

Primljen / Received: 4.4.2017.

Ispravljen / Corrected: 11.7.2017.

Prihvaćen / Accepted: 14.8.2017.

Dostupno online / Available online: 10.11.2017.

Primjena recikliranih čeličnih vlakana u betonskim elementima izloženima zamoru

Autori:



Marina Frančić Smrkić, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
mfrancic@grad.hr



Izv.prof.dr.sc. **Domagoj Damjanović**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
ddomagoj@grad.hr



Doc.dr.sc. **Ana Baričević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za materijale
abaricevic@grad.hr

Prethodno priopćenje

Marina Frančić Smrkić, Domagoj Damjanović, Ana Baričević

Primjena recikliranih čeličnih vlakana u betonskim elementima izloženima zamoru

Dodavanjem čeličnih vlakana u beton poboljšavaju se njegova svojstva pri zamoru. Opisana su eksperimentalna istraživanja betonskih elemenata s recikliranim čeličnim vlaknima pri cikličkom opterećenju. Prikazani su proračunski modeli zamora prema fib Model Code 2010, ACI 215 i JSCE smjernicama. Rezultati proračunskih modela uspoređeni su s rezultatima eksperimentalnog istraživanja. Uočeno je da, u pravilu, svi proračunski modeli podcjenjuju eksperimentalno određenu otpornost betona pri zamoru. Dan je prijedlog korekcije fib Model Code modela.

Ključne riječi:

zamor, mikroarmirani beton, eksperimentalno istraživanje, čelična vlakna, proračunski model

Preliminary note

Marina Frančić Smrkić, Domagoj Damjanović, Ana Baričević

Application of recycled steel fibres in concrete elements subjected to fatigue loading

Properties of concrete elements under fatigue load can be enhanced by adding steel fibres to the concrete mixture. An experimental study of recycled steel fibre reinforced concrete elements subjected to cyclic load is described. Fatigue design models are presented according to the fib Model Code 2010, ACI 215, and JSCE guidance. Design model calculations are compared to the results of experimental analyses. It can be observed that, as a rule, all design models underestimate the experimentally obtained fatigue resistance of concrete elements. The adjustment of the fib Model Code design model is proposed.

Key words:

fatigue, fibre reinforced concrete, experimental analysis, steel fibres, design model

Vorherige Mitteilung

Marina Frančić Smrkić, Domagoj Damjanović, Ana Baričević

Verwendung von recycelten Stahlfasern in Betonelementen unter Ermüdungsbeanspruchung

Durch Zugabe von Stahlfasern werden die Eigenschaften von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung verbessert. In der Arbeit werden experimentelle Untersuchungen von Betonelementen mit recycelten Stahlfasern bei zyklischen Ermüdungsbeanspruchungen beschrieben. Es werden Bemessungsmodelle nach dem fib Model Code 2010, ACI 215 und den JSCE-Richtlinien dargestellt. Die Ergebnisse der Bemessungsmodelle wurden mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Bemessungsmodelle die experimentell festgelegte Ermüdungsbeständigkeit von Beton in der Regel unterschätzen. In der Arbeit wird ein Vorschlag für die Korrektur des Modells fib Model Code gegeben.

Schlüsselwörter:

Ermüdung, mikroarmierter Beton, experimentelle Untersuchung, Stahlfasern, Bemessungsmodell

1. Uvod

Zamor se definira kao pojava tijekom koje se materijal izložen cikličkom opterećenju razara pri naprezanju znatno manjem od svoje statičke čvrstoće [1]. Može se još opisati i kao proces progresivnih i trajnih unutarnjih strukturnih promjena u materijalu izazvanih cikličkim opterećenjem [2]. Kod betona je pojava zamora povezana s rastom mikropukotina koje tijekom cikličkog opterećenja prerastaju u makropukotine, što vodi ka smanjenju krutosti i promjeni mehaničkih karakteristika materijala. Upravo zbog svoje sposobnosti kontroliranja širenja pukotina, čelična vlakna mogu se koristiti u elementima i konstrukcijama izloženim cikličkom opterećenju (betonski kolnici, kolničke ploče mostova, temelji industrijskih postrojenja). S inženjerskog stajališta, zamor je važno uzeti u obzir pri procjeni stanja postojećih, kao i u projektiranju novih konstrukcija i elemenata koji će tijekom uporabljivosti biti izloženi velikom broju ponavljanja opterećenja. Posljednjih godina fenomen zamora postaje sve zanimljivija tema, posebno kod projektiranja mostova i njihovih kolničkih ploča zbog sve većih tehničkih zahtjeva (veće brzine, osovinska opterećenja i frekvencija prometa).

Šira primjena čeličnih vlakana ograničena je na mali broj konstrukcija, prije svega zbog visoke cijene, pa se brojna istraživanja usmjeravaju prema pronalasku alternativnih vrsta vlakana. Istraživanje primjene recikliranih čeličnih vlakana u građevinarstvu počelo je prije dvadesetak godina na Sveučilištu u Sheffieldu [3-7], a unatrag nekoliko godina odvija se i na Građevinskom fakultetu u Zagrebu [8-13]. Predmet istraživanja su uglavnom bila osnovna mehanička svojstva betona s recikliranim čeličnim vlaknima (tlačna i vlačna čvrstoća, žilavost) uz nekoliko slučajeva istraživanja praktične primjene toga materijala. Jedno od njih je istraživanje o mogućnosti primjene recikliranih čeličnih vlakana kao armature u betonskim kolnicima [7]. Proučavan je utjecaj cikličkog opterećenja, tj. zamora, na uzorke ojačane vlaknima i dobiveni su obećavajući rezultati s obzirom na očiti pozitivni utjecaj vlakana kod takvog tipa opterećenja. Dosadašnja istraživanja pokazala su da reciklirana čelična vlakna zbog svojih svojstava ne mogu u potpunosti zamijeniti industrijska čelična vlakna, ali mogu uspješno zamijeniti njihov određeni udio [14, 15]. Tako se razvila ideja o kombiniranju industrijskih i recikliranih čeličnih vlakana pri čemu nastaje hibridni mikroarmirani beton (dalje: HMAB).

U kontekstu zamora, HMAB ima veliki potencijal za primjenu jer reciklirana čelična vlakna zbog svojih dimenzija (kraća su od industrijskih) mogu zadržavati širenje mikropukotina dok su industrijska vlakna učinkovitija pri zadržavanju makropukotina. Takvom kombinacijom mogao bi se ostvariti sinergijski učinak, tj. bolje zajedničko djelovanje, uz ekonomsku uštedu te bi se ujedno pridonijelo rješavanju ekološkog problema kako postupati s otpadnim automobilskim gumama. Navedena hipoteza djelomično je potvrđena pojedinačnim ispitivanjem utjecaja recikliranih i industrijskih vlakana u betonu [7], gdje je pokazano da se ona aktiviraju pri različitim širinama pukotina, zbog čega je intencija ovog istraživanja ocijeniti ponašanje HMAB-a pri zamoru.

2. Opis materijala i metoda ispitivanja

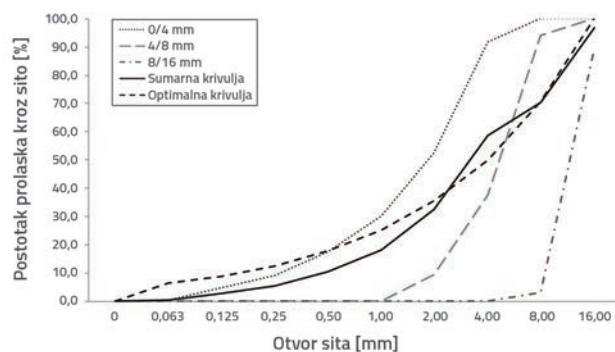
2.1. Materijali

Sastav betonskih mješavina korištenih u istraživanju prikazan je u tablici 1. Nazivi mješavina mikroarmiranih betona upućuju na vrstu i količinu čeličnih vlakana po kubiku betona pojedine mješavine. Tako mješavina oznake 20M20R sadrži 20 kg industrijskih čeličnih vlakana (eng. *M-manufactured*) i 20 kg recikliranih čeličnih vlakana (eng. *R-recycled*) po kubiku betona, a mješavina oznake 40MOR upućuje na 40 kg industrijskih čeličnih vlakana i 0 kg recikliranih vlakana po kubiku betona. Mješavina običnog betona označena je oznakom PC (eng. *plain concrete*).

Tablica 1. Sastav mješavina betona

Mješavine	PC	40MOR	20M20R
Sastojci [kg/m ³]			
Cement		370	
Voda		170	
Omjer vode i cementa		0,46	
Superplastifikator		2,22	
Industrijska čelična vlakna	0	40	20
Recilirana čelična vlakna	0	0	20
Agregat (sve frakcije)	1840	1825	1825

Za izradu betona korišten je riječni agregat, frakcija 0/4 mm (drobljeni riječni), 4/8 mm i 8/16 mm, i cement tipa CEM II/A-M (S-V) 42,5 N. Ukupni granulometrijski sastav i krivulje prosijavanja prikazani su na slici 1. Ciljani razred konzistencije svih mješavina u istraživanju bio je S4 (slijeganje 160 mm - 210 mm). U svrhu postizanja tog cilja i poboljšanja obradivosti betona, korišten je superplastifikator na bazi karboksilnih eterskih polimera s dugim bočnim lancima.



Slika 1. Grafički prikaz granulometrijskog sastava agregata

Za armiranje su korištena industrijska čelična vlakna zavintutih krajeva, duljine 35 mm i promjera 0,55 mm. Zbog procesa

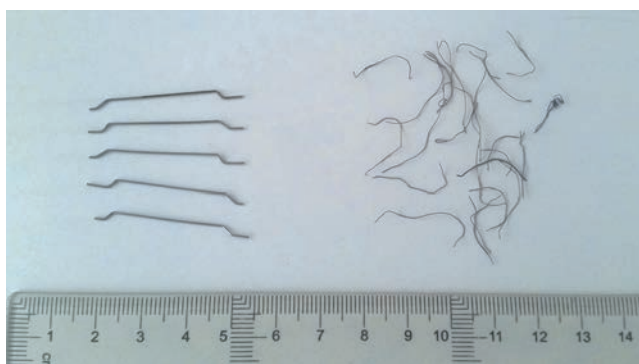
Tablica 2. Geometrijske i mehaničke karakteristike čeličnih vlakana [17]

Vrsta vlakana	Duljina [mm]	Promjer [mm]	Koeficijent oblika (l/d)	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Oblik
Industrijska vlakna	35	0,55	64	1100	Zavinuti krajevi
Reciklirana vlakna	20 ± 2	0,15 ± 0,04	133	2850	Valovit

Tablica 3. Metode ispitivanja svojstava u svježem i očvrslulom stanju

Svojstvo	Norma	Dimenzije uzoraka [mm]
Gustoća svježeg betona	HRN EN 12350-6 [18]	-
Udio pora svježeg betona	HRN EN 12350-7 [19]	-
Konzistencija slijeganjem betona	HRN EN 12350-2 [20]	-
Tlačna čvrstoća betona	HRN EN 12390-3 [21]	150 x 150 x 150
Vlačna čvrstoća betona cijepanjem	HRN EN 12390-6 [22]	Φ/l = 150/300
Modul elastičnosti betona	HRN EN 12390-13 [23]	Φ/l = 150/300
Savojna čvrstoća betona	HRN EN 14651 [24]	150 x 150 x 600

mehaničke reciklaže, reciklirana čelična vlakna su nepravilnog oblika i dimenzija. Prosječne geometrijske i mehaničke karakteristike vlakana prikazane su u tablici 2. i na slici 2.



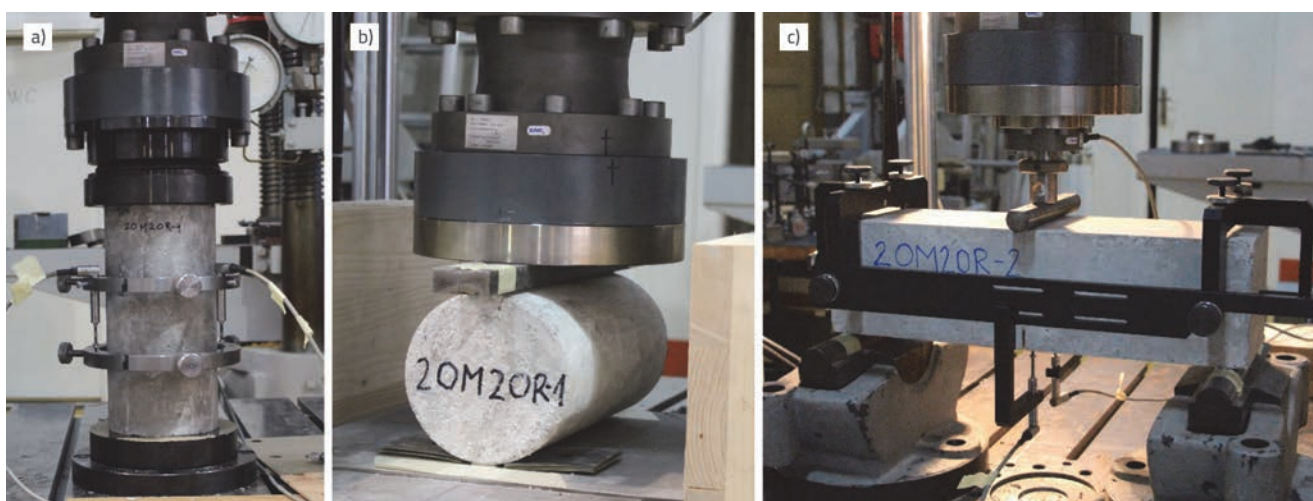
Slika 2. Usporedba industrijskih i recikliranih čeličnih vlakana korištenih u ispitivanju

Varijabilnost vlakana određena je metodom razvijenom u tvrtki Twincon Ltd, Sheffield, a temelji se na tehnikama optičke korelacije [16]. Prosječne su duljine 20 mm i promjera 0,15 mm, dok im je vlačna čvrstoća znatno veća od čvrstoće industrijskih vlakana.

2.2. Metode ispitivanja

Svojstva betona u svježem i očvrslulom stanju određena su prema normama, navedenim u tablici 3. Ispitivanja modula elastičnosti, vlačne čvrstoće cijepanjem te savojne čvrstoće prikazana su na slici 3. Ispitivanja koja nisu određena propisima, ili se od njih tijekom eksperimentalnog rada odstupilo, dodatno će se objasniti.

Savojna čvrstoća betona ispitana je na uzorcima oblika prizme, sa zarezom širine 5 mm i dubine 25 mm na polovici duljine uzorka. Ispitivanje uzoraka od mikroarmiranog betona je provedeno prema zahtjevima norme HRN EN 14651 [24].



Slika 3. Ispitivanje: a) modula elastičnosti, b) vlačne čvrstoće cijepanjem, c) savojne čvrstoće

Ispitivanje uzoraka od običnog betona provedeno je na isti način, ali s brzinom opterećenja koja je bila deset puta niža nego kod mikroarmiranog betona kako bi se spriječilo naglo otkazivanje nosivosti. Ispitivanje se provodi savijanjem prizmi u tri točke, s razmakom oslonaca od 500 mm, uz korištenje okvira na kojem su postavljeni senzori za mjerenje progiba, čime se eliminira utjecaj slijeganja na osloncima. Norma predviđa mjerenje širine izvedenog zarezata tijekom ispitivanja (eng. *CMOD - crack mouth opening displacement*), ali dopušta i mjerenje progiba te određivanje širine zarezata pomoću izraza za međusobnu pretvorbu tih dvaju parametara. Za mjerenje progiba korištena su dva LVDT senzora, po jedan sa svake strane uzorka, te je kao rezultat prikazana njihova srednja vrijednost. Za svaku mješavinu ispitana su tri uzorka.

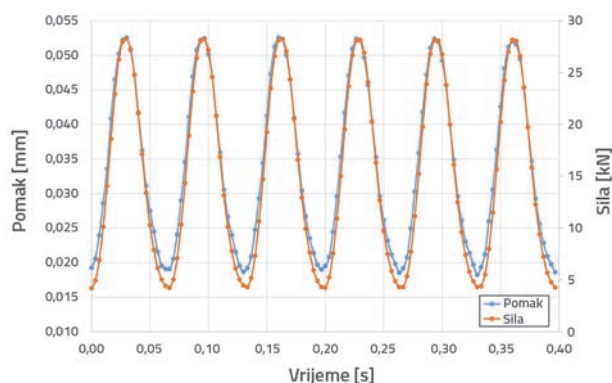
2.3. Postavke ispitivanja

Ispitivanje zamora betona nije normirano pa su pri osmišljavanju postavke ispitivanja uzete u obzir smjernice koje nudi ACI Committee 544 (eng. *American Concrete Institute*) - Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete [25] te postavke ispitivanja koja su provodili drugi istraživači [26].

Ispitivanja na zamor su vrlo dugotrajna i skupa jer se mogu provoditi i do deset milijuna ciklusa ponavljanja opterećenja. Kako bi se racionaliziralo vrijeme potrebno za ispitivanje, izrađen je poseban prihvatni sustav kojim se mogu istodobno ispitati tri uzorka oblika prizme dimenzija 150 x 150 x 600 mm (slika 4.). Na svaki uzorak postavljen je nosač za LVDT senzore (eng. *Linear Variable Differential Transformer*) kojima su mjereni vertikalni pomaci.

Prije ispitivanja na zamor za svaku mješavinu provedeno je statičko ispitivanje, kojim je određena statička čvrstoća na tri uzorka pri granici proporcionalnosti, tj. pri pojavi prve pukotine (eng. *LOP - Limit of Proportionality*). Statička čvrstoća, tj. vrijednost opterećenja pri granici proporcionalnosti, služila je kao referentna vrijednost za daljnje ispitivanje zamora koje se provodilo na četiri različite razine opterećenja *S* (eng. *stress level*). Tijekom ispitivanja minimalna

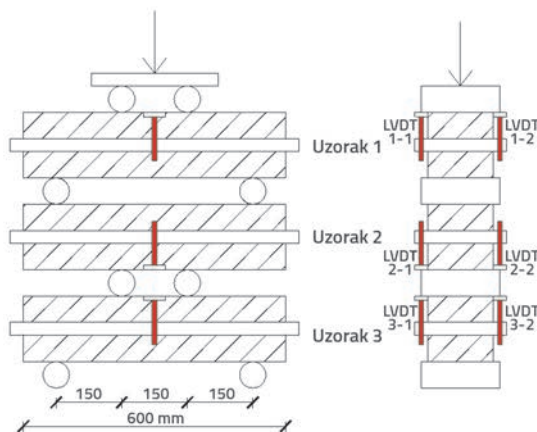
vrijednost opterećenja iznosila je 10 %, a maksimalna vrijednost 30 %, 50 %, 70 % i 90 % vrijednosti statičke sile. Opterećenje se nanosilo sinusoidnom funkcijom, s frekvencijom od 15 Hz, do loma jednog od uzoraka ili do dva milijuna ciklusa opterećenja. Opterećenje se nanosilo pomoću hidrauličkog dinamičkog ispitnog stroja kapaciteta 250 kN. Sustav je bio podešen na način da prestane raditi pri pomacima većim od 10 mm, što je značilo da je jedan od uzoraka otkazao. Kako ispitivanje nije bilo moguće nastaviti s preostala dva uzorka, izrađena su dva zamjenska uzorka istih dimenzija koji su bili armirani čeličnom armaturom i služili su isključivo za prijenos opterećenja. Kada bi jedan uzorak otkazao, na njegovo mjesto je postavljen zamjenski uzorak i ispitivanje bi se nastavilo sve dok i zadnji ispitni uzorak u setu ne otkáže ili dostigne dva milijuna ciklusa opterećenja. Tijekom ispitivanja pratio se broj ciklusa pri kojem uzorci otkazuju na pojedinoj razini opterećenja. Osim toga, mjereni su i vertikalni pomaci na uzorcima pomoću ukupno 6 LVDT senzora, po dva na svakom uzorku iz kojih se računala srednja vrijednost. Podaci sa svih senzora su prikupljeni s frekvencijom uzorkovanja od 300 Hz, kako bi se svaki ciklus opterećenja opisao s dovoljnim brojem točaka (slika 5.).



Slika 5. Sinusoidne funkcije sile i pomaka

Kako je već spomenuto, ispitivanje na zamor još nije normirano. Podaci koji se dobiju pri jednim postavkama ispitivanja ne

vrijede za bilo koji drugi slučaj. Zato se rezultati ispitivanja najčešće prikazuju u obliku S-N krivulja, ili Wöhlerovih krivulja, koje predstavljaju odnos između razine opterećenja i broja ciklusa pri kojem dolazi do loma materijala. Bezdimenzijska veličina *S*, koja predstavlja odnos između maksimalnog naprezanja i statičke čvrstoće, u većem dijelu eliminira utjecaj veličine i oblika uzorka, čvrstoće materijala, vlažnosti, uvjeta njegovanja uzoraka i drugih parametara koji utječu na rezultate ispitivanja. Bezdimenzijske S-N krivulje na taj način najtočnije opisuju ponašanje betona uslijed zamora [2]. Često se prikazuju u logaritamskom mjerilu S-logN radi bolje preglednosti.



Slika 4. Pravila ispitivanja



3. Rezultati i rasprava

3.1. Svojstva betona u svježem stanju

Dodana u svježi beton, čelična vlakna imaju tendenciju isprepletanja i stvaranja takozvanih ježeva. Nastajanje ježeva ima negativan utjecaj na obradivost svježeg betona [27-29]. Dosadašnja istraživanja utjecaja recikliranih čeličnih vlakana na obradivost betona pokazuju da se porastom udjela vlakana bilježi smanjenje obradivosti svježeg betona, mjereno metodom slijeganja [30]. To je potvrđeno ovim istraživanjem, gdje je dodatak obiju vrsta čeličnih vlakana utjecao na smanjenje vrijednosti slijeganja u odnosu na običan beton u iznosu od 20 %. Unatoč smanjenju obradivosti, sve mješavine mogu se svrstati u razred konzistencije slijeganjem S4 (tablica 4.).

Porast udjela zraka u odnosu na običan beton povezuje se s dodatkom vlakana, načinom doziranja, ali i udjelom pojedine vrste vlakana [3, 31]. Iako zbog nepravilnog oblika reciklirana vlakna mogu imati veću tendenciju isprepletanja, te uslijed toga negativan utjecaj na obradivost i udio zraka u odnosu na mikroarmirani beton s industrijskim vlaknima, ipak to nije zabilježeno. Razlika između vrijednosti zahvaćenog zraka tijekom miješanja za mješavine 20M20R i 40MOR iznosi 10%, dok su mjerene vrijednosti slijeganja jednake za obje mješavine. Zbog malog volumnog udjela vlakana (< 0,5 % ukupnog volumena) u odnosu na ukupni udio sastojaka betona, dodatak vlakana nema utjecaj na vrijednost gustoće betona u svježem stanju (tablica 4.).

Tablica 4. Svojstva betona u svježem stanju

Mješavina	Slijeganje [mm]	Gustoća [kg/m ³]	Udio pora [%]
PC	200	2368	1,4
20M20R	160	2332	2,8
40MOR	160	2366	3,1

3.2. Svojstva očvrstnalog betona

U tablici 5. prikazana je tlačna čvrstoća svih mješavina, modul elastičnosti i vlačna čvrstoća cijepanjem. Rezultati su prikazani kao srednja vrijednost od tri ispitna uzorka za svaku mješavinu i njihova standardna devijacija.

Dosadašnja ispitivanja mikroarmiranih betona s recikliranim čeličnim vlaknima upućuju na trend smanjenja tlačne čvrstoće s porastom udjela recikliranih vlakana [30, 32]. Analizom rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće u ovom radu potvrđeno je da dodatak vlakana utječe na smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće (tablica 5.). Smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće u vezi je s porastom udjela zraka u svježem betonu, a što je posljedica dodatka čeličnih vlakana. Rezultati pokazuju da je za udio zraka 1,4 % (mješavina PC) vrijednost tlačne čvrstoće 48,1

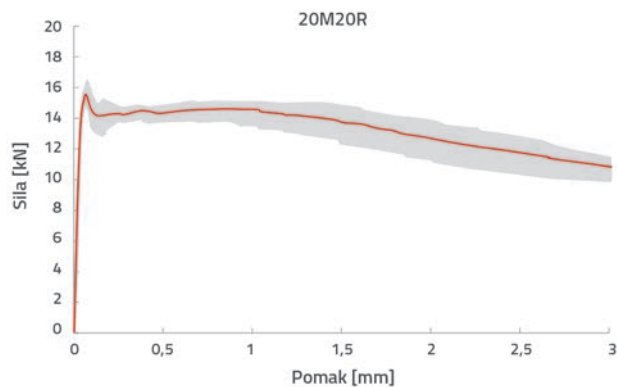
± 0,9 MPa, dok 2,8 % zraka utječe na smanjenje vrijednosti na 42,5 ± 0,3 MPa (mješavina 20M20R).

Tablica 5. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i vlačne čvrstoće cijepanjem

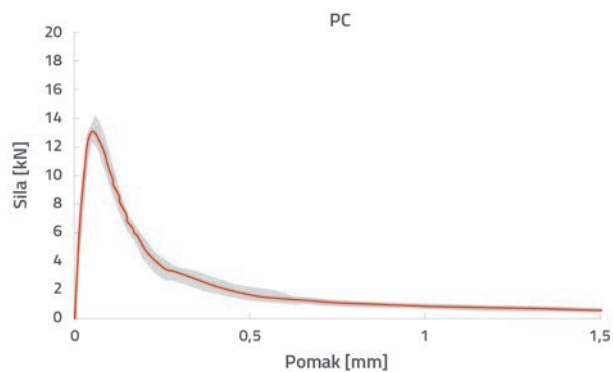
Mješavina	Tlačna čvrstoća ± s [MPa]	Modul elastičnosti ± s [GPa]	Vlačna čvrstoća cijepanjem ± s [MPa]
PC	48,1 ± 0,9	32,9 ± 1,1	3,1 ± 0,2
20M20R	42,5 ± 0,3	30,6 ± 0,8	4,5 ± 0,3
40MOR	46,8 ± 0,7	30,1 ± 0,7	4,1 ± 0,1

Sličan trend bilježi se i za vrijednosti modula elastičnosti, a što je u skladu s literaturom [31], gdje je pokazano da dodatak vlakana nema značajni utjecaj na vrijednosti modula elastičnosti bez obzira na visoku vrijednost modula elastičnosti samih vlakana. Za mješavine 20M20R i 40MOR smanjenje vrijednosti modula elastičnosti iznosi 7 % u odnosu na vrijednost modula elastičnosti za običan beton (mješavina PC). Porast vlačne čvrstoće cijepanjem u iznosu od 45 %, odnosno 32 % u odnosu na obični beton zabilježen je dodatkom vlakana. Primjenom vlakana u betonu usporava se brzina širenja pukotina, a samim time se povećava žilavost inače krčkog materijala. Vlakno koje se nađe na putu pukotini premošćuje ju i odupire se daljnjem rastu pukotine trošeći pritom energiju na izvlačenje vlakana. Rezultati ispitivanja betonskih prizmi na savijanje prikazani su u obliku dijagrama sila-pomak, slike 6. do 8. Prethodno je već pokazano postojanje sinergije industrijskih i recikliranih vlakana [13], gdje se pod pojmom sinergija razumijeva veća duktilnost hibridnog betona u odnosu na pojedinačnu duktilnost mješavina s industrijskim i recikliranim vlaknima. Definiranjem sinergije između dviju vrsta vlakana dokazano je da se optimalnim udjelom dviju vrsta vlakana može pripremiti mješavina hibridnog mikroarmiranog betona sličnih ili jednakih svojstava poput referentne mješavine s industrijskim vlaknima.

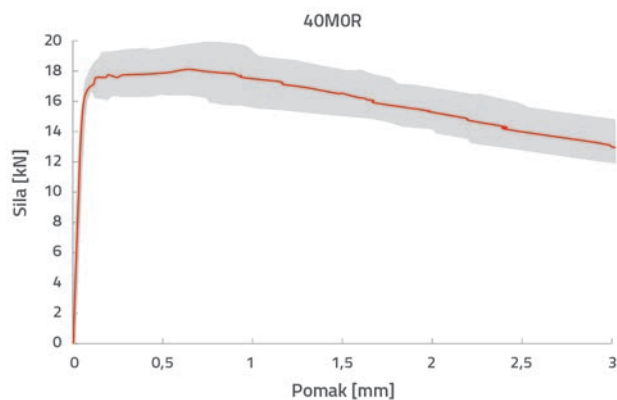
Vrijednosti savojne čvrstoće pri granici proporcionalnosti ($f_{ct,L}$) te rezidualne savojne čvrstoće pri progibima u četiri karakteristične točke ($f_{R,1}$ - $f_{R,4}$) prikazane su u tablici 6. Rezidualne čvrstoće $f_{r,1}$ i $f_{r,3}$ smatraju se karakterističnim rezidualnim čvrstoćama koje opisuju ponašanje mikroarmiranih betona za granično stanje uporabivosti i nosivosti [33]. Vrijednosti rezidualne čvrstoće $f_{R,1}$ povećale su i za nekoliko puta u usporedbi s referentnom mješavinom PC. Za drugu karakterističnu vrijednost rezidualne čvrstoće, $f_{r,3}$, običan beton više nije u mogućnosti preuzeti prisutna opterećenja. Istovremeno, obje ispitivane mješavine mikroarmiranog betona i dalje pokazuju visoku razinu nosivosti, gdje hibridna mješavina 20M20R ostvaruje samo 18 % nižu vrijednost rezidualne čvrstoće $f_{r,3}$ u odnosu na mješavinu 40MOR. Niže vrijednosti rezidualne čvrstoće $f_{r,3}$ posljedica su manjeg udjela duljih vlakana većeg promjera koja mogu osigurati duktilnost pri većim pukotinama.



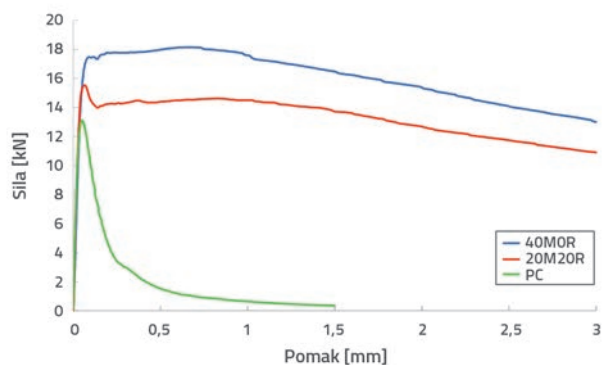
Slika 6. Dijagram sila - pomak s rasipanjem za mješavinu 20M20R



Slika 8. Dijagram sila - pomak s rasipanjem za mješavinu PC



Slika 7. Dijagram sila - pomak s rasipanjem za mješavinu 40M0R



Slika 9. Usporedba dijagrama sila - pomak za sve mješavine

Tablica 6. Savojne čvrstoće pri granici proporcionalnosti i u četiri karakteristične točke

Savojna čvrstoća	$f_{ct,1}$ [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,2}$ [MPa]	$f_{R,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]
PC	4,25 ± 0,29	0,56 ± 0,15	0,15 ± 0,05	0	0
20M20R	5,00 ± 0,21	4,59 ± 0,13	4,50 ± 0,28	3,94 ± 0,35	3,46 ± 0,23
40M0R	5,57 ± 0,16	5,74 ± 0,39	5,39 ± 0,42	4,78 ± 0,38	4,16 ± 0,39

Tablica 7. Vrijednosti sila i naprezanja pri statičkom ispitivanju i ispitivanju na zamor

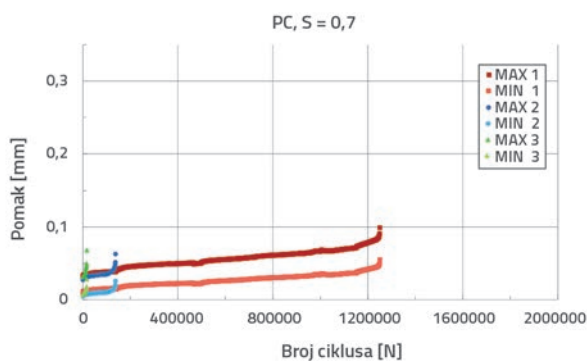
STATIČKO ISPITIVANJE				ISPITIVANJE NA ZAMOR			
Oznaka uzorka	Sila [kN]	Prosječna vrijednost sile [kN]	Statička čvrstoća [MPa]	Razina opterećenja S	Maks. sila [kN]	Maks. naprezanje [MPa]	Broj ispitanih uzoraka
PC-S1	33,8	33,0 ± 0,6	4,4	0,3	9,9	1,32	2
PC-S2	33,1			0,5	16,5	2,20	3
PC-S3	32,2			0,7	23,1	3,08	3
				0,9	29,7	3,96	3
20M20R-S1	40,9	40,5 ± 1,8	5,4	0,3	12,2	1,62	3
20M20R-S2	42,4			0,5	20,3	2,70	3
20M20R-S3	38,1			0,7	28,4	3,78	3
				0,9	36,5	4,86	2
40M0R-S1	41,7	40,1 ± 1,2	5,4	0,3	12,0	1,62	2
40M0R-S2	39,3			0,5	20,1	2,70	3
40M0R-S3	39,2			0,7	28,1	3,78	3
				0,9	36,1	4,86	3

3.3. Rezultati ispitivanja na zamor

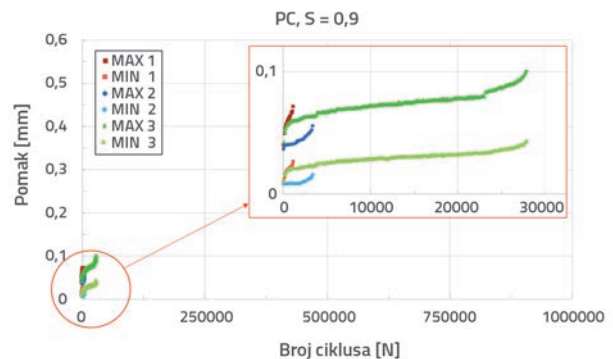
Prije ispitivanja na zamor za svaku mješavinu provedeno je statičko ispitivanje kojim je određena statička čvrstoća na tri uzorka na granici proporcionalnosti, tj. pri pojavi prve pukotine. Ovo ispitivanje je provedeno savijanjem u četiri točke s razmakom oslonaca od 450 mm, kako bi odgovaralo postavkama ispitivanja na zamor (slika 4.). Rezultati su prikazani u tablici 7., kao i izračunane vrijednosti maksimalnog naprezanja na četiri različite razine opterećenja. Pri nižim razinama opterećenja ($S = 0,3$ i $S = 0,5$) svi ispitni uzorci dostigli su krajnji cilj od dva milijuna ciklusa opterećenja.

Rezultati pri višim razinama opterećenja ($S = 0,7$ i $S = 0,9$) prikazani su u obliku krivulja maksimalnih i minimalnih pomaka i broja ciklusa tijekom ispitivanja na kojima je došlo do otkazivanja uzoraka (slike 10. do 15.).

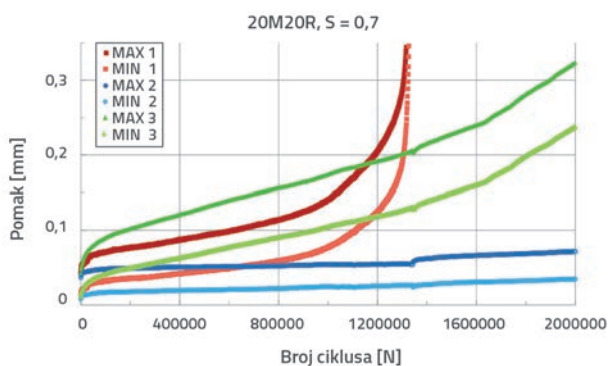
Može se primijetiti rasipanje rezultata, što je uobičajena pojava kod ispitivanja zamora [2], djelomično zbog nehomogenosti betona, a djelomično zbog činjenice da uzorci koji se ispituju na zamor nisu isti oni na kojima je određena statička čvrstoća tj. inicijalna vrijednost za ispitivanje zamora. Varijabilnost rezultata izraženija je kod mikroarmiranih betona zbog nasumično raspoređenih vlakana u svakom uzorku.



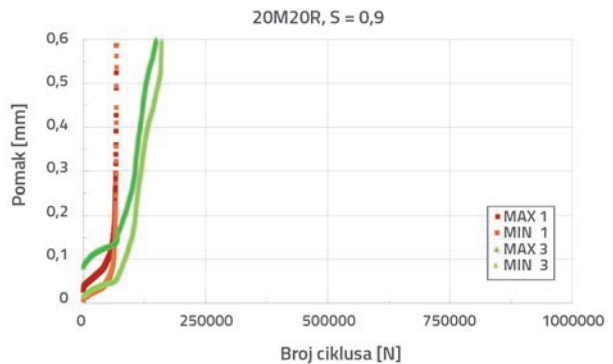
Slika 10. Dijagram pomak-broj ciklusa za mješavinu PC na razini $S = 0,7$



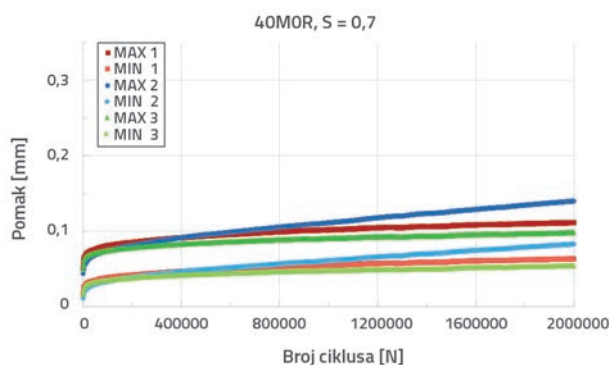
Slika 11. Dijagram pomak-broj ciklusa za mješavinu PC na razini $S = 0,9$



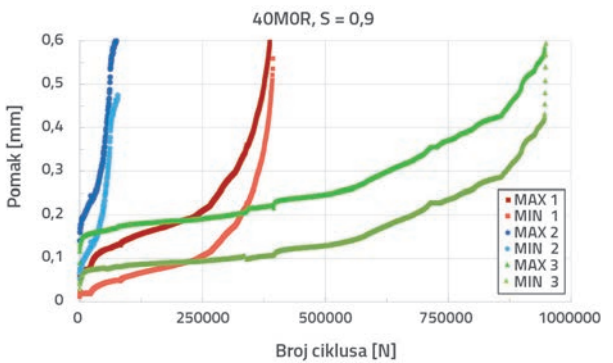
Slika 12. Dijagram pomak-broj ciklusa za mješavinu 20M20R na razini $S = 0,7$



Slika 13. Dijagram pomak-broj ciklusa za mješavinu 20M20R na razini $S = 0,9$



Slika 14. Dijagram pomak-broj ciklusa za mješavinu 40M0R na razini $S = 0,7$

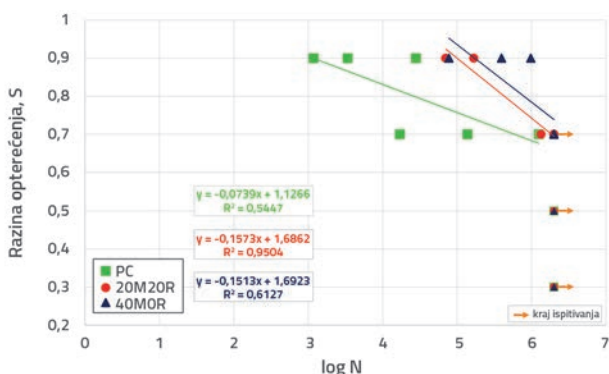


Slika 15. Dijagram pomak-broj ciklusa za mješavinu 40M0R na razini $S = 0,9$

Tablica 8. Broj ostvarenih ciklusa opterećenja za sve uzorke

Ispitni uzorci	S = 0,3		S = 0,5		S = 0,7		S = 0,9	
	N	logN	N	logN	N	logN	N	logN
PC	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	1.250.500	6,10	1170	3,07
	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	137.670	5,14	3380	3,53
	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	16.990	4,23	27.900	4,45
20M20R	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	1.342.700	6,13	70.170	4,85
	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	167.500	5,22
	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30
40M0R	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	394.050	5,60
	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	77.440	4,89
	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	2.000.000	6,30	975.600	45,99

U tablici 8. prikazan je ostvareni broj ciklusa za sve ispitane uzorke, a grafički prikaz logaritamske vrijednosti broja ciklusa i razine opterećenja prikazan je na slici 16. Ispitivanje je zaustavljeno nakon dva milijuna ciklusa, što je uobičajena praksa za beton [2, 7, 34]. Uzorci koji su izdržali planirani broj ciklusa, tj. došli do kraja ispitivanja, označeni su na slici 16. strelicama. Oštećenja na tim uzorcima bila su neznatna i oni bi vjerojatno dostigli i znatno veći broj ciklusa da se ispitivanje nastavilo. Pri oblikovanju S - N krivulja takvi uzorci stvaraju krivu sliku o ponašanju materijala jer je njihov položaj realno podcijenjen, tj. trebali bi biti na većoj vrijednosti logN. Iz tog razloga uzorci na razinama S = 0,3 i S = 0,5 isključeni su iz daljnjeg razmatranja i S-logN krivulje su formirane na temelju podataka ispitanih uzoraka na razinama S = 0,7 i S = 0,9.



Slika 16. S-logN dijagram s pripadajućim jednadžbama zamora

Analizom rezultata ispitivanja otpornosti mikroarmiranih betona na zamor potvrđuje se da se doprinos recikliranih vlakana može poboljšati sinergijom s industrijskim vlaknima, jer je prethodno dokazano da izložena zamoru reciklirana vlakna odgađaju povezivanje mikropukotina [26]. Međutim, uslijed brzog izvlačenja kratkih recikliranih vlakana iz matrice, naglo dolazi do promjene u post-pukotinskom ponašanju, što utječe na brzo formiranje makropukotina. S druge strane, industrijska vlakna tijekom ove faze kontroliraju napredovanje makropukotina uslijed čega se vrijednost progiba linearno povećava. Zbog toga se ponašanje recikliranih vlakana može

poboljšati sinergijom s industrijskim vlaknima. Ideja takvog projektiranja slična je ideji projektiranja granulometrijskog sastava, gdje se zrna različitih dimenzija kombiniraju radi postizanja bolje raspodjele i svojstava betona. Analizom rezultata na slikama 10. do 16. i u tablici 8. pokazano je da postoji sinergija duljih vlakana većeg promjera (koeficijent oblika 67) koja osiguravaju duktilnost pri većim pukotinama i kraćih vlakana manjeg promjera (> 85 % l = 0-15 mm, $\Phi_{sred} = 0,13$ mm) koja osiguravaju prijenos opterećenja tijekom napredovanja mikropukotina i u fazi razvoja makropukotina kada u strukturi i dalje pronalazimo velik broj vrlo finih i tankih pukotina. Međutim, iz dijagrama na slikama 12. do 15. je vidljivo da kod mješavine 20M20R pri većim razinama opterećenja dolazi do bržeg napredovanja makropukotina, a što se očituje u naglom porastu vrijednosti pomaka pri manjem broju ciklusa u odnosu na referentnu mješavinu 40M0R.

4. Proračunski modeli zamora

Rezultati eksperimentalnog istraživanja usporedit će se s teorijskim modelima za proračun otpornosti betonskih elemenata pri zamoru, koji su uvršteni u propise za projektiranje pojedinih zemalja. Ti modeli nastali su kao rezultat mnogih eksperimentalnih ispitivanja koja nisu normirana, što upozorava na problematiku ovog područja. Važno je napomenuti da se svi propisi odnose na zamor običnog betona, pa će se pokušati ocijeniti stupanj njihove primjenjivosti za mikroarmirani i hibridni mikroarmirani beton. Za usporedbu rezultata odabrani su propisi fib Model Code 2010 [33] (u nastavku MC), propisi Američkog instituta za beton ACI Code 215 [35, 36] (u nastavku ACI) i propisi Japanskog društva građevinskih inženjera za betonske konstrukcije [37] (u nastavku JSCE). Zanimljivo je da Eurokod 2 ne daje smjernice za proračun otpornosti betona pri vlaku ili savijanju, već samo u slučajevima čistog tlaka i posmika pa se zato ovdje neće razmatrati.

4.1. fib Model Code 2010

fib Model Code razlikuje izraze za proračun otpornosti pri zamoru u slučaju čistog tlaka, kombinacije tlak-vlak i čistog

vlak. Za konstantnu amplitudu naprežanja, broj ciklusa N pri kojem dolazi do loma pri zamoru, može se odrediti na temelju izraza (1) do (11).

a) Čisti tlak

U slučaju čistog tlaka logaritamska vrijednost očekivanog broja ciklusa opterećenja određuje se prema jednom od sljedeća dva izraza:

$$\log N_1 = \frac{8}{(Y-1)}(S_{c,max} - 1) \quad (1)$$

$$\log N_2 = 8 + \frac{8 \ln(10)}{(Y-1)}(Y - S_{c,min}) \cdot \log\left(\frac{S_{c,max} - S_{c,min}}{Y - S_{c,min}}\right) \quad (2)$$

Kao mjerodavan broj ciklusa N , tj. $\log N$, uzima se:

ako je $\log N_1 \leq 8$, onda $\log N = \log N_1$ (3)

ako je $\log N_1 > 8$, onda $\log N = \log N_2$ (4)

pri čemu je parametar Y definiran kao

$$Y = \frac{0,45 + 1,8 \cdot S_{c,min}}{1 + 1,8 \cdot S_{c,min} - 0,3 \cdot S_{c,min}^2} \quad (5)$$

U izrazima (1), (2) i (5) $S_{c,max}$ i $S_{c,min}$ predstavljaju maksimalnu tj. minimalnu razinu opterećenja u tlaku i definirani su izrazima:

$$S_{c,max} = \frac{|\sigma_{c,max}|}{f_{ck,fat}} \quad (6)$$

$$S_{c,min} = \frac{|\sigma_{c,min}|}{f_{ck,fat}} \quad (7)$$

pri čemu su $\sigma_{c,max}$ i $\sigma_{c,min}$ maksimalno tj. minimalno tlačno naprežanje pri zamoru kojem su uzorci izloženi, a $f_{ck,fat}$ je čvrstoća betona pri zamoru u tlaku koja se može izračunati kao:

$$f_{ck,fat} = \beta_{cc}(t) \beta_{c,sus}(t, t_0) f_{ck}(1 - f_{ck}/400) \quad (8)$$

U izrazu (8), $\beta_{cc}(t)$ je koeficijent koji ovisi o starosti betona u danima t , a $\beta_{c,sus}(t, t_0)$ je koeficijent koji uzima u obzir frekvenciju opterećenja i u slučaju zamora može se uzeti $\beta_{c,sus}(t, t_0) = 0,85$.

b) Tlak-vlak, za $\sigma_{ct,max} \leq 0,026|\sigma_{c,max}|$

Za slučajeve kombinacije naprežanja tlak-vlak, pri čemu su maksimalna vlačna naprežanja $\sigma_{ct,max}$ manja ili jednaka od 2,6 % apsolutne vrijednosti maksimalnog tlačnog naprežanja $\sigma_{c,max}$, vrijedi:

$$\log N = 9(1 - S_{c,max}) \quad (9)$$

c) Čisti vlak i vlak-tlak za $\sigma_{ct,max} > 0,026|\sigma_{c,max}|$

Ako su maksimalna vlačna naprežanja $\sigma_{ct,max}$ veća od 2,6 % apsolutne vrijednosti maksimalnog tlačnog naprežanja $\sigma_{c,max}$, vrijedi:

$$\log N = 12(1 - S_{ct,max}) \quad (10)$$

gdje je $S_{ct,max}$ maksimalna razina vlačnog opterećenja definirana kao:

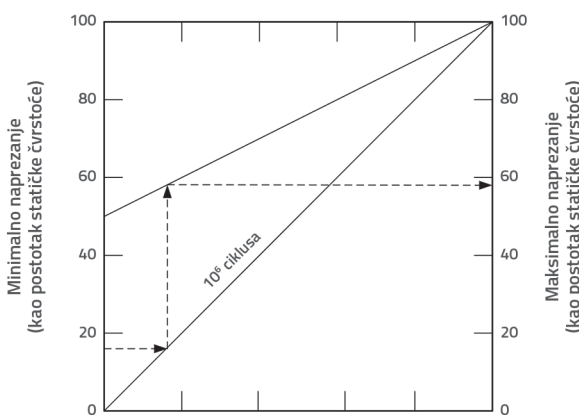
$$S_{ct,max} = \frac{\sigma_{ct,max}}{f_{ctk,min}} \quad (11)$$

pri čemu je $\sigma_{ct,max}$ maksimalno vlačno naprežanje pri zamoru kojem je uzorak izložen, a $f_{ctk,min}$ minimalna karakteristična vlačna čvrstoća betona uzeta iz propisa u skladu s razredom betona [33].

U proračunu su korišteni izrazi za slučaj opterećenja vlak-tlak, pri čemu su vrijednosti $\sigma_{ct,max}$ prikazane u tablici 7. za sve razine opterećenja, a vrijednost $f_{ctk,min}$ je uzeta kao 2,5 MPa.

4.2. ACI

Prema smjernicama ACI norme 215, za proračun otpornosti betona pri zamoru može se koristiti tzv. modificirani Goodmanov dijagram. Spomenuti dijagram temelji se na pretpostavci sličnog ponašanja betona na zamor pri vlaklu, tlaku i savijanju, a uključuje utjecaj raspona naprežanja (minimalne i maksimalne vrijednosti) pri cikličkom opterećenju do milijun ciklusa.



Slika 17. Goodmanov dijagram ponašanja običnog betona pri cikličkom opterećenju

Utjecaj minimalnog i maksimalnog naprežanja može se izraziti i jednadžbom

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} = 1 - 0,0685 \left(1 - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}\right) \log N \quad (12)$$

gdje je σ_c čvrstoća utvrđena statičkim ispitivanjem, a σ_{max} i σ_{min} maksimalna tj. minimalna vrijednost naprezanja kojem je uzorak izložen uslijed zamora. Izraz (12) jednako je primjenjiv za slučajeve opterećenja čisti tlak, vlak ili savijanje.

Vrijednosti korištene u proračunu σ_c i σ_{max} prikazane su u tablici 7., a minimalno naprezanje tijekom ispitivanja σ_{min} iznosilo je 10 % od σ_{max} .

4.3. JSCE

Smjernice JSCE daju izraz koji povezuje minimalno i maksimalno naprezanje uslijed cikličkog opterećenja i očekivanog broja ciklusa N , za $N \leq 2 \cdot 10^6$:

$$\log N = 17 \frac{1 - S_{max}}{1 - S_{min}} \quad (13)$$

pri čemu su S_{max} i S_{min} maksimalna tj. minimalna razina opterećenja:

$$S_{max} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} \quad (14)$$

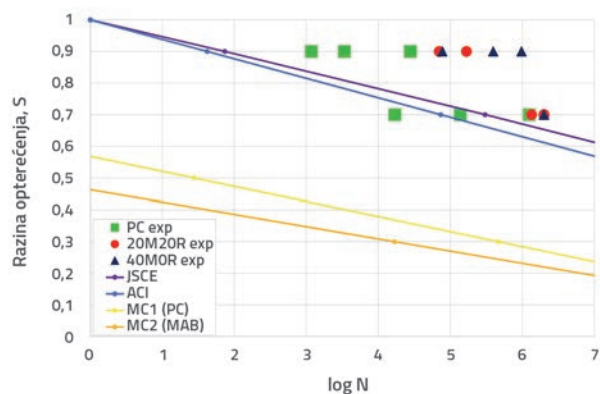
$$S_{min} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_c} \quad (15)$$

Kao i u slučaju ACI norme, σ_c je čvrstoća utvrđena statičkim ispitivanjem, a σ_{max} i σ_{min} maksimalna tj. minimalna vrijednost naprezanja kojem je uzorak izložen uslijed zamora.

5. Usporedba i analiza rezultata istraživanja

5.1. Usporedba rezultata istraživanja i postojećih proračunskih modela

Usporedba $S - \log N$ dijagrama prema različitim propisima i eksperimentalnih rezultata prikazana je na slici 18. Proračunski model MC razlikuje se od preostala dva promatrana modela u tome što u obzir uzima omjer maksimalnog vlačnog naprezanja $S_{ct,max}$ i minimalne karakteristične vlačne čvrstoće betona $f_{ctk,min}$ izrazi (10) i (11). Vrijednost minimalne karakteristične vlačne čvrstoće betona svih uzoraka uzeta je kao $f_{ctk,min} = 2,5$ MPa, prema razredu betona C40/50 [33]. Statička čvrstoća običnog betona, a time i određena vrijednost maksimalnog vlačnog naprezanja, bila je manja od one kod mikroarmiranih uzoraka, koji su imali gotovo jednaku statičku čvrstoću, tablica 7. Prema tome se krivulja MC1 odnosi na uzorke od običnog betona PC, a krivulja MC2 na mikroarmirane uzorke, 20M20R i 40M0R. Proračunski modeli JSCE i ACI u obzir uzimaju samo omjer maksimalnog i minimalnog naprezanja i time daju jedinstvenu krivulju za sve uzorke. Može se vidjeti da model MC daje mnogo konzervativnije rezultate u odnosu na preostala dva modela, čija su predviđanja prilično ujednačena.



Slika 18. Usporedba $S - \log N$ dijagrama prema različitim modelima i eksperimentalnih rezultata

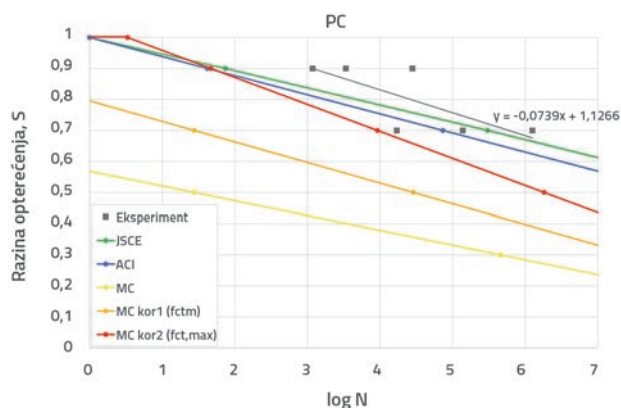
U pravilu, svi proračunski modeli su podcijenili otpornost betona pri zamoru. Jedina iznimka su dva uzorka od običnog betona koji su precijenjeni u modelu JSCE, tj. jedan uzorak u slučaju ACI modela. Proračunski model MC 2010 se pokazao kao najkonzervativniji, što je i očekivano jer uzima u obzir vrijednost minimalne karakteristične vlačne čvrstoće betona. Proračunski modeli JSCE i ACI u obzir uzimaju samo omjer maksimalnog i minimalnog naprezanja te su njihova predviđanja prilično ujednačena.

Treba napomenuti da su svi modeli razvijeni za proračun otpornosti pri zamoru običnog betona i jedan od ciljeva ovog istraživanja bio je utvrditi mogu li se oni primijeniti i za mikroarmirani beton. Proračunski model MC daje bolja predviđanja za običan beton (krivulja MC1) nego za mikroarmirani beton (MC2), slika 18. Može se zaključiti da taj model nije primjenjiv za mikroarmirane betone jer pri proračunu uzima u obzir minimalne karakteristične vlačne čvrstoće običnog betona koje su znatno niže od realnih vlačnih čvrstoća mikroarmiranog betona. U daljnjoj analizi prikazana su predviđanja MC modela za slučajeve korekcije izraza (11).

5.2. Korekcija MC proračunskog modela

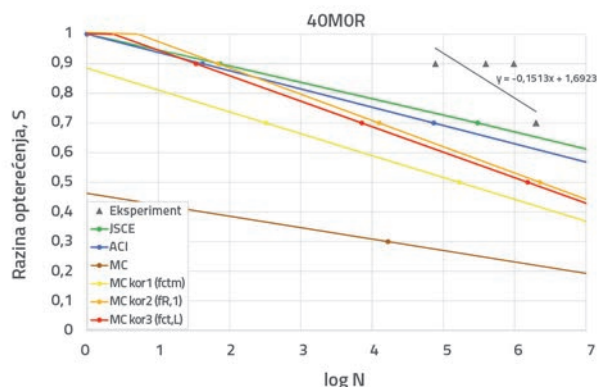
Osim što nije primjenjiv za mikroarmirani beton, uočeno je da MC model daje i najkonzervativnija predviđanja od sva tri proračunska modela za običan beton. Iz tog razloga napravljena je korekcija modela na način da se u proračunu za obični beton umjesto minimalne karakteristične vlačne čvrstoće $f_{ctk,min} = 2,5$ MPa u izraz (11) uvrstila srednja vlačna čvrstoća betona $f_{ctm} = 3,5$ MPa, tj. u drugom koraku korekcije uvrstila se maksimalna vlačna čvrstoća $f_{ctk,max} = 4,6$ MPa, slika 19. Koristeći maksimalnu vlačnu čvrstoću $f_{ctk,max}$ postiglo se mnogo bolje predviđanje modela i veće podudaranje s eksperimentalnim rezultatima i s preostala dva modela (ACI i JSCE). Ipak, na slici je vidljivo da u tom slučaju model predviđa određeni broj ciklusa i za razinu opterećenja veću od $S = 1$ (veće naprezanje od statičke čvrstoće), što nije moguće. Zato je krivulja ograničena horizontalnim dijelom na razini $S = 1$, iako ni to nije realno

jer obični beton nema gotovo nikakvu rezidualnu čvrstoću. Iz navedenih razloga i relativno malog broja ispitanih uzoraka bilo bi preuranjeno zaključiti da ta krivulja dovoljno sigurno procjenjuje ponašanje običnog betona pri zamoru. Imajući na umu i određeni koeficijent sigurnosti, prva korekcija koja koristi srednju vlačnu čvrstoću betona f_{ctm} može se razmatrati kao doprinos MC modelu.

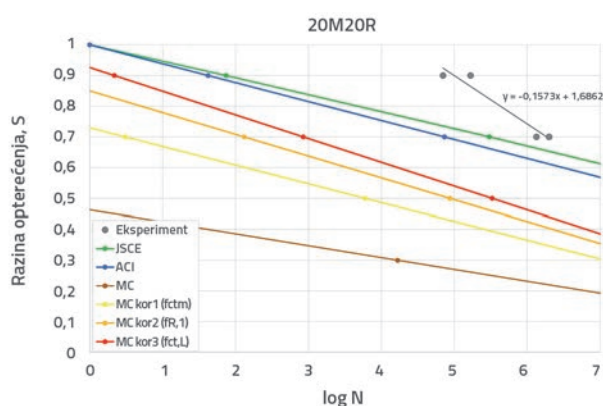


Slika 19. Usporedba S-logN dijagrama prema MC 2010 i korigiranih verzija autora

Za klasifikaciju mikroarmiranih betona prema MC-u koristi se omjer rezidualnih savojnih čvrstoća $f_{R,3}$ i $f_{R,1}$ određenih prema normi [24], tablica 6. Čvrstoća $f_{R,1}$ koristi se za proračun graničnog stanja nosivosti, a $f_{R,3}$ za proračun graničnog stanja uporabivosti. Iz tog razloga pokušala se provesti korekcija MC modela na način da se u prvom koraku umjesto minimalne vlačne čvrstoće $f_{ctk,min}$ u izraz (11) uvrstila vrijednost rezidualne savojne čvrstoće $f_{R,3}$. U drugom koraku korekcije koristila se vrijednost rezidualne savojne čvrstoće $f_{R,1}$, a u trećem koraku vrijednost savojne čvrstoće pri granici proporcionalnosti $f_{ct,L}$. Rezultati korigiranih verzija MC modela za mikroarmiranu mješavinu 40MOR i hibridnu mikroarmiranu mješavinu 20M2OR prikazani su na slikama 20. i 21. Prikazana je i krivulja postojećeg MC modela koja se koristila kao početna vrijednost za korekciju modela. Za mješavinu 40MOR S-N krivulje predviđaju određeni broj ciklusa za razinu opterećenja veću od $S = 1$, pa su te krivulje ograničene horizontalnim pravcem na razini $S = 1$. Kod mikroarmiranih betona je realno da pri opterećenju $S = 1$ uzorak preživi određeni broj ciklusa, jer u postpukotinskom stanju materijal zadržava značajne rezidualne čvrstoće, a može doći i do očvršćivanja materijala uslijed djelovanja vlakana. Sva tri koraka korekcije modela znače napredak u predviđanju ponašanja pri zamoru mikroarmiranih betonskih mješavina. Treći korak korekcije, koji koristi vrijednost $f_{ct,L}$, najbolje je opisao ponašanje hibridne mikroarmirane mješavine 20M2OR, a za mikroarmiranu mješavinu 40MOR drugi i treći korak korekcije daju približno sličnu krivulju. Autori predlažu primjenu savojne čvrstoće pri granici proporcionalnosti $f_{ct,L}$ u MC modelu za običan beton koji bi se na taj način mogao koristiti kao proračunski model zamora i za mikroarmirani beton.



Slika 20. Korigirane verzije MC modela za mješavinu 40MOR



Slika 21. Korigirane verzije MC modela za mješavinu 20M2OR

6. Zaključak

U radu je opisana problematika zamora betona uslijed cikličkog opterećenja te prednosti uporabe mikroarmiranih betona kod konstrukcijskih elemenata koji su izloženi takvom opterećenju. Objašnjen je pojam hibridnog mikroarmiranog betona, koji je nastao dodavanjem kombinacije industrijskih i recikliranih čeličnih vlakana iz otpadnih automobilskih guma u beton. Cilj istraživanja bio je utvrditi može li takav materijal ponuditi alternativu klasičnom mikroarmiranom betonu jer su reciklirana čelična vlakna jeftinija od industrijskih, a njihovom se uporabom pridonosi i rješavanju ekološkog problema koji se odnosi na postupanje s otpadnim automobilskim gumama. Opisano je eksperimentalno istraživanje na ukupno 42 betonska elementa dimenzija $150 \times 150 \times 600$ mm od običnog, mikroarmiranog i hibridnog mikroarmiranog betona. Prikazana su i tri modela za proračun otpornosti na zamor: fib Model Code 2010, ACI 215 i JSCE. Dodatni cilj istraživanja bio je usporediti proračunske modele s rezultatima eksperimentalnog istraživanja te ocijeniti njihovu primjenjivost kod mikroarmiranih betona. Mikroarmirani beton, oznake 40MOR, pokazao je najveću otpornost pri zamoru budući da su svi uzorci izdržali razinu opterećenja $S = 0,7$. Hibridni mikroarmirani beton, oznake 20M2OR, također je pokazao visoku otpornost pri zamoru,

a običan beton, oznake PC, očekivano je pokazao najnižu otpornost. Obje mješavine s vlaknima ostvarile su i do 5 puta veće pomake pri lomu nego običan beton. Rezultati eksperimentalnog istraživanja pokazuju vrlo slično ponašanje mikroarmirane i hibridne mikroarmirane mješavine do razine opterećenja $S = 0,7$. Tek na razini opterećenja $S = 0,9$ mikroarmirani beton pokazuje nešto bolja svojstva od hibridnog mikroarmiranog betona. Ovdje treba uzeti u obzir i prilično veliko odstupanje u rezultatima, koje je uobičajeno tijekom ispitivanja zamora, pogotovo kod mikroarmiranih betona zbog nasumične raspodjele vlakana u svakom uzorku. Na temelju provedenog eksperimenta može se zaključiti da s inženjerskog, ekonomskog i ekološkog stajališta ovakva hibridna mikroarmirana mješavina pruža alternativu klasičnom mikroarmiranom betonu.

Analiza postojećih modela za proračun otpornosti na zamor pokazuje da, u pravilu, svi proračunski modeli podcjenjuju otpornost betona pri zamoru. Jedina iznimka su dva uzorka od običnog betona koji su precijenjeni u modelu JSCE, tj. jedan uzorak u slučaju ACI modela. Proračunski model MC 2010 se pokazao kao najkonzervativniji, što je i očekivano jer jedini uzima u obzir vrijednost minimalne karakteristične vlačne čvrstoće betona. Proračunski modeli JSCE i ACI u obzir uzimaju samo omjer maksimalnog i minimalnog naprezanja te su njihova predviđanja prilično ujednačena. Zaključeno je da proračunski

model MC nije primjenjiv za mikroarmirane betone. Stoga se predlaže njegova korekcija primjenom srednje vlačne čvrstoće f_{ctm} u modelu za običan beton te savojne čvrstoće pri granici proporcionalnosti f_{ctL} u modelu za mikroarmirani beton radi njegove velike duktilnosti i relativno malog gubitka nosivosti u postpukotinskom području. Time se postiglo realnije predviđanje ponašanja pri zamoru kako običnog tako i mikroarmiranog betona. Iako se model JSCE pokazao najtočnijim za primjenu kod mikroarmiranih betona, i njegova predviđanja podcjenjuju njihov učinak. Kod spomenutog modela, kao i kod modela ACI, svakako bi trebalo uzeti u obzir doprinos vlakana u povećanju duktilnosti i vlačne čvrstoće betona.

Provođenjem sličnih eksperimenata s mnogo većim brojem uzoraka i na više različitih razina opterećenja (od $S = 0,6$ do $S = 0,95$) ostvario bi se bolji uvid u mogućnosti nadopune proračunskih modela zamora betona.

Zahvala

Autori zahvaljuju na financijskoj potpori iz sedmog okvirnog programa Europske unije projekta "Anagennisi - Innovative Use of All Tyre Components in Concrete". Također zahvaljuju svim suradnicima na projektu, a posebno kolegama iz Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu i tvrtki Gradmont d.o.o.

LITERATURA

- [1] Krolo J., Šimić D.: *Mehanika materijala*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet; 2011.
- [2] Lee, M.K., Barr, B.I.G.: An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete, *Cem Concr Compos*, 26 (2004) 4, pp. 299-305.
- [3] Tlemat, H., Pilakoutas, K., Neocleous, K.: Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres, *Mater Struct*, 39 (2006), pp. 365-77, <https://doi.org/10.1007/s11527-005-9009-4>
- [4] Tlemat, H., Pilakoutas, K., Neocleous, K.: Modelling of SFRC using inverse finite element analysis, *Mater Struct*, 39 (2006) 2, pp. 221-33.
- [5] Neocleous, K., Tlemat, H., Pilakoutas, K.: Design issues for concrete reinforced with steel fibers, including fibers recovered from used tires, *J Mater Civ Eng*, 18 (2006) 5, pp. 677-85.
- [6] Achilleos, C., Hadjimitsis, D., Neocleous, K., Pilakoutas, K., Neophytou, P.O., Kallis, S.: Proportioning of Steel Fibre Reinforced Concrete Mixes for Pavement Construction and Their Impact on Environment and Cost, *Sustainability*, 3 (2011) 7, pp. 965-83, <https://doi.org/10.3390/su3070965>
- [7] Graeff, A.G., Pilakoutas, K., Neocleous, K., Peres, M.V.N.N.: Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres, *Eng Struct*, 45 (2012), pp. 385-95, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.030>
- [8] Serdar, M., Baričević, A., Lakušić, S., Bjegović, D.: Betonski proizvodi specijalne namjene od reciklata otpadnih guma, *GRAĐEVINAR*, 65 (2013) 9, pp. 793-801.
- [9] Serdar, M., Baričević, A., Bjegović, D., Lakušić, S.: Possibilities of use of products from waste tyre recycling in concrete industry, *Istraz i Proj za privredu*, 12 (2014), pp. 89-93.
- [10] Bjegović, D., Baričević, A., Lakušić, S.: Innovative low cost fibre-reinforced concrete. Part I: Mechanical and durability properties, In: Alexander MG, Beushausen HD, Dehn F, Moyo P, editors. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*, CRC Press/Balkema, pp. 199-203, 2012.
- [11] Krolo, J., Damjanović, D., Duvnjak, I., Bjegović, D., Lakušić, S., Baričević, A.: Innovative low cost fibre-reinforced concrete. Part II: Fracture toughness and impact strength, In: Alexander MG, Beushausen HD, Dehn F, Moyo P, editors. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*, CRC Press/Balkema, pp. 204-209, 2012.
- [12] Baričević, A., Bjegović, D., Kovačević, J.: Innovative low cost hybrid fibre reinforced concrete, *CPI - Concr Plant Int*, 4 (2013), pp. 64-70.
- [13] Bjegović, D., Baričević, A., Lakušić, S., Damjanović, D., Duvnjak, I.: Positive interaction of industrial and recycled steel fibres in fibre reinforced concrete, *J Civ Eng Manag*, 19 (2013) 1, pp. 550-60.
- [14] Baričević, A.: Doprinos razvoju održivog hibridnog mikroarmiranog betona primjenom produkata reciklaže otpadnih guma, *Disertacija*. Građevinski fakultet, Zagreb; 2014.

- [15] Bartolac, M.: Svojstva predgotovljenih konstruktivnih elemenata s djelomičnom zamjenom armature recikliranim čeličnim vlaknima, Disertacija, Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.
- [16] Projekt Anagennisi, D1.7 Characterised materials of sufficient quantities, FP7 Project: Innovative Reuse of all Tyre Components in Concrete, 2014.
- [17] Twincon.: Technical Data Sheet, Steel fibres RTSF -High strength reused steel fibre
- [18] HZN: HRN EN 12350-6:2000 Ispitivanje svježega betona - 6. dio: Gustoća
- [19] HZN: HRN EN 12350-7:2009 Ispitivanje svježega betona - 7. dio: Sadržaj pora - Tlačne metode
- [20] HZN: HRN EN 12350-2:2009 Ispitivanje svježega betona - 2. dio: Ispitivanje slijeganjem
- [21] HZN: HRN EN 12390-3:2012. Ispitivanje očvrstloga betona - 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka
- [22] HZN: HRN EN 12390-6:2010. Ispitivanje očvrstloga betona - 6. dio: Vlažna čvrstoća cijepanjem
- [23] HZN: HRN EN 12390-13:2013. Ispitivanje očvrstloga betona -13. dio: Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri tlaku
- [24] HZN: HRN EN 14651:2008 - Ispitna metoda za beton ojačan metalnim vlaknima - Mjerenje savojne čvrstoće
- [25] ACI Committee 544.: Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, 89 (1999).
- [26] Graeff, A.G.: Long-term performance of recycled steel fibre reinforced concrete for pavement application, PhD thesis. University of Sheffield; 2011.
- [27] Şahin, Y., Köksal, F.: The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete, Constr Build Mater, pp. 1801-1806. 2011.
- [28] Naaman, A.E.: Fibre reinforced concrete: State of Progress at the edge of the new millennium, In: Proceedings of the ACI-KC 2nd International Conference Design and Sustainability of Structural Concrete in the Middle East with Emphasis on High-Rise Buildings, Kuwait; 2017AD.
- [29] Shah, A.A., Ribakov Y.: Recent trends in steel fibered high-strength concrete, Mater Des, pp. 4122-4151, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.030>
- [30] Angelakopoulos, H., Neocleous, K., Pilakoutas, K.: Uniaxial compressive behaviour of steel fibre reinforced roller compacted concrete, In: 6th International Conference Fibre Concrete 2011, Prague, Czech Republic; 2011.
- [31] Baričević, A., Bjegović, D., Skazlić, M.: Hybrid Fiber - Reinforced Concrete with Unsorted Recycled-Tire Steel Fibres, J Mater Civ Eng, 2016 (2009).
- [32] Neocleous, K., Angelakopoulos, H., Pilakoutas, K., Guadagnini, M.: Fibre-reinforced roller-compacted concrete transport pavements, Proceeding ICE - Transp, 164 (2011) 2, pp. 97-109.
- [33] Federation internationale du beton: Model Code for Concrete Structures 2010, 2013.
- [34] Chang, D.: Flexural fracture and fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete structures, 156 (1995), pp. 201-207.
- [35] ACI Committee 2015.: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading Reported by ACI Committee 215, pp. 74, 1997.
- [36] Shah, N.M., Surendra, P.: American concrete institute considerations for fatigue, 1982.
- [37] Japan Society of Civil Engineers.: Standard Specifications for Concrete Structures, 2007 , Design, 2010.