadržaja vazduha u svežem betonu izvršeno je prema standardu SRPS EN 12350-7:2010 [200], slika 5.12. Za potrebe ispitivanja korišćen je porozimetar TESTING zapremine 8 litara. Rezultati merenja sadržaja vazduha u svežem betonu dati su u tabeli 5.20, a dobijeni na bazi srednjih vrednosti po tri rezultata ispitivanja.



Slika 5.12. Ispitivanje sadržaja vazduha u svežem betonu

Tabela 5.20. Rezultati ispitivanja sadržaja vazduha u svežem betonu

Oznaka mešavine	$\Delta p$ [%]
E	3,1
ER	4,1
EPM	3,5
EPF	3,6
ESS	3,4
ESL	3,3
EF	3,3
FR	4,2
FPM	3,8
FPF	3,7
FSS	3,6
FSL	3,5
ES	3,0
SR	4,0
SPM	3,4
SPF	3,3
SSS	3,2
SSL	3,1

Treba naglasiti da je etalon beton imao procenat uvučenog vazduha 3,2% što je nešto više od uobičajnog koji se kreće u granicama od 1 do 2%. Razlog je upotreba superplastifikatora koji ima dodatni efekat aeriranja, što je potvrđeno prethodnim ispitivanjem uticaja dodatka na svojstva cementne paste i cementnog maltera (poglavlje 5.2.6). Delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom i silikatnom prašinom u maloj meri je uticala na promenu sadržaja vazduha u svežem betonu, pri čemu je došlo do smanjenja u slučaju zamene cementa silikatnom prašinom, odnosno povećanja u slučaju zamene cementa elektrofilterskim pepelom. Dodatak elektrofilterskog pepela doprinosi boljoj obradljivosti betonske mešavine i ima značajnu ulogu u stvaranju dovoljne količine cementne paste pri čemu poboljšava mehaničke karakteristike betona popunjavanjem mikropora. Objasnjenje je logično, silikatna prašina ima čestice koje su za oko 100 do 150 puta sitnije od čestica portland cementa i shodno tome ima veliku specifičnu površinu. Ova submikronska veličina čestica silikatne prašine omogućava popunjavanje otvorenih pora u cementnoj pasti, slično kao što zrna sitnog agregata popunjavaju pore između zrna krupnog agregata. Što se tiče elektrofilterskog pepela, njegov udeo u betonu je bio znatno veći (20% zamene po masi) zbog velike razlike specifičnih masa (specifična masa cementa je  $3,15 \text{ g/cm}^3$ , a elektrofilterskog pepela  $2,21 \text{ g/cm}^3$ ). To dalje znači da su betonske mešavine sa elektrofilterskim pepelom imale potrebu za većom količinom vode, a kako je vodocementni faktor bio isti za sve betonske mešavine, povećala se količina superplastifikatora koji doprinosi povećanju sadržaja vazduha u betonu.

Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da je delimična zamena prirodnog sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom uticala na povećanje sadržaja vazduha u svežem betonu. To se objašnjava time da u betonskoj mešavini postoji nedostatak čestica sitnijih od 0,5 mm koje bi ispunile prazan prostor između krupnijih zrna agregata, jer je zamena prirodnog agregata frakcije 0-4 mm izvršena recikliranom granulisanom gumom frakcije 0,5-4 mm. Još jedna vrlo bitna činjenica jeste da je otežano kvašenje zrna granulisane gume zbog hrapavosti površine nastale prilikom usitnjavanja, kao i zbog nehigroskopnosti gume. Iz razloga koji su prethodno navedeni, prilikom mešanja betonskog kompozita koji u sebi sadrži recikliranu granulisanu gumu dolazi do uvlačenja nešto većeg procenta vazduha u poređenju sa etalon betonskom mešavinom.

Dodatak polipropilenskih i čeličnih vlakana ima mali uticaj na promenu sadržaja vazduha u svežem betonu u smislu neznatnog povećanje sadržaja vazduha. Ovaj efekat je više izražen u slučaju dodatka veće količine vlakana (bez obzira na njihovu vrstu i tip). Upoređujući dobijene rezultate dolazi se do zaključka da su betoni armirani polipropilenskim vlaknima uvukli nešto više vazduha u odnosu na betone sa čeličnim vlaknima. Ovo je logično s obzirom da je broj polipropilenskih vlakana u jedinici zapremine znatno veći u odnosu na čelična vlakna.

## 5.5. Ispitivanje svojstava očvrslog betona

Svojstva očvrslog betona zavise od velikog broja parametara, počevši od ostvarene strukture betonskog kompozita, zatim načina spravljanja, ugrađivanja i nege betona, kao i od kvaliteta i količine (odnosa) komponentalnih materijala, uslova spoljašnje sredine (temperatura, vlažnost, prisustvo štetnih i agresivnih agenasa), načina eksploatacije, starosti betona itd.

Na očvrsnom betonu od fizičkih karakteristika ispitana je zapremiska masa betona u vodozasicienom stanju prema standardu SRPS EN 12390-7:2010 [201] na kockama ivice 15cm pri starosti betona od 2, 7, 28 i 90 dana. Takođe, merena je i brzina prolaska

ultrazvučnog impulsa prema standardu SRPS EN 12504-4:2008 [206] na kockama ivice 15cm pri starosti od 90 dana.

Ispitivana su i mehanička svojstva betona od kojih je najznačajnija čvrstoća pri pritisku. Ova karakteristika je ispitana u skladu sa standardom SRPS EN 12390-3:2010 [202] na epruvetama oblika kocke ivice 15cm pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana. Vršeno je ispitivanje čvrstoće pri savijanju na epruvetama oblika prizme dimenzija 10×10×40 cm pri starosti od 90 dana prema standardu SRPS EN 12390-5:2010 [203]. Takođe je urađeno ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem (Brazilski opit) na cilindričnim uzorcima prečnika Ø15 cm i dužine 30 cm pri starosti od 90 dana prema standardu SRPS EN 12390-6:2012 [204]. Određena je veličina odskoka sklerometrom prema standardu SRPS EN 12504-2:2008 [205] na kockama ivice 15 cm pri starosti od 90 dana. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju čupanjem – „Pull-off“ metodom urađeno je na prizmatičnim uzorcima dimenzije 20×20×15 cm pri starosti od 90 dana prema standardu SRPS EN 1542:2010 [208]. Ispitivanje otpornosti prema habanju brušenjem vršeno je na kockama ivice 7,07 cm pri starosti betona od 90 dana prema standardu SRPS B.B8.015:1984 [190]. I na kraju, najznačajnije ispitivanje u ovom istraživanju, ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona – ubrzani test koji omogućava da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom udara o površinu ispitne betonske ploče, vršeno je na pločama dimenzija 20×20×5 cm na originalnoj aparaturi napravljenoj u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu.

Iz kategorije deformacionih svojstava betona određen je statički modul elastičnosti pri pritisku na cilindrima prečnika Ø15 cm i visine 30 cm pri starosti od 90 dana prema standardu SRPS ISO 6784:2000 [207].

Za dinamičko ispitivanje duktilnosti usvojena je metoda za određivanje udarne otpornosti betona, tzv. „Drop-weight test“ prema preporukama profesora Ukrainczyka [209] – modifikovan za potrebe disertacije (teg mase 3 kg pada sa visine od 30 cm na betonsku ploču dimenzija 40×40×6 cm, pri čemu se meri broj udaraca do nastanka prve prsline, kao i broj udaraca do loma ploče). Ispitivanje je urađeno pri starosti ploča od 90 dana.

#### 5.5.1. Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju

Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju određena je prema standardu SRPS EN 12390-7:2010 [201] na kockama ivice 15cm pri starosti betona od 2, 7, 28 i 90 dana neposredno pre ispitivanja čvrstoće pri pritisku. Pre merenja mase na elektronskoj preciznoj vagi Fuzhou Kerndy Electronics (merni opseg 0 – 60 kg, tačnost ±10 g), uklonjen je višak vode sa površine epruveta suvom krpom. Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju je sračunata prema poznatom izrazu:

$$\gamma_{b,z} = \frac{m_{b,z}}{V_b} = \frac{m_{b,z}}{15^3} \quad [\text{g/cm}^3],$$

gde je:

$m_{b,z}$  - masa vodozasićene betonske kocke,

$V_b$  - zapremina betonske kocke.

Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslog betona u vodozasićenom stanju dati su u tabeli 5.21. Prikazane vrednosti su srednje veličine tri rezultata ispitivanja (tri betonske kocke za svaku starost betona).

Tabela 5.21. Rezultati ispitivanja zapreminske mase pri različitoj starosti očvrslog betona u vodozasićenom stanju

Oznaka mešavine	Zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju u $\text{kg/m}^3$ pri starosti epruveta od			
	2 dana	7 dana	28 dana	90 dana
E	2369	2367	2367	2364
ER	2282	2280	2277	2274
EPM	2368	2368	2367	2364
EPF	2373	2370	2370	2367
ESS	2385	2383	2380	2380
ESL	2381	2379	2378	2376
EF	2278	2276	2275	2273
FR	2200	2195	2196	2194
FPM	2278	2277	2275	2272
FPF	2281	2280	2277	2275
FSS	2296	2296	2293	2290
FSL	2293	2292	2287	2285
ES	2355	2353	2350	2348
SR	2267	2265	2262	2259
SPM	2358	2356	2352	2352
SPF	2364	2361	2359	2357
SSS	2366	2363	2359	2358
SSL	2366	2366	2360	2359

Generalno, na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je delimična zamena prirodnog sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom u velikoj meri uticala na smanjenje zapreminske mase betona, kako u svežem (zaključak izveden u poglavlju 5.4.3) tako i u očvrslog stanju (što pokazuju rezultati iz tabele 5.21). Razlog tome je daleko manja zapreminska mase reciklirane granulirane gume u odnosu na zapreminsku masu zamenjenog sitnog rečnog agregata, kao i nešto veći procenat uvučenog vazduha u svežoj betonskoj mešavini.

Takođe, delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom značajno je uticala na smanjenje zapreminske mase očvrslog betona, dok je u slučaju delimične zamene cementa silikatnom prašinom smanjenje znatno manje (iz razloga što je zamena cementa silikatnom prašinom izvršena u iznosu od 10% u odnosu na masu, dok je procenat zamene cementa elektrofilterskim pepeolom bio 20%). Razlog smanjenja treba tražiti u činjenici da su specifične mase elektrofilterskog pepela i silikatne prašine daleko manje od specifične mase zamenjenog cementa i da je zamena cementa izvršena po masi.

Dodatak polipropilenskih vlakana imao je zanemarljiv uticaj na promenu zapreminske mase očvrslog betona. Ovo je očekivano, s obzirom na vrlo malu količinu vlakana ( $0,91 \text{ kg/m}^3$ ), kao i mali doprinos ovih vlakana ukupnoj količini uvučenog vazduha u svežoj betonskoj mešavini (više o ovome videti u odeljku 5.4.4). Dodatak čeličnih vlakana doprineo je malom povećanju zapreminske mase očvrslog betona, s obzirom na dozažu ovih vlakana u iznosu od  $25 \text{ kg/m}^3$  betona.

## 5.5.2. Čvrstoća pri pritisku

Čvrstoća pri pritisku određena je prema standardu SRPS EN 12390-3:2010 [202] na kockama ivice 15 cm pri starosti betona od 2, 7, 28 i 90 dana u cilju dobijanja  $f_p=f_p(t)$ , funkcionalne zavisnosti priraštaja čvrstoće pri pritisku u toku vremena. Ispitivanje je vršeno na hidrauličkoj presi HPM – 3000, ZRMK Ljubljana (opseg merenja 0 – 3000 kN, tačnost 2,5 kN), slika 5.13. Čvrstoća pri pritisku očvrstlog betona je sračunata na osnovu poznatog obrasca:

$$f_p = \frac{F_p}{A} \quad [\text{N/mm}^2],$$

gde je:

$F_p$  - sila loma (granična sila pritiska),

$A$  - površina na koju deluje sila pritiska ( $15 \times 15 = 225 \text{ cm}^2$ ).



Slika 5.13. Određivanje čvrstoće pri pritisku očvrstlog betona

Na osnovu ovih ispitivanja može se oceniti kolika je ostvarena klasa čvrstoće betona (ili marka betona), kao normirana čvrstoća pri pritisku dobijena na epruvetama starosti 28 dana.

U tabelama 5.22-1. do 5.22-4. dati su rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku ( $f_p$ ) i procentualna razlika ( $\Delta f_p$ ) u odnosu na odgovarajući etalon beton na uzorcima svih betonskih mešavina analiziranih u ovom istraživanju. Prikazane vrednosti su srednje veličine tri rezultata ispitivanja (tri betonske kocke za svaku starost betona). Na slikama od 5.14-1. do 5.14-7 dati su dijagrami promene čvrstoće pri pritisku betonskih epruveta u funkciji vremena.

Tabela 5.22-1. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku pri različitoj starosti očvrstlog betona

Oznaka mešavine	Čvrstoća pri pritisku u $N/mm^2$ i procentualna razlika u odnosu na etalonske uzorke pri starosti epruveta od							
	2 dana		7 dana		28 dana		90 dana	
	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]
E	34,45	0	45,23	0	52,56	0	60,89	0
ER	23,45	-31,93	33,11	-26,80	40,22	-23,48	43,78	-28,10
EPM	39,78	15,47	45,56	0,73	53,00	0,84	63,23	3,84
EPF	38,22	10,94	42,67	-5,66	53,67	2,11	63,78	4,75
ESS	37,56	9,03	44,11	-2,48	52,89	0,63	64,11	5,29
ESL	37,56	9,03	43,56	-3,69	54,23	3,18	63,11	3,65
EF	25,44	-26,15	39,89	-11,81	46,34	-11,83	57,34	-5,83
FR	19,44	-43,57	21,78	-51,85	34,23	-34,87	36,23	-40,50
FPM	27,34	-20,64	41,45	-8,36	47,11	-10,37	58,67	-3,65
FPF	26,78	-22,26	41,67	-7,87	46,45	-11,62	59,03	-3,05
FSS	28,11	-18,40	42,89	-5,17	49,22	-6,35	60,34	-0,90
FSL	26,00	-24,53	40,67	-10,08	47,56	-9,51	57,67	-5,29
ES	28,45	-17,42	42,56	-5,90	54,34	3,39	62,22	2,18
SR	21,34	-38,06	31,23	-30,95	39,89	-24,11	45,00	-26,10
SPM	30,67	-10,97	43,22	-4,44	54,45	3,60	64,33	5,65
SPF	32,22	-6,47	44,78	-0,99	56,34	7,19	65,11	6,93
SSS	33,11	-3,89	43,33	-4,20	54,89	4,43	66,56	9,31
SSL	30,78	-10,65	43,67	-3,45	54,67	4,01	63,11	3,65

Procentualna razlika čvrstoće pri pritisku pri različitoj starosti betona računa se prema obrascu:

$$\Delta f_p(t) = \frac{f_p(t) - f_{p,e}(t)}{f_{p,e}(t)} \cdot 100 \text{ [%]},$$

gde je:

$\Delta f_p(t)$  - procentualna razlika čvrstoće pri pritisku pri starosti betona od  $t$  dana,

$f_{p,e}(t)$  - čvrstoća pri pritisku etalon uzorka pri starosti od  $t$  dana,

$f_p(t)$  - čvrstoća pri pritisku posmatranog uzorka betona pri starosti od  $t$  dana.



Tabela 5.22-2. Čvrstoće pri pritisku pri različitoj starosti očvrsllog betona spravljenih bez delimične zamene cementa

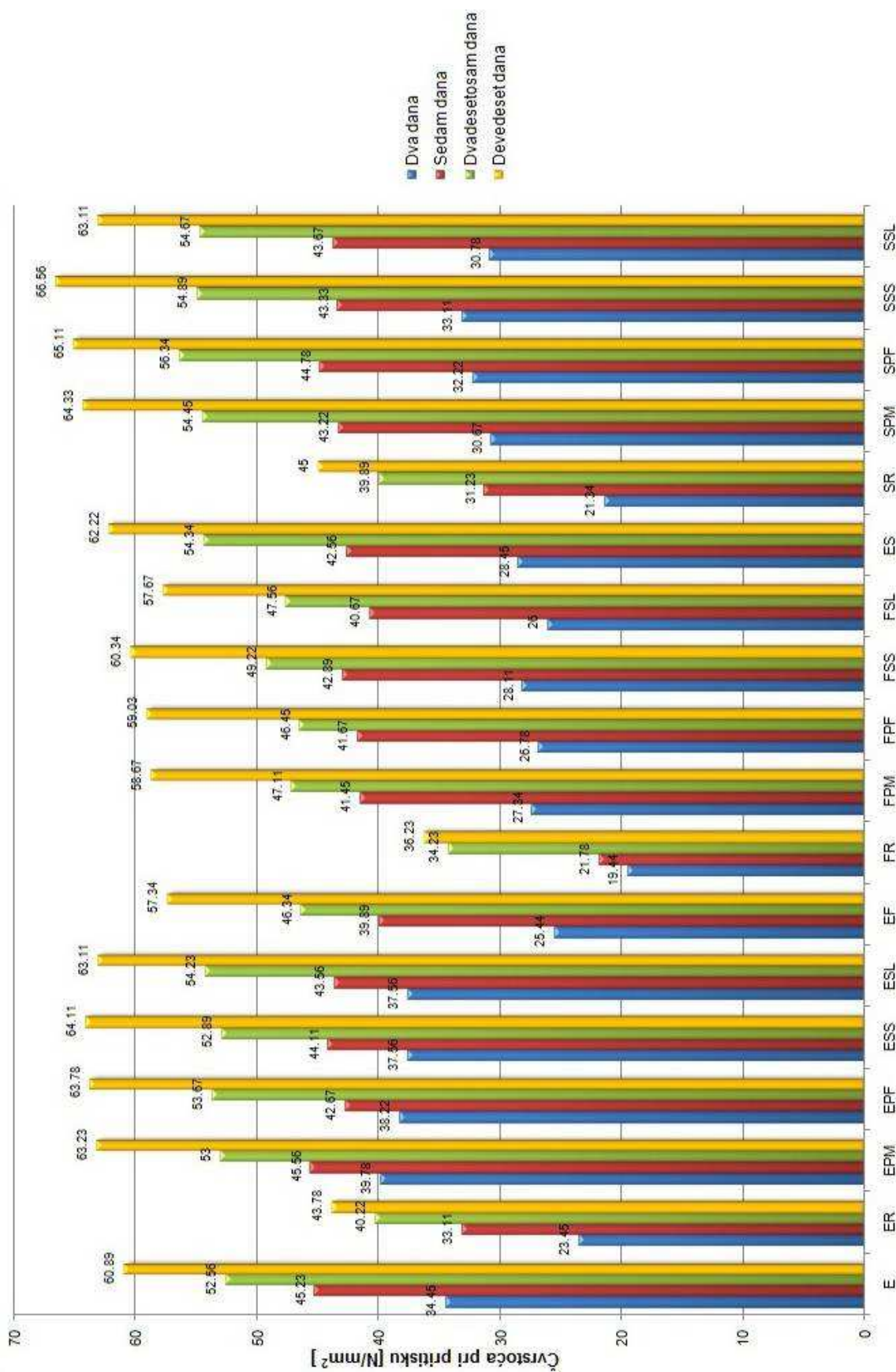
Oznaka mešavine	Čvrstoća pri pritisku u $N/mm^2$ i procentualna razlika u odnosu na etalonske uzorke pri starosti epruveta od							
	2 dana		7 dana		28 dana		90 dana	
	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]
E	34,45	0	45,23	0	52,56	0	60,89	0
ER	23,45	-31,93	33,11	-26,80	40,22	-23,48	43,78	-28,10
EPM	39,78	15,47	45,56	0,73	53,00	0,84	63,23	3,84
EPF	38,22	10,94	42,67	-5,66	53,67	2,11	63,78	4,75
ESS	37,56	9,03	44,11	-2,48	52,89	0,63	64,11	5,29
ESL	37,56	9,03	43,56	-3,69	54,23	3,18	63,11	3,65

Tabela 5.22-3. Čvrstoće pri pritisku pri različitoj starosti očvrsllog betona spravljenih sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom

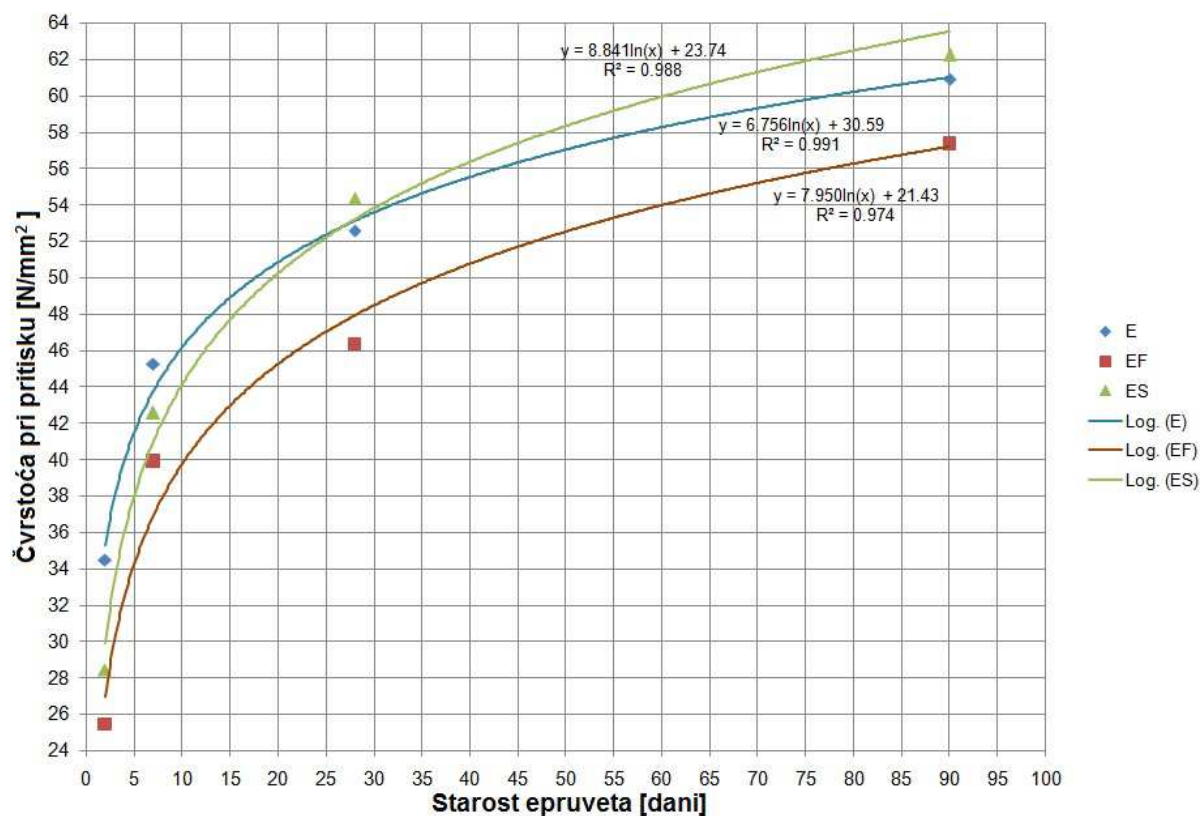
Oznaka mešavine	Čvrstoća pri pritisku u $N/mm^2$ i procentualna razlika u odnosu na etalonske uzorke pri starosti epruveta od							
	2 dana		7 dana		28 dana		90 dana	
	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]
EF	25,44	0	39,89	0	46,34	0	57,34	0
FR	19,44	-30,86	21,78	-45,40	34,23	-26,13	36,23	-36,82
FPM	27,34	7,47	41,45	3,91	47,11	1,66	58,67	2,32
FPF	26,78	5,27	41,67	4,46	46,45	0,24	59,03	2,95
FSS	28,11	10,50	42,89	7,52	49,22	6,21	60,34	5,23
FSL	26,00	2,20	40,67	1,96	47,56	2,63	57,67	0,58

Tabela 5.22-4. Čvrstoće pri pritisku pri različitoj starosti očvrsllog betona spravljenih sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom

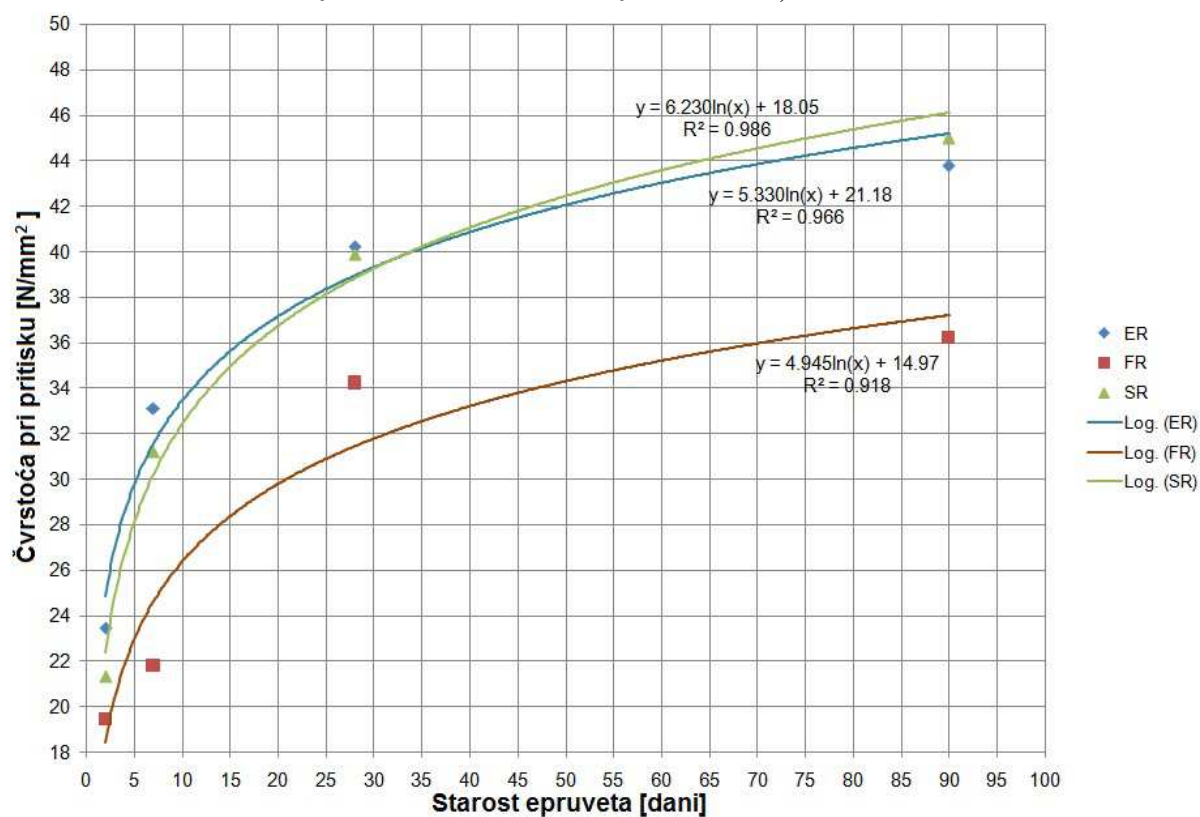
Oznaka mešavine	Čvrstoća pri pritisku u $N/mm^2$ i procentualna razlika u odnosu na etalonske uzorke pri starosti epruveta od							
	2 dana		7 dana		28 dana		90 dana	
	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]	$f_p$ [ $N/mm^2$ ]	$\Delta f_p$ [%]
ES	28,45	0	42,56	0	54,34	0	62,22	0
SR	21,34	-24,99	31,23	-26,62	39,89	-26,59	45,00	-27,68
SPM	30,67	7,80	43,22	1,55	54,45	0,20	64,33	3,39
SPF	32,22	13,25	44,78	5,22	56,34	3,68	65,11	4,64
SSS	33,11	16,38	43,33	1,81	54,89	1,01	66,56	6,98
SSL	30,78	8,19	43,67	2,61	54,67	0,61	63,11	1,43



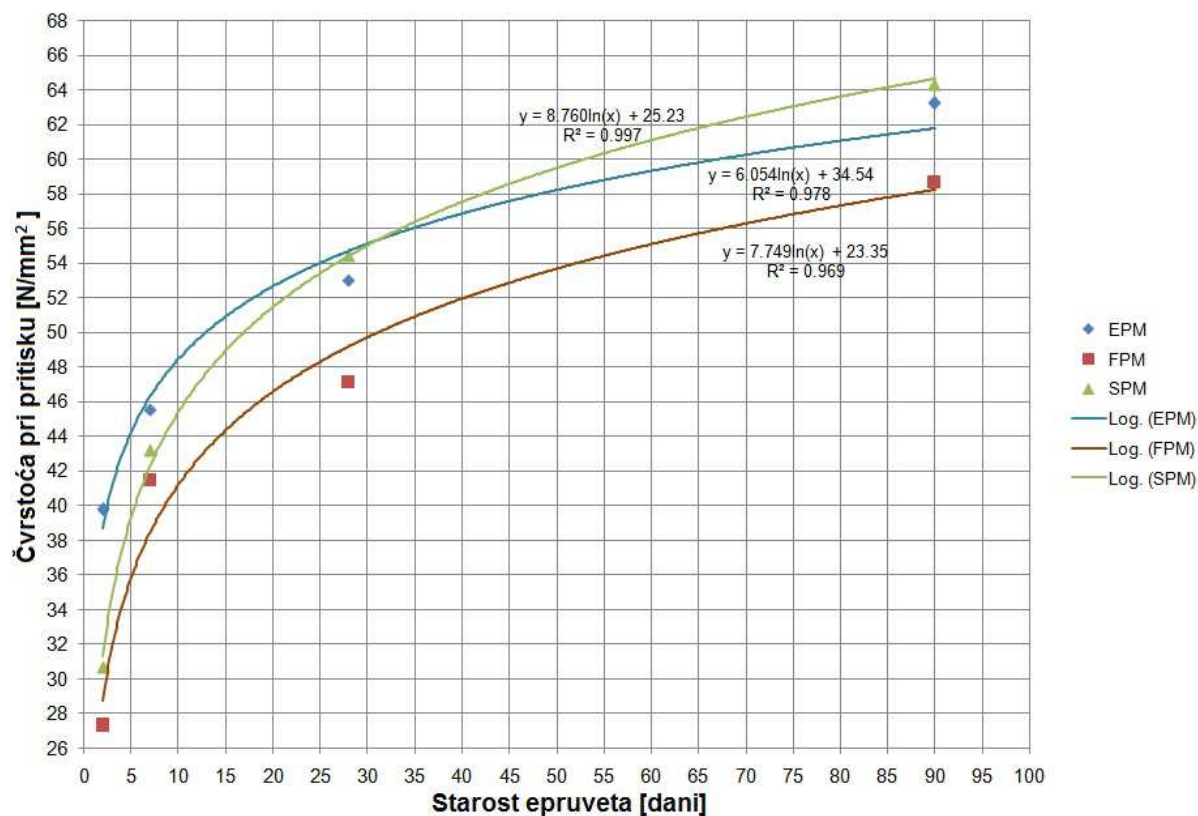
Slika 5.14-1. Prikaz čvrstoće pri pritisku očvrstlog betona pri starosti od 2, 7, 28 i 90 dana



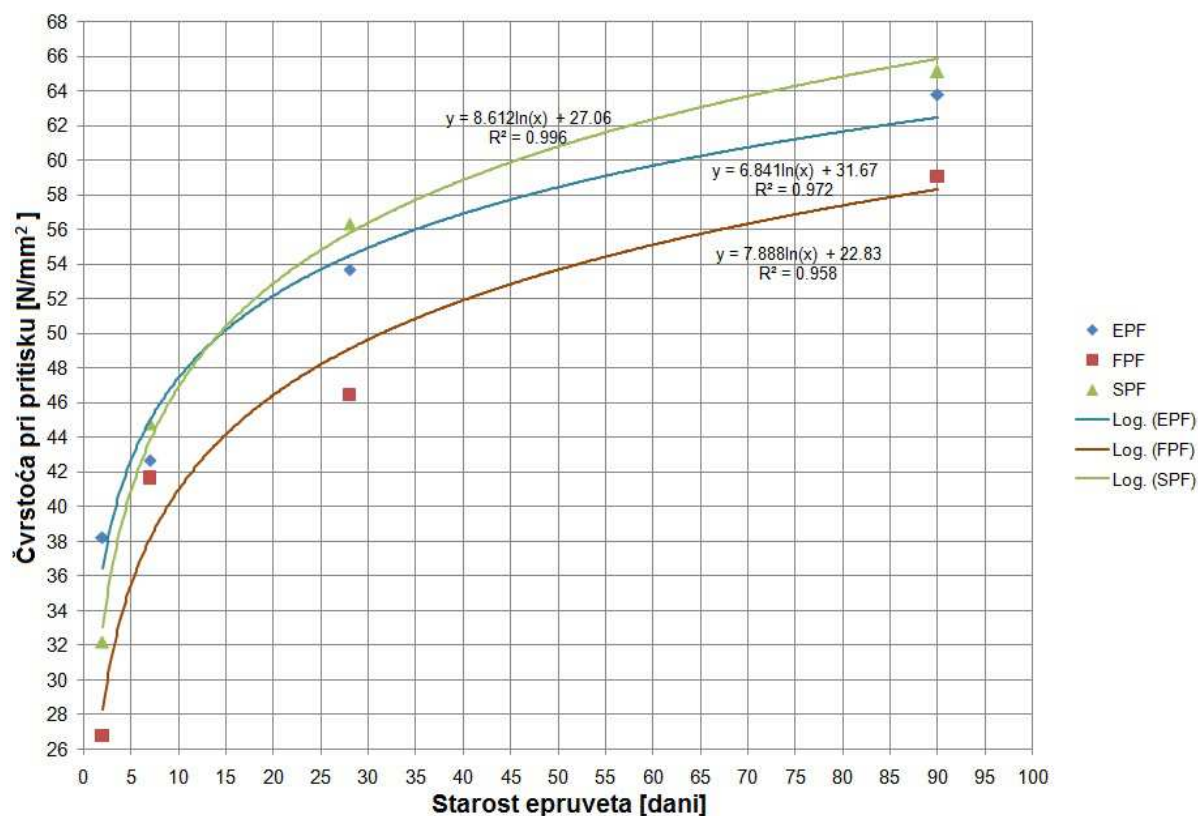
Slika 5.14-2. Dijagrami promene čvrstoće pri pritisku betonskih epruveta u funkciji vremena za betonske mešavine označene sa E, EF i ES



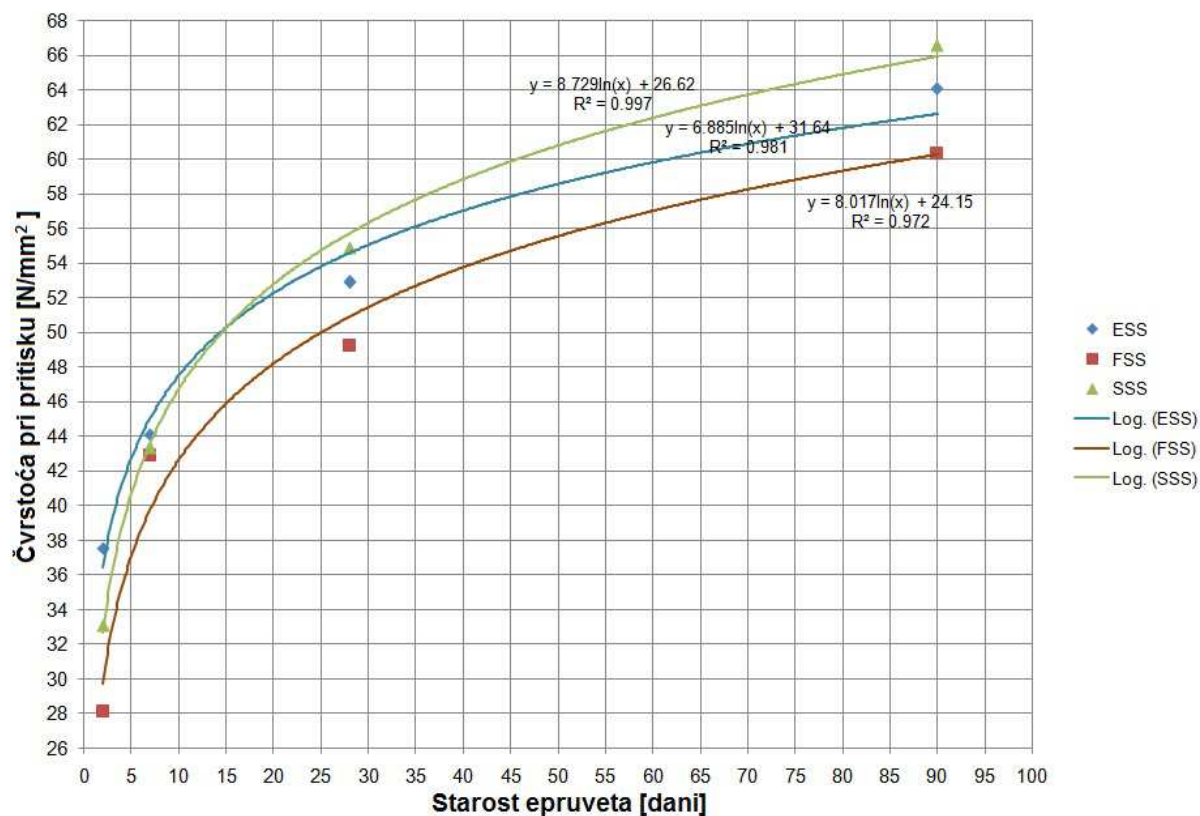
Slika 5.14-3. Dijagrami promene čvrstoće pri pritisku betonskih epruveta u funkciji vremena za betonske mešavine označene sa ER, FR i SR



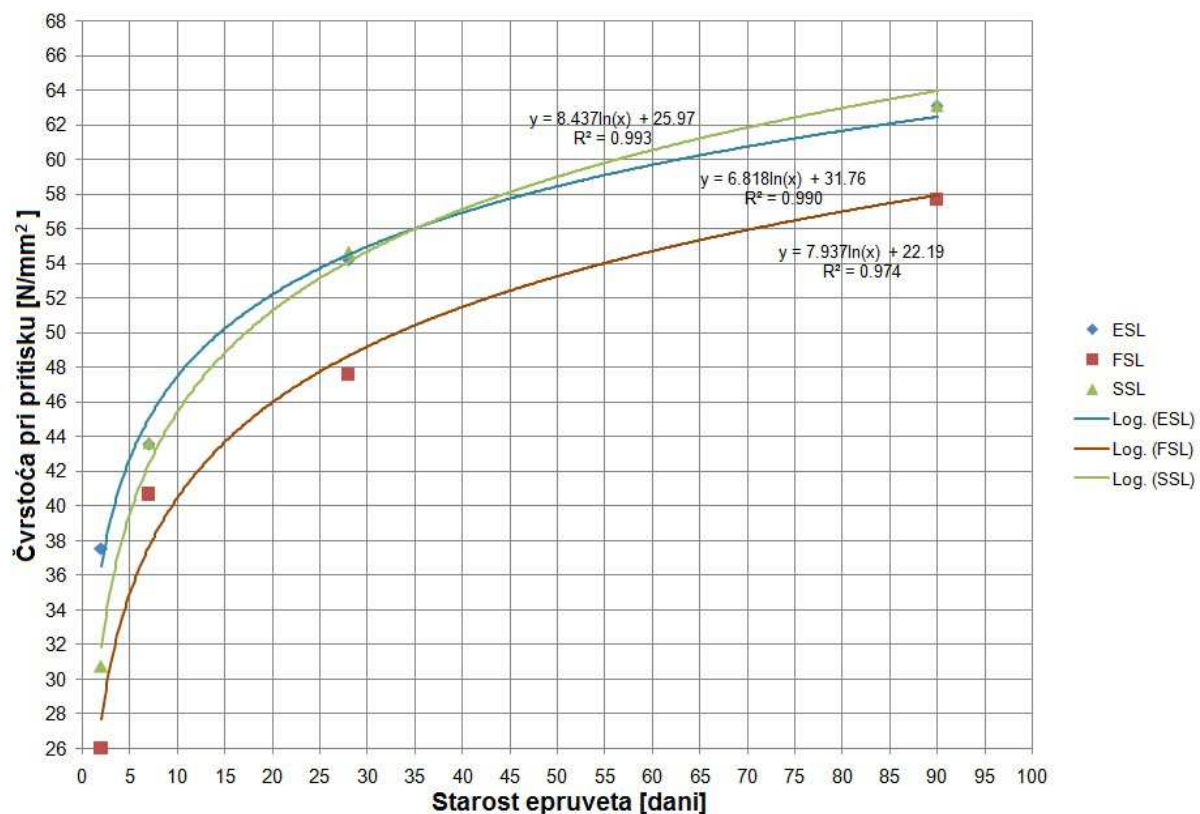
Slika 5.14-4. Dijagrami promene čvrstoće pri pritisku betonskih epruveta u funkciji vremena za betonske mešavine označene sa EPM, FPM i SPM



Slika 5.14-5. Dijagrami promene čvrstoće pri pritisku betonskih epruveta u funkciji vremena za betonske mešavine označene sa EPF, FPF i SPF



Slika 5.14-6. Dijagrami promene čvrstoće pri pritisku betonskih epruveta u funkciji vremena za betonske mešavine označene sa ESS, FSS i SSS



Slika 5.14-7. Dijagrami promene čvrstoće pri pritisku betonskih epruveta u funkciji vremena za betonske mešavine označene sa ESL, FSL i SSL

Imajući u vidu vrste betonskih mešavina koje su analizirane u ovom istraživanju, na veličinu čvrstoće pri pritisku, kao i na njen prirast tokom vremena, uticaj je imala vrsta i geometrija primenjenih vlakana, kao i sadržaj elektrofilterskog pepela, silikatne prašine i reciklirane granulirane gume u betonu.

Rezultati prikazani u okviru tabela 5.22-1 do 5.22-4 u pogledu korišćenja mikroarmature potvrđuju poznatu činjenicu da dodatak vlakana, pre svega polipropilenskih, nema značajan doprinos u smislu povećanja čvrstoće pri pritisku betona. Naime, moguće je značajnije povećanje čvrstoće pri pritisku betona armiranog čeličnim vlaknima, ali samo u slučaju veće dozaže vlakana (iznad 0,5% dodatka čeličnih vlakana po zapremini) [230]. S obzirom da su u ovom istraživanju čelična vlakna dozirana u iznosu od  $25 \text{ kg/m}^3$ , odnosno 0,32% zapremine, logično je bilo očekivati neki mali prirast čvrstoće pri pritisku u odnosu na etalon beton. Kod betona armiranih polipropilenskim vlaknima manje je izraženo povećanje čvrstoće pri pritisku, što se pre svega objašnjava niskim procentualnim učešćem ovih vlakana u okviru cementne matrice. U nekim slučajevima može doći i do smanjenja čvrstoće pri pritisku kod mikroarmiranih betona u odnosu na etalon beton, što se objašnjava viškom uvučenog vazduha prilikom mešanja i ugradnje betona.

U pogledu delimične zamene cementa, rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku takođe potvrđuju činjenicu da beton spravljen bez zamene cementa ima brži prirast čvrstoće u odnosu na betone koji u sebe sadrže elektrofilterski pepeo i silikatnu prašinu. U kasnijoj fazi očvršćavanje (90 dana) vrednosti čvrstoće pri pritisku postaju približno iste.

Što se tiče vrednosti čvrstoće pri pritisku betona spravljenih sa delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom, dobile su se očekivano niže vrednosti u odnosu na etalon beton. To se objašnjava činjenicom da je adhezijska veza između cementnog kamena i zrna reciklirane gume slabija u odnosu na vezu između kamenog agregata i cementnog kamena, kao i viškom uvučenog vazduha prilikom mešanja i ugradnje betona što su pokazali rezultati ispitivanja sadržaja uvučenog vazduha u svežem betonu, tabela 5.22.

Pored prethodno iznetih stavova, na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku prikazanih tabelarno (tabelama 5.22-1 do 5.22-4) i dijagramima (slike 5.14-1 do 5.14-7), moguće je zaključiti sledeće:

1. Delimična zamena cementa uticala je na promenu vrednosti čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka u bilo kojoj fazi očvršćavanja betona. Upoređujući vrednosti za betonske mešavine označene EP i ES sa etalon betonskom mešavinom (označena sa E) pri starosti od 28 (90) dana, primećuje se da je kod mešavina EP došlo do pada čvrstoće pri pritisku za 11,83% (5,83%), dok je kod mešavine ES došlo do povećanja čvrstoće pri pritisku za 3,39% (2,18%). Ovde je u razmatranje uzeta starost betonskih epruveta od 28 i 90 dana iz razloga što se klasa (marka) betona određuje pri starosti od 28 dana, dok je starost od 90 dana uzeta iz razloga intenzivnog prirasta čvrstoće pri pritisku pucolanskih materijala u periodu od 28 do 90 dana.
2. Delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom doprinela je značajnom padu čvrstoće pri pritisku. Pad čvrstoće pri pritisku je malo izraženiji u ranijim fazama očvršćavanja kod betona spravljenog sa elektrofilterskim pepelom. Analizirajući dobijene rezultate pri starosti betona od 28 (90) dana, konstatuje se da kod betona sa oznakom ER pad čvrstoće pri pritisku iznosi 23,48% (28,10%) u odnosu na etalon beton, dok kod betona označenih sa FR i SR pad je 34,87% (40,50%) i 24,11% (26,10%), respektivno.
3. Što se tiče armiranja betona mikrovlaknima, može se reći da su i polipropilenska i čelična vlakna dala mali doprinos povećanju čvrstoće pri pritisku. Analizirajući

rezultate ispitivanja čvrstoće pri pritisku za svaku grupu betonskih mešavina kako je programom utvrđeno (jednu grupu čine betoni bez delimične zamene cementa, drugu grupu čine betoni sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom i treću grupu čine betoni sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom, tabele od 5.22-2 do 5.22-4), može se uočiti da su nešto povoljniji efekat ostvarila kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima u odnosu na ostala, ali razlika nije značajna. Kada su u pitanju polipropilenska vlakna, fibrilna su dala nešto veće čvrstoće pri pritisku u odnosu na monofilamentna. U zavisnosti od vrste betonskih mešavina, polipropilenska monofilamentna vlakna su doprinela povećanju čvrstoće pri pritisku u iznosu od 0,84% do 1,66% (2,32% do 3,84%), dok su polipropilenska fibrilna vlakna doprinela u iznosu od 0,24% do 3,68% (2,95% do 4,75%) pri starosti betona od 28 (90) dana. Što se tiče čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima, kraća vlakna su doprinela povećanju čvrstoće pri pritisku u iznosu od 0,63% do 6,21% (5,23% do 6,98%), dok su duža vlakna doprinela u iznosu od 0,61% do 3,18% (0,58% do 3,65%) pri starosti betona od 28 (90) dana.

4. Upoređujući čvrstoće pri pritisku svih betonskih mešavina u odnosu na etalon beton (beton spravljen bez delimične zamene cementa i agregata) pri različitoj starosti betona (tabela 5.22-1), može se reći da je najveći efekat postignut delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i mikroarmiranjem betona bilo čeličnim bilo polipropilenskim vlaknima (porast čvrstoće pri pritisku u iznosu od 3,65% do 9,31% pri starosti od 90 dana), uz konstataciju da su najveći doprinos dala kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima. Takođe, pri starosti betona od 90 dana, betoni spravljeni bez zamene cementa i betoni spravljeni sa 10% silikatne prašine, izuzimajući betone sa recikliranom granulisanom gumom, imaju približno iste vrednosti čvrstoće pri pritisku. Nešto niže vrednosti postigli su betoni sa 20% elektrofilterskog pepela.
5. Analizom rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku za svaku grupu betona, uočava se niz pravilnosti koje važe za svaku grupu betonskih mešavina. Naime, najmanja vrednost čvrstoće pri pritisku kod svih grupa betonskih mešavina dobijena je na betonima kod kojih je izvršena delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom, pri bilo kojoj starosti betona. Takođe, kod svih grupa betonskih mešavina, mikroarmatura je najveći doprinos imala u ranoj fazi očvršćavanja betona (nakon 2 dana). Pri ovoj starosti betona povećanje čvrstoće pri pritisku kod mikroarmiranih betona iznosilo je od 5,27% do 16,38% u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke. U kasnijoj fazi očvršćavanja (7 i 28 dana), došlo je do usporavanja priraštaja čvrstoće kod mikroarmiranih betona. Kod betona kod kojih nije bilo zamene cementa došlo je čak do smanjenja čvrstoće pri pritisku mikroarmiranih betona u odnosu na etalon pri starosti od 7 dana, što nije slučaj sa ostalim vrstama betona. Pri starosti betona od 90 dana, kod betona armiranih polipropilenskim vlaknima, veće čvrstoće pri pritisku su postignute sa fibriliranim vlaknima, dok kod betona armiranih čeličnim vlaknima veću čvrstoću su pokazali betoni sa kraćim vlaknima, pri čemu treba naglasiti da su mikroarmirani betoni sa čeličnim vlaknima dali veće čvrstoće pri pritisku. Fibrilirana polipropilenska vlakna su doprinela povećanju čvrstoće pri pritisku u iznosu od 2,95% do 4,64% u odnosu na odgovarajuće etalone, dok je kod betona sa monofilamentnim vlaknima taj doprinos nešto manji i iznosi od 2,32% do 3,84%. Prethodno navedeni procenti navode na činjenicu da faktor oblika i broj vlakana nisu u velikoj meri uticali na veličinu čvrstoće pri pritisku betona armiranih polipropilenskim vlaknima. Eventualno, mala razlika koja se javlja može se objasniti u međusobnoj povezanosti fibriliranih vlakana poprečnim vezama tako da se prilikom naprežanja aktivira veći

broj vlakana, što nije slučaj sa monofilamentnim vlaknima. Kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima doprinela su povećanju čvrstoće pri pritisku od 5,23% do 6,98% u odnosu na odgovarajuće etalone, dok je kod betona sa dužim čeličnim vlaknima taj doprinos dosta manji i iznosi od 0,58% do 3,65%. Ovde se može reći da su geometrijske karakteristike (dužina i faktor oblika vlakana) i broj vlakana imali blagi uticaj na vrednost čvrstoće pri pritisku betona. Naime, kraća vlakna imaju veći faktor oblika, brojnija su u odnosu na duža čelična vlakna i ravnomernije su raspoređena u betonskom kompozitu. Sve ovo upućuje na konstataciju da je formirana kompaktna i homogena struktura betona iz koje su proizašle visoke vrednosti čvrstoće pri pritisku.

6. Na slikama 5.14-2 do 5.14-7 su dati dijagrami promene čvrstoće pri pritisku i to tako da svaka slika sadrži uporedne dijagrame tri betona koji se međusobno razlikuju samo u delimičnoj zameni cementa. Kao što se sa dijagrama može uočiti, u početnoj fazi očvršćavanja (prvih 15 dana) najveće čvrstoće pri pritisku postigle su mešavine bez delimične zamene cementa, dok nakon ovog perioda veće čvrstoće pri pritisku su postigle mešavine sa silikatnom prašinom (za iznos od 2,18% do 3,82% u odnosu na odgovarajuće etalone bez zamene cementa, pri starosti betona od 90 dana). Mešavine sa elektrofilterskim pepelom pri bilo kojoj starosti imale su manje čvrstoće pri pritisku u odnosu na mešavine izrađene bez zamene cementa. Pri starosti betona od 90 dana, čvrstoća pri pritisku betona sa elektrofilterskim pepelom je manja za 5,83% do 8,62% u odnosu na odgovarajuće betone bez zamene cementa, što nije veliki pad ako se ima u vidu da je 20% cementa bukvalno zamenjeno elektrofilterskim pepelom bez dodatnih procesa homogenizacije, kao što je to slučaj prilikom dobijanja kompozitnih cementa.

### 5.5.3. Čvrstoća pri savijanju

Čvrstoća pri savijanju određena je prema standardu SRPS EN 12390-5:2010 [203] na epruvetama oblika prizme dimenzija 10×10×40 cm pri starosti betona od 90 dana. Ispitivanje je izvršeno na hidrauličkoj presi WPM VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein (opseg merenja 0 – 20000 N, tačnost 25 N), slika 5.15. Čvrstoća epruveta pri savijanju očvrstlog betona je sračunata na osnovu poznatog obrasca:

$$f_{zs} = \frac{M_{gr}}{W} = \frac{P_{gr,s} \cdot l_o}{b \cdot h^2} \text{ [N/mm}^2\text{]},$$

gde je:

$M_{gr}$  - moment savijanja pri maksimalnom (graničnom) opterećenju,

$W$  - otporni moment poprečnog preseka epruvete,

$P_{gr,s}$  - sila loma (granično opterećenje),

$b$  - širina epruvete (100 mm),

$h$  - visina epruvete (100 mm),

$l_o$  - rastojanje između oslonaca (360 mm).





Slika 5.15. Određivanje čvrstoće pri savijanju očvrslog betona

U tabelama 5.23-1. do 5.23-4. dati su rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju ( $f_{zs}$ ) i procentualna razlika ( $\Delta f_{zs}$ ) u odnosu na odgovarajući etalon beton na uzorcima svih betonskih mešavina analiziranih u ovom istraživanju. Prikazane vrednosti su srednje veličine tri rezultata ispitivanja. Na slici 5.16. su putem dijagrama prikazani rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju betona.

Tabela 5.23-1. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju betona

Oznaka mešavine	$f_{zs}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{zs}$ [%]
E	5,68	0
ER	4,72	-16,90
EPM	6,04	6,34
EPF	6,12	7,75
ESS	6,22	9,51
ESL	6,08	7,04
EF	5,32	-6,34
FR	4,51	-20,60
FPM	5,58	-1,76
FPF	5,64	-0,70
FSS	5,74	1,06
FSL	5,60	-1,41
ES	5,99	5,46
SR	4,85	-14,61
SPM	6,36	11,97
SPF	6,45	13,56
SSS	6,60	16,20
SSL	6,40	12,68

Procentualna razlika čvrstoće pri savijanju betona računa se prema obrascu:

$$\Delta f_{zs} = \frac{f_{zs} - f_{zs,e}}{f_{zs,e}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

gde je:

$\Delta f_{zs}$  - procentualna razlika čvrstoće pri savijanju betona,

$f_{zs,e}$  - čvrstoća pri savijanju etalon uzorka,

$f_{zs}$  - čvrstoća pri savijanju posmatranog uzorka betona.

Tabela 5.23-2. Čvrstoće pri savijanju betona spravljenih bez delimične zamene cementa

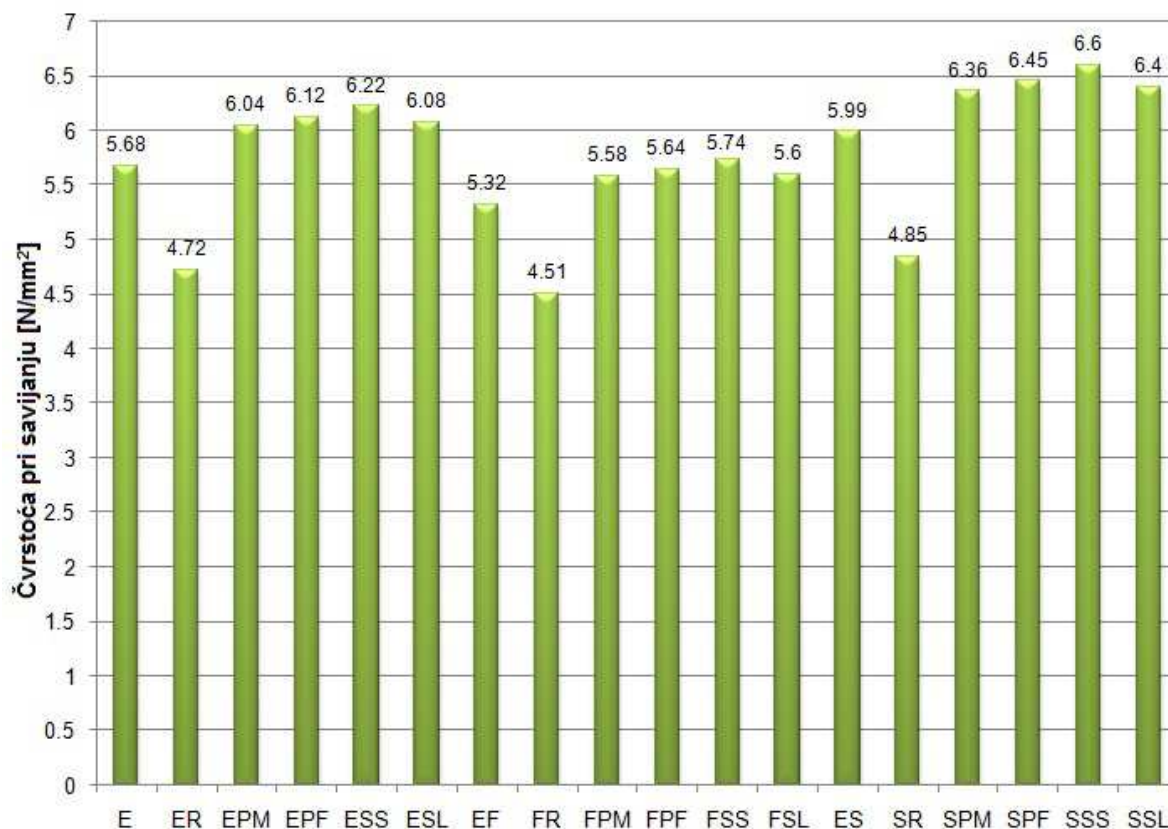
Oznaka mešavine	$f_{zs}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{zs}$ [%]
E	5,68	0
ER	4,72	-16,90
EPM	6,04	6,34
EPF	6,12	7,75
ESS	6,22	9,51
ESL	6,08	7,04

Tabela 5.23-3. Čvrstoće pri savijanju betona spravljenih sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom

Oznaka mešavine	$f_{zs}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{zs}$ [%]
EF	5,32	0
FR	4,51	-15,23
FPM	5,58	4,89
FPF	5,64	6,02
FSS	5,74	7,89
FSL	5,60	5,26

Tabela 5.23-4. Čvrstoće pri savijanju betona spravljenih sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom

Oznaka mešavine	$f_{zs}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{zs}$ [%]
ES	5,99	0
SR	4,85	-19,03
SPM	6,36	6,17
SPF	6,45	7,68
SSS	6,60	10,18
SSL	6,40	6,84



Slika 5.16. Prikaz rezultata ispitivanja čvrstoće pri savijanju betona

Kao što je već poznato, dodatak vlakana betonu pre svega treba da omogući veću zateznu čvrstoću betona, što je i potvrđeno u ovom istraživanju na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u tabelama od 5.23-1. do 5.23-4. i na slici 5.16. Slično kao u slučaju čvrstoće pri pritisku, na veličinu čvrstoće pri savijanju uticaj su imali vrsta i geometrija primenjenih vlakana, kao i sadržaj elektrofilterskog pepela, silikatne prašine i reciklirane granulirane gume u betonu. Takođe, i kod betona spravljenih sa delimičnom zamenu sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom, dobili su se očekivano niže vrednosti čvrstoće pri savijanju odnosu na etalon beton. To se objašnjava činjenicom da je adhezijska veza između cementnog kamena i zrna reciklirane gume slabija u odnosu na vezu između kamenog agregata i cementnog kamena, kao i viškom uvučenog vazduha prilikom mešanja i ugradnje betona što su pokazali rezultati ispitivanja sadržaja uvučenog vazduha u svežem betonu, tabela 5.22.

Na osnovu predmetnih rezultata ispitivanja prikazanih u tabelama od 5.23-1. do 5.23-4. i na slici 5.16. i uzimajući u obzir prethodno navedeni stav, mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Delimična zamena cementa uticala je na promenu vrednosti čvrstoće pri savijanju betonskih uzoraka. Upoređujući vrednosti za betonske mešavine označene EP i ES sa etalon betonskom mešavinom (označena sa E), zaključuje se da kod mešavine EP došlo do pada čvrstoće pri savijanju za 6,34%, dok je kod mešavine ES došlo do povećanja čvrstoće pri savijanju za 5,46%. Bitna je činjenica da smanjenje čvrstoće pri savijanju betona sa elektrofilterskim pepelom u odnosu na etalon beton nije toliko izražen, s obzirom na zamenu čistog PC u iznosu od 20%, dok je s druge strane silikatna prašina doprinela nešto većim čvrstoćama pri savijanju betona.
2. Delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom doprinela je značajnom padu čvrstoće pri savijanju. Kod betona sa oznakom ER pad

iznosi 16,90%, dok kod betona označenih sa FR i SR pad je 20,60% i 14,61%, respektivno u odnosu na etalon beton.

3. Što se tiče armiranja betona mikrovlaknima, može se reći da su i polipropilenska i čelična vlakna doprinela povećanju čvrstoće pri savijanju. Analizirajući rezultate ispitivanja čvrstoće pri savijanju za svaku grupu betonskih mešavina, tabele 5.23-2. do 5.23-4, može se uočiti da su nešto povoljniji efekat ostvarila kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima u odnosu na ostala, ali razlika nije izražena. Kada su u pitanju polipropilenska vlakna, fibrilna su dala nešto veće čvrstoće pri savijanju u odnosu na monofilamentna. U zavisnosti od vrste betonskih mešavina, polipropilenska monofilamentna vlakna su doprinela povećanju čvrstoće pri savijanju od 4,89% do 6,17%, dok je doprinos polipropilenskih fibrilnih vlakana od 6,02% do 7,68%. U slučaju čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima, kraća vlakna su doprinela povećanju čvrstoće pri savijanju od 7,89% do 10,18%, dok je doprinos dužih vlakana od 5,26% do 7,04%. Na osnovu prethodno navedenih iskaza, zaključuje se da geometrijske karakteristike vlakana (dužina i faktor oblika) i broj vlakana, bilo da je reč o polipropilenskim ili čeličnim vlaknima, nisu u velikoj meri uticali na čvrstoću pri savijanju betona.
4. Posmatrajući superponirani uticaj delimične zamene cementa, delimične zamene sitnog agregata i mikroarmiranja betona, odnosno upoređujući čvrstoće pri savijanju svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju i etalon betonske mešavine, tabela (5.23-1.), može se zaključiti da je najveći efekat postignut delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i mikroarmiranjem betona bilo čeličnim ili polipropilenskim vlaknima (porast čvrstoće pri savijanju je od 11,97% do 16,20%), uz konstataciju da su najveći doprinos dala kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima. Treba naglasiti da i pored manje čvrstoće pri savijanju na betonskoj mešavini sa oznakom EF u odnosu na etalon betonsku mešavinu E (razlika iznosi 6,34%), postupak mikroarmiranja (bez obzira da li je reč o čeličnim ili polipropilenskim vlaknima) doprineo je da betonske mešavine sa elektrofilterskim pepelom dostignu približno iste čvrstoće pri savijanju kao i etalon beton (u zavisnosti od vrste vlakana, razlika čvrstoće pri savijanju se kreće u granicama od -1,76% do 1,06%).
5. Treba napomenuti da kod svih ispitanih uzoraka betona sa čeličnim vlaknima sa ojačanim krajevima (bilo da je reč o kraćim ili dužim vlaknima) nije dolazilo do trenutnog otkaza (tzv. krto g loma) nakon dostizanja granične sile loma, kao što je to bio slučaj sa ostalim uzorcima betona. Uzorci su i nakon loma u izvesnoj meri zadržali integritet, odnosno čelična vlakna su i dalje bila povezana sa cementnom matricom, premošćavajući pukotinu nastalu duž celog poprečnog preseka, slika 5.17.



Slika 5.17. Uzorak mikroarmiranog betona nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju

## 5.5.4. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem

Čvrstoća pri zatezanju cepanjem ispitana je na standardnim uzorcima oblika cilindra prečnika 15 cm i visine 30 cm prema standardu SRPS EN 12390-6:2012 [204] pri starosti betona od 90 dana. Ispitivanje je vršeno na hidrauličkoj presi HPM – 3000, ZRMK Ljubljana (opseg merenja 0 – 1000 kN, tačnost 0,5 kN). Čvrstoća betona pri zatezanju cepanjem je sračunata na osnovu poznatog obrasca:

$$f_{zc} = \frac{2 \cdot P_{gr,c}}{\pi \cdot D \cdot L} \quad [\text{N/mm}^2],$$

gde je:

$P_{gr,c}$  - sila loma (granična sila pri kojoj dolazi do cepanja),

$D$  - prečnik ispitivanog cilindra (150 mm),

$L$  - dužina cilindra (300 mm).

Za razliku od ostalih metoda za ispitivanje čvrstoće betona pri zatezanju, kao što su npr. čvrstoća pri direktnom aksijalnom zatezanju ili čvrstoća pri savijanju, metoda određivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem (u literaturi poznata i kao „Brazilski opit“), znatno češće se koristi u praksi. Razlozi za ovo su brojni: ispitivanje se vrši na standardnim uzorcima koji se mogu napraviti u svakoj laboratoriji ili se mogu izvaditi iz već gotove konstrukcije (izvlačenjem cilindričnih uzoraka – kernova pomoću odgovarajuće garniture za bušenje), uzorci se ispituju na standardnim presama kakve poseduje svaka laboratorija za beton, nije neophodan dodatni alat i pribor, nema dodatnih troškova za pripremu uzoraka (lepljenje, mašinska obrada uzoraka, naknadno čišćenje alata posle ispitivanja i sl.).

Kod metode ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem do loma uzoraka dolazi pri složenom naponskom stanju (istovremeno zatezanje i pritisak), pri čemu se pretpostavlja da je cepanje posledica prekoračenja graničnih napona zatezanja (koji su kod većinu betona 10 do 15 puta niži od graničnih napona pritiska). Na slici 5.18 prikazan je cilindrični uzorak prilikom ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem. Kao što se može videti, na mestima kontakta čeličnih ploča prese i betonskog uzorka postavljeni su odgovarajući podmetači od drveta koji obezbeđuju ravnomerno prenošenja sile pritiska na izvodnice cilindra.



Slika 5.18. Dispozicija ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem

U tabelama 5.24-1. do 5.24-4. dati su rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem ( $f_{zc}$ ) i procentualna razlika ( $\Delta f_{zc}$ ) u odnosu na odgovarajući etalon beton na uzorcima svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju. Prikazane vrednosti su srednje veličine tri rezultata ispitivanja. Na slici 5.19. su putem dijagrama prikazani rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona.

Tabela 5.24-1. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem

Oznaka mešavine	$f_{zc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{zc}$ [%]
E	4,71	0
ER	3,67	-22,08
EPM	5,36	13,80
EPF	5,30	12,53
ESS	5,44	15,50
ESL	5,24	11,32
EF	4,38	-6,91
FR	3,44	-26,96
FPM	4,96	5,31
FPF	4,90	4,03
FSS	5,02	6,53
FSL	4,88	3,65
ES	4,90	4,03
SR	3,75	-20,38
SPM	5,54	17,62
SPF	5,45	15,71
SSS	5,69	20,81
SSL	5,49	16,51

Procentualna razlika čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona računa se prema obrascu:

$$\Delta f_{zc} = \frac{f_{cs} - f_{zc,e}}{f_{zc,e}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

gde je:

$\Delta f_{zc}$  - procentualna razlika čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona,

$f_{zc,e}$  - čvrstoća pri zatezanju cepanjem etalon uzorka,

$f_{zc}$  - čvrstoća pri zatezanju cepanjem posmatranog uzorka betona.

Tabela 5.24-2. Čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona spravljenih bez delimične zamene cementa

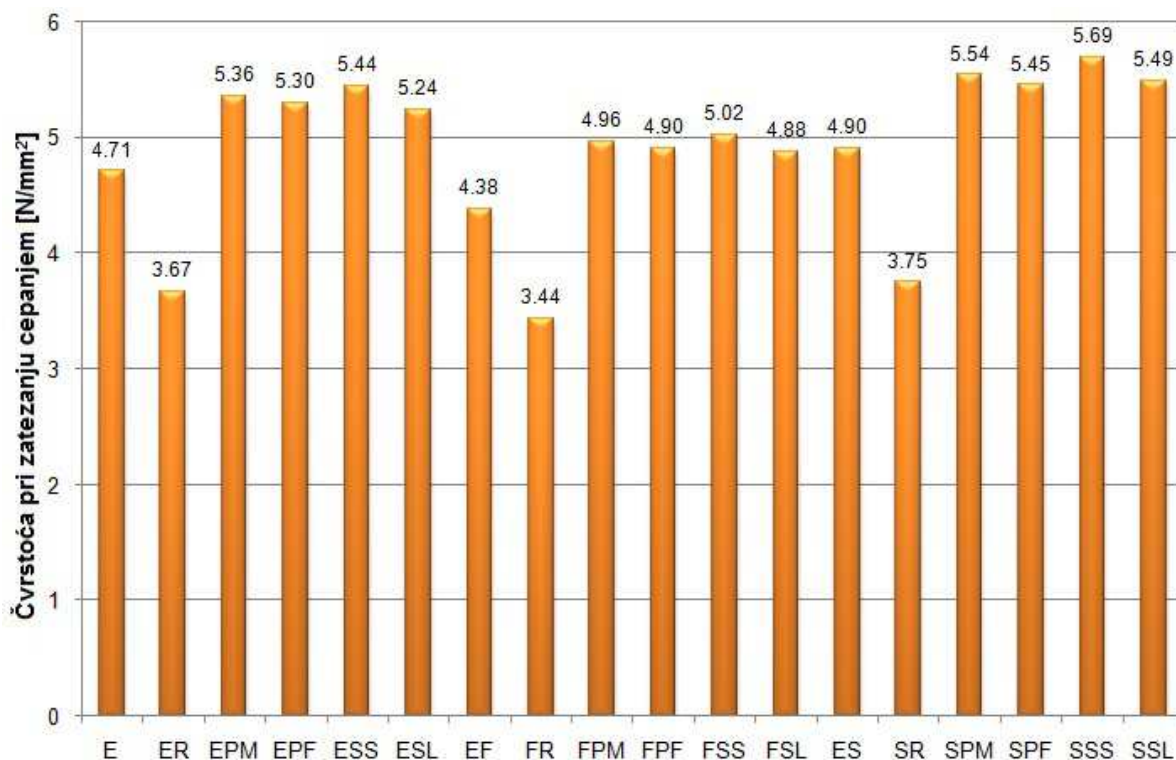
Oznaka mešavine	$f_{zc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{zc}$ [%]
E	4,71	0
ER	3,67	-22,08
EPM	5,36	13,80
EPF	5,30	12,53
ESS	5,44	15,50
ESL	5,24	11,32

Tabela 5.24-3. Čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona spravljenih sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom

Oznaka mešavine	$f_{zc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{zc}$ [%]
EF	4,38	0
FR	3,44	-21,46
FPM	4,96	13,24
FPF	4,90	11,87
FSS	5,02	14,61
FSL	4,88	11,42

Tabela 5.24-4. Čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona spravljenih sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom

Oznaka mešavine	$f_{zc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{zc}$ [%]
ES	4,90	0
SR	3,75	-23,47
SPM	5,54	13,06
SPF	5,45	11,22
SSS	5,69	16,12
SSL	5,49	12,04



Slika 5.19. Prikaz rezultata ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona

Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u tabelama od 5.24-1. do 5.24-4. i na slici 5.19. mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Delimična zamena cementa uticala je na promenu vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem betonskih uzoraka. Upoređujući vrednosti za betonske mešavine označene EP i ES sa etalon betonskom mešavinom (označena sa E), zaključuje se da kod mešavina EP došlo do pada čvrstoće pri zatezanju cepanjem za 6,91%, dok je kod mešavine ES došlo do povećanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem za 4,03%. Slično kao i u slučajevima čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju, pad čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona sa elektrofilterskim pepelom u odnosu na etalon beton nije toliko izražen, što je bitna konstatacija s obzirom da se radi o dvadesetoprocentnoj zameni čistog PC elektrofilterskim pepelom, dok je s druge strane silikatna prašina doprinela nešto većim čvrstoćama pri zatezanju cepanjem betona.
2. Delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom doprinela je značajnom smanjenju čvrstoće pri zatezanju cepanjem. Kod betona sa oznakom ER smanjenje iznosi 22,08%, dok kod betona označenih sa FR i SR smanjenje je 26,96% i 20,38%, respektivno u odnosu na etalon beton.
3. Kada je reč o mikroarmiranju betona, može se konstatovati da su i polipropilenska i čelična vlakna doprinela povećanju čvrstoće pri zatezanju cepanjem. Analizirajući rezultate ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem za svaku grupu betonskih mešavina, tabele 5.24-2. do 5.24-4, može se uočiti da su nešto povoljniji efekat ostvarila kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima u odnosu na ostala, ali i ovde razlika nije izražena. Kada su u pitanju polipropilenska vlakna, monofilamentna su dala nešto veće čvrstoće pri zatezanju cepanjem u odnosu na fibrilna. U zavisnosti od vrste betonskih mešavina, polipropilenska monofilamentna vlakna su doprinela povećanju čvrstoće pri zatezanju cepanjem u iznosu od 13,06% do 13,80%, dok su



polipropilenska fibrilna vlakna doprinela u iznosu od 11,22% do 12,53%. U slučaju čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima, kraća vlakna su doprinela povećanju čvrstoće pri zatezanju cepanjem u iznosu od 14,61% do 16,12%, dok su duža vlakna doprinela u iznosu od 11,32% do 12,04%.

4. Posmatrajući superponirani uticaj delimične zamene cementa, delimične zamene sitnog agregata i mikroarmiranja betona, odnosno upoređujući čvrstoće pri zatezanju cepanjem svih betonskih mešavina analiziranih u ovom istraživanju i etalon betonske mešavine, tabela (5.24-1), može se reći da je najveći efekat postignut delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i mikroarmiranjem betona bilo čeličnim ili polipropilenskim vlaknima (porast čvrstoće pri zatezanju cepanjem je od 15,71% do 20,81%), uz konstataciju da su najveći doprinos dala kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima. Treba napomenuti da i pored manje čvrstoće pri zatezanju cepanjem na betonskoj mešavini sa oznakom EF u odnosu na etalon betonsku mešavinu E (razlika iznosi 6,91%), postupak mikroarmiranja (bez obzira da li je reč o čeličnim ili polipropilenskim vlaknima) doprineo je da betonske mešavine sa elektrofilterskim pepelom dostignu veće čvrstoće pri zatezanju cepanjem u odnosu na etalon beton (u zavisnosti od vrste vlakana, povećanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem se kreće u granicama od 3,65% do 6,53%).
5. Kao i kod ispitivanja čvrstoće pri savijanju, i ovde je postupak mikroarmiranja doprineo poboljšanju duktilnosti i očuvanju integriteta celovitosti kompozita uzoraka nakon loma. Dok je kod betona bez mikroarature dolazilo do trenutnog otkaza tzv. krtoeg loma, u trenutku dostizanja granične sile cepanja, kod mikroarmiranih betona (armiranih i polipropilenskim i čeličnim vlaknima) uzorci su i nakon loma u izvesnoj meri sačuvali integritet. Ovo je naročiti bilo izraženo kod uzoraka armiranih čeličnim vlaknima sa ojačanim krajevima, kod kojih su primenjena vlakna ostala ankerisana u cementnoj matrici i nakon loma, premošćavajući pukotinu nastalu duž celog betonskog preseka, slika 5.20.



Slika 5.20. Uzorak mikroarmiranog betona nakon ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem

## 5.5.5. Čvrstoća pri zatezanju metodom „Pull-off“

Čvrstoća pri zatezanju čupanjem primenom metode „Pull-off“ testa predstavlja standardnu metodu namenjenu za terensko i laboratorijsko ispitivanje betona i maltera, odnosno athezije različitih materijala za betonsku podlogu (cementnih košuljica, reparaturnih maltera, karbonskih traka, epoksidnih i drugih zaštitnih sistema i sl.). Ova metoda ispitivanja je postala jedno od osnovnih ispitivanja prilikom dokazivanja kvaliteta izvedenih industrijskih podova, rekonstrukcije i sanacije različitih tipova betonskih konstrukcija. Rezultati ispitivanja „Pull-off“ metodom mogu biti dobar prilog u ocenjivanju doprinosa koji dodatak vlakana, granulisanе gume, silikatne prašine i elektrofilterskog pepela betonu može da ima na promenu otpornosti površine betona na hidro-abrazivno dejstvo.

Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ urađeno je prema standardu SRPS EN 1542:2010 [208] na prizmatičnim uzorcima dimenzija 20×20×15 cm pri starosti betona od 90 dana. U skladu sa odredbama navedenog standarda, najpre je izvršena mašinska priprema uzoraka – zasecanje burgijom (sa dijamantskim kronicama) prečnika Ø50 mm. Propisana dubina zasecanja iznosi 15±5 mm, ali se u praksi često dešava da ta dubina bude 5 mm ili manje (ponekad se i ne vrši zasecanje). Za potrebe istraživanja urađeno je zasecanje uzoraka do dubine 5 mm, jer je za površinski sloj betona imalo smisla ispitivati čvrstoću na zatezanje metodom „Pull-off“. Nakon zasecanja, površina betona je dodatno očišćena čeličnom četkom i vazduhom pod pritiskom, a zatim su na mestima ispitivanja zalepljeni čelični pečati (prečnika 50 mm i visine 20 mm). Lepljenje je urađeno pomoću specijalnog epoksidnog lepka visokih mehaničkih performansi i ubrzanog priraštaja čvrstoće (Sikadur-31 CF Normal). Ispitivanje uzoraka betona vršeno je nakon 2 dana „Pull-off“ aparatom proizvođača Matest, tip Dyna Z-16, kapaciteta do 16 kN. Na slici 5.21 dat je prikaz upotrebljene aparature i uzorka nakon ispitivanja „čupanjem“. Kao što se na fotografiji može videti, predmetna aparatura daje vrednost sile čupanja u kN, dok se čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ računa po obrascu:

$$f_{za} = \frac{4 \cdot F_{za}}{D^2 \cdot \pi} \text{ [MPa] } ,$$

gde je:  $F_{za}$  - sila čupanja i  $D$  - prečnik uzorka (50 mm).



Slika 5.21. „Pull-off“ aparatura i uzorak betona nakon ispitivanja

U tabelama 5.25-1. do 5.25-4. dati su rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ ( $f_{za}$ ) i procentualna razlika ( $\Delta f_{za}$ ) u odnosu na odgovarajući etalon beton na uzorcima svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju. Prikazane vrednosti su srednje veličine tri rezultata ispitivanja. Na slici 5.22. su putem dijagrama prikazani rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“.

Tabela 5.25-1. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom

Oznaka mešavine	$f_{za}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{za}$ [%]
E	5,37	0
ER	3,89	-27,56
EPM	5,98	11,36
EPF	5,84	8,75
ESS	5,80	8,01
ESL	5,75	7,08
EF	4,98	-7,26
FR	3,75	-30,17
FPM	5,49	2,23
FPF	5,42	0,93
FSS	5,40	0,56
FSL	5,35	-0,37
ES	5,52	2,79
SR	4,12	-23,28
SPM	6,16	14,71
SPF	6,12	13,97
SSS	6,04	12,48
SSL	6,04	12,48

Procentualna razlika čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom računa se prema obrascu:

$$\Delta f_{za} = \frac{f_{za} - f_{za,e}}{f_{za,e}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

gde je:

$\Delta f_{za}$  - procentualna razlika čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom,

$f_{za,e}$  - čvrstoća pri zatezanju „Pull-off“ metodom etalon uzorka,

$f_{za}$  - čvrstoća pri zatezanju „Pull-off“ metodom posmatranog uzorka betona.

Tabela 5.25-2. Čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom betona spravljenih bez delimične zamene cementa

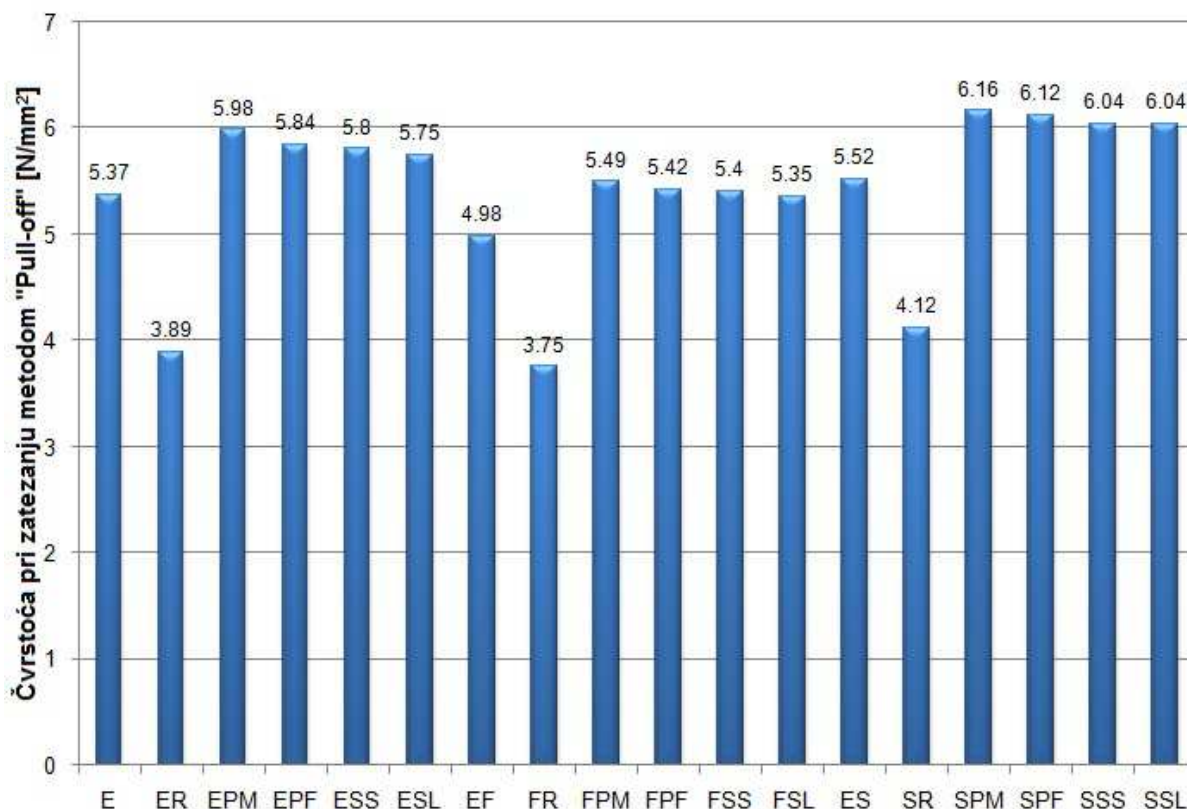
Oznaka mešavine	$f_{za}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{za}$ [%]
E	5,37	0
ER	3,89	-27,56
EPM	5,98	11,36
EPF	5,84	8,75
ESS	5,80	8,01
ESL	5,75	7,08

Tabela 5.25-3. Čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom betona spravljenih sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom

Oznaka mešavine	$f_{za}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{za}$ [%]
EF	4,98	0
FR	3,75	-24,70
FPM	5,49	10,24
FPF	5,42	8,84
FSS	5,40	8,43
FSL	5,35	7,43

Tabela 5.25-4. Čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom betona spravljenih sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom

Oznaka mešavine	$f_{za}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta f_{za}$ [%]
ES	5,52	0
SR	4,12	-25,36
SPM	6,16	11,59
SPF	6,12	10,87
SSS	6,04	9,42
SSL	6,04	9,42



Slika 5.22. Prikaz rezultata ispitivanja čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“

Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ prikazanih u tabelama od 5.25-1. do 5.25-4. i na slici 5.22. mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Delimična zamena cementa u betonskim mešavinama uticala je na promenu vrednosti čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“. Upoređujući vrednosti za betonske mešavine označene EP i ES sa etalon betonskom mešavinom (označena sa E), zaključuje se da kod mešavina EP došlo do pada čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ za 7,26%, dok je kod mešavine ES došlo do povećanja čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ za 2,79%. I u ovom slučaju, pad čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ kod betona sa elektrofilterskim pepelom u odnosu na etalon beton nije toliko izražen, dok je s druge strane silikatna prašina doprinela nešto većim čvrstoćama pri zatezanju metodom „Pull-off“.
2. Delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom doprinela je značajnom padu čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“. Kod betona sa oznakom ER pad iznosi 27,56%, dok kod betona označenih sa FR i SR pad je 30,17% i 23,28%, respektivno u odnosu na etalon beton.
3. Kada je reč o mikroarmiranju betona, može se konstatovati da su i polipropilenska i čelična vlakna doprinela povećanju čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“. Analizirajući rezultate ispitivanja čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ za svaku grupu betonskih mešavina, tabele 5.25-2. do 5.25-4, može se uočiti da su nešto povoljniji efekat ostvarila monofilamentna polipropilenska vlakna u odnosu na ostala, ali i ovde razlika nije izražena. Kada su u pitanju čelična vlakna sa ojačanim krajevima, kraća vlakna su dala nešto veće čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ u odnosu na duža. U zavisnosti od vrste betonskih mešavina, polipropilenska monofilamentna vlakna su doprinela povećanju čvrstoće pri zatezanju cepanjem u

iznosu od 10,24% do 11,59%, dok su polipropilenska fibrilna vlakna doprinela u iznosu od 8,75% do 10,87%. U slučaju čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima, kraća vlakna su doprinela povećanju čvrstoće pri zatezanju cepanjem u iznosu od 8,01% do 9,42%, dok su duža vlakna doprinela u iznosu od 7,08% do 9,42%. Ovde treba naglasiti da je na vrednost čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ u dobroj meri uticao raspored mikroarmature u betonskom kompozitu. Naime, kako su polipropilenska vlakna manja i brojnija u odnosu na čelična, raspored ovih vlakana u betonskom kompozitu je homogeniji u smislu količine i pravca pružanja. Posebno je ovo važno za površinske delove betonskog uzorka (u praksi konstruktivnog betonskog elementa) na kojima se ispituje veličina zatezne čvrstoće metodom „Pull-off“. Logično je da će se veće čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ dobiti, ako je veći broj vlakana u površinskoj zoni betona u pravcu ili u blagom uglu u odnosu na pravac delovanja sile čupanja.

4. Posmatrajući superponirani uticaj delimične zamene cementa, delimične zamene sitnog agregata i mikroarmiranja betona, odnosno upoređujući čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju i etalon betonske mešavine, tabela (5.25-1.), može se zaključiti da je najveći efekat postignut delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i mikroarmiranjem betona bilo čeličnim ili polipropilenskim vlaknima (porast čvrstoće pri zatezanju cepanjem je od 12,48% do 14,71%), uz konstataciju da su najveći doprinos dala polipropilenska monofilamentna vlakna. Treba napomenuti da i pored manje čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ na betonskoj mešavini sa oznakom EF u odnosu na etalon betonsku mešavinu E (razlika iznosi 7,26%), postupak mikroarmiranja (bez obzira da li je reč o čeličnim ili polipropilenskim vlaknima) doprineo je da betonske mešavine sa elektrofilterskim pepelom dostignu približno iste čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom kao i etalon beton (u zavisnosti od vrste vlakana, razlika čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“ se kreće u granicama od -0,37% do 2,23%).

#### 5.5.6. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton

Metoda merenja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton je jedna od najviše primenjivanih nedestruktivna metoda u određivanju karakteristika očvrslog betona. Koristi se za utvrđivanje stepena hidratacije cementa u betonskom kompozitu, utvrđivanje postojanja prslina u betonskom elementu i određivanje njene dubine prostiranja, detekciju postojanja tzv. „gnezda“ u betonskoj masi usled neadekvatne ugradnje betona, prisustvo armature u betonu, određivanje čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti itd.

Generator ultrazvuka šalje impuls preko sonde predajnika koja se postavlja sa jedne strane ispitnog uzorka, dok se sa druge strane uzorka postavlja sonda prijemnik koja detektuje impuls. Na osnovu vremena putovanja impulsa i izmerenog rastojanja između sonde, može se sračunati brzina prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz beton. Prema ACI 544.1R [231], brzina ultrazvučnog impulsa zavisi od elastičnih karakteristika i zapremine mase sredine kroz koju se zvuk rasprostire, u konkretnom slučaju je to beton.

Sprovođenje samog testiranja betona metodom ultrazvuka prilično je jednostavno. Međutim, brojna ispitivanja pokazala su da može biti problema s reproduktivnošću rezultata, jer mnogi faktori utiču na njihovu vrednost. U nastavku teksta navedeni su najznačajniji od njih.

Prilikom merenja, veoma je važno da se ostvari pravilan kontakt između sonde ultrazvučnog aparata i ispitne površine betona. Površina betona na mestu postavljanja sonde

mora biti premazana tankim slojem masti u koju se sonde utiskuju tako da ne bude zaostalih mehurića vazduha. Ukoliko je površina betona hrapava, neophodno je da se poravna. Rilem takođe propisuje minimalno dozvoljeno rastojanje sonde ultrazvučnog aparata i to 100 mm – ako je beton spravljen s najvećim zrnom agregata do 30 mm, odnosno 150 mm – ako je najveće zrno agregata do 45 mm [232].

U najvećem broju slučajeva ispitivanja, betonska tela ili konstruktivni elementi imaju dimenzije koje ne utiču na regularnost merenja. Međutim, treba voditi računa kada su bočne dimenzije betonskih tela znatno manje u odnosu na treću dimenziju, odnosno na dužinu puta koji treba da pređe ultrazvučni talas. Na primer, ako je izmerena brzina ultrazvuka u betonu od oko 3700 m/s i ako sonda predajnik ima frekvencu od 54 kHz, onda je talasna dužina oko 68 mm. Odatle sledi da najmanja bočna dimenzija predmetnog betonskog tela ne sme biti manja od 70 mm. Ovakva provera regularnosti merenja se lako može uraditi u svakom pojedinačnom slučaju. Ako bi se koristila sonda predajnik koja emituje ultrazvučni talas veće frekvence od 54 kHz, onda minimalne bočne dimenzije betonskog elementa mogu biti manje nego u navedenom primeru. U poslednjoj deceniji dosta se radilo i na tzv. bezkontaktnoj metodi ispitivanja betona ultrazvukom [233], ali je to još uvek u eksperimentalnoj fazi.

Smatra se da varijacija temperature betona u granicama od 5 do 30 °C ne utiče značajno na rezultate merenja. S druge strane, ukoliko je temperatura izvan ovog opsega, preporučuju se određene korekcije rezultata [234].

Brzina zvuka, pa tako i ultrazvuka, znatno je manja u vazduhu nego u vodi ili u čvrstim telima. Shodno tome, brzina ultrazvuka u vodom zasićenom betonu veća je nego u istom osušenom betonu čije su pore ispunjene vazduhom. Ovaj efekat naročito je izražen u slučaju kada se beton spravlja s visokim vodocementnim faktorom, što za posledicu ima veću poroznost. Razlika u brzini ultrazvuka može iznositi i od 4 do 5% [235].

Može se reći da brzina ultrazvuka ne zavisi od naponskog stanja u betonskom elementu. Neko smanjenje brzine ultrazvuka može se desiti ukoliko je beton izložen znatnom statičkom opterećenju, na primer, od 60% do 70% ili više u odnosu na njegovu čvrstoću pri pritisku. Ovo se objašnjava pojavom mikroprslina unutar strukture betona.

Postojanje čelične armature u betonu smatra se jednim od najznačajnijih faktora koji mogu uticati na brzinu ultrazvuka [236]. Brzina ultrazvuka je od 50% do 70% veća u čeliku nego u betonu. Shodno tome, često se može očekivati veća brzina ultrazvuka u armiranom betonu nego u onom bez armature. Stoga, preporučuje se da se za merenja odaberu mesta na kojima se armatura ne pruža u pravcu puta koji prelazi ultrazvuk. Ukoliko to nije moguće, onda se prilikom izračunavanja brzine ultrazvuka moraju koristiti odgovarajući koeficijenti za korekciju [237]. Pored svega navedenog, postoji značajna verovatnoća da dobijeni rezultati merenja ne budu dovoljno tačni.

Sastav betona – komponentni materijali od kojih se on spravlja – takođe utiče na brzinu ultrazvuka. To je potpuno logično jer od svojstava komponenti i njihovog udela zavise i svojstva betona. Navedeno se svakako odnosi i na čvrstoću pri pritisku, s kojom se brzina ultrazvuka često dovodi u korelaciju. S druge strane, nije jednako značajan uticaj svake komponente od kojih se beton spravlja. Na primer, uticaj vrste cementa nema značajan efekat na brzinu ultrazvuka za isti dostignuti stepen hidratacije. Tačnije, mnogo veći uticaj ima dostignuti stepen hidratacije cementa, pri čemu je korelacija jasna i očigledna: veći stepen hidratacije – veća brzina ultrazvuka. Povećanje starosti betona, što je u direktnoj korelaciji s dostignutim stepenom hidratacije, logično utiče na povećanje brzine ultrazvuka. U početku, brzina ultrazvuka raste naglo, dok se kasnije prirast usporava s trendom sličnim kao i u slučaju prirasta čvrstoće pri pritisku betona tokom vremena.

Hemijski dodaci utiču na brzinu ultrazvuka – ako utiču na stopu hidratacije cementa.

U tom smislu, najveći uticaj imaju regulatori brzine vezivanja i očvršćavanja betona, to jest akceleratori i retarderi. Uticaj aditiva tipa reduktora vode može se razmatrati preko smanjenog vodocementnog faktora. S druge strane, potpuno je logično da povećanje vodocementnog faktora utiče na smanjenje brzine ultrazvuka. Aeranti nemaju značajniji uticaj na vezu između brzine ultrazvuka i čvrstoće pri pritisku betona [238], što treba prihvatiti sa rezervom jer aeranti povećavaju sadržaj vazduha u betonu.

Dodavanjem čeličnih vlakana običnom betonu nesumnjivo dovodi do povećanje njegove zapreminske mase, zbog veće specifične mase vlakana ( $7,85 \text{ g/cm}^3$ ). Po teoriji prostiranja talasa, ukoliko je veća gustina sredine, veća je i brzina prostiranja. To znači da što je veća zapremiska masa očvrstlog betona, očekuje se da i brzina prostiranja ultrazvučnog impulsa bude veća. Međutim, istraživanja [239] su pokazala da je veća količina čeličnih vlakana doprinela znatno manjem povećanju brzine ultrazvučnog impulsa ili je čak došlo do smanjenja brzine. Razlog je razvoj pora i nehomogenost mikroarmiranog betona, koji znatno usporavaju prolaz ultrazvučnog impulsa kroz beton.

Polipropilenska vlakna, ukoliko se doziraju u manjim količinama (do 1% zapremine), ne utiču bitno na zapreminsku masu očvrstlog betona, a samim tim i na brzinu prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz beton. Međutim, u većim količinama smanjuju zapreminsku masu betona zbog svoje male specifične mase ( $0,91 \text{ g/cm}^3$ ), kao i zbog sadržaja vazduha u betonu, koji se povećava sa povećanjem količine polipropilenskih vlakana [177].

Elektrofilterski pepeo u betonu doprinosi boljoj obradljivosti betonske mešavine i poboljšava mehaničke karakteristike betona popunjavanjem mikropora. Silikatna prašina ima čestice koje su za oko 100 do 150 puta sitnije od čestica portland cementa i ima veliku specifičnu površinu. Ova submikronska veličina čestica silikatne prašine omogućava popunjavanje otvorenih pora u cementnoj pasti, slično kao što zrna sitnog agregata popunjavaju pore između zrna krupnog agregata. Dakle, elektrofilterski pepeo i silikatna prašina doprinose boljoj kompaktnosti betona, ali to ne znači da će beton imati veću zapreminsku masu, jer ona zavisi i od udela elektrofilterskog pepela i silikatne prašine u betonu zbog manjih specifičnih masa u odnosu na specifičnu masu cementa. To dalje znači da i brzina prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz beton zavisi od prethodno navedenih uslova.

Od svih komponentnih materijala, agregat ima najveći uticaj na brzinu prostiranja ultrazvuka kroz beton. Uticaj agregata može se sagledati iz aspekta vrste i količine. Ispitivanjima je utvrđeno da je brzina ultrazvuka kroz zrna agregata veća nego kroz očvrslu cementnu pastu, što se direktno može dovesti u vezu s njihovom poroznošću. Ono što je veoma važno jeste to što su rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazali da je za istu čvrstoću pri pritisku betona brzina ultrazvuka manja ako je beton spravljen s rečnim agregatom nego ako je spravljen s drobljenim agregatom. Takođe, postoje razlike u brzini ultrazvuka, u zavisnosti od mineraloškog sastava drobljenog agregata [240]. Tako, na primer, brzina ultrazvuka će biti veća u betonu s krečnjačkim agregatom nego u onom, spravljenom sa andezitom, dijabazom ili bazaltom, za isti nivo čvrstoće pri pritisku betona.

Određivanje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton rađeno je na uzorcima oblika kocke ivice 15cm prema standardu SRPS EN 12504-4:2008 [206] pri starosti betona od 90 dana, slika 5.23. Ispitivanje je vršeno pomoću aparata PUNDIT CNS Electronics LTD. Brzina ultrazvučnog impulsa je određena pomoću formule:

$$v_{uz} = \frac{l_p}{t_e} \quad [\text{m/s}],$$

gde je:



$v_{uz}$  - brzina ultrazvučnog impulsa,

$l_p$  - dužina putanje (15cm),

$t_e$  - efektivno vreme prolaska.



Slika 5.23. Određivanje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton

U tabelama 5.26-1. do 5.26-4. dati su rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton ( $v_{uz}$ ) i procentualna razlika ( $\Delta v_{uz}$ ) u odnosu na odgovarajući etalon beton na uzorcima svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju. Prikazane vrednosti su srednje veličine tri rezultata ispitivanja (ispitivanje je vršeno na tri betonska uzorka, na svakom uzorku na 5 ispitnih mesta). Na slici 5.24. su putem dijagrama prikazani rezultati ispitivanja brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz beton.

Tabela 5.26-1. Rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton

Oznaka mešavine	$v_{uz}$ [m/s]	$\Delta v_{uz}$ [%]
E	4733	0
ER	4479	-5,37
EPM	4713	-0,42
EPF	4708	-0,53
ESS	4750	0,36
ESL	4742	0,19
EF	4518	-4,54
FR	4236	-10,50
FPM	4494	-5,05
FPF	4489	-5,16
FSS	4530	-4,29
FSL	4525	-4,39
ES	4715	-0,38
SR	4425	-6,51
SPM	4699	-0,72
SPF	4707	-0,55
SSS	4731	-0,04
SSL	4725	-0,17

Procentualna razlika brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton računa se prema obrascu:

$$\Delta v_{uz} = \frac{v_{uz} - v_{uz,e}}{v_{uz,e}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

gde je:

$\Delta v_{uz}$  - procentualna razlika brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton,

$v_{uz,e}$  - brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak etalon betona,

$v_{uz}$  - brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz posmatrani uzorak betona.

Tabela 5.26-2. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kod betona spravljenih bez delimične zamene cementa

Oznaka mešavine	$v_{uz}$ [m/s]	$\Delta v_{uz}$ [%]
E	4733	0
ER	4479	-5,37
EPM	4713	-0,42
EPF	4708	-0,53
ESS	4750	0,36
ESL	4742	0,19

Tabela 5.26-3. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kod betona spravljenih sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom

Oznaka mešavine	$v_{uz}$ [m/s]	$\Delta v_{uz}$ [%]
EF	4518	0
FR	4236	-6,24
FPM	4494	-0,53
FPF	4489	-0,64
FSS	4530	0,27
FSL	4525	0,15

Tabela 5.26-4. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kod betona spravljenih sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom

Oznaka mešavine	$v_{uz}$ [m/s]	$\Delta v_{uz}$ [%]
ES	4715	0
SR	4425	-6,15
SPM	4699	-0,34
SPF	4707	-0,17
SSS	4731	0,34
SSL	4725	0,21



Slika 5.24. Prikaz rezultata ispitivanja brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton

Na osnovu rezultata ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton prikazanih u tabelama od 5.26-1. do 5.26-4. i na slici 5.24. mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Delimična zamena cementa u betonskim mešavinama uticala je na promenu brzine prolaska ultrazvučnog impulsa. Upoređujući vrednosti za betonske mešavine označene kao EP i ES sa etalon betonskom mešavinom (označena sa E), zaključuje se da je kod mešavina EP i ES došlo do smanjenja brzine ultrazvučnog impulsa za 4,54%, odnosno za 0,38%. Pad brzine ultrazvučnog impulsa kroz beton kod betonskih mešavina sa silikatnom prašinom je neznatan, dok u slučaju betonskih mešavina sa elektrofilterskim pepelom najveći uticaj na smanjenje brzine doprinela je manja vrednost zapreminske mase u odnosu na etalon betonsku mešavinu. Takođe uticaj je imao i nešto veći sadržaj vazduha u betonu (poglavlje 5.4.4).
2. Delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom doprinela je značajnom smanjenju brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton. Kod betona sa oznakom ER smanjenje iznosi 5,37%, dok kod betona označenih sa FR i SR smanjenje je 10,50% i 6,51%, respektivno u odnosu na etalon beton. Rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton pokazuju da su granule gume u betonu slaba mesta, te da ne doprinose poboljšanju mehaničkih karakteristika betona, kao što su inače pokazali rezultati čvrstoća pri pritisku i zatezanju. Međutim, guma doprinosu poboljšanju nekih mehaničkih karakteristika betona (otpornost na habanje po Böhme-u, hidroabrazivna otpornost betona) o čemu će biti reči u narednim poglavljima. Treba, međutim, napomenuti da se guma odlikuje sposobnošću apsorpcije zvuka, pa je to jedan od razloga manje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton. Takođe, veći udeo uvučenog vazduha utiče na smanjenje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton koji sadrži gumene granule (poglavlje 5.4.4).

3. Kada je reč o mikroarmiranju betona, može se konstatovati da su i polipropilenska i čelična vlakna takođe doprinela promeni brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton. Analizirajući rezultate ispitivanja brzine ultrazvučnog impulsa za svaku grupu betonskih mešavina, tabele 5.26-2. do 5.26-4, može se uočiti da su čelična vlakna doprinela blagom povećanju brzine, dok su polipropilenska vlakna doprinela blagom smanjenju brzine ultrazvučnog impulsa. Kada su u pitanju čelična vlakna sa ojačanim krajevima, kraća vlakna su doprinela nešto većoj brzini ultrazvučnog impulsa u odnosu na duža, dok su u slučaju polipropilenskih vlakana monofilamentna doprinela većem smanjenju brzine ultrazvučnog impulsa u odnosu na fibrilirana. U zavisnosti od vrste betonskih mešavina, polipropilenska monofilamentna vlakna su doprinela smanjenju brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton u iznosu od 0,34% do 0,53%, dok su polipropilenska fibrilna vlakna doprinela u iznosu od 0,17% do 0,53%. U slučaju čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima, kraća vlakna su doprinela povećanju brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton u iznosu od 0,27% do 0,36%, dok su duža vlakna doprinela u iznosu od 0,15% do 0,21%. S obzirom na veću specifičnu masu čeličnih vlakana ( $7,85 \text{ g/cm}^3$ ) u odnosu na polipropilenska ( $0,91 \text{ g/cm}^3$ ), kao i na manji doprinos čeličnih vlakana povećanju sadržaja uvučenog vazduha u odnosu na polipropilenska, logične su i vrednosti dobijene za brzinu prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton.
4. Posmatrajući superponirani uticaj delimične zamene cementa, delimične zamene sitnog agregata i mikroarmiranja betona, odnosno upoređujući brzine ultrazvučnog impulsa svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju i etalon betonske mešavine, tabela (5.26-1.), može se reći da betonske mešavine izrađene bez zamene cementa i mešavine sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom imaju približno iste vrednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton (razlika u granicama od -0,72% do 0,36% kod svih betona, izuzev betona sa gumom gde je razlika u granicama od -5,37% do -6,51%). Vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod betonskih mešavina izrađenih sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom su manje od etalona u iznosu od 4,29% do 5,16%, izuzev kod betona sa gumom gde razlika iznosi 10,50%.

#### 5.5.7. Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra

Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra (indeksa odskoka sklerometra) predstavlja standardnu nedestruktivnu metodu namenjenu za terensko i laboratorijsko ispitivanje betona. Ova metoda se zasniva na merenju površinske tvrdoće betona na osnovu koje se na vrlo jednostavan način može odrediti orijentaciona vrednost čvrstoće pri pritisku. Metode koje se zasnivaju na korelaciji između čvrstoće i površinske tvrdoće betona imaju niz nedostataka, ali i pored ovoga, one se u praksi vrlo često primenjuju zbog izuzetne jednostavnosti i prilično dobre pouzdanosti. Glavni nedostaci nedestruktivnih metoda ispitivanja (pa i metode određivanja indeksa odskoka sklerometra) vezani su za činjenicu da se merenja vrše na površini elemenata, gde beton u opštem slučaju nema iste karakteristike kao njegova masa u unutrašnjosti. Jedan od ozbiljnih nedostataka ove metode je i mogućnost velike disperzije rezultata ispitivanja do koje dolazi zbog variranja tvrdoće betona od jednog do drugog ispitnog mesta na površini istog elementa. Veličina odskoka zavisi i od rasporeda i udaljenosti krupnih zrna agregata od površine betona, prisustva armature, mikroarmature, pa i od iskustva ispitivača. Navedeni nedostaci se delimično prevazilaze tako što će se ispitivanja sprovesti na većem broju ispitnih mesta po određenoj šemi. Na ovaj način se

dolazi do većeg skupa podataka, u okviru kojeg se primenom matematičke statistike može dobiti rezultat značajne pouzdanosti. Rezultati ispitivanja površinske tvrdoće betona upotrebom sklerometra mogu biti dobar prilog u ocenjivanju doprinosa koji dodatak vlakana, granulirane gume, silikatne prašine i elektrofilterskog pepela betonu može da ima na poboljšanje otpornosti površine betona na hidro-abrazivno dejstvo.

Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra (indeksa odskoka sklerometra) rađeno je na uzorcima oblika kocke ivice 15 cm prema standardu SRPS EN 12504-2:2008 [205] pri starosti betona od 90 dana, slika 5.25. Ispitivanje je vršeno pomoću aparata Sklerometar N-34 Proceq SA Switzerland.



Slika 5.25. Određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra

U tabelama 5.27-1. do 5.27-4. dati su rezultati ispitivanja indeksa odskoka sklerometra ( $N_s$ ) i procentualna razlika ( $\Delta N_s$ ) u odnosu na odgovarajući etalon beton na uzorcima svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju. Prikazane vrednosti su srednje veličine tri rezultata ispitivanja (ispitivanje je vršeno na tri betonska uzorka, na svakom uzorku na 18 ispitnih mesta). Na slici 5.26. su putem dijagrama prikazani rezultati ispitivanja indeksa odskoka sklerometra.

Tabela 5.27-1. Rezultati ispitivanja indeksa odskoka sklerometra

Oznaka mešavine	$N_s$	$\Delta N_s$
E	48,2	0
ER	38,0	-21,16
EPM	47,9	-0,62
EPF	47,0	-2,49
ESS	47,6	-1,24
ESL	47,3	-1,87
EF	44,5	-7,68
FR	36,8	-23,65
FPM	43,9	-8,92
FPF	43,8	-9,13
FSS	43,5	-9,75
FSL	44,0	-8,71
ES	48,3	0,21
SR	38,4	-20,33
SPM	46,9	-2,70
SPF	47,8	-0,83
SSS	47,4	-1,66
SSL	47,9	-0,62

Procentualna razlika ideksa odskoka sklerometra računa se prema obrascu:

$$\Delta N_s = \frac{N_s - N_{s,e}}{N_{s,e}} \cdot 100 [\%]$$

gde je:

$\Delta N_s$  - procentualna razlika indeksa odskoka sklerometra,

$N_{s,e}$  - indeks odskoka sklerometra etalon betona,

$N_s$  - indeks odskoka sklerometra posmatranog betona.

Tabela 5.27-2. Indeks odskoka sklerometra kod betona spravljenih bez delimične zamene cementa

Oznaka mešavine	$N_s$	$\Delta N_s$
E	48,2	0
ER	38,0	-21,16
EPM	47,9	-0,62
EPF	47,0	-2,49
ESS	47,6	-1,24
ESL	47,3	-1,87

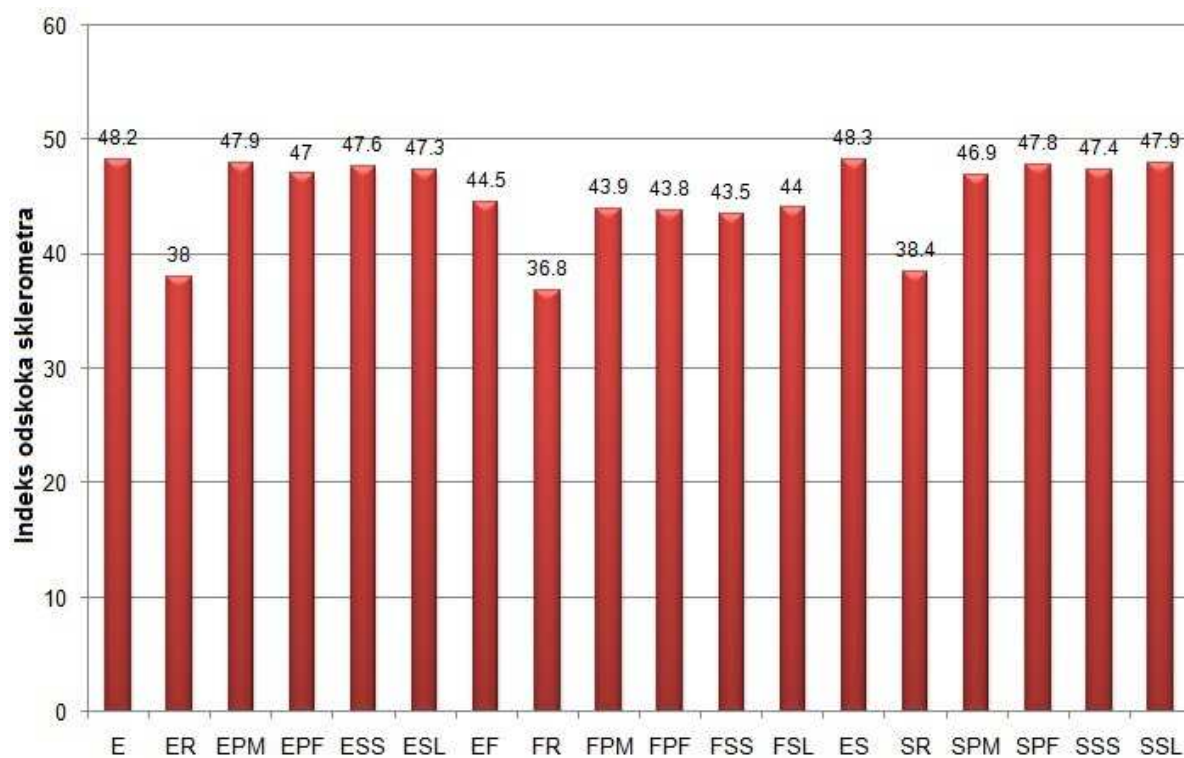
Tabela 5.27-3. Indeks odskoka sklerometra kod betona spravljenih sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom

Oznaka mešavine	$N_s$	$\Delta N_s$
EF	44,5	0
FR	36,8	-17,30
FPM	43,9	-1,35
FPF	43,8	-1,57
FSS	43,5	-2,25
FSL	44,0	-1,12

Tabela 5.27-4. Indeks odskoka sklerometra kod betona spravljenih sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom

Oznaka mešavine	$N_s$	$\Delta N_s$
ES	48,3	0
SR	38,4	-20,50
SPM	46,9	-2,90
SPF	47,8	-1,04
SSS	47,4	-1,86
SSL	47,9	-0,83





Slika 5.26. Prikaz rezultata ispitivanja indeksa odskoka sklerometra

Na osnovu rezultata ispitivanja indeksa odskoka sklerometra prikazanih u tabelama od 5.27-1. do 5.27-4. i na slici 5.26. mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Delimična zamena cementa u betonskim mešavinama uticala je na promenu vrednosti indeksa odskoka sklerometra. Upoređujući vrednosti za betonske mešavine označene EP i ES sa etalon betonskom mešavinom (označena sa E), zaključuje se da kod mešavina EP došlo do smanjenja indeksa odskoka sklerometra za 7,68%, a kod mešavine sa oznakom ES došlo je do povećanja za 0,21%. U poređenju sa čvrstoćama pri pritisku (poglavlje 5.5.2), vrednosti indeksa odskoka sklerometra su logični, jer najveću čvrstoću pri pritisku je pokazao beton sa oznakom ES, zatim E i na kraju EF.
2. Delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom doprinela je značajnom smanjenju indeksa odskoka sklerometra. Kod betona sa oznakom ER smanjenje iznosi 21,16%, dok kod betona označenih sa FR i SR smanjenje je 23,65% i 20,33%, respektivno u odnosu na etalon beton. Treba napomenuti da guma sadržana u očvrslom betonu delimično amortizuje udare čekića, čime utiče na smanjenje vrednosti indeksa odskoka sklerometra.
3. Kada je reč o mikroarmiranju betona, može se konstatovati da i polipropilenska i čelična vlakna nisu u velikoj meri uticali na promeni indeksa odskoka sklerometra. Analizirajući rezultate ispitivanja indeksa odskoka sklerometra za svaku grupu betonskih mešavina, tabele 5.27-2. do 5.27-4, može se uočiti da su i jedna i druga vlakna doprinela blagom smanjenju indeksa odskoka sklerometra. To znači da su vlakna doprinela da površina uzorka mikroarmiranog betona bude elastičnija i da u nekoj manjoj meri amortizuje udare čekića. U zavisnosti od vrste betonskih mešavina, polipropilenska monofilamentna vlakna su doprinela smanjenju indeksa odskoka sklerometra u iznosu od 0,62% do 2,90%, dok su polipropilenska fibrilna vlakna doprinela u iznosu od 1,04% do 2,49%. U slučaju čeličnih vlakana sa

ojačanim krajevima, kraća vlakna su doprinela smanjenju indeksa odskoka sklerometra u iznosu od 1,24% do 2,25%, dok su duža vlakna doprinela u iznosu od 0,83% do 1,87%.

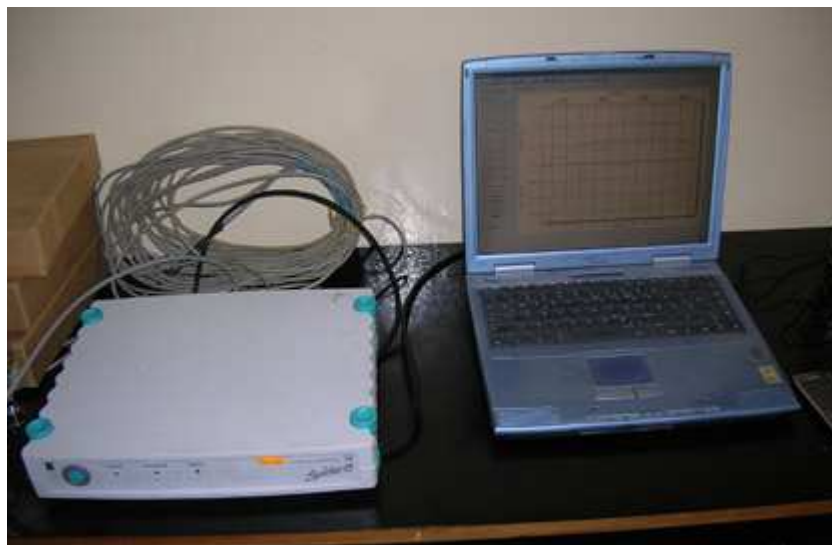
4. Posmatrajući superponirani uticaj delimične zamene cementa, delimične zamene sitnog agregata i mikroarmiranja betona, odnosno upoređujući indekse odskoka sklerometra svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju i etalon betonske mešavine, tabela (5.27-1.), može se reći da betonske mešavine izrađene bez zamene cementa i mešavine sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom imaju približno iste vrednosti indeksa odskoka sklerometra (razlikuju se u granicama od -0,62% do -2,70% kod svih betona, izuzev betona sa gumom gde je razlika u granicama od -20,33% do -21,16%). Vrednosti indeksa odskoka sklerometra kod betonskih mešavina izrađenih sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom su manje od etalona u iznosu od 7,68% do 9,75%, izuzev kod betona sa gumom gde razlika iznosi 23,65%.

#### 5.5.8. Ispitivanje deformacionih svojstava betona – Statički modul elastičnosti

Od deformacionih svojstava betona ispitan je statički modul elastičnosti ( $E_s$ ) pri starosti uzoraka od 90 dana. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti izvršeno je prema odredbama standarda SRPS ISO 6784:2000 [207] na cilindričnim epruvetama prečnika 15cm i visine 30 cm, prema dispoziciji sa slike 5.27. U cilju merenja dilatacije pod aksijalnim pritiskom, postavljena su tri pretvarača pomeranja W20 raspoređena u mernim linijama pod uglom od  $120^\circ$  i učvršćena preko aluminijumskih prstenova. Baza merenja iznosila je 100 mm i nalazila se u srednjoj trećini visine epruvete. Ispitivanje je vršeno na hidrauličkoj presi HPM – 3000, ZRMK Ljubljana koja ima mogućnost kontrolisanog unosa sile u oba smera (opterećenje i rasterećenje), što zahteva procedura standarda. Uzorak koji se ispitivao je bio postavljen preko čelične ploče na dinamometru koji je kao i tri pretvarača pomeranja bio povezan sa kompjuterom, a koji je pomoću softvera beležio vrednosti sile i vrednosti pomeranja za sve vreme trajanja ispitivanja. Na slici 5.28 prikazana je kompjuterska oprema korišćena za ispitivanje statičkog modula elastičnosti.



Slika 5.27. Dispozicija epruvete za ispitivanje  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrama



Slika 5.28. Kompjuterska oprema korišćena pri ispitivanju statičkog modula elastičnosti

Kako je to odredbama standarda utvrđeno, najpre su se odredile granice donjeg ( $\sigma_d$ ) i gornjeg ( $\sigma_g$ ) napona, između kojih se zatim vršilo ciklično opterećivanje i rasterećivanje uzoraka, uz istovremeno merenje napona i odgovarajućih elastičnih deformacija. Ovakvo „treniranje“ uzoraka se vršilo u tri koraka u cilju eliminisanja postojećih plastičnih deformacija betona. Donji napon je propisan i on iznosi 0,5 MPa, dok gornji napon zavisi od čvrstoće pri pritisku ispitivanih uzoraka ( $f_p$ ) i njegova vrednost je usvojena tako da važi relacija  $\sigma_g \approx f_p/3$ . Bitno je bilo poštovati ovu odredbu, da bi naponi tokom ispitivanja bili u elastičnom domenu, odnosno da bi se u poslednjem koraku ispitivanja registrovane ukupne deformacije ( $\varepsilon_u$ ) bile jednake elastičnim ( $\varepsilon_e$ ), pri čemu su odgovarajuće plastične deformacije ( $\varepsilon_{pl}$ ) jednake nuli.

Na osnovu zabeleženih vrednosti tokom ispitivanja, za svaki uzorak određen je konačan rezultat, tj. statički modul elastičnosti prema formuli:

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_g - \sigma_d}{\varepsilon_g - \varepsilon_d} \text{ [GPa]}.$$

U tabelama 5.28-1. do 5.28-4. dati su rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti ( $E_s$ ) i procentualna razlika ( $\Delta E_s$ ) u odnosu na odgovarajući etalon beton na uzorcima svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju. Prikazane vrednosti su srednje veličine tri rezultata ispitivanja. U sklopu tabele 5.30-1 date su i vrednosti čvrstoće pri pritisku betona pri starosti od 90 dana, radi poređenja rezultata. Na slici 5.29. je prikazan kompletan zapis ispitivanja statičkog modula elastičnosti u skladu sa odredbama standarda SRPS ISO 6784:2000 [207] za betonske uzorke sa oznakom E i ER. Zapisi ispitivanja statičkog modula elastičnosti svih betona obrađenih u ovom istraživanju su međusobno slični i nalik zapisu dobijenom na etalon uzorku, izuzev za betonske mešavine sa gumom (a koji su međusobno slični).

Tabela 5.28-1. Rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti betona

Oznaka mešavine	$E_s$ [GPa]	$f_p$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta E_s$ [GPa]
E	34,2	60,89	0
ER	26,8	43,78	-21,64
EPM	32,9	63,23	-3,80
EPF	33,6	63,78	-1,75
ESS	35,3	64,11	3,22
ESL	34,9	63,11	2,05
EF	31,8	57,34	-7,02
FR	24,7	36,23	-27,78
FPM	30,3	58,67	-11,40
FPF	30,8	59,03	-9,94
FSS	32,5	60,34	-4,97
FSL	32,3	57,67	-5,56
ES	35,5	62,22	3,80
SR	27,3	45,00	-20,18
SPM	33,8	64,33	-1,17
SPF	34,4	65,11	0,58
SSS	36,4	66,56	6,43
SSL	35,9	63,11	4,97

Procentualna razlika statičkog modula elastičnosti računa se prema obrascu:

$$\Delta E_s = \frac{E_s - E_{s,e}}{E_{s,e}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

gde je:

$\Delta E_s$  - procentualna razlika statičkog modula elastičnosti betona,

$E_{s,e}$  - statičkog modula elastičnosti etalon betona,

$E_s$  - statičkog modula elastičnosti posmatranog betona.

Tabela 5.28-2. Statički modul elastičnosti betona spravljenih bez delimične zamene cementa

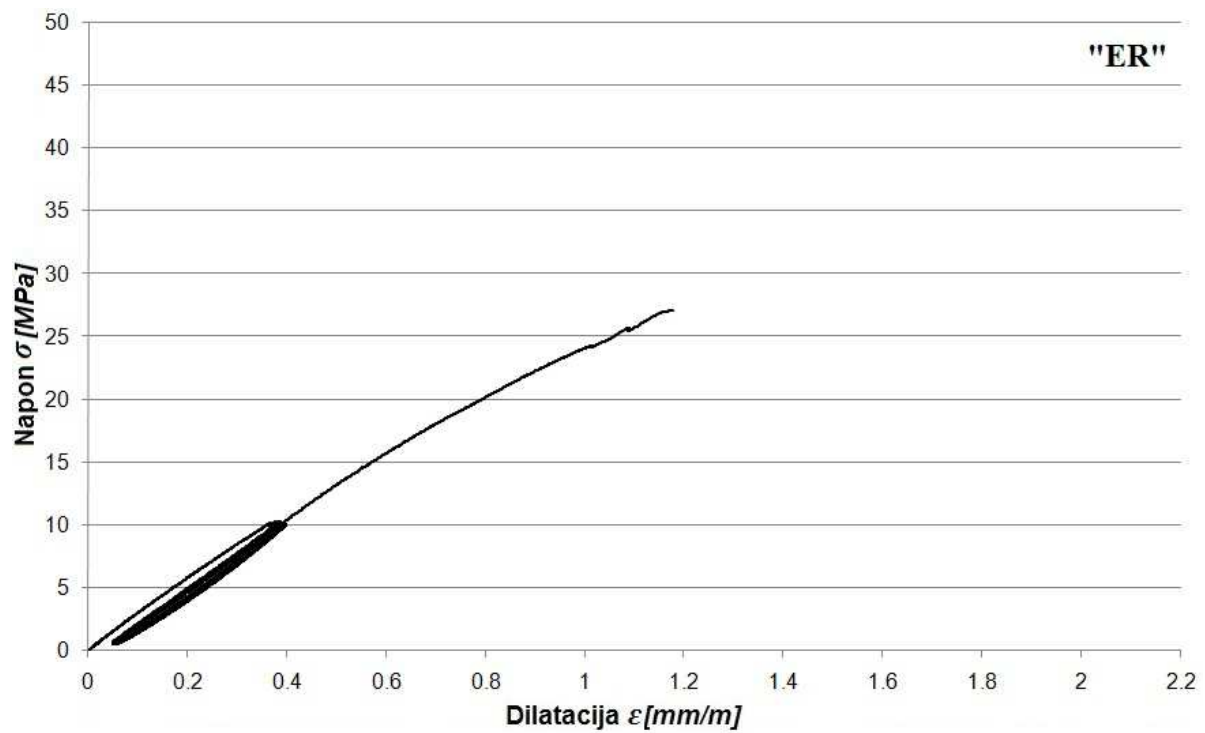
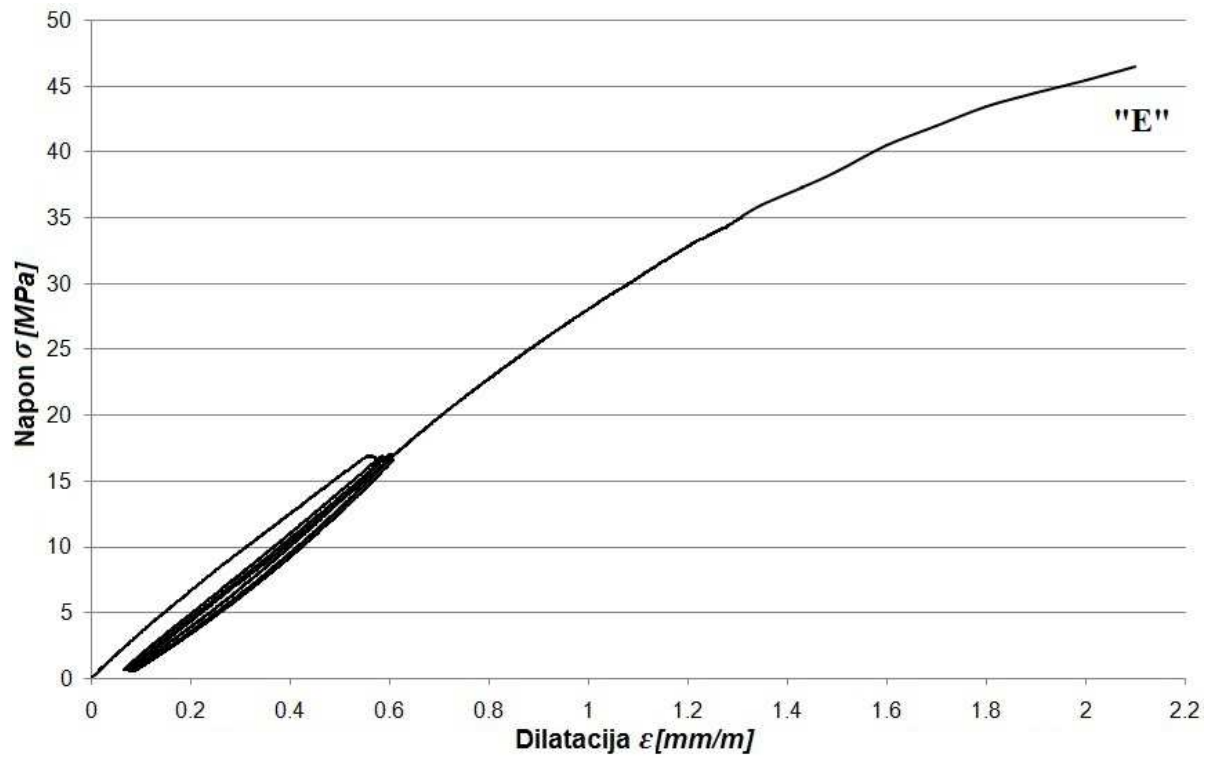
Oznaka mešavine	$E_s$ [GPa]	$\Delta E_s$ [GPa]
E	34,2	0
ER	26,8	-21,64
EPM	32,9	-3,80
EPF	33,6	-1,75
ESS	35,3	3,22
ESL	34,9	2,05

Tabela 5.28-3. Statički modul elastičnosti betona spravljenih sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom

Oznaka mešavine	$E_s$ [GPa]	$\Delta E_s$ [GPa]
EF	31,8	0
FR	24,7	-22,33
FPM	30,3	-4,72
FPF	30,8	-3,14
FSS	32,5	2,20
FSL	32,3	1,57

Tabela 5.28-4. Statički modul elastičnosti betona spravljenih sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom

Oznaka mešavine	$E_s$ [GPa]	$\Delta E_s$ [GPa]
ES	35,5	0
SR	27,3	-23,10
SPM	33,8	-4,79
SPF	34,4	-3,10
SSS	36,4	2,54
SSL	35,9	1,13



Slika 5.29. Zapisi sa ispitivanja statičkog modula elastičnosti za betonske uzorke sa oznakom E (gore) i ER (dole)

Na osnovu rezultata ispitivanja statičkog modula elastičnosti prikazanih u tabelama od 5.28-1. do 5.28-4. mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Delimična zamena cementa u betonskim mešavinama uticala je na vrednost statičkog modula elastičnosti. Upoređujući vrednosti za betonske mešavine označene EP i ES sa etalon betonskom mešavinom (označena sa E), zaključuje se da kod mešavina EP došlo do smanjenja statičkog modula elastičnosti za 7,02%, dok je kod mešavine ES došlo do povećanja za 3,80%. Imajući u vidu i vrednosti čvrstoća pri pritisku ovih betonskih mešavina, logično je povećanje statičkog modula elastičnosti kod betona sa silikatnom prašinom, odnosno smanjenja kod betona sa elektrofilterskim pepelom.
2. Delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom doprinela je značajnom padu vrednosti statičkog modula elastičnosti. Kod betona sa oznakom ER smanjenje iznosi 21,64%, dok kod betona označenih sa FR i SR smanjenje je 27,78% i 20,18%, respektivno u odnosu na etalon beton. Na veličinu statičkog modula elastičnosti betona utiče modul elastičnosti cementne paste i agregata, a kako gumeni agregat ima znatno manji modul elastičnosti od prirodnog agregata, to je razlog smanjenja vrednosti statičkog modula elastičnosti kod betona kod koga je izvršena delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom. Dodatna elastičnost koju beton dobija prisustvom reciklirane gume u velikoj meri utiče na njegovu sposobnost abrobovanja dinamičkih udara, što će se odraziti i na njegovu hidro-abrazivnu otpornost o čemu će biti reči u poglavlju 5.5.11.
3. Može se reći da mikrovlakna nisu u velikoj meri uticala na vrednost statičkog modula elastičnosti. Analizirajući rezultate ispitivanja statičkog modula elastičnosti za svaku grupu betonskih mešavina, tabele 5.28-2. do 5.28-4, može se uočiti da su čelična vlakna sa ojačanim krajevima uticala na neznatno povećanje vrednosti statičkog modula elastičnosti, dok su polipropilenska vlakna doprinela neznatnom smanjenju. Nešto veći doprinos povećanju statičkog modula elastičnosti dala kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima u odnosu na duža, odnosno čelična vlakna sa većim faktorom oblika. Kada su u pitanju polipropilenska vlakna, monofilamentna vlakna su doprinela nešto većem padu vrednosti statičkog modula elastičnosti u odnosu na fibrilirana. U zavisnosti od vrste betonskih mešavina, polipropilenska monofilamentna vlakna su doprinela smanjenju statičkog modula elastičnosti u iznosu od 3,80% do 4,72%, dok su polipropilenska fibrilna vlakna doprinela smanjenju u iznosu od 1,75% do 3,14%. U slučaju čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima, kraća vlakna su doprinela povećanju statičkog modula elastičnosti u iznosu od 2,20% do 3,22%, dok su duža vlakna doprinela povećanju u iznosu od 1,13% do 2,05%. Slično kao i kod čvrstoće pri pritisku, ovo se može objasniti pre svega niskim procentualnim učešćem mikroarmature u okviru cementne paste. Objašnjenje za smanjenje statičkog modula elastičnosti kod betona mikroarmiranih polipropilenskim vlaknima, leži u činjenici da je modul elastičnosti polipropilenskih vlakana oko 9 puta manji u odnosu na modul betona (cementne matrice). U prilogu ovome ide i činjenica da su brojna istraživanja betona mikroarmiranih polipropilenskim ili nekim drugim sintetičkim vlaknima pokazala izvesna smanjenja modula elastičnosti [172,230]. Slično je objašnjenje i za betonske mešavine sa čeličnim vlaknima čiji je modul elastičnosti oko 9 puta veći od modula elastičnosti betona, odnosno cementne matrice. Zbog većeg modula elastičnosti, čelična vlakna doprinose povećanju modula elastičnosti betona i to povećanje zavisi od količine upotrebljenih vlakana. I u ovoj oblasti tehnologije betona postoje dosta istraživanja koja potkrepljuju prethodni zaključak [179,230].

4. Posmatrajući superponirani uticaj delimične zamene cementa, delimične zamene sitnog agregata i mikroarmiranja betona, odnosno upoređujući vrednosti statičkog modula elastičnosti svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju i etalon betonske mešavine, tabela (5.28-1.), može se reći da je najveći promenu prouzrokovala delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom (smanjenje statičkog modula elastičnosti u iznosu od 20,18% do 27,78%). Delimična zamena cementa silikatnom prašinom i mikroarmiranje betona čeličnim vlaknima sa ojačanim krajevima doprinela je povećanju statičkog modula elastičnosti u iznosu od 4,97% do 6,43%, uz konstataciju da su najveći doprinos dala kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima. Betonske mešavine sa elektrofilterskim pepelom mikroarmirane čeličnim vlaknima imaju manju vrednost statičkog modula elastičnosti u odnosu na etalon beton u iznosu od 4,97% do 5,56%.

#### 5.5.9. Dinamičko ispitivanje duktilnosti – Ispitivanje udarne otpornosti putem metode udarne mase

Za dinamičko ispitivanje duktilnosti mikroarmiranih kompozita usvojena je metoda udarne mase, tzv. „Drop-weight test“ prema preporukama profesora Ukrainczyka [209] – prilagođena za potrebe ispitivanja mikroarmiranih betona. Ovakva modifikovana metoda ima sledeće karakteristike:

- teg mase 3 kg sa zaobljenim vrhom od kaljenog čelika;
- cev od krute plastike dužine 0,50 m, gradušana na svakih 10 cm, dovoljne širine da kroz nju teg može slobodno da pada;
- kruti čelični ram oslonjen na četiri stuba ankerisana za betonsku podlogu (pod), u koji se postavlja i fiksira čelični kalup sa betonskim uzorkom;
- uzorci betona oblika ploče dimenzija 40×40×6 cm, koji se postavljaju u čelični kalup i fiksiraju čeličnim prstenom – u cilju ostvarenja krute veze.

U konkretnom slučaju, teg mase 3 kg pada sa visine od 30 cm na betonsku ploču dimenzija 40×40×6 cm, pri čemu se meri broj udaraca do nastanka prve prsline i broj udaraca do loma. Na osnovu merenih veličina, može se odrediti količina utrošene energija, koji u okviru ove metode predstavlja najznačajniji parametar udarne otpornosti kompozita.

Na slici 5.30 prikazana je dispozicija ispitivanja uzoraka – betonskih ploča, u skladu sa metodom „Drop weight“. U skladu sa dispozicijom postupak ispitivanja je sledeći: teg konstantne mase od 3 kg pada na uzorak sa konstantne visine od 30 cm. Pri tome uzorak je betonska ploča dimenzija 40×40×6 cm, koja je praktično uklještena po celom obimu, s obzirom da je fiksirana unutar čeličnog rama, koji je ankerisan za pod. Dakle, može se smatrati da se radi o tzv. tvrdom udaru, klase 2 (brzina tega iznosi  $v=2,43$  m/s). Udarne masa (teg) pada sa visine od 30 cm kroz plastičnu cev fiksiranu za ram, čija osočina prolazi kroz središnju tačku (centar mase) betonskog uzorka. Nakon svakog nanesenog udarnog opterećenja vrši se vizuelno-makroskopski pregled površine betona pomoću lupe i jakog osvetljenja, u cilju detekcije eventualno nastalih oštećenja na uzorku. U ovom slučaju, pod oštećenjem se smatra jasno izražena i vidljiva prslina, koja u principu nastaje sa suprotne strane od mesta udara, tj. na donjoj površini betonskog uzorka. S obzirom da se radi o jednoslojnom materijalu, nisu bili očekivani neki drugi tipovi loma karakteristični za višeslojne materijale (delaminacija, drobljenje i sl.). Kriterijum za ocenu ostvarenih rezultata ispitivanja vezan je za broj udaraca do nastanka prve prsline, kao i broj udaraca do loma ploče. Pri tome, pod lomom se podrazumeva ili situacija kada dođe do potpune propagacije prsline po celoj visini uzorka ili potpuni otkaz (stvarni lom) uzorka.





Slika 5.30. Dispozicija ispitivanja udarne otpornosti betona – metodom „Drop-weight“

Ova metoda je korišćena za ispitivanje dinamičke duktilnosti sitnozrnih betona mikroarmiranih sintetičkim vlaknima [172], pri čemu su se još merila i ubrzanja udarne mase pomoću akceleratora. Za potrebe predmetnog istraživanja odlučeno je da se meri samo broj udaraca (količina utrošene energije) koji dovodi do pojave prve prsline na uzorku i loma uzorka. Rezultati ispitivanja dinamičke duktilnosti betona metodom udarne mase tzv. „Drop-weight test“ mogu biti dobri pokazatelja u ocenjivanju doprinosa koji dodatak vlakana, granulirane gume, silikatne prašine i elektrofilterskog pepela betonu može da ima na poboljšanje otpornosti površine betona na hidro-abrazivno dejstvo.

U okviru tabele 5.29. prikazani su rezultati ispitivanja udarne otpornosti, izvršenih na po tri uzoraka od svake vrste betona pri starosti od 90 dana. Predmetni rezultati predstavljaju srednje vrednosti broja udaraca do nastanka prve prsline ( $N_1$ ), odnosno broja udaraca do loma ( $N_2$ ), dobijene na po tri probna tela od svake serije. Svaki uzorak je ispitivan do maksimalnog broja od 40 udaraca, osim ukoliko lom nije nastupio ranije.

Na osnovu registrovanog broja udaraca, u okviru iste tabele sračunate su i veličine utrošene energije neophodne za nastanak prve prsline na uzorku ( $E_1$ ), odnosno ukupne energije koja odgovara otkazu materijala ( $E_2$ ). Pri tome, teorijska vrednost energije koja odgovara jednom udarcu tega odgovarajuće udarne mase, a koji pada sa odgovarajuće visine, računata je prema formuli:

$$E = \frac{m_t \cdot v_t^2}{2} = m_t \cdot g \cdot h_p \quad [\text{J}].$$

Ukupna energija koja je utrošena nakon N udaraca tega, neophodnih da dođe do unapred definisog oštećenje (ili loma) ispitanog materijala, određena je kao:

$$E_N = N \cdot E = N \cdot m_t \cdot g \cdot h_p \text{ [J]},$$

gde su korišćene oznake:

$E$  – utrošena energija koja odgovara jednom udarcu tega,

$E_N$  – ukupna energija nakon  $N$  udaraca tega,

$N$  – ukupan broj udaraca nakon koga se javlja oštećenje (lom) uzorka,

$m_t$  – masa tega (udarna masa) [kg],

$v_t$  – brzina udarne mase [m/s],

$g$  – ubrzanje Zemljine teže [ $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ ],

$h_p$  – visina sa koje pada teg (udarna masa) [m].

Prilikom predmetnog ispitivanja, potencijalna energija udarne mase je iznosila  $E=8,83 \text{ J}$ , dok je brzina tega u trenutku udara u betonsku ploču iznosila  $v_t=2,43 \text{ m/s}$ .

Tabela 5.29. Rezultati ispitivanja udarne otpornosti betona

Oznaka mešavine	$N_1$	$N_2$	$E_1$ [J]	$E_2$ [J]
E	10	21	88,3	185,43
ER	13	18	114,79	158,94
EPM	15	33	132,45	291,39
EPF	17	35	150,11	309,05
ESS	25	> 40	220,75	> 353,20
ESL	22	35	194,26	309,05
EF	8	17	70,64	150,11
FR	11	17	97,13	150,11
FPM	13	30	114,79	264,9
FPF	15	32	132,45	282,56
FSS	22	38	194,26	335,54
FSL	19	34	167,77	300,22
ES	12	22	105,96	194,26
SR	15	20	132,45	176,6
SPM	17	34	150,11	300,22
SPF	19	37	167,77	326,71
SSS	28	> 40	247,24	> 353,20
SSL	24	38	211,92	335,54

Osnovna karakteristika tvrdog udara klase 2, koji se javlja prilikom ovakvog testa, jeste da pri udarnom opterećenju dolazi do manjeg ili većeg odskoka tega od površine betona, pri čemu se jedan deo kinetičke energije prenese na betonsku podlogu. Pri tome, rezultujuća deformacija betona na početku je većim delom elastična, pa se pri prvim udarcima ne registruju nikakva oštećenja na uzorku. Pri većem broju ponovljenih identičnih udarnih opterećenja, ukupna energija apsorbirana od strane betonske podloge postaje dovoljna da se pojave lokalna oštećenja (mikroprsrline). Ova oštećenja nastaju kada naponi zatezanja, prouzrokovani maksimalnim vibracijama uzorka usled udara, prekorače veličinu čvrstoće pri zatezanju ispitivanog betona.

Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u tabeli 5.29 može se zaključiti sledeće:

1. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom daje betonu veću moć apsorpcije energije usled udarnog opterećenja pre pojave prve prsline. Nakon nastanka inicijalnog oštećenja, propagacija prsline ide ubrzanim tempom i pri manjem broju udara tega dolazi do loma uzorka. Objašnjenje leži u činjenici da guma ima veću sposobnost apsorbovanja udara i vibracija u odnosu na beton, kao i da svojim prisustvom u betonskom kompozitu čini njegovu površinu elastičnijom. Zbog povećane elastičnosti površine betona, kinetička energija tega pri početnim udarcima biva u većoj meri pretvorena u elastičnu deformaciju uzorka, dok se manji deo te energije troši na stvaranje trajnih (plastičnih) deformacija betona. Nakon nastanka prve prsline, propagacija oštećenja je ubrzana zbog slabijih sila zatezanja u betonskom kompozitu sa granulisanom gumom (što su potvrdila ispitivanja čvrstoće pri zatezanju betona).
2. Delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom i silikatnom prašinom je u maloj meri uticala na udarnu otpornost betona. Najbolji efekat je ostvaren dodavanjem silikatne prašine, ali razlika u količini apsorbovane energije u odnosu na etalon beton nije značajna. Dodavanjem elektrofilterskog pepela betonu smanjena je otpornost na udarno opterećenje u odnosu na etalon beton, ali i ovde razlika nije značajnije izražena.
3. Mikroarmirani betoni su otporniji na udarno opterećenje u odnosu na nearmirane bez obzira na vrstu dodatih vlakana. Čelična i propilenska vlakna su doprinela povećanju udarne otpornosti betona kako u smislu povećanja apsorbovane energije do pojave inicijalnog oštećenja (prve prsline) tako i u smislu održanja upotrebljivosti pri dužem trajanju izloženosti udarnim opterećenjem nakon nastanka prve prsline. Čelična vlakna sa ojačanim krajevima su više doprinela ovoj vrsti otpornosti betona u odnosu na polipropilenska, pri čemu su betoni sa kraćim čeličnim vlaknima dali bolje rezultate u odnosu na betone sa dužim čeličnim vlaknima. Naime, čelična vlakna su bolje ankerovana u cementnom matriksu u odnosu na polipropilenska, zbog svoje dužine i geometrije krajeva vlakana, tako da u većoj meri mogu da preuzmu na sebe i amortizuju udarno opterećenje. Zbog homogenijeg rasporeda u betonskom kompozitu, kraća čelična vlakna sa ojačanim krajevima daju veći doprinos povećanju udarne otpornosti betona u odnosu na duža vlakna. Što se tiče polipropilenskih vlakana, monofilamentna vlakna su dala nešto manji doprinos povećanju udarne otpornosti betona u odnosu na fibrilna. Količina potrebne energije za stvaranje prve prsline kod mikroarmiranih betona sa polipropilenskim vlaknima je bila za 50-80% veća u odnosu na utrošenu energiju prilikom ispitivanja etalon betona, dok je za mikroarmirane betone čeličnim vlaknima ta količina energije bila veća za 120-175%. Sa druge strane, potrebna količina energije za nastanak loma uzorka napravljenog sa dodatkom polipropilenskih vlakana je za 55-85% veća od količine energije utrošene za lom etalon betonskog uzorka. U slučaju betona sa čeličnim vlaknima, količina utrošene energije na lom uzorka je bila veća za 65-100% i više u odnosu na potrebnu količinu energije za lom etalon uzorka. Kod nekih uzoraka betona sa čeličnim vlaknima do loma nije došlo ni posle 40 udaraca tegom. Još jedno zapažanje vezano za ispitivanje udarne otpornosti mikroarmiranih betona jeste da su nastale prsline znatno manjih širina u odnosu na prsline koje su se javile na betonski uzorcima bez mikrovlakana. Takođe, kod mikroarmiranih betona nakon loma (prsline se protežu po celoj visini preseka) uzorci su zadržali integritet, odnosno nije došlo do raspadanja uzoraka na više delova, što nije slučaj sa betonima bez dodatka vlakana. Na slici 5.31 prikazani su betonski uzorci serije SPF i E nakon ispitivanja udarne otpornosti betona, dok su u prilogu 8.3 prikazani uzorci svih serija.



Slika 5.31. Izgled uzorka serije SPF i E nakon ispitivanja udarne otpornosti – metodom „Drop-weight“

#### 5.5.10. Otpornost prema habanju brušenjem

Otpornost prema habanju brušenjem predstavlja standardnu metodu namenjenu za ispitivanje kamena i betona koji su izloženi dejstvu habanja. Ovo svojstvo betona je jedan od osnovnih uslova kvaliteta koji treba da zadovolji betonski element ukoliko je izložen bilo kojoj vrsti habanja (abraziji ili kavitacija kod hidrotehničkih konstrukcija, trenju između točkova vozila i betonske kolovozne konstrukcije ili industrijskih podova, trenje između obuće pešaka i pešačkih staza itd).

Kod ove vrste otpornosti osnovno je da beton ima dovoljnu čvrstoću i tvrdoću u površinskom sloju, koji je neposredno izložen delovanju habanja. Pored agregata, koji sam po sebi mora da bude dovoljno otporan na ovaj uticaj, treba primeniti i cimente visokih klasa. Jedan od osnovnih principa jeste primena niskog vodocementnog faktora i aditiva tipa plastifikatora, pošto se ni u kom slučaju ne sme dozvoliti izdvajanje cementne paste na površini. Posebnu pažnju treba posvetiti načinu ugrađivanja i nege betona, naročito površine koja će biti izložena habanju. Rezultati ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem mogu biti dobar pokazatelj u ocenjivanju doprinosa koji dodatak vlakana, granulisanе gume, silikatne prašine i elektrofilterskog pepela može da ima na poboljšanje otpornosti površine betona na hidro-abrazivno dejstvo.

Ispitivanje otpornosti prema habanju brušenjem izvršeno je na uzorcima oblika kocke ivice 7,07 cm izrezanih iz komada prizmi dobijenih nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju. Sprovedeno je u skladu sa odredbama standarda SRPS B.B8.015:1984 [190] pri starosti betonskih epruveta od 90 dana. Ispitivanje je izvršeno na Böhme mašini u Laboratoriji za kamen i agregat Instituta IMS u Beogradu. Na slici 5.32 prikazan je jedan model Böhme mašina za ispitivanje otpornosti prema habanju brušenjem.



Slika 5.32. Böhme mašina za ispitivanje otpornosti prema habanju brušenjem

U tabelama 5.30-1. do 5.30-4. dati su rezultati ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem ( $H_B$ ) i procentualna razlika ( $\Delta H_B$ ) u odnosu na odgovarajući etalon beton. Prikazane vrednosti su srednje veličine dva rezultata ispitivanja. Na slici 5.33. su putem dijagrama prikazani rezultati ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem.

Tabela 5.30-1. Rezultati ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem

Oznaka mešavine	$H_B$ [cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ]	$\Delta H_B$ [cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ]
E	15,09	0
ER	7,72	-48,84
EPM	13,73	-9,01
EPF	14,42	-4,44
ESS	13,86	-8,15
ESL	12,78	-15,31
EF	15,34	1,66
FR	8,58	-43,14
FPM	13,60	-9,87
FPF	14,78	-2,05
FSS	15,02	-0,46
FSL	13,71	-9,15
ES	13,79	-8,61
SR	7,22	-52,15
SPM	12,27	-18,69
SPF	13,46	-10,80
SSS	13,71	-9,15
SSL	12,21	-19,09

Procentualna razlika otpornosti betona prema habanju brušenjem računa se prema obrascu:

$$\Delta H_B = \frac{H_B - H_{B,e}}{H_{B,e}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

gde je:

$\Delta H_B$  - procentualna razlika otpornosti betona prema habanju brušenjem,

$H_{B,e}$  - otpornost prema habanju brušenjem etalon betona,

$H_B$  - otpornost prema habanju brušenjem posmatranog betona.

Tabela 5.30-2. Otpornost prema habanju brušenjem betona spravljenih bez delimične zamene cementa

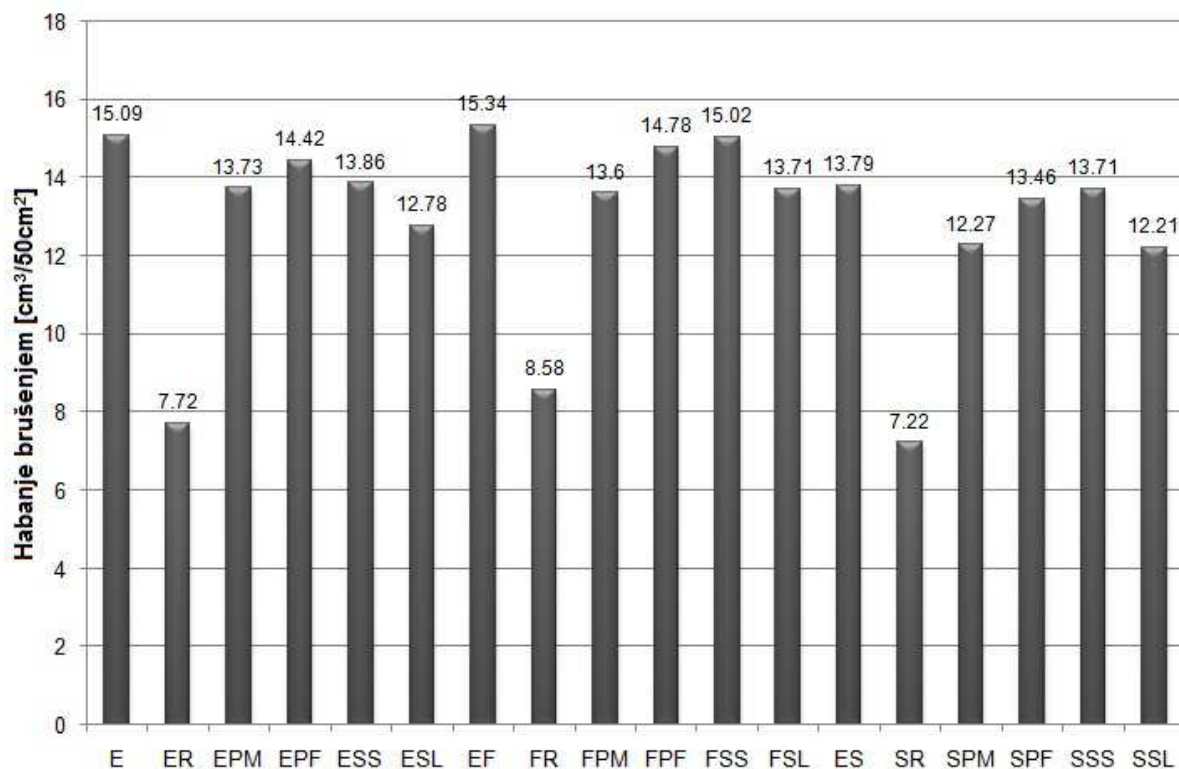
Oznaka mešavine	$H_B$ [cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ]	$\Delta H_B$ [cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ]
E	15,09	0
ER	7,72	-48,84
EPM	13,73	-9,01
EPF	14,42	-4,44
ESS	13,86	-8,15
ESL	12,78	-15,31

Tabela 5.30-3. Otpornost prema habanju brušenjem betona spravljenih sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom

Oznaka mešavine	$H_B$ [cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ]	$\Delta H_B$ [cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ]
EF	15,34	0
FR	8,58	-44,07
FPM	13,60	-11,34
FPF	14,78	-3,65
FSS	15,02	-2,09
FSL	13,71	-10,63

Tabela 5.30-4. Otpornost prema habanju brušenjem betona spravljenih sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom

Oznaka mešavine	$H_B$ [cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ]	$\Delta H_B$ [cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ]
ES	13,79	0
SR	7,22	-47,64
SPM	12,27	-11,02
SPF	13,46	-2,39
SSS	14,71	-0,58
SSL	12,21	-11,46



Slika 5.33. Prikaz rezultata ispitivanja otpornosti prema habanju brušenjem

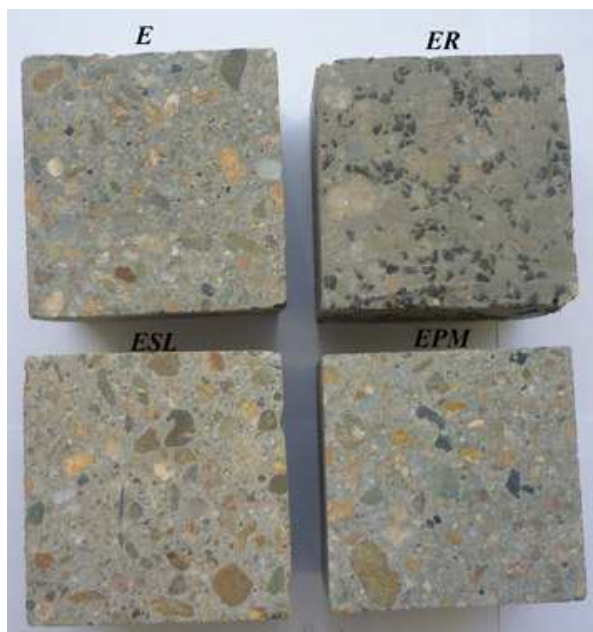
Na osnovu rezultata ispitivanja otpornosti prema habanju brušenjem prikazanih u tabelama od 5.30-1. do 5.30-4. i na slici 5.33. mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Delimična zamena cementa u betonskim mešavinama uticala je na veličinu habanja brušenjem. Upoređujući vrednosti za betonske mešavine označene EP i ES sa etalon betonskom mešavinom (označena sa E), zaključuje se da kod mešavina EP došlo do neznatnog povećanja habanja za 1,66%, dok je kod mešavine ES došlo do smanjenja habanja za 8,61%. Ove razlike u vrednosti otpornosti betona prema habanju brušenjem su očekivane, imajući u vidu rezultate čvrstoće pri pritisku betona (poglavlje 5.5.2). Povećanje veličine habanja, odnosno smanjenje otpornosti prema habanju brušenjem, kod betona sa elektrofilterskim pepelom u odnosu na etalon beton nije toliko izražen, što je veoma značajan podatak, s obzirom da je postignut isti efekat (ista otpornost prema habanju brušenjem) sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom. S druge strane, desetoprocentnom zamenom cementa silikatnom prašinom ostvareno je povećanje otpornosti betona prema habanju brušenjem.
2. Delimična zamena sitnog rečnog agregata granulisanom recikliranom gumom doprinela je značajnom smanjenju vrednosti habanja, odnosno značajnom povećanju otpornosti prema habanju brušenjem. U poređenju sa odgovarajućim etalonima, kod betona sa oznakom ER smanjenje veličine habanja iznosi 48,84%, dok kod betona označenih sa FR i SR smanjenje je 44,07% i 47,64%, respektivno. Na veličinu habanja u dobroj meri utiče zapreminska masa gumenog granulata koja je više od dva puta manja od zapreminske mase kamenog agregata, odnosno cementne paste. Takođe, nesporno je da pri ovom načinu habanja, gumeni granulati otporniji u odnosu na kameni agregat zbog svoje sposobnosti da u dužem vremenskom periodu napreznja zadrži elastično svojstvo. Sile trenja koje se javljaju prilikom habanja na kontaktu između habajućih površina nisu toliko velike da mogu da iščupaju granule

gume iz betonskog kompozita, slika 5.34. Kao što se vidi sa slike, površina betonskog uzorka je ravna, gumeni granulat je homogeno raspoređen po masi betona i nema tragova da je došlo do čupanja granula gume. Ovakav raspored gumenih granula po površini betonskog uzorka, sprečava ubrzano habanje cementnog kamena i zrna rečnog agregata, te je zato kod betona sa gumom povećana otpornost prema habanju brušenjem.

3. Kada je reč o mikroarmiranju betona, može se konstatovati da su i polipropilenska i čelična vlakna doprinela povećanju otpornosti prema habanju brušenjem. Analizirajući rezultate ispitivanja otpornosti prema habanju brušenjem za svaku grupu betonskih mešavina, tabele 5.30-2. do 5.30-4, može se uočiti da su nešto povoljniji efekat ostvarila duža čelična vlakna sa ojačanim krajevima, ali razlika nije izražena. Kada su u pitanju polipropilenska vlakna, monofilamentna vlakna su doprinela nešto većoj otpornosti prema habanju brušenjem u odnosu na fibrilirana. U zavisnosti od vrste betonskih mešavina, polipropilenska monofilamentna vlakna su doprinela povećanju otpornosti prema habanju brušenjem u iznosu od 9,01% do 11,34%, dok su polipropilenska fibrilna vlakna doprinela u iznosu od 2,39% do 4,44%. U slučaju čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima, kraća vlakna su doprinela povećanju otpornosti prema habanju brušenjem u iznosu od 0,58% do 8,15%, dok su duža vlakna doprinela u iznosu od 10,63% do 15,31%. Ovde treba naglasiti da je na vrednost otpornosti prema habanju brušenjem u dobroj meri uticao raspored mikroarmature u betonskom kompozitu. Naime, kako su polipropilenska vlakna manja i brojnija u odnosu na čelična, raspored ovih vlakana u betonskom kompozitu je homogeniji u smislu količine i pravca pružanja. Ovo je posebno važno za površinske delove betonskog uzorka (u praksi konstruktivnog betonskog elementa) na kojima se ispituje svojstvo otpornosti prema habanju brušenjem. Čelična vlakna su daleko otpornija na habanje u odnosu na beton, tako da dodatak ovih vlakana betonu u optimalnoj količini povećava otpornost betona na habanje. Može se javiti i suprotan efekat, kada prekomernom dozažom čeličnih vlakana dolazi do smanjenja otpornosti prema habanju brušenjem [241]. Osnovni razlog smanjenja otpornosti na habanje u ovom slučaju jeste skidanja samih vlakana sa površine betona.
4. Posmatrajući superponirani uticaj delimične zamene cementa, delimične zamene sitnog agregata i mikroarmiranja betona, odnosno upoređujući otpornosti prema habanju brušenjem svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju i etalon betonske mešavine, tabela (5.30-1.), može se reći da je najveći efekat postignut delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom (porast otpornosti prema habanju brušenjem je od 43,14% do 52,15%). Delimična zamena cementa silikatnom prašinom i mikroarmiranje betona bilo čeličnim ili polipropilenskim vlaknima doprinela je povećanju otpornosti prema habanju brušenjem u iznosu od 9,15% do 19,09%, uz konstataciju da su najveći doprinos dala duža čelična vlakna sa ojačanim krajevima. Treba napomenuti da je postupak mikroarmiranja (bez obzira da li je reč o čeličnim ili polipropilenskim vlaknima) doprineo da betonske mešavine sa elektrofilterskim pepelom imaju veću otpornost prema habanju brušenjem u odnosu na etalon beton u iznosu od 0,46% do 9,87%.





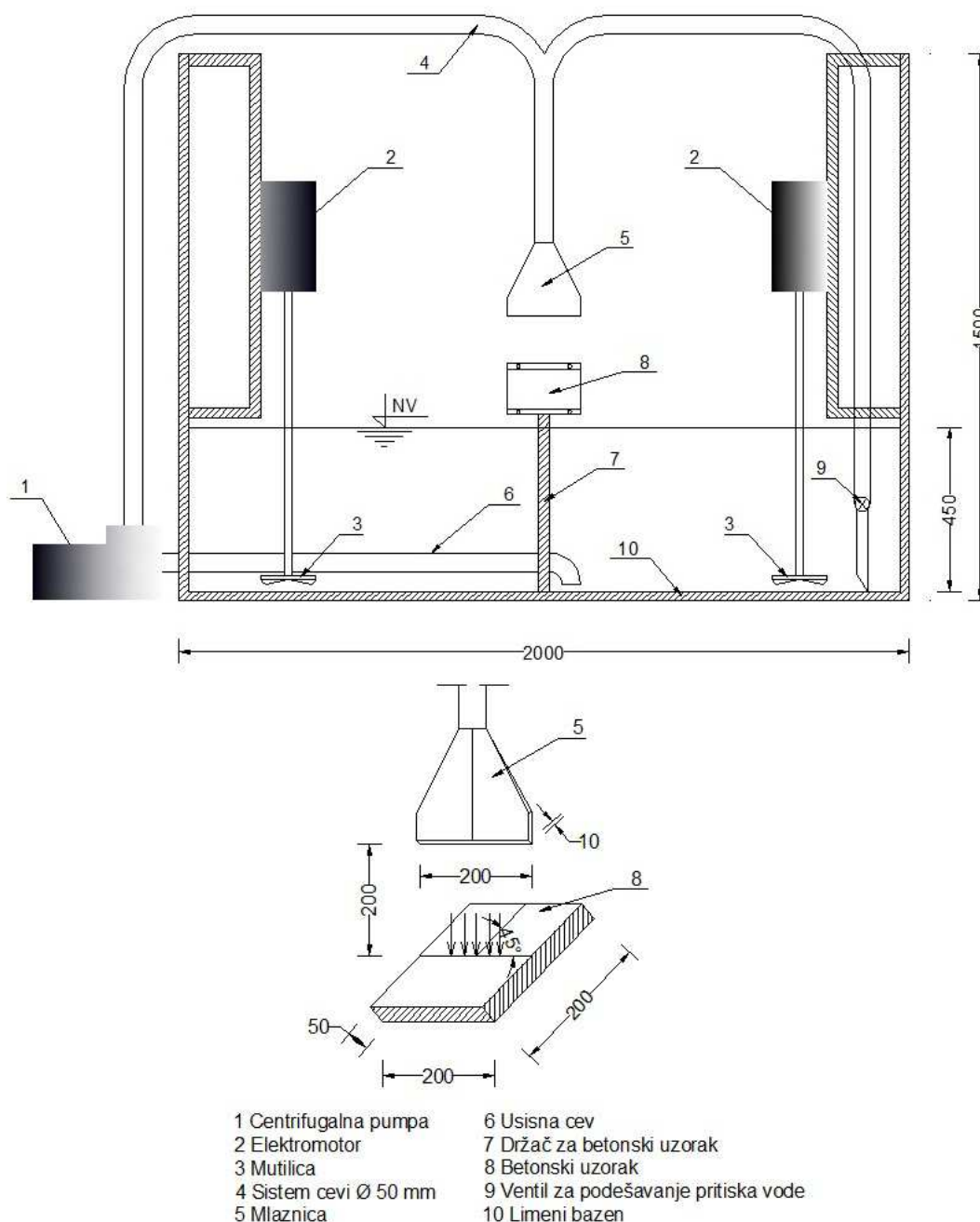
Slika 5.34. Izgled površine betona nakon ispitivanja otpornosti prema habanju brušenjem

#### 5.5.11. Hidro-abrazivna otpornost betona

Ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona jeste najznačajnije ispitivanje u ovom istraživanju. Kao što je već rečeno u poglavlju 4, za određivanje hidro-abrazivne otpornosti betona primenjeno je ubrzano ispitivanje na aparaturi koja omogućava da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom udara o površinu ispitne betonske ploče. Testiranje je vršeno na pločama dimenzija 20×20×5 cm pri starosti betona od 90 dana na originalnoj aparaturi napravljenoj u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, slika 5.35. U prilogu 8.4 su prikazani detalji aparature za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona.



Slika 5.35. Foto prikaz aparature za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona



Slika 5.36. Skica aparature za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona

Šema aparature za ispitivanje abrazivne otpornosti betona prikazana je na slici 5.36. Sličnu aparaturu koristili su istraživači na Tajvanu za različita ispitivanje abrazivne otpornosti betona [27,31]. Aparatura se sastoji od limenog bazena dimenzija 2,0×2,0 m u osnovi i 1,5 m visine, čija je prednja strana obložena providnim pleksiglasom radi bolje preglednosti prilikom ispitivanja, slika 5.35. Bazen je do trećine svoje visine napunjen mešavinom vode i peska granulacije 0,6 – 1,2 mm u masenoj razmeri 10:1. Za abraziju betona korišćen je silikatni pesak zbog velike tvrdoće zrna. Četiri elektromotora okreću propelere-mutilice praveći homogenu mešavinu vode i peska, dok centrifugalna pumpa preko usisnika uvlači mešavinu koja pod pritiskom preko mlaznice deluje na betonsku ploču. Betonska ploča je dimenzija 20×20×5 cm i pričvršćena je za nosač koji može da

rotira oko horizontalne osovine. Time se omogućava promena napadnog ugla između mlaza i uzorka.

Postupak ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona na prethodno opisanoj aparaturi je sledeći. Ispitna epruveta, odnosno betonska ploča se najpre suši do konstantne mase na temperature od  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  i meri se masa suvog uzorka ( $m_1$ ). Zatim se vrši zasićenje uzorka metodom postupnog potapanja i izlaže delovanju mlazom mešavine vode i peska u trajanju od 120 minuta. Temperatura vode za vreme ispitivanja iznosi oko  $30^\circ\text{C}$ . Nakon toga se uzorak još jednom suši do konstantne mase i meri masa obrušene epruvete ( $m_2$ ). Masa uzorka se meri sa tačnošću od  $\pm 0,1$  g. Mlaz mešavine vode i peska udara pod uglom od  $45^\circ$  na površinu betonske ispitne ploče preko pravougaone mlaznice dimenzija  $10 \times 200$  mm. Brzina mlaza koji izlazi iz mlaznice iznosi 20 m/s, što je ekvivalentno pritisku od 2,4 bara odnosno 0,24 MPa. Kako je brzina tj. pritisak na mlaznici bio veći u ovom ispitivanju od pritiska koji su koristili Lu i saradnici [27,31], trajanje ovog ispitivanja je nešto kraće i iznosi 120 minuta. Razlika masa  $\Delta m$  predstavlja masu obrušenog materijala usled dejstva abraziva iz vode. Stepent hidro-abrazivne erozije po masu se računa kao:

$$E_{R,m} = \frac{\Delta m}{t} = \frac{m_1 - m_2}{t} \text{ [g/min]},$$

gde je:

$m_1$  i  $m_2$  - masa ispitnog uzorka osušenog do konstantne mase pre odnosno posle dejstva mešavine vode i peska,

$t$  - vreme delovanja mešavine na ispitni uzorak ( $t=120$  min).

Međutim, kako se zapreminske mase očvrsllog betona za betonske mešavine korišćenih u ovom istraživanju međusobno razlikuju, pogodnije je pratiti gubitak zapremine uzorka, jer to omogućuje bolje razumevanje oštećenja do kojeg dolazi usled hidro-abrazivnog dejstva. Promena zapremine se računa po sledećoj formuli:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\gamma_{ocv.bet}} \text{ [cm}^3\text{]},$$

dok se stepent hidro-abrazivne erozije po zapremini računa po formuli:

$$E_{R,V} = \frac{\Delta V}{t} = \frac{\frac{m_1 - m_2}{\gamma_{ocv.bet}}}{t} \text{ [cm}^3\text{/min]},$$

gde je:

$\gamma_{ocv.bet}$  - zapreminska masa uzorka betona osušenog do konstantne mase u  $\text{g/cm}^3$ .

Na osnovu prikazanih formula za određivanje stepena hidro-abrazivne otpornosti po masi, odnosno po zapremini, može se zaključiti da što je veći stepent hidro-abrazivne erozije, to je manja otpornost betona na hidro-abrazivno dejstvo i obratno.

U tabelama 5.31-1. do 5.31-4. dati su rezultati ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona za sve betonske mešavine korišćene u ovom istraživanju. Prikazane su vrednosti stepena hidro-abrazivne erozije po masi ( $E_{R,m}$ ) i stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini ( $E_{R,V}$ ). Takođe je prikazana i procentualna razlika stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini ( $\Delta E_{R,V}$ ) u odnosu na odgovarajući etalon beton na uzorcima svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju. Prikazane vrednosti su srednje veličine tri rezultata ispitivanja. Na slici 5.37. su šematski prikazane vrednosti stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini ( $E_{R,V}$ ).

Tabela 5.31-1. Rezultati ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona

Oznaka mešavine	$E_{R,m}$ [g/min]	$E_{R,V}$ [cm <sup>3</sup> /min]	$\Delta E_{R,V}$ [cm <sup>3</sup> /min]
E	0,40417	0,17813	0
ER	0,25500	0,11844	-33,51
EPM	0,35083	0,15496	-13,01
EPF	0,33583	0,14749	-17,20
ESS	0,38583	0,17042	-4,33
ESL	0,39667	0,17451	-2,03
EF	0,46167	0,21255	19,33
FR	0,28500	0,13855	-22,22
FPM	0,39250	0,18129	1,78
FPF	0,38250	0,17643	-0,95
FSS	0,44500	0,20450	14,81
FSL	0,46833	0,21552	20,99
ES	0,35500	0,15955	-10,43
SR	0,21750	0,10382	-41,72
SPM	0,30500	0,13689	-23,15
SPF	0,29333	0,13154	-26,16
SSS	0,34833	0,15537	-12,78
SSL	0,35917	0,16070	-9,78

Procentualna razlika stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini računa se prema obrascu:

$$\Delta E_{R,V} = \frac{E_{R,V} - H_{R,V,e}}{H_{R,V,e}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

gde je:

$\Delta E_{R,V}$  - procentualna razlika stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini,

$E_{R,V,e}$  - stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini etalon betona,

$E_{R,V}$  - stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini posmatranog betona.

Tabela 5.31-2. Hidro-abrazivna otpornost betona spravljenih bez delimične zamene cementa

Oznaka mešavine	$E_{R,V}$ [cm <sup>3</sup> /min]	$\Delta E_{R,V}$ [cm <sup>3</sup> /min]
E	0,17813	0
ER	0,11844	-33,51
EPM	0,15496	-13,01
EPF	0,14749	-17,20
ESS	0,17042	-4,33
ESL	0,17451	-2,03

Tabela 5.31-3. Hidro-abrazivna otpornost betona spravljenih sa 20% zamene cementa elektrofilterskim pepelom

Oznaka mešavine	$E_{R,V}$ [cm <sup>3</sup> /min]	$\Delta E_{R,V}$ [cm <sup>3</sup> /min]
EF	0,21255	0
FR	0,13855	-34,82
FPM	0,18129	-14,71
FPF	0,17643	-16,99
FSS	0,20450	-3,79
FSL	0,21552	1,40

Tabela 5.31-4. Hidro-abrazivna otpornost betona spravljenih sa 10% zamene cementa silikatnom prašinom

Oznaka mešavine	$E_{R,V}$ [cm <sup>3</sup> /min]	$\Delta E_{R,V}$ [cm <sup>3</sup> /min]
ES	0,15955	0
SR	0,10382	-34,93
SPM	0,13689	-14,20
SPF	0,13154	-17,56
SSS	0,15537	-2,62
SSL	0,16070	0,72

S obzirom na sastav betonskih mešavina korišćenih u ovom istraživanju i imajući u vidu rezultate ispitivanja datih u u okviru tabela 5.31-1 do 5.31-4, može se konstatovati da je na hidro-abrazivnu otpornost betona uticaj imala vrsta i geometrije primenjenih vlakana, kao i sadržaj elektrofilterskog pepela, silikatne prašine i reciklirane granulirane gume u betonu.

Što se tiče parcijalnog uticaja pojedinačnih dodataka betonu na poboljšanje njegove hidro-abrazivne otpornosti, evidentno je da je najveći efekat postignut delimičnom zamenom sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom. U odnosu na odgovarajuće etalone, stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini betona sa granulisanom gumom je manji za 33,51% do 34,93%. Slična situacija je bila i u slučaju ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem, s tim što je smanjenje habanja betonskih uzoraka sa gumom u odnosu na odgovarajuće etalone bilo nešto više i iznosilo 44,07% do 48,84%.

Delovanje zrna peska (abraziva) nošenih vodom na betonsku ploču usled hidro-abrazivnog habanja je udarnog karaktera. Poznato je da je guma dobar absorber udarnog opterećenja, te prisustvo gumenih granula u betonskom kompozitu doprinosi povećanju njegove elastičnosti (smanjuje modul elastičnosti, poglavlje 5.5.8) što se direktno odražava na povećanje sposobnosti amortizovanja udara čvrstih čestica. Veći deo energije čvrste čestice prilikom udara o betonsku površinu se troši na elastičnu deformaciju, dok njen mali deo stvara plastičnu deformaciju odnosno degradaciju površinskih delova betonskog uzorka. Na slici 5.38 prikazan je betonski uzorak serije SR nakon ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona.



Slika 5.37. Prikaz rezultata ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona



Slika 5.38. Izgled površine uzorka betona serije SR nakon ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti

Kao što se može videti na slici 5.38, oštećenje na betonskoj ploči je nastalo usled krunjenja i odvajanja delova cementne matrice i krupnih zrna agregata, kao i usled izvlačenja sitnih zrna agregata iz cementne matrice. Lom granula gume praktično nije moguć usled hidro-abrazivnog dejstva, izvesnije je čupanje zrna gume iz cementne matrice

usled prekoračenja adhezionih sila. Takođe, na površini betonskog uzorka, zapaža se da su granule gume ogoljene od cementne matrice, što nije slučaj sa rečnim agregatom. To se objašnjava manjom silom adhezije na relaciji cementna matrica – granule gume u odnosu na adhezionu silu između cementne matrice i zrna rečnog agregata.

Da delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinosi povećanju njegove otpornosti na hidro-abrazivno dejstvo, potvrdila su istraživanja Šušteršiča i saradnika [68,123], Kang-a i saradnika [242], He-a i saradnika [122] i Portella i saradnika [243].

Imajući u vidu da dodatak reciklirane granulisane gume betonu u velikoj meri doprinosi povećanju njegove hidro-abrazivne otpornosti, sa jedne strane, ali u značajnoj meri doprinosi pogoršanju njegovih karakteristika relevantnih za nosivost i stabilnost betonske konstrukcije (čvrstoća pri pritisku, čvrstoće pri zatezanju, statički modul eastičnosti), sa druge strane, ovu vrstu betona je opravdano koristiti kao površinsku oblogu konstruktivnih elemenata hidrotehničkih objekata izloženih hidro-abrazivnom delovanju.

Delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom u iznosu od 20% u odnosu na masu doprinela je smanjenju hidro-abrazivne otpornosti betona, odnosno povećanju stepena hidro-abrazivne erozije betona po zapremini ( $E_{R,V}$ ) u iznosu od 19,33% u odnosu na etalon beton. Sa druge strane, delimična zamena cementa silikatnom prašinom u iznosu od 10% u odnosu na masu doprinela je povećanju otpornosti betona prema hidro-abrazivnom dejstvu, što se ogleda u smanjenju stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini ( $E_{R,V}$ ) za 10,43% u odnosu na etalon beton. I rezultati ispitivanja drugih mehaničkih karakteristika ukazuju na poboljšane performanse betona sa silikatnom prašinom, odnosno na nešto lošije karakteristike betona sa elektrofilterskim pepelom u odnosu na etalon beton. Posebno treba istaći rezultate ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem (poglavlje 5.5.10) i čvrstoće pri zatezanju metodom "Pull-off" (poglavlje 5.5.5), kao metode ispitivanja pomoću kojih se mogu kvantitativno opisati karakteristike površine betonskog uzorka. Degradacija uzoraka betona spravljenih sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i silikatnom prašinom nastala je usled krunjenja i odvajanja delova cementne matrice i krupnih zrna agregata, kao i usled izvlačenja sitnih zrna agregata iz cementne matrice. Nesumnjivo je da su nastala oštećenja veća kod betona spravljenog sa elektrofilterskim pepelom, što se može videti sa slike 5.39. U prilogu 8.5 prikazane su fotografije uzoraka svih serija nakon ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti.



Slika 5.39. Izgled površine uzorka betona serije E, EF i ES nakon ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti



Da delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom u betonu doprinosi smanjenju njegove hidro-abrazivne otpornosti pokazala su istraživanja Yen-a i saradnika [87], Choi-a i saradnika [90], Liu-a i saradnika [27] i Ristića i saradnika [89]. Međutim, istraživanja u kojima je sitan agregat delimično menjan elektrofilterskim pepelom [97] ili mlevenom zgurom iz visokih peći [244] u betonu pokazala su da dolazi do poboljšanja mehaničkih i deformacijskih karakteristika betona, pa i hidro-abrazivne otpornosti. Naime, produkti hidratacije cementa aktiviraju pucolansku aktivnost elektrofilterskog pepela tako da pored cementa i elektrofilterski pepeo dobija ulogu veziva u betonu iako je predviđen kao punilac. Takođe, istraživanja Liu-a [31] i He-a i saradnika [122] su pokazala da delimična zamena cementa silikatnom prašinom u betonskom kompozitu doprinosi povećanju hidro-abrazivne otpornosti betona, ali i drugih mehaničkih karakteristika betona. Takođe, rađena su istraživanja kod kojih je silikatna prašina dodata betonskom kompozitu kao posebni dodatak u iznosu do 10% od mase cementa u cilju poboljšanje performansi betona u svežem i očvrslom stanju. To su, primera radi, istraživanja Horszczaruk [37,128], Kryzanowski sa saradnicima [123], Portella sa saradnicima [243], koja su između ostalog potvrdila da dodatak silikatne prašine betonu značajno doprinosi povećanju njegove hidro-abrazivne otpornosti.

Dodatak čeličnih vlakana sa ojačanim krajevima betonu je vrlo malo uticao na njegovu hidro-abrazivnu otpornost. Kraća čelična vlakna, odnosno čelična vlakna sa većim faktorom oblika, su doprinela smanjenju stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini ( $E_{R,V}$ ) betona za 2,62% do 4,33% u odnosu na odgovarajuće etalone. Stepenn hidro-abrazivne erozije po zapremini betona ojačanog dužim čeličnim vlaknima razlikovao se za vrednost od -2,03% do 1,40% u odnosu na odgovarajuće etalone, što znači da su neki uzorci betona ojačani dužim čeličnim vlaknima imali manju hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon uzorke.

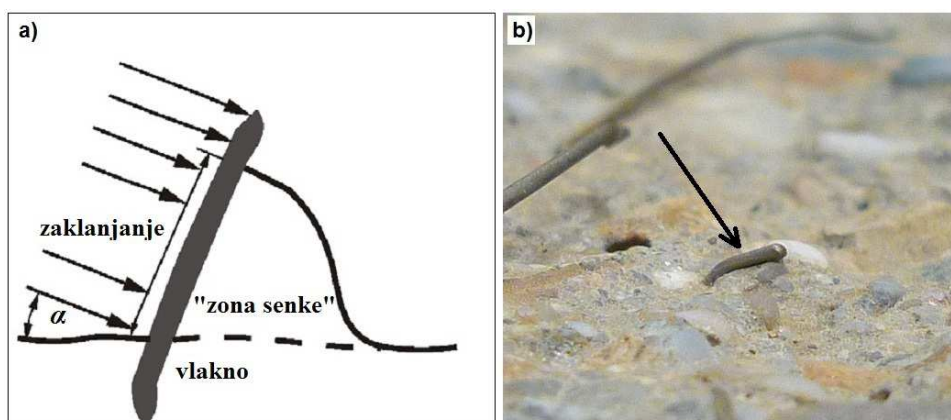
Naime, fenomen izvlačenja vlakana iz cimente matrice javlja se kod betona ojačanih čeličnim vlaknima (u konkretnom slučaju čelična vlakna sa ojačanim krajevima ZS/N – 0,50×30 mm i ZS/N – 1,05×50 mm). Prema istraživanjima [36,43,245] značajnu ulogu u procesu abrazivnog habanja betona armiranog čeličnim vlaknima igra napadni ugao mlaza mešavine vode i peska na betonsku ploču i orijentacija čeličnih vlakana u betonskom kompozitu. Nakon izvršenog ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona i makroskopskog pregleda površine mikroarmiranog betona moglo je da se utvrdi da li je došlo do izvlačenje ili presecanja vlakana usled dejstva čvrstih čestica iz vode, slika 5.40. Ovaj fenomen prema autorima [246] se najčešće javlja kada čvrste čestice udaraju upravno na pravac pružanja vlakna, pri malim napadnim uglom abrazivnih čestica na betonsku ploču (oko 15 stepeni).



Slika 5.40. Površina uzorka betona mikroarmiranog čeličnim vlaknima ZS/N – 0,50x30mm:  
1 – udubljenje od vlakna, 2 – kidanje vlakna

U slučaju da je napadni ugao abrazivnih čestica na betonsku površinu od 45 – 60° stepeni i ukoliko čelična vlakna nisu ugrađena paralelno sa habajućom površinom, formira se tzv. „zona senke” odmah iza izloženog vlakna, kao rezultat delovanja abraziva upravno na uzdužnu osu vlakna [36,43]. Ova oblast cementne matrice je zaštićena od uticaja abraziva, jer se ukupna energija udara absorbuje čeličnim vlaknima, koji odbijaju abrazivne čestice.

Veličina „zone senke” zavisi od dužine i krutosti (faktor oblika) primenjenih čeličnih vlakana i položaja vlakana u cementnoj matrici u odnosu na oštećenu površinu [43]. Prisustvo „zone senke” je konstatovana kod obe vrste čeličnih vlakana. Delaminacija krutih čeličnih vlakana iz cementne matrice nastala je usled snažnih udara čvrstih čestica nošenih vodom. Čelična vlakna su pretrpela značajnu plastičnu deformaciju, prouzrokujući takođe „brazdanje” cementne matrice u kontakt zoni sa površinom vlakna, slika 5.41. Nakon kidanja vlakna, cementna pasta iz „zone senke” biva uklonjena od strane abrazivnih čestica. Fenomen „zone senke” je primećen na površinama uzoraka za oba tipa vlakna (kraća i duža). Veličina „zone senke” zavisi od napadnog ugla abrazivnih čestica na betonsku ploču i od pravca ugradnje čeličnih vlakana u odnosu na ispitivanu površinu. U ovom istraživanju napadni ugao je iznosio 45 stepeni, dok u realnim uslovima napadni ugao je u rasponu od 0 do 90 stepeni.



Slika 5.41. Obrazovanje „zone senke” u mikroarmiranom betonu: (a) šematski prikaz „zone senke”, (b) slika obrazovane „zone senke”

Pad hidro-abrazivne otpornosti betona sa dužim čeličnim vlaknima u poređenju sa etalon betonom dobijen u ovom istraživanju, može se objasniti velikom krutošću čeličnih vlakana (mala vrednost faktora oblika), što je bio razlog delaminacije vlakana iz cementne matrice. Kruta vlakna su prouzrokovala brazdanje cementne matrice u kontaktnoj zoni kao rezultat plastične deformacije usled udara čvrstih čestica nošenih vodom. To je omogućilo ubrzano hidro-abrazivno habanje cementne matrice u poređenju sa uzorcima etalon betona.

Zaključak istraživanja [43] je bio da dodatak čeličnih vlakana betonima izloženih hidro-abrazivnom habanju, pri brzini smeše ispod 60 m/s nije preporučen, posebno u slučaju da abrazivni mlaz deluje pod uglom od 90 stepeni, gde je bilo evidentirano povećanje oštećenja betona armiranog čeličnim vlaknima u odnosu na beton bez vlakana. Pad hidro-abrazivne otpornosti betona ojačanog čeličnim vlaknima u poređenju sa nearmiranim betonom dobijen je u istraživanjima [247,248] u kojima je ispitivanje vršeno prema standardu ASTM C 1138-97 [88]. Međutim, zaključak istraživanja [249] je da dodatak čeličnih vlakana u betonu u zapreminskom iznosu od 1% i 1,5% doprinosi boljoj otpornosti betona na hidro-abrazivno dejstvo u poređenju sa betonima ojačanim karbonskim i staklenim vlaknima. U ovom istraživanju hidro-abrazivna otpornost je ispitivana paralelno prema standardu ASTM C 1138-97 [88] i primenom ubrzanog testa koji omogućava da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom udara o površinu ispitne betonske ploče, tzv. „flow abrasion test“.

Generalni zaključak ovog istraživanja u vezi betona ojačanog čeličnim vlaknima jeste da s obzirom da dodatak čeličnih vlakana betonu ne doprinose značajnom povećanju njegove hidro-abrazivne otpornosti, a značajno povećava cenu koštanja betona, neopravdano je koristiti ovu vrstu betona za izradu konstruktivnih elemenata hidrotehničkih objekata izloženih hidro-abrazivnom delovanju.

Kao što rezultati ispitivanja iz tabela 5.31-1 do 5.31-4 pokazuju, dodatak polipropilenskih vlakana betonu doprineo je značajnom povećanju njegove otpornosti prema hidro-abrazivnom habanju, pri čemu je veći efekat postignut primenom fibriliranih vlakana polipropilenskih vlakana. Ovaj efekat se ogleda u smanjenju stepena hidro-abrazivne erozije prema zapremini betona u odnosu na odgovarajuće etalone za 16,99% do 17,56% kada je u pitanju dodatak fibriliranih polipropilenskih vlakana, dok kod betona sa dodatkom monofilamentnih vlakana to smanjenje iznosi od 13,01% do 14,71%. Prethodno navedeni procenti ukazuju da faktor oblika i broj vlakana nisu u velikoj meri uticali na hidro-abrazivnu otpornost betona armiranih polipropilenskim vlaknima. Eventualno, mala razlika koja se javlja može se objasniti u međusobnoj povezanosti fibriliranih vlakana poprečnim vezama, tako da se prilikom delovanja abraziva iz vode, na površini betona aktiviraju veći broj vlakana u prihvatanju udarnog opterećenja, što nije slučaj sa monofilamentnim vlaknima.

Komparativnom analizom rezultata ispitivanja stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini mikroarmiranih betona, primećen je pad hidro-abrazivne otpornosti betona ojačanog čeličnim vlaknima u poređenju sa betonom ojačanog polipropilenskim vlaknima. Povećanje hidro-abrazivne otpornosti betona armiranog polipropilenskim vlaknima je povezan sa boljom adhezijom ovih vlakana sa cementnom matricom u poređenju sa čeličnim vlaknima [246,248,250,251].

Polipropilenska vlakna korišćena u ovom istraživanju su nekoliko puta veća od prosečne veličine zrna cementa, međutim poredeći sa čeličnim vlaknima ona su gibkija i formiraju kompaktnu strukturu zajedno sa cementnom matricom. Polipropilenska vlakna imaju vrlo malu sposobnost zadržavanja vode. Pored toga, površinski napon polimernih materijala je obično manji od površinskog napona vode. U istraživanju [251] se navodi da u kontaktnoj zoni polipropilensko vlakno – cementna matrica nema portlandita, te ne postoji

moгуćnost lokalnog povećanja vodocementnog faktora i samim tim slabljenja adhezije, što nije slučaj kod betona sa čeličnim vlaknima [252]. Kao što se sa slike 5.42 može videti, polipropilenska vlakna su iskidana kao rezultat uticaja čvrstih čestica abraziva na betonsku površinu, što potvrđuje njihovo dobro prijanjanje za cementnu matricu.



Slika 5.42. Površina uzorka betona mikroarmiranog polipropilenskim vlaknima

Generalno, dodatak polipropilenskih vlakana betonu doprinosi značajnom poboljšanju njegove hidro-abrazivne otpornosti, a takođe i poboljšanju drugih fizičkih i mehaničkih performansi betona (poglavlja od 5.5.1 – 5.5.10), te se ova vrsta betona može primeniti za izradu ne samo konstruktivnih elemenata hidrotehničkih objekata izloženih hidro-abrazivnom delovanju, već i drugih konstruktivnih elemenata sa posebnim zahtevima u pogledu nosivosti, stabilnosti i trajnosti.

Posmatrajući superponirani uticaj delimične zamene cementa, delimične zamene sitnog agregata i mikroarmiranja betona, odnosno upoređujući vrednosti stepena hidro-abrazivne erozije prema zapremini svih betonskih mešavina obrađenih u ovom istraživanju i etalon betonske mešavine, tabela (5.31-1.), može se reći da je najveći efekat postignut delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom (smanjenje stepena hidro-abrazivne erozije prema zapremini je 41,72%). Takođe, značajan efekat postignut je delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i mikroarmiranjem betona polipropilenskim vlaknima (smanjenje stepena hidro-abrazivne erozije prema zapremini je od 23,15% do 26,16%), uz konstataciju da su veći doprinos dala polipropilenska fibrilirana vlakna. Treba napomenuti da i pored većeg stepena hidro-abrazivne erozije prema zapremini (manje hidro-abrazivne otpornosti) betonske mešavine sa oznakom EF u odnosu na etalon betonsku mešavinu E (razlika iznosi 19,33%), postupak mikroarmiranja polipropilenskim vlaknima doprineo je da betonske mešavine sa elektrofilterskim pepelom dostignu približno iste vrednosti stepena hidro-abrazivne erozije prema zapremini kao i etalon beton (u zavisnosti od vrste vlakana, razlika stepena hidro-abrazivne erozije prema zapremini se kreće u granicama od -0,98% do 1,75%). Imajući u vidu napred navedeno, kao i činjenicu da se delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom smanjuje toplota hidratacije i skupljanje betona (što je veoma bitno kod hidrotehničkih objekata koje su uglavnom masivne konstrukcije), beton sa elektrofilterskim pepelom ojačan polipropilenskim vlaknima predstavlja dobro rešenje za izradu konstruktivnih elemenata hidrotehničkih konstrukcija izloženih hidro-abrazivnom delovanju.

## 6. ZAVRŠNA RAZMATRANJA I ZAKLJUČCI

U okviru eksperimentalnih istraživanja izvršena su brojna ispitivanja betona koji su spravljani sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i silikatnom prašinom, delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom, kao i dodatkom čeličnih i polipropilenskih vlakana, kako u svežem, tako i u očvrslom stanju. To je pre svega učinjeno u cilju proučavanja fizičko-mehaničkih performansi betonskih kompozita, a posebno hidro-abrazivne otpornosti, ali i drugih karakteristika važnih za njihovu tehnološkičnost i trajnost.

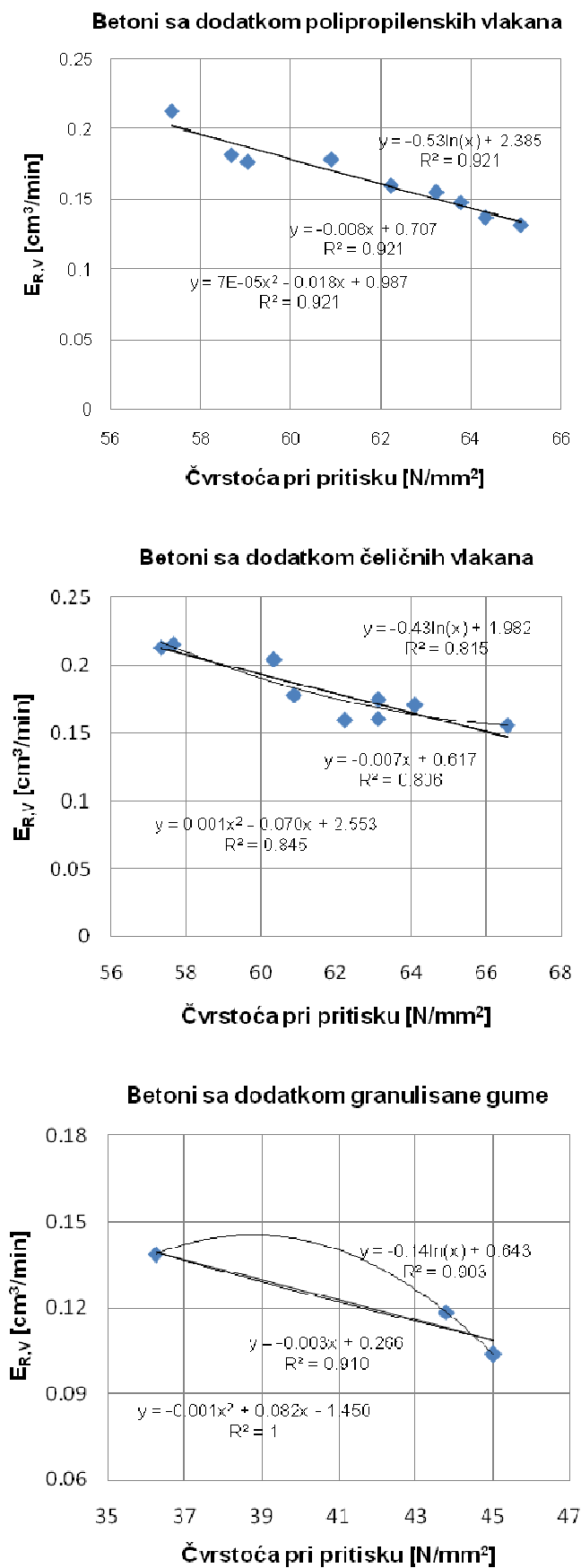
Najpre je izvršeno ispitivanje komponentalnih materijala koji ulaze u sastav predmetnih betonskih kompozita, s obzirom da njihov kvalitet i karakteristike u velikoj meri utiču na svojstva svežeg i očvrsllog betona. Zatim su usvojeni sastavi betonskih mešavina, odnosno potrebne količine pojedinih komponentnih materijala. Nakon usvojenih sastava betonskih mešavina, izvršeno je eksperimentalno ispitivanje njihovih svojstava. Ispitivane su najbitnije karakteristike betona u svežem stanju (zapreminska masa, konzistencija, sadržaj uvučenog vazduha, homogenost, ugradljivost i obradljivost), kao i pojedine fizičko-mehaničke osobine betona u očvrslom stanju (zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju savijanjem, čvrstoća pri zatezanju cepanjem, čvrstoća pri zatezanju metodom „Pull-off“, brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton, određivanje odskočnog broja upotrebom sklerometra, otpornost prema habanju brušenjem) pri određenoj starosti betona. Od deformacionih svojstava betona izvršeno je ispitivanje statičkog modula elastičnosti, a od dinamičkih ispitivanja duktilnosti izvršeno je ispitivanje udarne otpornosti metodom udarne mase.

Najvažnije ispitivanje u sklopu eksperimentalnih istraživanja jeste ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betonskih kompozita na aparaturi koja omogućava da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom udara o površinu ispitne betonske ploče. U poglavlju 5.5.11 izvršena je analiza uticaja delimične zamene cementa elektrofilterskim pepelom i silikatnom prašinom, delimične zamene sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i dodatka čeličnih i polipropilenskih vlakana betonu na njegovu hidro-abrazivnu otpornost. U narednom tekstu analiziraće se uticaj fizičko-mehaničkih karakteristika betona na njegovu otpornost na abrazivno dejstvo tvrdih čestica nošenih vodom.

### 6.1. Analiza uticaja mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona

Komponentalni sastav betonskih mešavina analiziranih u ovom istraživanju je u značajnoj meri uticao na ponašanje betona usled hidro-abrazivnog dejstva (poglavlje 5.5.11). Betonske mešavine u kojima je sitan rečni agregat delimično zamenjen recikliranom granulisanom gumom imale su daleko veću hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na ostale mešavine, nasuprot malim vrednostima čvrstoće pri pritisku i zatezanju. Takođe, mikroarmiranje betona polipropilenskim vlaknima doprinelo je povećanju hidro-abrazivne otpornosti, dok su čelična vlakna kod nekih mešavina doprinela čak i smanjenju otpornosti.

Iz prethodno navedenih razloga, posebno za tri grupe betona (betoni sa dodatkom polipropilenskih vlakana, betoni sa dodatkom čeličnih vlakana, betoni sa dodatkom reciklirane gume), utvrđena je zavisnost hidro-abrazivne otpornosti betona i čvrstoće pri pritisku, slika 6.1. Etalon mešavine (E, EF i ES) se nalaze u sastavu obe grupe mikroarmiranih betona.



Slika 6.1. Zavisnost hidro-abrazivne otpornosti betona od čvrstoće pri pritisku

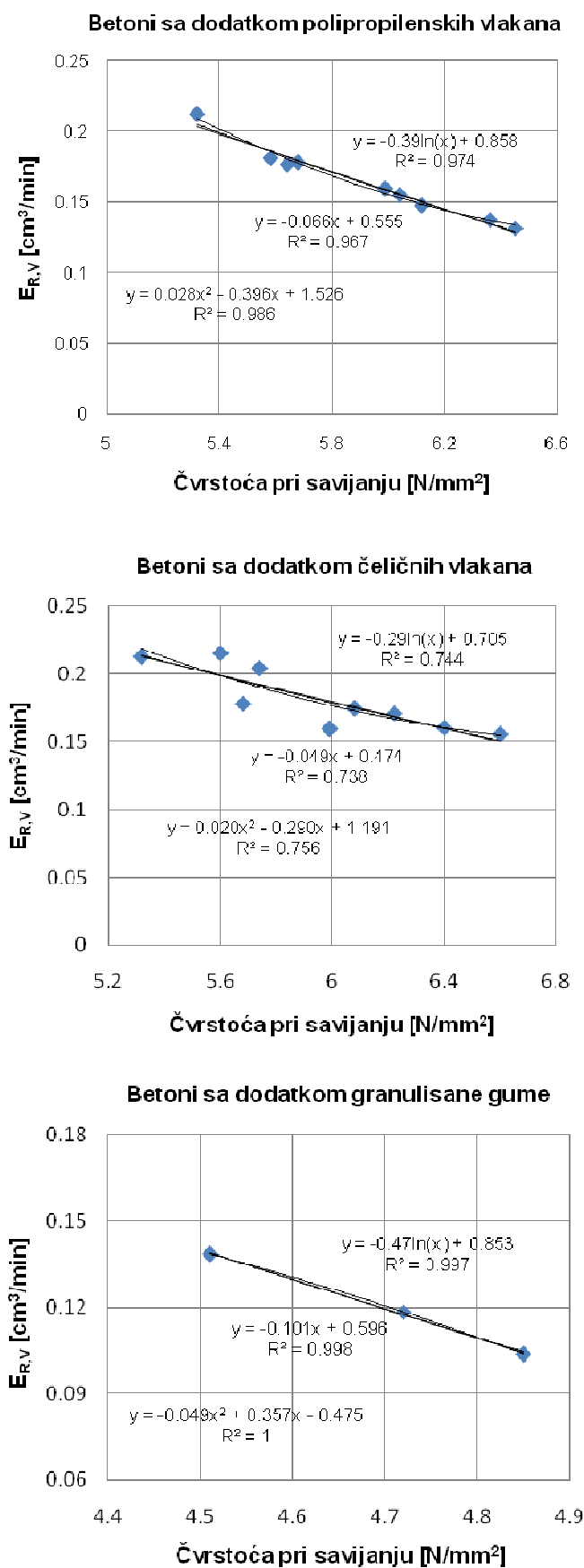
Kao što se sa prikazanih dijagrama može videti, sa povećanjem čvrstoće pri pritisku smanjuje se stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini ( $E_{R,V}$ ), odnosno povećava se otpornost betona prema hidro-abrazivnom dejstvu. Ova zakonitost važi za svaku grupu betona. Na dijagramima je između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini i čvrstoće pri pritisku betona uspostavljena linearna, logaritamska i polinomna kvadratna veza, a za svaku od veza sračunata je vrednost koeficijenta korelacije  $R^2$ . Za linearnu vezu koeficijent korelacije se kreće u rasponu od 0,806 do 0,921, za logaritamsku vezu od 0,815 do 0,921, dok je za polinomnu kvadratnu vezu vrednost koeficijenta korelacije između 0,845 do 1,0 odnosno 0,921 (vrednost koeficijenta korelacije 1,0 nije merodavna jer je sračunata za tri tačke, za tri različite vrste betona sa dodatkom reciklirane gume). S obzirom na vrednosti koeficijenta korelacije, može se reći da za sve tri veze (linearna, logaritamska i polinomna kvadratna) postoji jaka korelacija između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini i čvrstoće pri pritisku betona (uslov za jaku korelaciju  $0,8 < R < 1,0$ ).

Slično kao u slučaju čvrstoće pri pritisku, uspostavljena je zavisnost između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona, sa jedne strane, i čvrstoće pri zatezanju (savijanjem, cepanjem i metodom „Pull-off“), sa druge strane. Na slici 6.2 dati su dijagrami zavisnosti između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i čvrstoće pri savijanju. Koeficijent korelacije za linearnu vezu kreće se u granicama od 0,738 do 0,998, za logaritamsku vezu od 0,744 do 0,997, dok za polinomnu kvadratnu vezu vrednost se nalazi u granicama od 0,845 do 0,986. Koeficijent korelacije  $R^2$  je niži kod betona armiranih čeličnim vlaknima, što znači da kod ove vrste betona postoji veće oscilacije odnosa između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini i čvrstoće pri savijanju. Na osnovu vrednosti koeficijenta korelacije  $R^2$  za sve tri veze, postoji jaka korelacija između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i čvrstoće pri savijanju.

Na slici 6.3 dati su dijagrami zavisnosti između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i čvrstoće pri zatezanju cepanjem. Koeficijent korelacije za linearnu vezu kreće se u granicama od 0,883 do 0,967, za logaritamsku vezu od 0,887 do 0,964, dok za polinomnu kvadratnu vezu vrednost se nalazi u granicama od 0,887 do 0,976. Za grupu betona armiranih čeličnim vlaknima nisu uzete u obzir rezultati ispitivanja etalonskih uzoraka iz razloga značajnog smanjenja koeficijenta korelacije ( $R^2 < 0,4$ ). U ovom slučaju, za vezu između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i čvrstoće pri zatezanju cepanjem se može reći da postoji jaka korelacija na osnovu vrednosti koeficijenta korelacije.

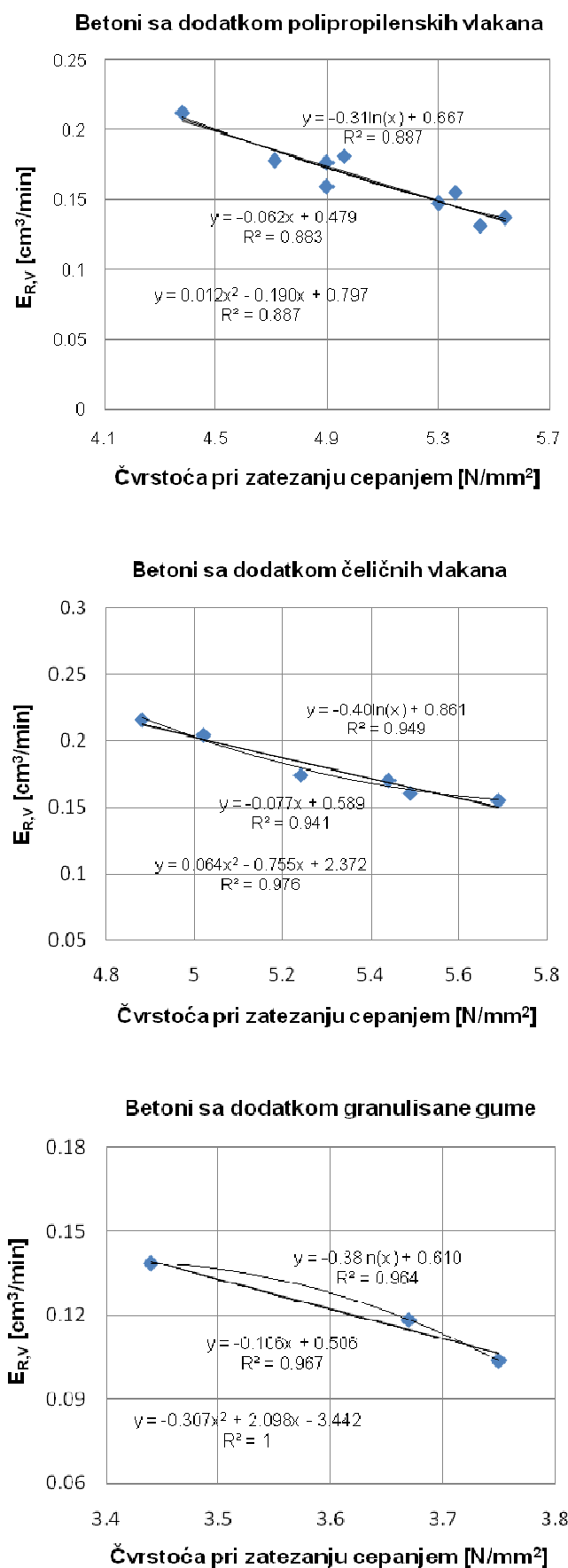
Na slici 6.4 dati su dijagrami zavisnosti između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“. Koeficijent korelacije za linearnu vezu kreće se u granicama od 0,784 do 0,947, za logaritamsku vezu od 0,797 do 0,953, dok za polinomnu kvadratnu vezu vrednost se nalazi u granicama od 0,919 do 0,927. U ovom slučaju koeficijent korelacije  $R^2$  je znatno niži kod betona armiranih čeličnim vlaknima u odnosu na beton sa polipropilenskim vlaknima. I u ovom slučaju može se reći da između predmetnih parametara postoji jaka korelacija.

Generalno, s obzirom na vrednosti koeficijenta korelacije, čvrstoća pri zatezanju cepanjem predstavlja efektivniji faktor za predviđanje hidro-abrazivne otpornosti betona u odnosu na čvrstoću pri pritisku, čvrstoću pri savijanju i čvrstoću pri zatezanju određenu metodom „Pull-off“. Do sličnog zaključka došlo se u istraživanju [27]. Ovaj zaključak može da se dodatno potkrepi analizom mehanizma nastanka oštećenja usled hidro-abrazivnog dejstva. Naime, udari čvrstih čestica nošenih vodom izazivaju lokalne napone zatezanja na površini ispitne betonske ploče. Ovi naponi zatezanja su glavni uzročnici pojave mikropukotina u cementnoj matrici i loma njenih delova oko krupnijih zrna agregata.

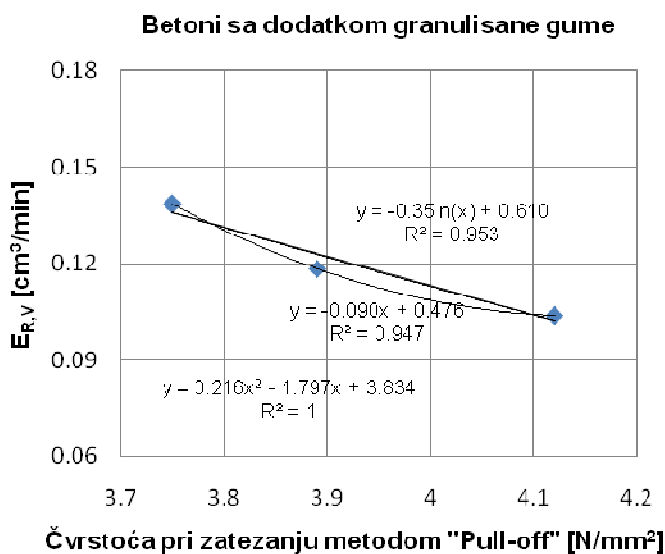
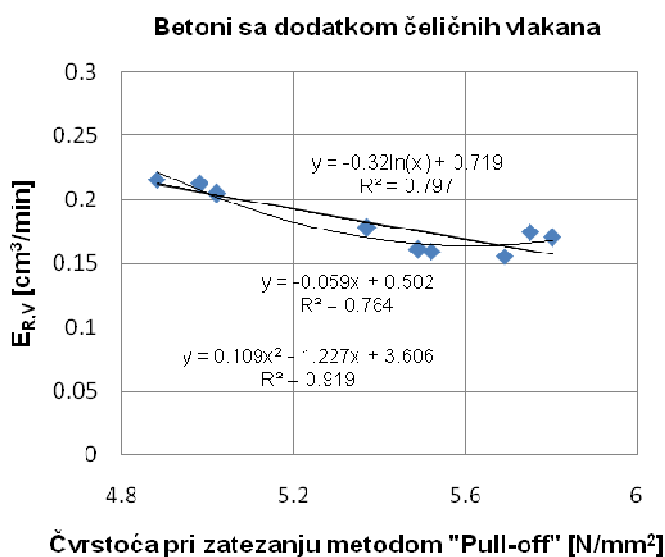
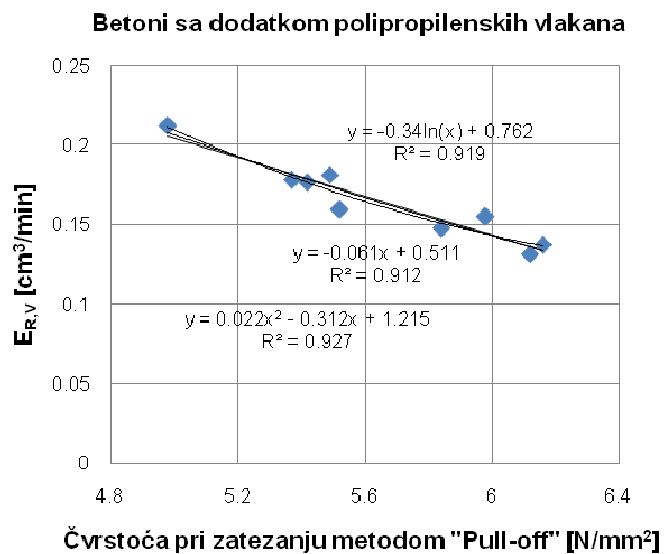


Slika 6.2. Zavisnost hidro-abrazivne otpornosti betona od čvrstoće pri savijanju

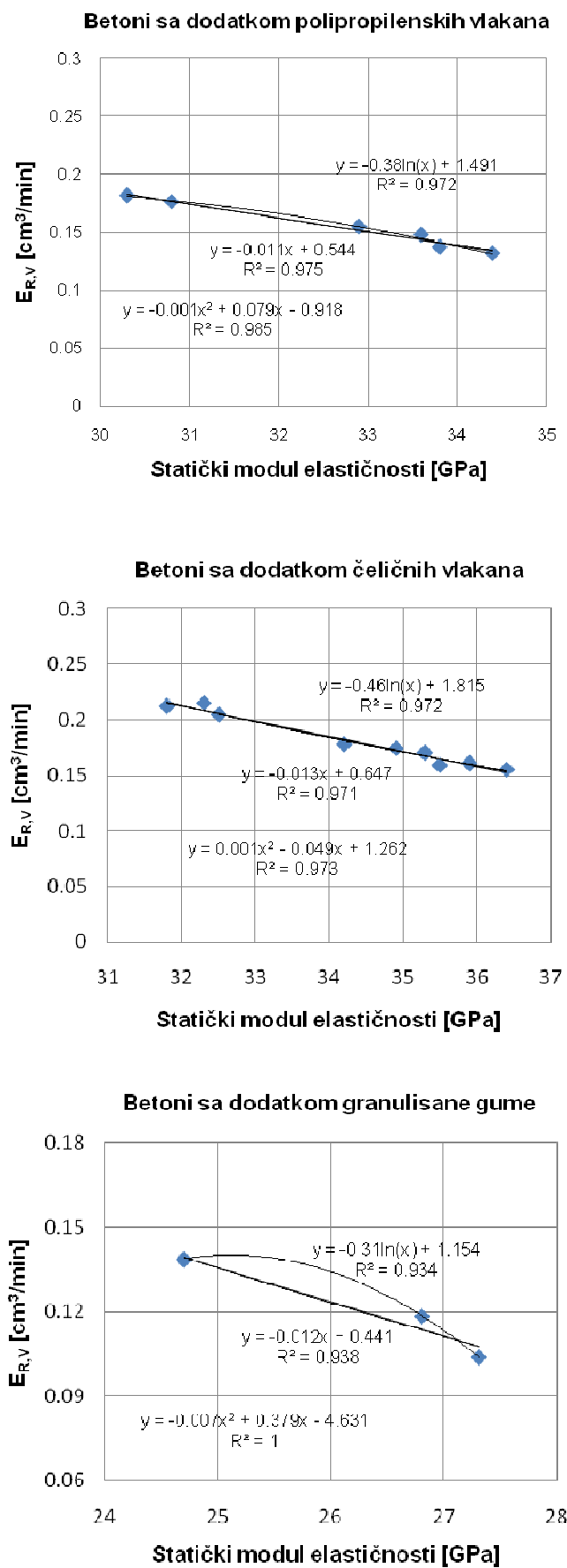




Slika 6.3. Zavisnost hidro-abrazivne otpornosti betona od čvrstoće pri zatezanju cepanjem



Slika 6.4. Zavisnost hidro-abrazivne otpornosti betona od čvrstoće pri zatezanju metodom „Pull-off“



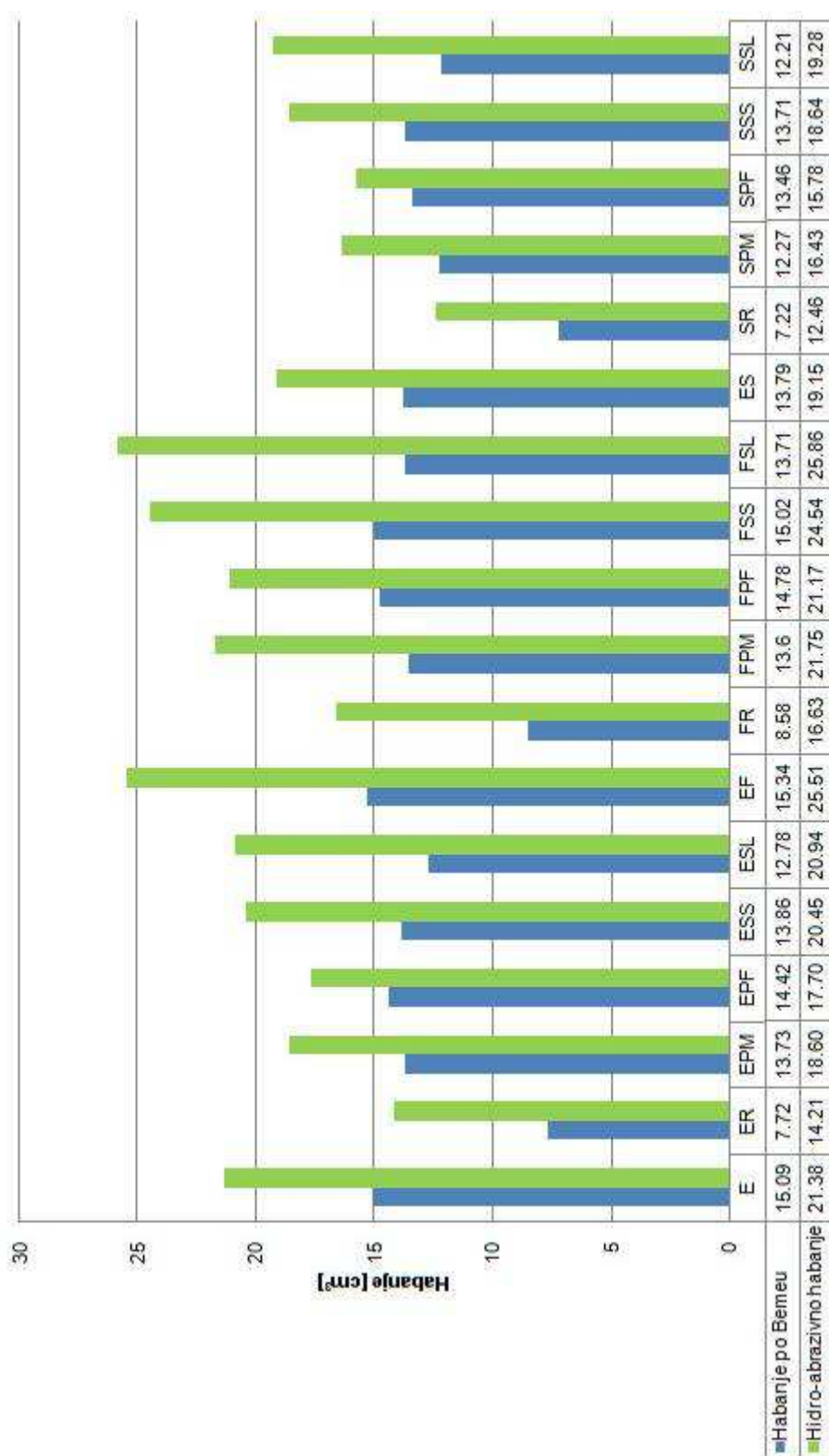
Slika 6.5. Zavisnost hidro-abrazivne otpornosti betona od statičkog modula elastičnosti

Na slici 6.5 dati su dijagrami zavisnosti između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i statičkog modula elastičnosti. Kao što se može primetiti, sa povećanjem statičkog modula elastičnosti betona smanjuje se stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini, odnosno povećava se hidro-abrazivna otpornost betona. Koeficijent korelacije za linearnu vezu kreće se u granicama od 0,938 do 0,975, za logaritamsku vezu od 0,934 do 0,972, dok za polinomnu kvadratnu vezu vrednost se nalazi u granicama od 0,973 do 0,985. Za grupu betona armiranih polipropilenskim vlaknima nisu uzete u obzir rezultati ispitivanja etalonskih uzoraka iz razloga značajnog smanjenja koeficijenta korelacije ( $R^2 < 0,4$ ). U ovom slučaju, za vezu između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i statičkog modula elastičnosti se može reći da postoji jaka korelacija na osnovu vrednosti koeficijenta korelacije.

Rezultati ispitivanje udarne otpornosti betona metodom „Drop-weight“ (poglavlje 5.5.9) su pokazali da su mikroarmirani betoni znatno otporniji na udarno opterećenje u odnosu na nearmirane betone. Takođe, prisustvo granula guma u betonu doprinela su poboljšanju njegove udarne otpornosti. Na slici 6.6 su šematski prikazane količine utrošene energije za nastanak prve prsline prilikom ispitivanja udarne otpornosti betona metodom „Drop-weight“. Prikazani rezultati navode na zaključak da se na osnovu ispitivanja udarne otpornosti betona metodom „Drop weight“ ne može u potpunosti predvideti ponašanje betona prilikom izlaganja hidro-abrazivnom dejstvu. Naime, delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom i silikatnom prašinom, delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom, kao i dodatak polipropilenskih vlakana betonu na sličan način je uticala na njegovu udarnu odnosno hidro-abrazivnu otpornost. Međutim, dok je, sa jedne strane, dodatak čeličnih vlakana u betonu u znatnoj meri doprineo povećanju njegove udarne otpornosti, sa druge strane, minorno je uticao na njegovu hidro-abrazivnu otpornost (neznatno je povećao ili čak u nekim slučajevima i smanjio). Betoni sa dodatkom granulisanog gume su pokazali najveću hidro-abrazivnu otpornost, što se nije moglo pretpostaviti na osnovu rezultata ispitivanja udarne otpornosti.



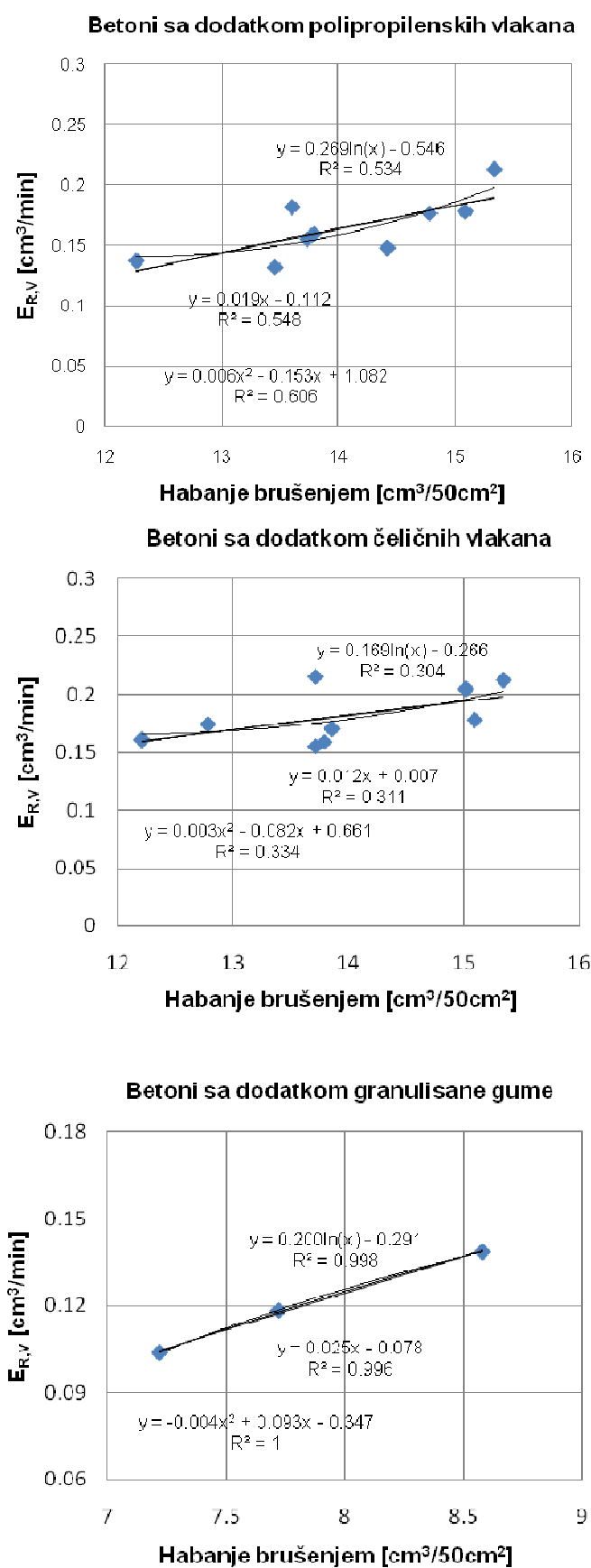
Slika 6.6. Količina utrošene energije za nastanak prve prsline prilikom ispitivanja udarne otpornosti betona – metodom „Drop-weight“



Slika 6.7. Uporedni prikaz vrednosti habanja betona dobijenih ispitivanjem hidro-abrazivne otpornosti betona i otpornosti betona prema habanju brušenjem (pomoću Böhme mašine)

Veoma je bilo važno proveriti da li se na osnovu rezultata ispitivanje otpornosti betona prema habanju brušenjem može predvideti njegova hidro-abrazivna otpornost. Na slici 6.7 je dat uporedni prikaz vrednosti habanja betona dobijenih ispitivanjem hidro-abrazivne otpornosti betona i otpornosti betona prema habanju brušenjem (pomoću Böhme mašine). Na osnovu šematskog prikaza sa slike 6.7 i rezultata ispitivanje otpornosti betona prema habanju brušenjem (poglavlje 5.5.10) i hidro-abrazivne otpornosti betona (poglavlje 5.5.11) može se zaključiti da je ponašanje skoro svih vrsta betona analiziranih u ovom istraživanju bez obzira na način izlaganja habanju dosta slično, izuzev za betone ojačanih čeličnim vlaknima. Naime, čelična vlakna kod mikroarmiranih betona su doprinela znatnom povećanju otpornosti prema habanju brušenjem, dok su na hidro-abrazivnu otpornost imala vrlo mali uticaj. Najveću otpornost prema habanju brušenjem pokazali su betoni spravljeni sa delimičnom zamenom rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom, što je slučaj i sa hidro-abrazivnom otpornošću. Dodatak polipropilenskih vlakana je doprineo povećanju i otpornosti prema habanju brušenjem i hidro-abrazivne otpornosti, dok je delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom i silikatnom prašinom na isti način uticala na promenu ovih otpornosti betona (zamena cementa elektrofilterskim pepelom doprinela je smanjenju, dok je zamena cementa silikatnom prašinom doprinela povećanju otpornosti betona prema habanju brušenjem i hidro-abrazivne otpornosti).

Na slici 6.8 dati su dijagrami zavisnosti između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i habanja brušenjem. Kao što se može videti sa slike, za betone sa dodatkom polipropilenskih vlakana koeficijent korelacije  $R^2$  je tek nešto viši od 0,5 i za linearnu vezu iznosi 0,518, za logaritamsku vezu 0,534 i za polinomnu kvadratnu vezu 0,606. Dakle, za ovu vrstu betona postoji srednje jaka korelacija između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i habanja brušenjem. Koeficijent korelacije  $R^2$  je znatno niži kod betona armiranih čeličnim vlaknima, što znači da prirast stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini nije u velikoj meri ispraćen rastom veličine habanja brušenjem. Vrednosti koeficijenta korelacije za linearnu vezu iznosi 0,311, za logaritamsku vezu 0,304 i za polinomnu kvadratnu vezu 0,334. Za ovu vrstu betona postoji umerena korelacija između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i habanja brušenjem. Za betone spravljene sa dodatkom reciklirane gume postoji jaka korelacija između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i habanja brušenjem, jer vrednost koeficijenta korelacije za linearnu vezu iznosi 0,996, za logaritamsku vezu 0,998 i za polinomnu kvadratnu vezu 1,0. Generalni zaključak bi bio da ukoliko beton ima malo oštećenje usled habanja brušenjem, onda treba očekivati i manje habanje betona usled hidro-abrazivnog dejstva, odnosno dobru otpornost betona prema habanju brušenjem prati dobra hidro-abrazivna otpornost. Treba još jednom napomenuti da dodatak čeličnih vlakna betonu nema isti efekat u pogledu poboljšanja otpornosti betona prema habanju brušenjem i hidro-abrazivne otpornosti (znatno više utiče na povećanje otpornosti betona prema habanju brušenjem).



Slika 6.8. Zavisnost hidro-abrazivne otpornosti betona od otpornosti betona prema habanju brušenjem

## 6.2. Zaključci u vezi rezultata ispitivanja

Kao što je u uvodnom delu ove disertacije već istaknuto, oštećenja hidrotehničkih objekata od betona usled abrazije javljaju se u različitoj meri kod gotovo svih hidrotehničkih objekata. Abrazivna oštećenja betona na hidrotehničkim konstrukcijama predstavljaju stalni tehnički problem, tako da zaštita ovih konstrukcija zahteva postojane betonske mešavine otporne na abrazivno-erozivna delovanja. Neophodno je detaljno proučiti mehanizam nastanka oštećenja, utvrditi metode istraživanja, testirati različite materijale na abrazivnu otpornost, dati predloge kako sanirati postojeće oštećene hidrotehničke objekte i kako izvoditi nove.

U industrijskim razvijenim zemljama, godišnji troškovi održavanja betonskih površina kanala, tunela, prelivnih objekata ili temeljnih ispusta visokih brana su jako visoki. Kod nas su takođe evidentirana oštećenja hidrotehničkih konstrukcija različitog stepena koja zahtevaju sanaciju. Veliki broj hidrotehničkih objekata u Srbiji je upravo oštećen hidro-abrazivnim dejstvom. U trenutku projektovanja/izvođenja ovih objekata nije postojao nacionalni standard za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti (i još uvek ne postoji, čak ni pozivanja na strani standard). U svetu postoje standardne metode za ispitivanje abrazije betona (ASTM C 1138-97 [88], ASTM C 418-98 [192], ASTM C 944-99 [91]) i različite druge metode koje simuliraju prirode uslove (npr. ubrzani test abrazije pomoću vodenog mlaza i peska).

U stranoj literaturi uglavnom je obrađena hidro-abrazivna otpornost na betonima visokih čvrstoća, na betonima spravljanim sa prirodnim drobljenim ili rečnim agregatom, koji su ojačani dodavanjem silikatne prašine ili mikroarmaturom, sa velikom količinom cementa ( $> 400 \text{ kg/m}^3$ ). Takođe se istražuje pomoću kojih parametara se može izraziti hidro-abrazivna otpornost betona (čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju, modul elastičnosti, otpornost na habanje brušenjem...). U manjoj meri je prikazana mogućnost primene recikliranih materijala i smanjene količine cementa za izradu abrazivno otpornih betona.

Imajući u vidu sve napred navedeno, rad na navedenoj temi je realizovan istovremenom primenom teorijskog pristupa oslonjenog na podatke dobijene iz literature i praktičnog pristupa zasnovanog na rezultatima dobijenim u okviru sopstvenih eksperimentalnih istraživanja.

Eksperimentalna istraživanja u okviru disertacije obavljena su skoro u potpunosti u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, izuzev ispitivanja otpornosti betona prema habanju brušenjem koje je obavljenu u Institutu IMS u Beogradu. Ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona izvršeno je na originalnoj aparaturi izrađenoj u Laboratoriji za građevinske materijale Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, a koja omogućuje da mlaz mešavine vode i peska velikom brzinom udara o betonsku ispitnu ploču.

Glavni cilj predmetne disertacije jeste istraživanje i analiza mogućnosti dobijanja betona u čijem sastavu bi bila izvršena delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom i delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i dodata mikrovlakna (čelična ili polipropilenska), a koji bi imao veću otpornost na hidro-abrazivno dejstvo u odnosu na etalon beton (bez delimične zamene cementa i sitnog agregata i bez dodatka mikrovlakana).

Pored glavnog cilja, formirani su i ostali takođe veoma bitni ciljevi predmetnog naučnog istraživanja, kao što su:

- analiza postojećeg stanja u oblasti tehnologije hidrotehničkih betona otpornih na hidro-abrazivno dejstvo, uz poseban osvrt na različite tipove mikroarmiranih betona i



betone u čijem sastavu učestvuje elektrofilterski pepeo, silikatna prašina i reciklirana granulirana guma;

- obavljanje sopstvenih eksperimentalnih istraživanja betona spravljenih sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom, delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) i poređenje njihovih karakteristika sa karakteristikama etalon betona (izrađenog bez delimične zamene cementa i sitnog agregata i bez dodatka mikrovlakana);
- parametarska analiza uticaja pojedinih mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja nakon njihove obrade i sistematizacije;
- formiranje zaključaka o ostalim relevantnim svojstvima istraživanih tipova kompozita i davanje ocene mogućnosti njihove praktične primene na osnovu prethodne analize.

U vezi navedenih ciljeva istraživanja, u okviru poglavlja 1 („Uvodna razmatranja“), 2 („Habanje betona“), 3 („Uticaj dodatka betonu na njegove performanse u svežem i očvrslom stanju“) i 4 („Stanje stvari u oblasti ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti betona“), izvršena je analiza postojećeg stanja u oblasti tehnologije hidrotehničkih betona otpornih na hidro-abrazivno dejstvo, uz poseban osvrt na različite tipove mikroarmiranih betona i betone u čijem sastavu učestvuje elektrofilterski pepeo, silikatna prašina i reciklirana granulirana guma.

Obavljanje sopstvenih eksperimentalnih istraživanja različitih tipova mikroarmiranih betona (armiranih čeličnim i polipropilenskim vlaknima) i betone u čijem sastavu učestvuje elektrofilterski pepeo, silikatna prašina i reciklirana granulirana guma, bio je naredni značajan cilj predmetnog istraživanja. Ovaj deo disertacije je najobimniji i najznačajniji i obrađen je u poglavlju 5 („Eksperimentalna istraživanja“), u okviru koga je izvršena i komparativna analiza određenih karakteristika ispitivanih betona (betoni u kojima je izvršena delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom i delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i dodata mikrovlakna (čelična ili polipropilenska)) sa karakteristikama etalon betona (beton izrađen bez delimične zamene cementa i sitnog agregata i bez dodatka mikrovlakana).

Parametarska analiza uticaja pojedinih mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona započeta je u poglavlju 4 (definisanjem različitih parametara koji utiču na hidro-abrazivnu otpornost betona), a završena u poglavlju 6 („Završna razmatranja i zaključci“) – tačnije u tački 6.1 („Analiza uticaja mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona“).

Poslednji postavljeni cilj je formiranje zaključaka o ostalim relevantnim svojstvima istraživanih tipova kompozita i davanje ocene mogućnosti njihove praktične primene, predmet su ove tačke 6.2 („Zaključci u vezi rezultata ispitivanja“) i tačke 6.3 („Mogućnosti praktične primene“).

U svakom slučaju, može se zaključiti da su ciljevi koji su bili postavljeni na početku, u najvećoj meri i ostvareni tokom istraživanja.

Kao što je uobičajno kod ovakvih istraživanja, u uvodnom delu disertacije bile su formulisane odgovarajuće polazne pretpostavke, koje su ovom prilikom još jednom navedene:

1. Ojačanje betona čeličnim ili polipropilenskim vlaknima dovodi, u manjoj meri, do povećanja čvrstoća betona pri pritisku, zatezanju, savijanju i cepanju – u odnosu na etalon beton (beton bez mikroarmature).

2. U znatnoj meri, mikroarmiranje doprinosi porastu žilavosti betonskih kompozita pri dinamičkim uticajima (ka što je npr. udarno opterećenje).
3. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) imaju približno iste ili bolje performanse pri delovanju statičkih ili dinamičkih opterećenja u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa i bez mikroarmature).
4. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) imaju bolje performanse pri delovanju statičkih ili dinamičkih opterećenja u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa i bez mikroarmature).
5. Delimična zamena rečnog sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinosi povećanju duktilnosti betona.
6. Mikroarmiranje (čeličnim ili polipropilenskim vlaknima) doprinosi porastu otpornosti betona prema habanju brušenjem i hidro-abrazivne otpornosti betona.
7. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) imaju približno istu ili veću hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa i bez mikroarmature).
8. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i dodatkom mikrovlakana (čeličnih ili polipropilenskih) imaju veću hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa i bez mikroarmature).
9. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom imaju veću hidro-abrazivnu otpornost u odnosu na etalon beton (beton bez delimične zamene cementa, bez delimične zamene sitnog agregata i bez mikroarmature).
10. Parametri poput čvrstoće pri pritisku, savijanju, cepanju, zatezanju metodom „Pull-off“, statičkog modula elastičnosti, udarne otpornosti i otpornosti prema habanju brušenjem mogu biti dobri pokazatelji hidro-abrazivne otpornosti betona.
11. Primenjena ubrzana metoda ispitivanja abrazije je podesna za utvrđivanje hidro-abrazivne otpornosti betona.

U okviru ovih završnih razmatranja treba dati odgovor na pitanje: koje od napred navedenih početnih hipoteza, nakon izvršenih istraživanja, su u potpunosti potvrđene, a koje bi možda trebalo korigovati, preformulisati ili dodatno proveriti? U tekstu koji sledi neće se zasebno iznositi potvrde za svaku postavljenu hipotezu, već će taksativno biti izloženi najbitiniji zaključci predmetnog istraživanja, na osnovu kojih se može doneti ocena o potvrđivanju ili odbacivanju postavljenih hipoteza.

Na osnovu obrađenih i sistematizovanih rezultata eksperimentalnih istraživanja i izvršene parametarske analize uticaja pojedinih mehaničkih karakteristika na hidro-abrazivnu otpornost betona, formulisani su sledeći zaključci:

1. Betonske mešavine u kojima je izvršena delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom zahtevaju veću količinu superplastifikatora u cilju dobijanja predviđene veličine sleganja (90 – 110 mm) u odnosu na etalon beton. Takođe, prethodno navedeno se odnosi i na betonske mešavine u kojima je izvršena delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i na betonske mešavine ojačane mikroarmaturom (čeličnim i polipropilenskim vlaknima).
2. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom uticala je na smanjenje zapreminske mase svežeg betona u iznosu od 3,29% do 3,81% u

odnosu na odgovarajuće etalone. Delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom doprinela je smanjenju zapreminske mase svežeg betona u iznosu od 3,80% u odnosu na etalon beton, dok je to smanjenje u slučaju delimične zamene cementa silikatnom prašinom iznosilo 0,42%. Dodatak čeličnih (u iznosu od 25 kg/m<sup>3</sup> ili 0,32% zapremine) i polipropilenskih vlakana (u iznosu od 0,91 kg/m<sup>3</sup> ili 0,1% zapremine) nije značajno uticao na promenu zapreminske mase svežeg betona.

3. Delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom ili silikatnom prašinom nije značajno doprinela promeni sadržaja vazduha u svežem betonu u odnosu na etalon beton. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinela je povećanju sadržaja vazduha u svežem betonu u iznosu od 27,27% do 33,33% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Dodatak mikroarmature uticao je na povećanje sadržaja vazduha u svežem betonu i to u iznosu od 13,33% do 16,13% kada su u pitanju polipropilenska vlakna, odnosno 9,09% do 9,68% kada je reč o čeličnim vlaknima.
4. Promene nastale u veličini zapreminske mase očvrslog betona u vodozasićenom stanju usled delimične zamene cementa, sitnog rečnog agregata i dodatka vlakana u odnosu na etalon beton, prate promene u veličini zapreminske mase svežeg betona.
5. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinela je smanjenju čvrstoće pri pritisku betona u iznosu od 27,68% do 36,82% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Betoni izrađeni sa dodatkom polipropilenskih vlakana i bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata imaju veću čvrstoću pri pritisku u odnosu na etalon beton u iznosu od 3,84% do 4,75%, dok betoni ojačani čeličnim vlaknima imaju veću čvrstoću pri pritisku u iznosu od 4,75% do 5,29%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju manju čvrstoću pri pritisku u odnosu na etalon beton u iznosu od 3,05% do 3,65%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to smanjenje iznosi od 0,90% do 5,29%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju veću čvrstoću pri pritisku u odnosu na etalon beton u iznosu od 5,65% do 6,93%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to povećanje iznosi od 3,65% do 9,31%. Kompletna analiza čvrstoće pri pritisku odnosi se za starost betona od 90 dana.
6. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinela je smanjenju čvrstoće pri savijanju betona u iznosu od 15,23% do 19,03% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Betoni izrađeni sa dodatkom polipropilenskih vlakana i bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata imaju veću čvrstoću pri savijanju u odnosu na etalon beton u iznosu od 6,34% do 7,75%, dok betoni ojačani čeličnim vlaknima imaju veću čvrstoću pri savijanju u iznosu od 7,04% do 9,51%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju manju čvrstoću pri savijanju u odnosu na etalon beton u iznosu od 0,70% do 1,76%, dok se kod betona sa čeličnim vlaknima razlika kreće u granicama od -1,41% do 1,06%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju veću čvrstoću pri savijanju u odnosu na etalon beton u iznosu od 11,97% do 13,56%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to povećanje iznosi od 12,68% do 16,20%. Kompletna analiza čvrstoće pri savijanju odnosi se za starost betona od 90 dana.
7. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinela je smanjenju čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona u iznosu od 21,46% do 23,47% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Betoni izrađeni sa dodatkom

polipropilenskih vlakana i bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata imaju veću čvrstoću pri zatezanju cepanjem u odnosu na etalon beton u iznosu od 12,53% do 13,80%, dok betoni ojačani čeličnim vlaknima imaju veću čvrstoću pri zatezanju cepanjem u iznosu od 11,32% do 15,50%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju veću čvrstoću pri zatezanju cepanjem u odnosu na etalon beton u iznosu od 4,03% do 5,31%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to povećanje iznosi od 3,65% do 4,03%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju veću čvrstoću pri zatezanju cepanjem u odnosu na etalon beton u iznosu od 15,71% do 17,62%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to povećanje iznosi od 16,51% do 20,81%. Kompletna analiza čvrstoće pri zatezanju cepanjem odnosi se za starost betona od 90 dana.

8. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinela je smanjenju čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom u iznosu od 24,70% do 27,56% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Betoni izrađeni sa dodatkom polipropilenskih vlakana i bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata imaju veću čvrstoću pri zatezanju „Pull-off“ metodom u odnosu na etalon beton u iznosu od 8,75% do 11,36%, dok betoni ojačani čeličnim vlaknima imaju veću čvrstoću pri zatezanju „Pull-off“ metodom u iznosu od 7,08% do 8,75%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju veću čvrstoću pri zatezanju „Pull-off“ metodom u odnosu na etalon beton u iznosu od 0,93% do 2,23%, dok se kod betona sa čeličnim vlaknima razlika kreće u granicama od -0,37% do 0,56%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju veću čvrstoću pri zatezanju „Pull-off“ metodom u odnosu na etalon beton u iznosu od 13,97% do 14,71%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to povećanje iznosi od 12,48%. Kompletna analiza čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom odnosi se za starost betona od 90 dana.
9. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa zavisi pre svega od zapreminske mase očvrstlog betona. Kod betona izrađenih sa delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom, brzina prolaska ultrazvuka kroz beton je manja za 5,27% do 6,24% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Polipropilenska vlakna dodata betonu neznatno smanjuje brzinu prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton u poređenju sa etalon betonom, dok je čelična vlakna neznatno povećavaju. Kod betonskih mešavina izrađenih sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom brzina prolaska ultrazvučnog talasa kroz beton je manja za 4,29% do 5,16% u odnosu na etalon beton, dok je kod betonskih mešavina izrađenih sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom brzina prolaska ultrazvučnog talasa kroz beton je manja za 0,04% do 0,72% u odnosu na etalon beton. Kompletna analiza brzine ultrazvučnog impulsa kroz beton odnosi se za starost betona od 90 dana.
10. Kod betona izrađenih sa delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom, indeks odskoka sklerometra manji je za 17,30% do 21,16% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Polipropilenska i čelična vlakna dodata betonu neznatno smanjuje indeks odskoka sklerometra u poređenju sa etalon betonom. Kod betonskih mešavina izrađenih sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom indeks odskoka sklerometra je manji za 8,71% do 9,75% u odnosu na etalon beton, dok je kod betonskih mešavina izrađenih sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom indeks odskoka sklerometra je manji za

0,62% do 1,66% u odnosu na etalon beton. Kompletna analiza indeksa odskoka sklerometra odnosi se za starost betona od 90 dana.

11. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinela je smanjenju statičkog modula elastičnosti betona u iznosu od 21,64% do 23,10% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Betoni izrađeni sa dodatkom polipropilenskih vlakana i bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata imaju manju vrednost statičkog modula elastičnosti u odnosu na etalon beton u iznosu od 1,75% do 3,80%, dok betoni ojačani čeličnim vlaknima imaju veći statički modul elastičnosti u iznosu od 2,05% do 3,22%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju manju vrednost statičkog modula elastičnosti u odnosu na etalon beton u iznosu od 9,94% do 11,40%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to smanjenje iznosi od 4,97 do 5,56%. Kod betona izrađenih sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i ojačani polipropilenskim vlaknima statički modul elastičnosti se razlikuje u odnosu na etalon za vrednost od -1,17% do 0,58%, dok betoni ojačani čeličnim vlaknima imaju veću vrednost statičkog modula elastičnosti u odnosu na etalon beton u iznosu od 4,97% do 6,43%. Kompletna analiza statičkog modula elastičnosti odnosi se za starost betona od 90 dana.
12. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinosi betonu veću moć apsorpcije energije usled udarnog opterećenja pre pojave prve prsline. Potrebna količina energija za nastanak prve prsline kod betona sa recikliranom granulisanom gumom je za 25,0% do 37,50% veća u odnosu na odgovarajuće etalon betone, dok je za pojavu loma uzorka potrebna količina energije manja za 9,91% do 14,29%. Mikroarmirani betoni su otporniji na udarno opterećenje u odnosu na nearmirane bez obzira na vrstu dodatih vlakana. Potrebna količina energija za nastanak prve prsline kod betona sa dodatkom polipropilenskih vlakana i bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata je za 50,0% do 70,0% veća u odnosu na etalon beton, dok je za pojavu loma uzorka potrebna količina energije veća za 57,14% do 66,67%. U slučaju armiranja čeličnim vlaknima, potrebna količina energija za nastanak prve prsline je za 120,0% do 150,0% veća u odnosu na etalon beton, dok je za pojavu loma uzorka potrebna količina energije veća za 66,67% do >90,48% (ovde je reč o tome da do loma uzorka nije došlo nakon 40 udara tega, te je stoga potrebna količina energije za lom veća od 353,20 J, videti poglavlje 5.5.9). Potrebna količina energija za nastanak prve prsline kod betona izrađenih sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i ojačani polipropilenskim vlaknima je za 30,0% do 50,0% veća u odnosu na etalon beton, dok je za pojavu loma uzorka potrebna količina energije veća za 42,86% do 52,38%. U slučaju armiranja čeličnim vlaknima, potrebna količina energija za nastanak prve prsline je za 90,0% do 120,0% veća u odnosu na etalon beton, dok je za pojavu loma uzorka potrebna količina energije veća za 61,90% do 80,95%. Potrebna količina energija za nastanak prve prsline kod betona izrađenih sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i ojačani polipropilenskim vlaknima je za 70,0% do 90,0% veća u odnosu na etalon beton, dok je za pojavu loma uzorka potrebna količina energije veća za 61,90% do 76,19%. U slučaju armiranja čeličnim vlaknima, potrebna količina energija za nastanak prve prsline je za 140,0% do 180,0% veća u odnosu na etalon beton, dok je za pojavu loma uzorka potrebna količina energije veća za 80,95% do >90,48%. Kompletna analiza udarne otpornosti odnosi se za starost betona od 90 dana.

13. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinela je smanjenju habanja betona brušenjem u iznosu od 44,07% do 48,84% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Betoni izrađeni sa dodatkom polipropilenskih vlakana i bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata imaju manje habanje brušenjem u odnosu na etalon beton u iznosu od 4,44% do 9,01%, dok betoni ojačani čeličnim vlaknima imaju, takođe, manje habanje brušenjem u iznosu od 8,15% do 15,31%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju manje habanje brušenjem u odnosu na etalon beton u iznosu od 2,05% do 9,87%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to smanjenje iznosi od 0,46% do 9,15%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju manje habanje brušenjem u odnosu na etalon beton u iznosu od 10,80% do 18,69%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to smanjenje iznosi od 9,15% do 19,09%. Najveću otpornost prema habanju brušenjem pokazala je betonska mešavina izrađena sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i vrednost habanja brušenjem ovog betona je za 52,15% manja u odnosu na etalon beton. Kompletna analiza otpornosti betona prema habanju brušenjem odnosi se za starost betona od 90 dana.
14. Hidro-abrazivno delovanje na beton je dinamičkog karaktera izraženo na lokalnom nivou (u konkretnom slučaju površina betonskog uzorka izložena dejstvu mlaza mešavine vode i peska). Otpornost betona prema hidro-abrazivnom dejstvu pre svega zavisi od otpornosti cementne paste na zatežujuće sile koje se javljaju na površini betona, kvaliteta komponenti betona, kao i od jačine veze između cementnog kamena, sa jedne strane, i agregata i mikrovlakana, sa druge strane. Najveći efekat u smislu povećanja hidro-abrazivne otpornosti betona postignut je delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom. Takođe, ojačanje betona polipropilenskim vlaknima doprinelo je značajnom povećanju hidro-abrazivne otpornosti betona, pri čemu treba napomenuti da je veći efekat postignut primenom fibriliranih polipropilenskih vlakana. Dodatak čeličnih vlakna betonu nije doprineo značajnom povećanju hidro-abrazivne otpornosti betona, čak su se javili slučajevi i neznatnog smanjenja otpornosti betona prema hidro-abrazivnom dejstvu. Izraženo kvantitativno, stanje stvari u vezi hidro-abrazivne otpornosti betona obrađenih u ovom istraživanju izgleda ovako. Delimična zamena sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom doprinela je smanjenju stepena hidro-abrazivne erozije betona po zapremini u iznosu od 33,51% do 34,93% u odnosu na odgovarajuće etalon betone. Betoni izrađeni sa dodatkom polipropilenskih vlakana i bez delimične zamene cementa i sitnog rečnog agregata imaju manju vrednost stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini u odnosu na etalon beton u iznosu od 13,01% do 17,20%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to smanjenje iznosi od 2,03% do 4,33%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa elektrofilterskim pepelom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju približno isti stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini u odnosu na etalon beton (razlika je od -0,95% do 1,78%), dok betoni ojačani čeličnim vlaknima imaju veći stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini u iznosu od 14,81% do 20,99%. Betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i ojačani polipropilenskim vlaknima imaju manju vrednost stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini u odnosu na etalon beton u iznosu od 23,15% do 26,16%, dok kod betona sa čeličnim vlaknima to smanjenje iznosi od 9,78% do 12,78%. Najveću otpornost prema hidro-abrazivnom habanju pokazala je betonska mešavina izrađena sa delimičnom zamenom cementa

silikatnom prašinom i delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom i vrednost hidro-abrazivnog habanja ovog betona je za 41,72% manja u odnosu na etalon beton. Kompletna analiza hidro-abrazivne otpornosti betona odnosi se za starost betona od 90 dana.

15. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem predstavlja efektivniji faktor za predviđanje hidro-abrazivne otpornosti betona u odnosu na čvrstoću pri pritisku, čvrstoću pri savijanju i čvrstoću pri zatezanju određenu metodom „Pull-off“. Statički modul elastičnosti, takođe, može biti dobar faktor za predviđanje hidro-abrazivne otpornosti betona (postoji jaka korelacija između stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini betona i statičkog modula elastičnosti). Na osnovu ispitivanja udarne otpornosti betona metodom „Drop weight“ ne može se u potpunosti predvideti ponašanje betona prilikom izlaganja hidro-abrazivnom dejstvu. Od otpornosti betona prema habanju brušenjem, u dobroj meri zavisi i hidro-abrazivnu otpornost. Ukoliko beton ima malo oštećenje usled habanja brušenjem, onda treba očekivati i manje habanje betona usled hidro-abrazivnog dejstva, odnosno dobru otpornost betona prema habanju brušenjem prati dobra hidro-abrazivna otpornost. Treba još jednom napomenuti da dodatak čeličnih vlakna betonu nema isti efekat u pogledu poboljšanja otpornosti betona prema habanju brušenjem i hidro-abrazivne otpornosti (znatno više utiče na povećanje otpornosti betona prema habanju brušenjem).
16. Primenjena ubrzana metoda ispitivanja abrazije je podesna za utvrđivanje hidro-abrazivne otpornosti betona, iz razloga što su rezultati ispitivanja sličnih tipova betona od strane drugih autora kompatibilni sa rezultatima istraživanja prikazanih u disertaciji (videti poglavlje 5.5.11).

### 6.3. Mogućnosti praktične primene

Na osnovu rezultata ispitivanja predmetnih betona može se dati preporuka za njihovu praktičnu primenu prilikom projektovanja i izgradnje hidrotehničkih objekata, odnosno njihovih konstruktivnih elemenata izloženih hidro-abrazivnom dejstvu.

Najveću hidro-abrazivnu otpornost pokazali su betoni izrađeni sa delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom zato što su imali i najveću otpornost prema habanju brušenjem, dok im je otpornost prema udarnom dejstvu bila bolja u odnosu na etalon beton. Treba imati u vidu da je prisustvo gume u znatnoj meri umanjilo ostale mehaničke karakteristike betona, pre svega čvrstoću pri pritisku. Iz prethodno navedenih razloga, betoni izrađeni sa delimičnom zamenom sitnog rečnog agregata recikliranom granulisanom gumom se mogu koristiti kao tanka obloga konstruktivnih elemenata hidrotehničkih objekata izloženih hidro-abrazivnom dejstvu, u vidu prefabrikovanih ploča za popločavanje površina. Prilikom ovakve primene, posebnu pažnju treba obratiti na izradu spojnica između ploča, jer one predstavljaju potencijalna slaba mesta obložne konstrukcije.

Ojačavanje betona mikrovlaknima doprinosi povećanju mehaničkih karakteristika betona, ali samo polipropilenska vlakna doprinose značajnom povećanju hidro-abrazivne otpornosti. Iz ovih razloga, mikroarmirane betone sa polipropilenskim vlaknima ima smisla koristiti za izradu kompletnih konstruktivnih elemenata hidrotehničkih objekata izloženih hidro-abrazivnom dejstvu, dok za betone ojačane čeličnim vlaknima nema dovoljno opravdanja za korišćenje u ovu svrhu.

Delimična zamena cementa elektrofilterskim pepelom doprinosi smanjenju fizičko-mehaničkih karakteristika betona u odnosu na etalon beton, između ostalih i hidro-abrazivne otpornosti. Ojačanje ovih vrsta betona mikrovlaknima doprinosi poboljšanju performansi

betona, tako da po kvalitetu oni postaju slični etalon betonu. Analizirajući cenu koštanja kubnog metra betona i potrebne količine betona za izradu hidrotehničkih objekata, kao i da se radi o procentu zamene cementa elektrofilterskim pepelom u iznosu od 20% (konkretno  $80 \text{ kg/m}^3$ ) i niz drugih prednosti, ovakvi betoni ojačani polipropilenskim vlaknima se mogu koristiti za izradu konstruktivnih elemenata hidrotehničkih objekata izloženih hidro-abrazivnom dejstvu manjeg inteziteta. I u ovom slučaju, nije opravdano korišćenje čeličnih vlakana.

Delimična zamena cementa silikatnom prašinom doprinosi poboljšanju performansi betona, pa i njegove hidro-abrazivne otpornosti. Ojačanje ovih betona mikrovlaknima dodatno povećava njihov kvalitet, ali i u ovom slučaju samo polipropilenska vlakna doprinose značajnom poboljšanju hidro-abrazivne otpornosti. Iz ovog razloga, betoni izrađeni sa delimičnom zamenom cementa silikatnom prašinom i ojačani polipropilenskim vlaknima se mogu koristiti za izradu konstruktivnih elemenata hidrotehničkih objekata izloženih intezivnom hidro-abrazivnom dejstvu.

#### 6.4. Pravci daljeg istraživanja

Na osnovu formulisanih zaključaka ovog istraživanja i imajući u vidu širok spektar kombinacija koje postoje prilikom izbora komponentnih materijala, mogu se dati sledeće preporuke za dalja istraživanja:

- istraživanje hidro-abrazivne otpornosti betona izrađenih sa drobljenim agregatima (pre svega sa agregatima vulkanskog porekla);
- istraživanje mogućnosti korišćenja elektrofilterskog pepela, zgure iz visokih peći i drugih nuz produkata kao delimične zamene agregata u betonskom kompozitu u oblasti hidro-abrazivno otpornih betona;
- istraživanje uticaja dodatka krupnijih komada (većih od 4mm) reciklirane gume na hidro-abrazivnu otpornost i druge karakteristike betona;
- istraživanje mogućnosti primene različitih vrsta sintetičkih vlakana u oblasti hidro-abrazivno otpornih betona (korišćenje vlakana različitih dužina i različitog procenta učešća u betonskom kompozitu);
- istraživanje hidro-abrazivne otpornosti i drugih performansi betona izrađenih sa delimičnom zamenom sitnog agregata recikliranom granulisanom gumom (u iznosu manjem od 10% prema zapremini) i ojačanih polipropilenskim vlaknima različite dužine i procenta učešća u betonskom kompozitu;
- istraživanje hidro-abrazivne otpornosti betona izrađenih sa dodatkom čeličnih opiljaka;
- istraživanje mogućnosti primene polimernih i polimerima modifikovanih betona u oblasti hidro-abrazivno otpornih betona;
- istraživanje hidro-abrazivne otpornosti i drugih performansi samozbijajućih betona (SCC – Self Compacting Concrete) sa elektrofilterskim pepelom, silikatnom prašinom ili zgurom iz visokih peći kao mineralnim praškastim dodatkom;
- istraživanje hidro-abrazivne otpornosti različitih vrsta reparaturnih maltera ojačanih sintetičkim vlaknima;
- implementacija evropskih (EN) i drugih relevantnih standarda (ASTM, ISO, JSCE) iz oblasti hidro-abrazivno otpornih betona, uz eventualnu izradu odgovarajućih domaćih uputstava, smernica ili pravilnika za projektovanje, spravljanje i ispitivanje predmetnih betona.



---

## 7. LITERATURA

- [1] ACI Committee 201.2R-08: *Guide to Durable Concrete*, American Concrete Institute, June 2008
- [2] Metha P.K., Gerwick Jr B.C.: *Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment*, Concrete International, Vol.4, No. 10, pp. 45 – 51 , 1982
- [3] Mehta P.K., Monteiro P.J.M.: *Concrete: microstructure, properties and materials*, McGraw-Hill, Columbus, USA, 2006
- [4] Papenfus N.: *Applying Concrete Technology to Abrasion Resistance*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Paving (PAVE AFRICA 2003), ISBN Number: 0-958-46091-4, Sun City, South Africa, 12<sup>th</sup> – 15<sup>th</sup> October 2003
- [5] Papenfus N.J.: *Abrasion Resistance, abrasion wear, and related strength properties in concrete, with special reference ot concrete pavers*, PhD thesis, Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, Johannesburg, February 2002
- [6] Addis B.J., Doulgeris N.P.: *The development of a method for determining the abrasion resistance of concrete*, Proceedings: Annual Transportation Convention, Pretoria, South Africa, August 1989
- [7] Sukandar B.M.: *Abrasion Resistance of Concrete Paving Blocks*, A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the requirements for the Master of Science Degree, Department of Civil Engineering & Mechanics, Graduate School Southern Illinois University, January 1993
- [8] ASTM C779 (2012): *Standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surface*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/C0779\_C0779M-12, www.astm.org.
- [9] Lane J.: *Semi-dry mixes for precasting*, Fultons Concrete Technology, Portland Cement Institute, Midrand, pp 875-876, 1986
- [10] ACI Committee 234: *Abstract of guide for the use of silica fume in concrete*, ACI Materials Journal, Title No. 92-M47, July-August 1995, pp. 437-440
- [11] Jacobs F., Winkler K., Hunkeler F., Volkart P.: *Betonabrasion im Wasserbau – Grundlagen/Feldversuche/Empfehlungen*, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Hochschule Zürich, 2001
- [12] ACI Committee 210R-93(R2008): *Erosion of Concrete in Hydraulic Structures*, American Concrete Institute, 1993 (Reapproved 2008)
- [13] Uetz H.: *Abrasion und Erosion - Grundlagen, Betriebliche Erfahrungen, Verminderung*, Carl Hanser Verlag, 1986
- [14] Höcker T.: *Einfluss von Stahlfasern auf das Verschleißverhalten von Betonen unter extremen Betriebsbedingungen in Bunkern von Abfallbehandlungsanlagen*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 468, Beuth Verlag, 1996
- [15] Moskvina V.M.: *Cavitation erosion of concrete*, Journal Power Technology and Engineering, Vol. 12, No. 12, p.p. 1215-1218., 1978
- [16] Mombar A.W.: *Short-time cavitation erosion of concrete*, Wear 241, pp. 47 – 52, 2000

- 
- [17] McDonald J.E.: *Evaluation of Materials for Repair of Erosion Damage in Hydraulic Structures*, Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, pp. 887 – 898, June 2000
- [18] Schrader E.K.: *Cavitation Resistance of Concrete Structures*, Frontiers in Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, 1983.
- [19] Duan C.G., Karelin V.Y.: *Abrasive Erosion & Corrosion of hydraulic machinery – Series on hydraulic machinery*, Vol. 2. World Scientific Publishing Co., 2003
- [20] Grübl P., Weigler H., Sieghart K.: *Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften*. Ernst & Sohn Verlag, 2001
- [21] Haroske G.: *Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 511, Beuth Verlag, 2000
- [22] McDonald J. E.: *Maintenance and Preservation of Concrete Structures*, Report 2, Repair of Erosion-Damaged Structures, Technical Report C-78-4, Structures Laboratory, U. S Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1980
- [23] Helbig U., Horlacher H.B., Stamm J.: *Mechanisms and prediction of hydroabrasion on hydraulic structures*, In: Proc. 1st European Congress of the IAHR, Edinburgh, UK, 2010
- [24] SPPS EN 206-1:2011 Beton – Deo 1: *Specifikacije, performance i usaglašenost*, srpska verzija EN 206-1: 2000
- [25] ZTV-W LB 215: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Wasserbau, Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton*. Bundesminister für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn, 2004
- [26] ZTV-W LB 219: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Wasserbau, Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken*. Bundesminister für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn, 2004
- [27] Liu Y.W., Yen T., Hsu T.H.: *Abrasion erosion of concrete by water-borne sand*, Cement and Concrete Research 36, pp. 1814–1820, 2006
- [28] Plum D., Xufei F.: *A rock and a hard place*, Water Power and, Construction, pp. 30 – 33, 1996
- [29] Vogel M.: *Schädigungsmodell für die Hydroabrasionsbeanspruchung zur probabilistischen Lebensdauerprognose von Betonoberflächen im Wasserbau*, Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2011
- [30] Huovinen S.: *Abrasion of concrete by ice in arctic sea structures*, Technical Research Centre of Finland, Publications 62, Espoo, 1990
- [31] Liu Y.W.: *Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume*, Construction and Building Materials 21, pp. 972 – 977, 2006.
- [32] Volkart P.U.: *Preventing hydraulic structures from abrasive concrete erosion*, Laboratory of Hydraulics Hydrology and Glaciology, Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 2001
-

- 
- [33] Helbig U., Horlacher H.B.: *Ein Ansatz zur versuchstechnischen Simulation und Übertragbarkeit der Hydroabrasion strömungsbeanspruchter Betonoberflächen im Wasserbau*, Bautechnik 84, Nr. 9, pp. 641-645, 2007
- [34] Bania A.: *Bestimmung des Abriebs und der Erosion von Betonen mittels eines Gesteinstoff-Wassergemisches*, Technische Hochschule Wismar, Diss., 1989
- [35] Helbig U., Horlacher H.B.: *Ein Approximationsverfahren zur rechnerischen Bestimmung des Hydroabrasionsverschleißes an überströmten Betonflächen*, Bautechnik 84, Nr. 12, pp. 854-861, 2007
- [36] Hu X.G., Momber A.W., Yin Y.G.: *Hydro-abrasive erosion of steel-fibre reinforced hydraulic concrete*, Wear 253, pp.848–854, 2002
- [37] Horszczaruk E.: *Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures*, Wear 259, pp.62–69, 2005
- [38] Ghafoori N., Diawara H.: *Abrasion Resistance of Fine Aggregate Replaced Silica Fume Concrete*, ACI Materials Journal 96, Nr. 5, pp. 559-567, 1999
- [39] Sadegzadeh M.: *Abrasion Resistance of Concrete*, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Aston in Birmingham, 1985
- [40] Popovics S., McDonald W.E.: *Inspection of the engineering condition of underwater concrete structures. Repair, Evaluation, Maintenance, and Rehabilitation Research Program*, Technical Report REMR-CS-9, US Army Corps of Engineers, 1989
- [41] Momber A.W., Kovacevic R.: *Accelerated high speed water erosion test for concrete wear debris analysis*, Tibol. Trans. 39, pp.943–949, 1996
- [42] Hu X., Momber A.W., Yin Y.: *Flüssigkeitserosion und Hydroabrasivverschleiß von Stahlfaserbeton*, Beton- und Stahlbetonbau 98, Nr. 12, pp. 764-772, 2003
- [43] Hu X.G., Momber A.W., Yin Y., Wang H., Cui D.M.: *High-speed hydrodynamic wear of steel-fibre reinforced hydraulic concrete*, Wear 257, pp.441–450, 2004
- [44] Hallauer O.: *Die Abriebbeanspruchung von Tosbecken. Internationales Symposium über Erosion, Abrasion und Kavitation im Wasserbau, 19.-21. Oktober 1988 in Zürich*, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 99, pp. 63-93, 1988
- [45] Dhir R.K., Hewlett P.C., Chan Y.N.: *Near-surface characteristics of concrete: abrasion resistance*, Materials and Structures 24, pp. 122-128, 1991
- [46] Liu T.C.: *Abrasion Resistance of Concrete*, ACI Journal, Nr. 9/10, pp. 341-350, 1981
- [47] Gjörv O.E., Baerland T., Ronning H.R.: *Abrasion Resistance of High-Strength Concrete Pavements*, Concrete International, Nr.1, pp. 45-48, 1990
- [48] Grübl P., Weigler H., Sieghart K.: *Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften*, Ernst & Sohn Verlag, 2001
- [49] Kiliç A., Atiş C.D., Teymen A., Karahan O., Özcan F., Bilim C., Özdemir M.: *The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete*, Cement & Concrete Composites 30, pp. 290-296, 2008
- [50] Werthmann E.: *Synthetischer Hartzuschlag für abriebfesten Beton*, Beton, Nr. 3, pp. 132-134, 1999
- [51] Pat M.G.M., Reinhardt H.W.: *Erosion of Concrete*, Heron 24, Nr. 3, 1979
-

- 
- [52] DIN 1045-2: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Beuth Verlag, August 2008
- [53] SRPS U.E3.010:1987 *Hidrotehnički beton – Tehnički uslovi za izradu i upotrebu*
- [54] Zimbelmann R.: *A Contribution to the Problem of Cement-Aggregate Bond*, Cement and Concrete Research 15., Nr. 5, pp. 801-808, 1985
- [55] Zimbelmann R.: *A Method for Strengthening the Bond between Cement Stone and Aggregates*, Cement and Concrete Research 17, Nr. 4, pp. 651-660, 1987
- [56] Röhling S., Eifert H., Kaden R.: *Betonbau – Planung und Ausführung*, Verlag Bauwesen, 2000
- [57] Grdic Z., Curcic G.T., Ristic N., Despotovic, I.: *Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers*, Constr Build Mater, 27, pp. 305–312, 2012
- [58] Kormann A.C.M., Portella K.F., Pereira P.N., Santos R.P.: *Study of the performance of four repairing material systems for hydraulic structures of concrete dams*, Cerâmika 49, pp. 48-54, 2003
- [59] Naik T.R., Singh S.S., Hossain M.M.: *Abrasion Resistance of High-Strength Concrete Made with Class C Fly Ash*, ACI Materials Journal 92(6), pp. 649-659, 1995
- [60] Naik T.R., Singh S.S., Ramme B.W.: *Effect of Source of Fly Ash on Abrasion Resistance of Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering 14, Nr. 5, pp. 417-426, 2002
- [61] Siddique R.: *Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the abrasion resistance of concrete*, Cement and Concrete Research 33, pp. 1877-1881, 2003
- [62] Li H., Zhang M.-H.; Ou J.-P.: *Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement*, Wear 260, pp. 1262-1266, 2006
- [63] Kettle R., Sadegzadeh M.: *Abrasion resistance of concrete and the new BS 8204: Part 2*, Concrete, Nr. 2, pp. 18-21, 2000
- [64] Kunterding R.: *Beanspruchung der Oberfläche von Stahlbetonsilos durch Schüttgüter*, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Diss., 1991
- [65] Pat M.G.M., Reinhardt H.W.: *Erosion of Concrete*, Heron 24, Nr. 3, 1979
- [66] Vassou V.C., Short N.R., Kettle R.J.: *Microstructural Investigations into the Abrasion Resistance of Fiber-Reinforced Concrete Floor*, Journal of Materials in Civil Engineering 20, Nr. 2, pp. 157-168, 2008
- [67] Atiş C.D.: *Abrasion-Porosity-Strength Model for Fly Ash Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering 15, Nr. 4, pp. 408-410, 2003
- [68] Šušteršič J.: *Abrazijsko odporni betoni*, 11. slovenski kolokvij o betonih – Gradnja z betoni visokih zmogljivosti, Zbornik gradiv in referatov, Ljubljana, Slovenia, pp. 41-48, 2004
- [69] Bušaltić I.: *Ispitivanje kvaliteta elektrofilterskog pepela TE Kakanj u funkciji njegove upotrebe u industriji cementa*, Zbornik radova 6. naučno-stručnog skupa sa međunarodnim učešćem “Kvalitet 2009”, Neum, Bosna i Hercegovina, st. 471-476, 2009
-

- 
- [70] ASTM C595-07 (2007): *Standard specification for blended hydraulic*, Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania; 2007.
- [71] ASTM C618-05 (2005): *Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete*, Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2005
- [72] Papadakis V.G: *Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. Low-calcium fly ash*. Cement and Concrete Research 29(1), pp.1727-36, 1999
- [73] Federal Highway Administration (FHWA), American Coal Ash Association (ACAA). *Fly ash facts for highway engineers*, Federal Highway Administration (FHWA); Report nr FHWA-IF-03-019, 2003
- [74] SRPS EN 197-1:2013 *Cement – Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente*, Institut za standardizaciju Srbije, 2013
- [75] Collins R.J, Ciesielski S.K: *Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction*, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board; Washington, DC, 1994
- [76] Dockter B.A, Jagiella D.M: *Engineering and environmental specifications of state agencies for utilization and disposal of coal combustion products*, 2005 world of coal ash conference, Lexington, KY., 2005
- [77] Halstead W.J.: *Use of fly ash in concrete*. Transportation Research Board; Washington, D.C.: 1986
- [78] Cook J.E.: *A ready-mixed concrete company's experience with class C ash*, National Ready-Mix Concrete Association; Silver Spring, Maryland. Report nr 163, 1981
- [79] ACI 211.4R. *Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash*, Report nr ACI 211.4R, 1993
- [80] Meyers J.F, Pichumani R., Kapples B.S.: *Fly ash: A highway construction material*, Washington, DC: Federal Highway Administration (FHWA), Report nr FHWA-IP-76-16, 1976
- [81] Freeman E., Gao Y., Hurt R, Suuberg E.: *Interactions of carbon-containing fly ash with commercial air-entraining admixtures for concrete*. Fuel 6;76(8), pp.761-765, 1997
- [82] Hester J.A.: *Fly ash in roadway construction*. First ash utilization symposium, U.S. Bureau of Mines, Washington, D.C., 1967.
- [83] Jia X., Zhou S.: *Effect of low-calcium fly ash on the resistance of cement mortar to sulfate attack in the form of acid rain*, Key Engineering Materials, 302-303, pp84-90, 2006
- [84] Dunstan E.R.Jr.: *A possible method for identifying fly ashes that will improve sulfate resistance of concrete*, Cement, Concrete and Aggregates, 2(1), 1980
- [85] Helmuth R.: *Fly ash in cement and concrete*, Skokie, Illinois: Portland Cement Association, Report nr SP040.01T, 1987
- [86] Chang-Seon S., Shondeep L.S., Zollinger D.G.: *Application of modified ASTM C1260 test for fly ash-cement mixtures*, Transportation Research Record, 2003
-

- 
- [87] Yen T., Hsu T.H., Lui Y.W., Chen S.H.: *Influence of class F ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete*, Construction and Building Materials 21, pp. 458–463, 2007
- [88] ASTM C1138-97, *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997
- [89] Ristić N., Grdić Z., Topličić-Ćurčić G., Grdić D.: *The influence of partial cement replacement by fly ash and silica fume on the hydro-abrasive resistance of concrete*, Proceedings of the RILEM International workshop on performance – based specification and control of concrete durability, 11 – 13 June 2014, Zagreb, Croatia, ISBN 978-2-35158-135-3, e-ISBN 978-2-35158-136-0, p.p. 33 – 40, 2014
- [90] Choi S., Bolander J.E.: *A Topology Measurement Method Examining Hydraulic Abrasion of High Workability Concrete*, KSCE Journal of Civil Engineering 16(5), pp. 771-778, 2012
- [91] ASTM C944 / C944M-12, *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
- [92] Atiş C.D., Celik O.N.: *Relation between abrasion resistance and flexural strength of high volume fly ash concrete*, Materials and Structures, Vol. 35, pp. 257 – 260, 2002
- [93] Ramana G.V., Potharaju M., mahure N.V., Ratnam M.: *Abrasion resistance of multi blended concrete mixes containing fly ash and silica fume*, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), ISSN:0975-5462, Vol. 6, No.6, pp. 388 – 395, 2014
- [94] Rashad A.M., Seleem H.H., Shaheen A.F.: *Effect of Silica Fume and Slag on Compressive Strength and Abrasion Resistance of HVFA Concrete*, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.8, No.1, pp.69–81, 2014
- [95] Siddique R.: *Wear resistance of high-volume fly ash concrete*, Leonardo Journal of Sciences 17, ISSN 1583-0233, pp. 21 – 36, 2010
- [96] Cavdar A., Yetgin S.: *Investigation of abrasion resistance of cement mortar with different pozzolanic compositions and subjected to sulfated medium*, Construction and Building Materials 24, pp. 461–470, 2010
- [97] Siddique R., Khatid J.: *Abrasion resistance and mechanical properties of high-volume fly ash concrete*, Materials and Structures 43, pp. 709–718, 2010
- [98] SRPS EN 13263-1:2010 *Silikatna prašina za beton - Deo 1: Definicije, zahtevi i kriterijumi usaglašenosti*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [99] ACI 234R-96(2000): *Guide for the use of silica fume in concrete*, American Concrete Institute, ACI Committee 234, 1996 (Reapproved 2000)
- [100] Siddique R., Khan M.I.: *Supplementary Cementing Materials*, Engineering Materials, DOI: 10.1007/978-3-642-17866-5-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011
- [101] Kurdowski W., Nocun-Wczelik W.: *The tricalcium silicate hydration in the presence of active silica*, Cement and Concret Research 13(3), pp. 341–348, 1983
- [102] Uchikawa H., Uchida S.: *Influence of pozzolans on the hydration of C3A*, Seventh International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, pp. IV-23–IV-29, 1980
-

- 
- [103] Lohtia R.P., Joshi R.C.: *Mineral admixtures*, Ramachandran, V.S. (ed.) Concrete Admixture Handbook, Noyes Publications, USA, 1153pp., 1996
- [104] Langan B.W., Weng K., Ward M.A.: *Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland Cement*, Cement and Concrete Research 32(7), pp. 1045–1051, 2002
- [105] Kadri E.H., Duval R.: Hydration heat kinetics of concrete with silica fume. Construction and Building Materials 23(11), pp. 3388–3392, 2009
- [106] Rao G.A.: *Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars*, Cement and Concrete Research 33(11), pp. 1765–1770, 2003
- [107] Qing Y., Zenan Z., Deyu K., Rongshen C.: *Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume*. Construction and Building Materials 21(3), pp. 539–545, 2007
- [108] Wong, H.S., Razak, H.A.: *Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance*, Cement and Concrete Research 35(4), pp. 696–702, 2005
- [109] Mazloom M., Ramezani pour A.A., Brooks J.J.: *Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete*, Cement and Concrete Composites 26(4), pp.347–357, 2004
- [110] Bhanja S., Sengupta B.: Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. Cement and Concrete Research 35(4), pp.743–747, 2005
- [111] Hooton R.D.: *Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack freezing and thawing, and alkali–silica reactivity*, ACI Materials Journal 90(2), pp.143–152, 1993
- [112] Güneyisi E., Gesog<sup>u</sup>lu M., Özturan T.: *Properties of rubberized concretes containing silica fume*, Cement and Concrete Research 34(12), pp. 2309–2317, 2004
- [113] Gjørv O.E., Monteiro P.J.M, Mehta P.K.: *Effect of condensed silica fume on the steel – concrete bond*, Norwegian Institute of Technology Trondheim, Report BML 86.201, 1986
- [114] Perraton D., Aitcin P.C., Vezina D.: *Permeabilities of silica fume concretes*, ACI Special Publications SP-108, pp. 63–84, 1988
- [115] Feldman R.F.: *Influence of condensed silica fume and sand/cement ratio on pore structure and frost resistance of Portland cement mortars*, ACI Special Publications SP-91, pp. 973–990, 1986
- [116] Sørensen E.V.: *Freezing and thawing resistance of condensed silica fume concrete exposed to deicing chemicals*, ACI Special Publications SP-79 (2), pp. 709–718, 1983
- [117] Sellevold E.J., Nilsen T.: *Condensed silica fume in concrete: a world review*, Malhotra, V.M. (ed) Supplementary Cementing Materials for Concrete, Ottawa, pp. 165–243, 1987
- [118] Cohen M.D., Bentur A.: *Durability of Portland-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions*. ACI Materials Journal 85(3), pp.148–157, 1988
- [119] Skjolsvold O.: *Carbonation depths of concrete with and with out condensed silica fume*, ACI Special Publications SP-91, pp. 1031–1048, 1986
-

- 
- [120] Schubert P.: *Carbonation behaviour of mortars and concrete made with fly ash*, ACI Special Publications SP-100, pp. 1945–1962, 1987
- [121] Grimaldi G., Carpio J., Raharinaivo A.: *Effect of silica fume on carbonation and chloride penetration in mortars*, Alsali, M. (ed.) Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, pp. 320–334, 1989
- [122] He Z., Chen X., Zang H, Cai X.: *Hidro-abrasive erosion of concrete incorporated with nano-SiO<sub>2</sub>, super-fine slag or rubber powder*, Wuhan University, Journal of Natural Sciences, Vo. 18 No. 6, pp.535-540, 2013
- [123] Kryžanowski A., Mikoš M., Šušteršič J., Planinc I.: *Abrasion resistance of concrete in hydraulic structures*, ACI Materials Journal, Vo. 106 No.4, pp.349-356, 2009
- [124] Riahi S., Nazari A.: *Compressive strength and abrasion resistance of concrete containing SiO<sub>2</sub> i SuO nanoparticles in different curing media*, Science China, Technological Sciences, Vo. 54, No. 9, pp 2349 – 2356, 2011
- [125] Horszczaruk E.: *Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete*, Wear 267, pp.110 – 115, 2009
- [126] Liu Y.W., Lee C.C., Pann K.S.: *Effects of fiber and silica fume reinforcement on abrasion resistance of hydraulic repair concrete*, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3, pp.877 – 880, 2009
- [127] Nili M., Afroughsabet V.: *The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete*, Construction and Building Materials 24, pp.927–933, 2010
- [128] Horszczaruk E.: *Mathematical model of abrasive wear of high performance concrete*, Wear 264, pp.113 – 118, 2008
- [129] Ribeiro A.C.B., Almeida I.R.: *Study of high performance roller compacted concrete*, Materials and Structures, Vo. 33, pp.398 – 402, 2000
- [130] Siddique R.: *Waste Materials and By-Products in Concrete. Scrap Tires*, Chapter 4, Springer; 1st. ed., pp. 121-145, 2007
- [131] Kerševicius V.: *Rubber waste – raw materials for building: technical and economical aspects of utilization environmental research*, Eng Manag, 3 (21), pp.72–77, 2002
- [132] Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A.A.: *Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete*, Constr Build Mater, 23(5), pp.1828-1836, 2009
- [133] ETRMA – European tyre and rubber manufacturers association, "*End of life tyres - A valuable resource with growing potential*", 2010
- [134] Serdar M., Baričević, A., Lakušić S., Bjegović D.: *Special purpose concrete product from waste tyre recyclates*, Građevinar 65(9), pp. 793 – 801, 2013
- [135] Al-Tayeb M.M., Abu Bakar B.H., Ismail H., Akil H.M.: *Effect of partial replacement of sand by fine crumb rubber on impact load behavior of concrete beam: experiment and nonlinear dynamic analysis*, Mater Struct doi: 10.1617/s11527-012-9974-3, 2012
- [136] Ozbay E., Lachemi M., Sevim U.K.: *Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption capacity of rubberized concretes with and without slag*, Mater Struct, 44, pp.1297–1307, 2011
-



- 
- [137] Bjegović D., Lakušić S., Serdar M., Baričević A.: *Properties of concrete with components from waste tyre recycling*, 6th Central European Congress on Concrete Engineering Marianske Lazne, Czech Republic, 30th September - 09th October 2010., pp.134-140
- [138] Topçu I., Demir A.: *Durability of rubberized mortar and concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering 19, pp. 173 – 178, 2007
- [139] Grdić Z., Topličić-Ćurčić G. Ristić N., Grdić D., Mitković P.: *Hydro-abrasive resistance and mechanical properties of rubberized concrete*, Građevinar 66(1), pp. 11 – 20, 2014
- [140] Khatib Z.K., Bayomy F.M.: *Rubberized Portland cement concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering 11, pp. 206–213, 1999
- [141] Batayneh M.K., Marie I., Asi I.: *Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries*, Waste Management 28, pp.2171 – 2176, 2008
- [142] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozturan T.: *Properties of rubberized concretes containing silica fume*, Cement and Concrete Research 34, 2309–2317, 2004
- [143] Sukontasukkul P., Chaikaew C.: *Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber*, Construction and Building Materials, 20, pp. 450–457, 2004
- [144] Siddique R., Naik T.R.: *Properties of concrete containing scrap tire rubber - an overview*, Waste management, vol. 24, no. 6, pp. 563–569, 2004
- [145] Turatsinze A, Garros M. On the modulus of elasticity and strain capacity of self compacting concrete incorporating rubber aggregate. Resour Conserv Recyc 52, pp. 1209 –1215, 2008
- [146] Nehdi M., Khan, A.: *Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber : An Overview of Engineering Properties and Potential Applications*, Cement, concrete and aggregates, vol. 23, no. 1, pp. 3–10, 2001
- [147] Cairns R., Kew H.Y., Kenny M.J.: *The Use of Recycled Rubber Tyres in Concrete Construction*, Final Report, University of Strath clyde, Glasgow, UK, 2004
- [148] Albano C., Camacho N., Reyes J., Feliu J., Hernández M.: *Influence of scrap rubber addition to Portland concrete composites: destructive and non-destructive testing*, Composte Structure 71, pp.439–46, 2005
- [149] Bignozzi M., Sandrolini F.: *Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research 36, pp. 735–739, 2006
- [150] Benazzouk A., Douzane O., Langlet T., Mezreb K., Roucoult J., Queneudec M.: *Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes*, Cement and Concrete Composites 29(10), pp. 732–740, 2007
- [151] Ghaly A, Cahill J. Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete. Can J Civil Eng 32, pp.1075–1081, 2005
- [152] Ganjian E, Khorami M, Maghsoudi A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, Construction and Building Materials 23, pp.1828–1836, 2009

- 
- [153] Khaloo A.R., Dehestani M., Rahmatabadi R.: *Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles*, Waste Manag 28, pp. 2472 – 2482, 2008
- [154] Sukontasukkul P. *Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pré-cast concrete panel*, Construction and Building Materials 23, pp. 1084–1092, 2009
- [155] Mohammed B.S., Azmi N.J., Abdullahi M.: *Evaluation of rubbercrete based of ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests*, Construction and Building Materials 25, pp. 1388-1397, 2011
- [156] Khorami M., Ganjian E., Vafaii A.: *Mechanical Properties of Concrete with Waste Tire Rubbers as Coarse Aggregates*, Proceeding of Special sections on International conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (pp. 85– 90). Coventry University, 2007.
- [157] Skripkiunas G., Grinys A., Cernius B.: *Deformation properties of concrete with rubber waste additives*, Mater Sci 13, pp.219–223, 2007
- [158] Turatsinze A., Bonnet S., Granju J.: *Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance*, Construction and Building Materials 21, pp.176–181, 2007
- [159] Zheng L., Huo S., Yuan Y.: *Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete*, Construction and Building Materials 22, pp939–947, 2008
- [160] Zheng L., Huo X., Yuan Y.: *Strength, modulus of elasticity, and brittleness index of rubberized concrete*, J Mater Civ Eng 20, pp.692–699, 2008
- [161] Li G., Garrick G., Eggers J., Abadie C., Stubblefield M., Pang S.: *Waste tire fiber modified concrete*, Composites: Part B, pp. 35:305–312, 2004
- [162] Balaha M., Badawy A., Hashish M.: *Effect of using ground waste tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes*, Indian J Eng Mater Sci 14, pp.427–435, 2007
- [163] Ling T., Nor H., Hainin M., Chik A.: *Laboratory performance of crumb rubber concrete block pavement*, Int J Pavement Eng 10, pp.361–374, 2009
- [164] Oikonomou N., Mavridou S.: *Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires*. Cement and Concrete Composites 31(6), pp. 403–407, 2009
- [165] Gesoğlu M., Guneyisi E.: *Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume*, Materials and Structures 40(9), pp. 953–964, 2007
- [166] Ling T., Nor H., Lim S.: *Using recycled waste tyres in concrete paving blocks*, Proc Inst Civ Eng: Waste Resour Manage 163, pp.37–45, 2010
- [167] Freitas C., Galvão J., Portella K., Joukoski A., Filho C.: *Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus*, Química Nova 32, pp.913–918, 2009
- [168] Lohmann M.: *Kunststoffasfalterbeton – Eigenschaften des Frischbetons und des erhaerteten Betons*, Universitaet – Gesamthochschule Essen, Deutschland, 1997
-

- 
- [169] Balaguru P.N., Shah S.P.: *Fiber reinforced cementitious materials*, Mc Graw-Hill, New York, 1992
- [170] Bentur A., Mindess S.: *Fiber reinforced cementitious composites*, Elsevier applied science, London, UK, 1993
- [171] Zollo R.F.: *Fiber-reinforced concrete: an overview after 3 years of development*, Cement and Concrete Composites 19, pp. 107 – 122, 1997
- [172] Zakić D.: *Istraživanje parametara duktilnosti i udarne otpornosti sitnozrnih betona mikroarmiranih sintetičkim vlaknima*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2010
- [173] Edington J.E., Hannant P.J., Williams R.I.T.: *Steel Fibre Reinforced Concrete*, Building Research Establishment, BRE Current Paper CP 69/74, 1974
- [174] Swamy R.N., Mangat P.S.: *Influence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete*, Cement and Concrete Research Vol. 4, No. 3, pp. 451–465, 1974
- [175] ACI Committee 544.3R-84, *Guide for Specifying, Mixing, Placing and Finishing Steel Fibre Reinforced Concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 81, No. 2, pp. 140–148, 1984.
- [176] Thirumurugan S., Siva Kumar A.: *Compressive Strength Index of Crimped Polypropylene Fibers in High Strength Cementitious Matrix*, World Applied Sciences Journal 24 (6), pp.698-702, 2013
- [177] Gencil O., Ozel C., Brostow W., Martinez-Barrera G.: *Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced with Polypropylene Fibres*, Materials Research Innovations Vol 15, No. 3, pp. 216 – 225, 2011
- [178] Patel P.A., Desai A.K., Desai J.A.: *Evaluation Of Engineering Properties for Polypropylene Fibre Reinforced Concrete*, International Journal of Advanced Engineering Technology, Vol. 3, Issue 1, pp. 42-45, 2012
- [179] Gul M., Bashir A., Naqash J.A.: *Study of modulus elasticity of Steel Fiber Reinforced Concrete*, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-3, Issue-4, pp. 304 – 309, 2014
- [180] Blagojević P.: *Eksperimentalno – teorijska analiza graničnih stanja nosača od mikroarmiranog betona*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, 2012
- [181] Ristic, N., Grdic, Z., Toplicic-Curcic, G., Despotovic, I.: *Hydroabrasive resistance of micro-reinforced concrete with steel and polypropylene fibres*, International symposium about research and application of modern achievements in civil engineering in the field of materials and structures, Tara, Serbia, pp. 125 – 134., 2011
- [182] Murahari K., Rao R.M.: *Effects of Polypropylene fibres on the strength properties Of fly ash based concrete*, International Journal of Engineering Science Invention, Volume 2 Issue 5, pp.13-19, 2013
- [183] Ramadevi V., Venkatesh Babu D.L.: *Flexural behavior of hybrid (steel and polypropylene) fibre reinforced concrete beams*, European Journal of Scientific Research, vol. 70 no. 1, pp. 81-87, 2012.
- [184] Prasad M., Rajeev C., Rakesh G.: *A Comparative Study of Polypropylene Fibre Reinforced Silica Fume Concrete with Plain Cement Concrete*, International Journal of Engineering Research and Science & Technology, Vol 2 , No 4, pp 127- 136, 2013
-

- 
- [185] Atis C.D., Karahan O.: Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete, *Construction and Building Materials* 23, pp. 392 – 399, 2009
- [186] Jan Z., Stang H.: *Fatigue performance in flexure of fiber reinforced concrete*, *ACI Materials Journal*, No 95, pp. 58 – 67, 1998
- [187] Vondran G.L., Nagabhusharam M., Zellers R.: Performance characteristics of polypropylene fiber reinforced concrete, *Fiber Reinforced cement and Concretes: Recent Developments*, Elsevier, New York, pp. 533 – 543, 1989
- [188] Khaloo A., Raisi E.M., Hosseini P., Tahsiri H.: *Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with steel fibers*, *Construction and Building Materials* 51, pp. 179 – 186, 2014
- [189] British Board of Agreement: *Certificate No 92/2830 related to „Fibrin 23“ crimped monofilament polypropylene fibers*, Watford, UK, 1995
- [190] SRPS B.B8.015:1984 *Ispitivanje otpornosti prema habanju brušenjem*, Institut za standardizaciju Srbije, 1984
- [191] Alexander M. G.: *Towards standard tests for abrasion resistance of concrete – Report on a limited number of tests studied, with a critical evaluation*, *Matériaux et Constructions* 18, Nr. 106, pp. 297-307, 1984
- [192] ASTM C 418-98: *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998
- [193] Huber H., Rozinski F.: *Durotec-GF-EP-Platten als Schutzverkleidung für abrasionsund kavitationsbeanspruchte Bauteile*, *Energie-Wirtschaft – Wien, Zeitschrift für die Anwendung der Energie in Wissenschaft*, 1977
- [194] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): *Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau (RPG)*, 1994
- [195] Helbig U., Horlacher H.-B., Schmutterer C., Engler T.: *Möglichkeit zur Erhöhung der Festigkeit abrasionsbeanspruchter Betonoberflächen bei wasserbaulichen Anlagen*, *Bautechnik* 82, Nr. 12, pp. 869-877, 2005
- [196] Haroske G.: *Beitrag zum Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen*. Universität Rostock, Fachgebiet Baustoffe, Diss., 1998
- [197] SRPS U.M1.057:1984 *Beton – Granulometrijski sastav mešavine agregata za beton*, Institut za standardizaciju Srbije, 1984
- [198] SRPS EN 12350-2:2010 *Ispitivanje svežeg betona – Deo 2: Ispitivanje sleganja*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [199] SRPS EN 12350-6:2010 *Ispitivanje svežeg betona – Deo 6: Zapreminska masa*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [200] SRPS EN 12350-7:2010 *Ispitivanje svežeg betona – Deo 7: Sadržaj vazduha - Metode pritiska*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [201] SRPS EN 12390-7:2010 *Ispitivanje očvrslog betona – Deo 7: Zapreminska masa očvrslog betona*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [202] SRPS EN 12390-3:2010 *Ispitivanje očvrslog betona – Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
-

- [203] SRPS EN 12390-5:2010 *Ispitivanje očvrstlog betona – Deo 5: Čvrstoća pri savijanju uzoraka za ispitivanje*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [204] SRPS EN 12390-6:2012 *Ispitivanje očvrstlog betona – Deo 6: Čvrstoća pri cepanju zatezanjem uzoraka za ispitivanje*, Institut za standardizaciju Srbije, 2012
- [205] SRPS EN 12504-2:2008 *Ispitivanje betonskih konstrukcija – Deo 2: Ispitivanje bez razaranja — Određivanje veličine odskoka*, Institut za standardizaciju Srbije, 2008
- [206] SRPS EN 12504-4:2008 *Ispitivanje betonskih konstrukcija – Deo 4: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa*, Institut za standardizaciju Srbije, 2008
- [207] SRPS ISO 6784:2000 *Beton – Određivanje statičkog modula elastičnosti pri pritisku*, Institut za standardizaciju Srbije, 2000
- [208] SRPS EN 1542:2010 *Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Merenje prionljivosti "pull-off" metodom*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [209] Štímer N., Ukrainczyk V.: *Model nadsloja industrijskog poda od udarnim opterećenjem*, Zbornik radova sa 12. Slovenskog kolokvija o betonima „Novosti pri gradnji tlakov“ u organizaciji instituta IRMA, Ljubljana, str. 49-63, 2005
- [210] SRPS EN 196-1:2008 *Metode ispitivanja cementa – Deo 1: Ispitivanje čvrstoće*, Institut za standardizaciju Srbije, 2008
- [211] SRPS EN 196-3:2010 *Metode ispitivanja cementa – Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [212] SRPS EN 196-6:2011 *Metode ispitivanja cementa – Deo 6: Određivanje finoće mliva*, Institut za standardizaciju Srbije, 2011
- [213] SRPS B.C8.023:1997 *Cement - Određivanje zapreminske mase*, Institut za standardizaciju Srbije, 1997
- [214] SRPS EN 933-1:2013 *Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda prosejavanja*, Institut za standardizaciju Srbije, 2013
- [215] SRPS B.B2.010:1986 *Separisani agregat (granulat) za beton – Tehnički uslovi*, Institut za standardizaciju Srbije, 1986
- [216] SRPS B.B3.100:1983 *Kameni agregat - Frakcionisani kameni agregat za beton i asphalt – Osnovni uslovi kvaliteta*, Institut za standardizaciju Srbije, 1983
- [217] ASTM C618-12a, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
- [218] SRPS B.C1.018:2001 *Nemetalne mineralne sirovine – Pucolanski materijali – sastojci za proizvodnju cementa – Klasifikacija, tehnički uslovi i metode ispitivanja*, Institut za standardizaciju Srbije, 2001
- [219] Sika Fume – tehnički list, *Mineralni dodatak betonu – silikatna prašina*, Sika Srbija d.o.o., Izdanje 10.10.2007.
- [220] Sika ViscoCrete 3070 – tehnički list, *Superplastifikator na bazi modifikovanih polistearičnih estera (modifikovanih polikarboksilata) za betone sa produženom ugradivošću spravljene na fabrikama betona*, Sika Srbija d.o.o., Izdanje 02.04.2008.

- 
- [221] SRPS ISO 6783:1999 *Krupni agregati za beton – određivanje stvarne zapreminske mase i upijanja vode – Metoda pomoću hidrostatičke vage*, Institut za standardizaciju Srbije, 2001
- [222] Prospect of polypropylene fibers FIBRILs, *Polypropylene fibers for reinforcing concrete*, Motvoz Plast d.o.o. Grosuplje, Slovenia
- [223] *Report of testing concrete, micro-reinforced with polypropylene fibers FIBRILs*, Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Department for materials, Laboratory for concrete, Ljubljana, Slovenia, August 13<sup>th</sup> 2003
- [224] SRPS EN 10016-2:2008 – *Valjana žica od nelegiranog čelika za izvlačenje i/ili hladno valjanje – Deo 2: Posebni zahtevi za žicu za opštu namenu*, Institut za standardizaciju Srbije, 2008
- [225] Spajić čelična vlakna – tehnički list, *Tehničke karakteristike čeličnih vlakana tipa ZS/N 0,5x30mm i ZS/N 1,05x50mm*, Spajić d.o.o. Negotin, Srbija
- [226] SRPS EN 14889-1:2006 – *Vlakna za beton. Deo 1: Metalna vlakna. Definicije, specifikacije i usaglašenost*, Institut za standardizaciju Srbije, 2006
- [227] *Declaration of Conformity of Steel fibres for concrete type: ZS/N 0,5x30mm and ZS/N 1,05x50m produced by Spajić d.o.o. Negotin Serbia, with regulations of Council Directive 89/106/EHS*, Building Testing and Research Institute, Testing Laboratory Bratislava branch, Bratislava, Slovakia, 2010
- [228] SRPS EN 14845-2:2010 – *Metode ispitivanja vlakana u betonu – Deo 2: Uticaj na beton*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [229] SRPS EN 12350-3:2010 – *Ispitivanje svežeg betona – Deo 3: Vebeovo ispitivanje*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010
- [230] Wong C. M.: *Use of short fibres in structural concrete to enhance mechanical properties*, PhD Dissertation, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2004
- [231] ACI 544.1R-96: *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1996
- [232] RILEM Recommendation NDT 1: *Testing of concrete by the ultrasonic pulse method*, Paris, Dec. 1972.
- [233] Purnell P., Gan T.H, Hutchins D.A, Berriman J.: *Noncontact ultrasonic diagnostics in concrete: A preliminary investigation*, Cement and Concrete Research, Vol. 34, Issue 7, pp. 1185–1188, 2004
- [234] Standard BS 1881, Part 203: *Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete*, British Standards Institution, London, 1986
- [235] Jones R.: *The Non-Destructive Testing of Concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol. 1, Issue 2, pp. 67–78, 1949
- [236] Ranković S., Drenić D., Grdić Z.: *Experimental determination of the concrete type by the ultrasound method in densely reinforced cross-sections: Rigid body effect*, Zbornik radova Građevinskoarhitektonskog fakulteta u Nišu, no. 19, pp. 201–212, 2003
- [237] *Pundit Manual for the use*, C.N.S. Electronics Ltd., 61-63 Holmes Road, London, NW5
-

- 
- [238] Malhotra V. M., Carino N.J.: *Handbook on nondestructive testing of concrete*, CRC Press LLC, ASTM International, Chapter 8, 2004.
- [239] Al-Owaisy S. R.: *Post heat exposure properties of steel fiber reinforced concrete*, Journal of Engineering and Development, Vol. 10, No. 2, pp. 194-207, 2006
- [240] Topličić-Ćurčić G.: *Influence of Physico-Mechanical Characteristics of Various Kinds of Crushed Mineral Aggregate on the Concrete Properties with the Special Focus on Strength*, Ph.D. dissertation, Faculty of Civil Engineering and Architecture, University of Nis, 2009
- [241] Yalçinkaya Ç., Sznajder J., Beglarigale A., Sancakoğlu O., Yazıcı H.: *Abrasion resistance of reactive powder concrete: the influence of water-to-cement ratio and steel micro-fibers*, Advanced Materials Letters, 5(6), pp. 345-351, 2014
- [242] Kang J., Zhang B., Li G.: *The abrasion-resistance investigation of rubberized concrete*, Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition, Vol. 27, No. 6, pp. 1144-1148, 2012
- [243] Portella K. F., Moreira do Carmo J.B., Freitas C., Filho C.V.G., Hoppen C.: *The use of waste materials in utility poles, crossarms, paver, and reef balls concrete structures: Advantages and Care*, Hindawi Publishing Corporation Journal of Ceramics, pp. 1-8, 2013
- [244] Binici H., Aksogan O., Gorur E. B., Kaplan H., Bodur M. N.: *Hydro-abrasive erosion of concrete incorporating ground blast-furnace slag and ground basaltic pumice*, Construction and Building Materials 23, pp. 804–811, 2009
- [245] Hu X.G., Momber A.W., Yin Y.: *Erosive wear of hydraulic concrete with low steel fiber content*, Journal of Hydraulic Engineering 12, pp. 1331–1340, 2006
- [246] Song P.S., Hwang S., Sheu B.C.: *Strength properties of nylon-and polypropylene fiber-reinforced concretes*, Cement and Concrete Research 35, pp. 1546–1550, 2005
- [247] Higgins P., Kurtovich M.: *Repairing critical assets using high performance calcium aluminate cements*, M-NZ Concrete Society Conference, Wairakei, pp. 23–28, 2003
- [248] Tasdemir M.A., Ilki A., Yerlikaya M.: *Mechanical behaviour of steel fibre reinforced concrete used in hydraulic structures*, International Conference of Hydropower and Dams – HYDRO, 4–7 October, Kiris-Antalya, pp. 159–166, 2002
- [249] Wu C.H., Liu Y.W., Huang C.H., Yen T., Hsu T.H.: *Research on the abrasion erosion and impact resistance of fiber concrete*, National Chung-Hsing University Research and Development.
- [250] Song P.S., Hwang S.: *Mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete*, Construction and Building Materials 18, pp. 669–673, 2004
- [251] Pichor W., Dyczek J.: *Early formation on the interfacial zone in FRC with PAN fibers*, Proc. Int. Symposium Brittle Matrix Composites 5, PAN, Warsaw, pp. 74–78, 1997.
- [252] Bentour A., Mindess S.: *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Science, New York, 1990.
- [253] Portella K.F., Kormann A.C.M.: *Abrasive effects observed in concrete hydraulic surfaces of dams and application of repair materials*, Book: Abrasion Resistance of Materials, Edited by Marcin Adamiak, Rijeka, Croatia, 2012
-

## 8. PRILOZI

### 8.1. Oznake korišćene u disertaciji

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>	<u>Značenje oznake</u>
$w/b$	-	vodovezivni faktor
$\alpha$	$^{\circ}$	napadni ugao
$\sigma$	$N/mm^2$	normalni napon
$\tau$	$N/mm^2$	smičući napon
$m_p$	$g$	masa čestice abraziva
$v_p$	$m/s$	brzina čestice abraziva
$v_F$	$m/s$	brzina protoka
$d_p$	$mm$	prečnik čestice abraziva
$E_R$	$g/min$	stepen abrazivne erozije
$E_s$	$GPa$	statički modul elastičnosti
$f_p, f_c$	$MPa$	čvrstoća pri pritisku
$E_{R,V}$	$cm^3/min$	stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini
$DL\alpha$	$dB$	zvučna apsorpcija
$DI$	-	Indeks duktilnosti
$\varepsilon_u$	$\mu m/m$	dilatacija pri lomu
$\varepsilon_e$	$\mu m/m$	dilatacija na granici elastičnosti
$E_{R,m}$	$g/min$	stepen hidro-abrazivne erozije po masi
$m_1$	$g$	masa ispitnog uzorka osušenog do konstantne mase pre ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti
$m_2$	$g$	masa ispitnog uzorka osušenog do konstantne mase posle ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti
$t$	$min$	vreme delovanja mešavine vode i abraziva na ispitni uzorak prilikom ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti
$\gamma_{ocv.bet}$	$g/cm^3$	zapreminska masa uzorka betona osušenog do konstantne mase
$\Delta V$	$cm^3$	promena zapremine uzorka pre i posle ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti
$\Delta m$	$g$	promena mase uzorka pre i posle ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti
$E_{R,V}$	$cm^3/min$	stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini
$l$	$mm$	dužina vlakna
$d$	$mm$	prečnik vlakna
$\lambda$	-	faktor oblika mikro vlakna
$\gamma_{sv}$	$g/cm^3$	specifična masa vlakna
$f_{zv}$	$MPa$	čvrstoća pri zatezanju vlakna
$E_v$	$GPa$	modul elastičnosti vlakna
$\varepsilon_{uk}$	%	dilatacija pri kidanju
$T_v$	$^{\circ}C$	temperatura topljena vlakana
$m_w$	$kg$	masa vode
$m_b$	$kg$	masa veziva
$m_a$	$kg$	masa agregata
$\Delta h_{sr}$	$mm$	srednja vrednost sleganja betona



Oznaka	Jedinica	Značenje oznake
$\gamma_{b,sv}$	$kg/m^3$	zapreminska masa svežeg zbijenog betona
$\gamma_{sFA}$	$g/cm^3$	specifična masa elektrofilterskog pepela
$\gamma_{sSF}$	$g/cm^3$	specifična masa silikatne prašine
$\gamma_{sC}$	$g/cm^3$	specifična masa cementa
$\Delta p$	%	sadržaj vazduha u betonu
$\gamma_{bz}$	$g/cm^3$	zapreminska masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju
$m_{b,z}$	g	masa očvrslog betona u vodozasićenom stanju
$V_b$	$cm^3$	zapremina betonskog tela
$F_p$	N	sila loma betonskog tela pri pritisku
$A$	$mm^2$	površina na koju deluje sila pritiska
$\Delta f_p(t)$	$N/mm^2$	procentualna razlika čvrstoće pri pritisku pri starosti betona od $t$ dana
$f_{p,e}(t)$	$N/mm^2$	čvrstoća pri pritisku etalon uzorka pri starosti od $t$ dana
$f_p(t)$	$N/mm^2$	čvrstoća pri pritisku posmatranog uzorka betona pri starosti od $t$ dana
$f_{zs}$	$N/mm^2$	čvrstoća pri zatezanju savijanjem očvrslog betona
$M_{gr}$	$Nmm$	moment savijanja pri maksimalnom (graničnom) opterećenju
$W$	$mm^3$	otporni moment poprečnog preseka betonske epruvete
$P_{gr,s}$	N	sila loma (granično opterećenje) pri savijanju
$b$	mm	širina betonske epruvete
$h$	mm	visina betonske epruvete
$l_o$	mm	rastojanje između oslonaca
$\Delta f_{zs}$	$N/mm^2$	procentualna razlika čvrstoće pri savijanju betona
$f_{zs,e}$	$N/mm^2$	čvrstoća pri savijanju etalon uzorka
$f_{zc}$	$N/mm^2$	čvrstoća pri zatezanju cepanjem betona
$P_{gr,c}$	N	sila loma (granična sila pri kojoj dolazi do cepanja)
$D$	mm	prečnik betonskog ispitnog cilindra
$L$	mm	dužina betonskog ispitnog cilindra
$\Delta f_{zc}$	$N/mm^2$	procentualna razlika čvrstoće zatezanju cepanjem betona
$f_{zc,e}$	$N/mm^2$	čvrstoća pri zatezanju cepanjem etalon uzorka
$f_{za}$	$N/mm^2$	čvrstoća betona pri zatezanju metodom „Pull-off“
$F_{za}$	N	sila čupanja
$D$	mm	prečnik čeličnog pečata
$\Delta f_{za}$	$N/mm^2$	procentualna razlika čvrstoće pri zatezanju „Pull-off“ metodom
$f_{za,e}$	$N/mm^2$	čvrstoća pri zatezanju „Pull-off“ metodom etalon uzorka
$v_{uz}$	m/s	brzina ultrzvučnog impulsa
$l_p$	m	dužina putanje ultrazvuka
$t_e$	$\mu s$	efektivno vreme prolaska ultrazvuka
$\Delta v_{uz}$	m/s	procentualna razlika brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton
$v_{uz,e}$	m/s	brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak etalon betona
$N_s$	-	indeks odskoka sklerometra
$\Delta N_s$	-	procentualna razlika indeksa odskoka sklerometra
$N_{s,e}$	-	indeks odskoka sklerometra etalon betona
$\sigma_d$	$N/mm^2$	granica donjeg napona
$\sigma_g$	$N/mm^2$	granica gornjeg napona
$\Delta \sigma$	$N/mm^2$	razlika napona

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>	<u>Značenje oznake</u>
$\Delta\varepsilon$	$\mu\text{m}/\text{m}$	razlika dilatacija
$\varepsilon_d$	$\mu\text{m}/\text{m}$	dilatacija pri donjoj granici napona
$\varepsilon_g$	$\mu\text{m}/\text{m}$	dilatacija pri gornjoj granici napona
$\Delta E_s$	$\text{GPa}$	procentualna razlika statičkog modula elastičnosti betona
$E_{s,e}$	$\text{GPa}$	statičkog modula elastičnosti etalon betona
$N_1$	-	broj udaraca za nastanak prve prsline na uzorku
$N_2$	-	broj udaraca do loma uzorka
$E_1$	$\text{J}$	utrošena energija za nastanak prve prsline na uzorku
$E_2$	$\text{J}$	energija utrošena za nastanak loma uzorka
$E$	$\text{J}$	utrošena energija koja odgovara jednom udarcu tega
$E_N$	$\text{J}$	ukupna energija nakon $N$ udaraca tega
$N$	-	ukupan broj udaraca nakon koga se javlja oštećenje (lom) uzorka
$m_t$	$\text{kg}$	masa tega (udarna masa)
$v_t$	$\text{m}/\text{s}$	brzina udarne mase
$g$	$\text{m}/\text{s}^2$	ubrzanje Zemljine teže
$h_p$	$\text{m}$	visina sa koje pada teg (udarna masa)
$H_b$	$\text{cm}^3/50\text{cm}^2$	habanje brušenjem
$\Delta H_B$	$\text{cm}^3/50\text{cm}^2$	procentualna razlika habanja brušenjem
$H_{b,e}$	$\text{cm}^3/50\text{cm}^2$	habanje brušenjem etalon uzorka
$\Delta E_{R,V}$	$\text{cm}^3/\text{min}$	procentualna razlika stepena hidro-abrazivne erozije po zapremini
$E_{R,V,e}$	$\text{cm}^3/\text{min}$	stepen hidro-abrazivne erozije po zapremini etalon betona
$R^2$	-	koeficijent korelacije

Napomena: Korišćene oznake su navedene prema redosledu pojavljivanja u okviru disertacije.

## 8.2. Oštećenja hidrotehničkih objekata nastalih usled hidro-abrazivnog dejstva



*Slika 8.2.1. Oštećenje rečnog korita od betona usled hidro-abrazivnog habanja [29]*



*Slika 8.2.2. Prelivna ivice brane sa jasno izraženim hidro-abrazivnim oštećenjem [11]*



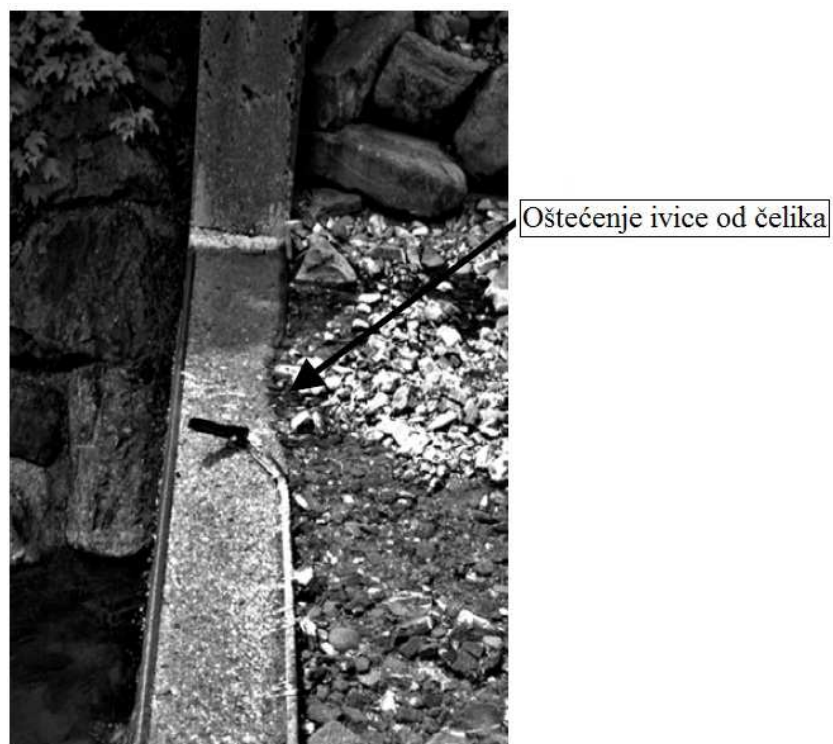
*Slika 8.2.3. Oštećena prelivna ivica brane na zahvatu HE „Temac“*



*Slika 8.2.4. Uticaj abrazije na strukturu betona brzotoka kanala za ispiranje nanosa na zahvatu HE „Temac“*



*Slika 8.2.5. Hidro-abrazivno oštećenje betonskog praga nastalo u koritu planinskog brzaka [11]*



*Slika 8.2.6. Oštećenje na spoju između betona i čelika nastalo u koritu planinskog brzaka [11]*



*Slika 8.2.7. Abrazivno oštećenje betonskog dna tunela za pražnjenje akumulacije [11]*



*Slika 8.2.8. Oštećenje prelivne brane usled abrazije [253]*



*Slika 8.2.9. Defekti na betonskoj konstrukciji uzrokovani abrazivnim procesom [253]*



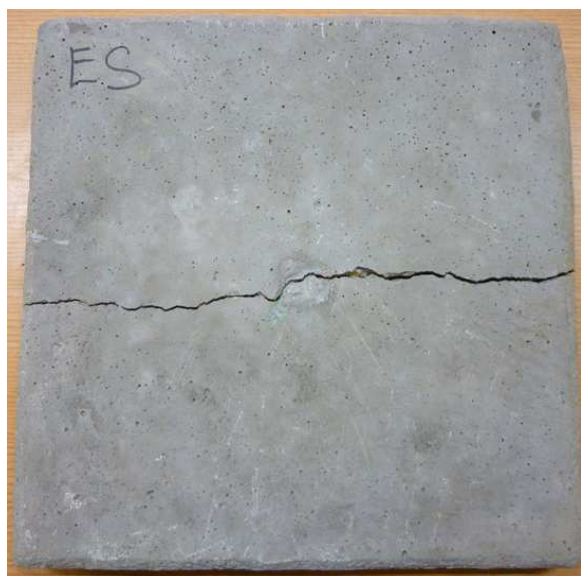
*Slika 8.2.10. Pogled na prelivnu branu (slika gore) i detalj deterioracije betona prouzrokovanog hidro-abrazivnim procesom (slika dole) [253]*

8.3. Foto prikaz betonskih uzoraka nakon ispitivanja udarne otpornosti

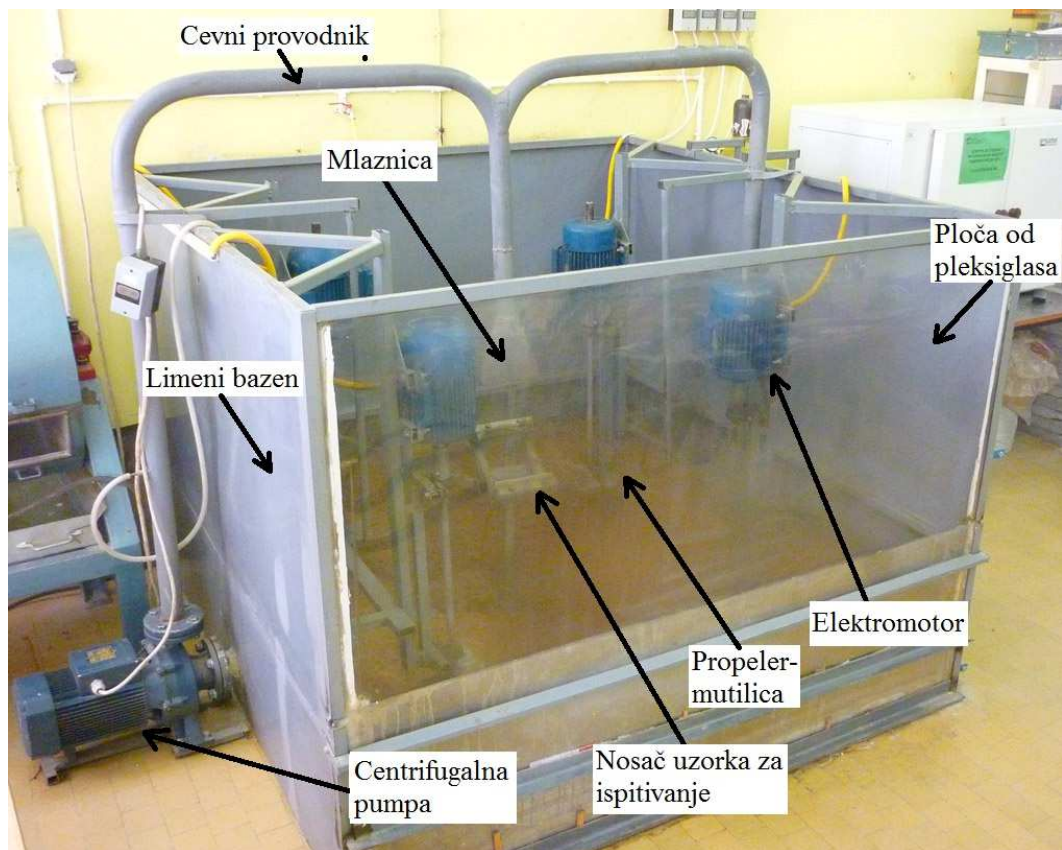




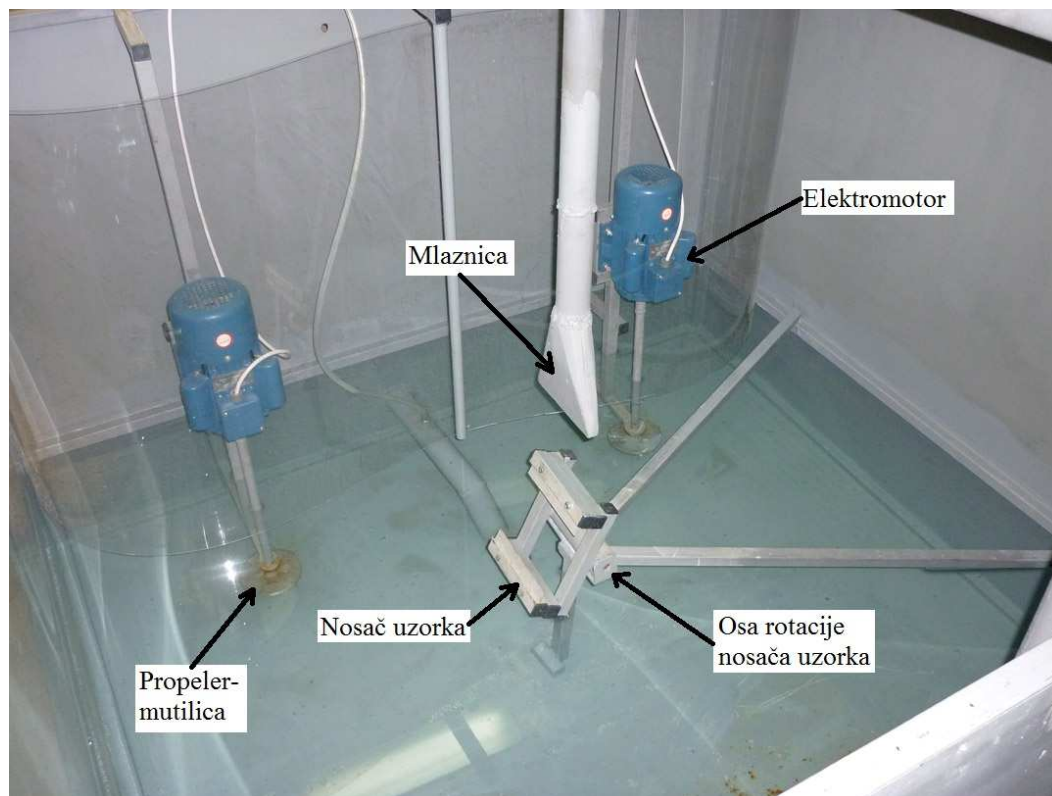




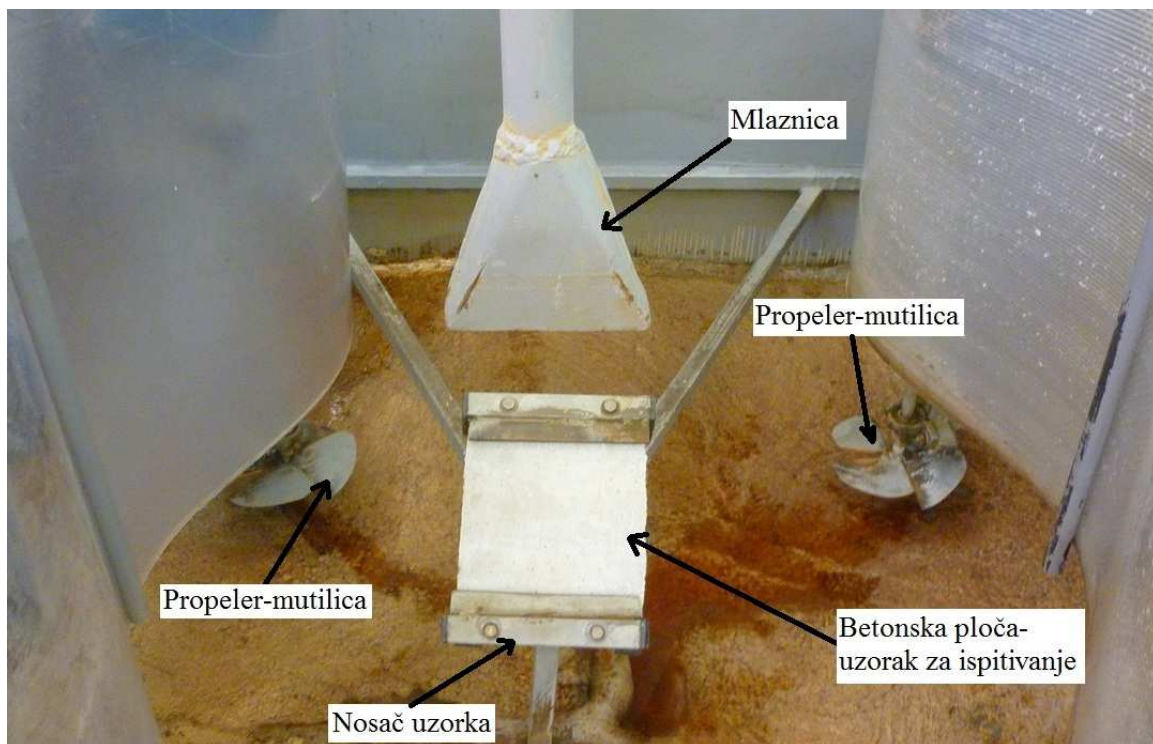
## 8.4. Foto prikaz aparature za ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti



Slika 8.4.1. Osnovni elementi aparature za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti



Slika 8.3.2. Prikaz mlaznice i nosača uzorka za ispitivanje



Slika 8.4.3. Betonski uzorak pripremljen za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti



Slika 8.4.4. Aparatura za ispitivanje hidro-abrazivne otpornosti betona u pogonu

8.4. Foto prikaz betonskih uzoraka nakon ispitivanja hidro-abrazivne otpornosti

