

Modifikacija modela skupljanja i puzanja betona

Elica Marušić, Nedjeljko Akrap

Ključne riječi

skupljanje betona, puzanje betona, model Eurokod 2, model B3, beton velike čvrstoće, koeficijent puzanja betona

Key words

concrete shrinkage, concrete creep, Eurocode 2 model, B3 model, high-strength concrete, concrete creep coefficient

Mots clés

retrait de béton, fluage de béton, modèle d'après Eurocode 2, modèle d'après B3, béton à haute résistance, coefficient de fluage de béton

Ключевые слова

усадка бетона, ползучесть бетона, модель Eurokod 2, модель B3, бетон высокой прочности, коэффициент ползучести бетона

Schlüsselworte

Betonschwinden, Betonkriechen, Modell Eurocode 2, Modell B3, hochfester Beton, Beiwert des Betonkriechens

E. Marušić, N. Akrap

Prethodno priopćenje

Modifikacije modela skupljanja i puzanja betona

Rezultati ispitivanja skupljanja betona dobiveni u pet istraživačkih programa uspoređeni su s rezultatima dobivenim proračunom prema dva modela (Eurokod 2 i B3). Usporedbe pokazuju veliko odstupanje vrijednosti dobivenih prema modelima od onih dobivenih ispitivanjima. Predložen je koeficijent pomoću kojega se povećava točnost EC2 modela, tako da se može upotrijebiti za predviđanje skupljanja betona velike čvrstoće. Analiziran je i model predviđanja koeficijenta puzanja betona.

E. Marušić, N. Akrap

Preliminary note

Modifications to the concrete shrinkage and creep models

The concrete shrinkage test results obtained in five research programs are compared with the results obtained through analysis according to two models (Eurocode 2 and B3). The comparisons show that the values obtained according to models greatly deviate from those obtained by testing. A coefficient is proposed as a means to increase accuracy of the EC 2 model, so that it can be used to anticipate shrinkage of the high-strength concrete. The model for anticipating the concrete creep coefficient is also analyzed.

E. Marušić, N. Akrap

Note préliminaire

Modifications des modèles de retrait et de fluage de béton

Les résultats de retrait de béton obtenus au cours des cinq programmes de recherches sont comparés avec les résultats obtenus par l'analyse selon deux modèles (Eurocode 2 et B3). Les comparaisons montrent que les valeurs obtenues selon les modèles s'écartent de manière considérable de celles obtenues au cours des essais. Un coefficient est proposé comme moyen pour augmenter la précision du modèle EC 2 pour que celui-ci puisse être utilisé pour anticiper le retrait du béton à haute résistance. Le modèle pour anticiper le coefficient de fluage de béton est également analysé.

E. Марушич, Н. Акрап

Предварительное сообщение

Модификация модели усадки и ползучести бетона

Результаты испытаний усадки бетона, полученные при проведении пяти программ исследований сравниваются с результатами, полученными при расчетах по двум моделям (Eurokod 2 и B3). При сравнении обнаруживаются значительные отклонения значений, полученных при расчете по моделям, от значений, полученных при испытаниях. Предлагается коэффициент, введение которого повышает точность модели EC2, что позволяет применить ее для прогнозирования усадки бетона высокой прочности. Проведен анализ модели прогнозирования коэффициента ползучести бетона.

E. Marušić, N. Akrap

Vorherige Mitteilung

Modifizierung der Modelle des Betonschwindens und -kriechens

Die Prüfungsergebnisse des Betonschwindens erhalten in fünf Forschungsprogrammen verglich man mit Ergebnissen erhalten durch Berechnung nach zwei Modellen (Eurocode 2 und B3). Die Vergleiche zeigen grosse Abweichung der Werte erhalten durch die Modelle von denen erhalten durch Prüfung. Vorgeschlagen ist ein Beiwert mit dessen Hilfe die Genauigkeit des EC2 Modells anwächst, so dass sie für die Voraussage der Schwindung von hochfesten Betonen brauchbar ist. Analysiert ist auch ein Modell der Voraussage des Beiwerts des Betonkriechens.

Autori: Mr. sc. Elica Marušić, dipl. ing. građ., Nedjeljko Akrap, dipl. ing. građ., Institut IGH, Laboratorij IGH, Split

1 Uvod

Kao pomoć pri predviđanju vremenskih deformacija betona, odnosno deformacija skupljanja i puzanja u Eurokodu 2 [5] opisani su modeli za predviđanje veličine navedenih deformacija. Izloženi su jednostavni modeli u kojima se ne uzima u obzir kvaliteta betona. U Dodatku 1 Eurokoda 2 dani su i nešto složeniji modeli za slučajeve projektiranja zahtjevnijih inženjerskih konstrukcija u kojima je potrebno točnije predviđanje vrijednosti deformacija. U laboratorijskoj se praksi pokazalo da postoje znatne razlike između vrijednosti deformacija dobivenih modelom i stvarnih rezultata ispitivanja vremenskih deformacija betona.

U laboratoriju IGH u Splitu puzanje i skupljanje sustavno se prate još od 1999. godine kada je započela izgradnja mosta preko Rijeke dubrovačke. Već su tada primijećena odstupanja u veličini deformacijskih svojstava betona u odnosu na vrijedeće modele. Primijećena je razlika ne samo u veličini nego i u zakonitosti rezultata. Pokazano je da su pretpostavke modela iz Eurokoda 2 samo djelomično točne jer se u modelu ne uzima u obzir utjecaj sastava betona na veličinu deformacija betona [9], [11].

U praksi problem nastaje kad se upotrebom modela iz Eurokoda 2 dobiju znatno manje vrijednosti skupljanja od onih koje su dobivene ispitivanjem projektiranih betona. Prema modelu iz Eurokoda 2 za dva uzorka istih dimenzija, njegovana u istim uvjetima jednako dugo vremena, uz upotrebu istog cementa, veličina vremenskih deformacija ovisi jedino o tlačnoj čvrstoći. Prema modelu, što je veća tlačna čvrstoća manje su vremenske deformacije betona. To je točno samo djelomično, što će se, analizom rezultata ispitivanja, obrazložiti u ovom radu. Iako većina sastava ispitivanih betona pripada HSC-u (*high strength concrete* – beton velike čvrstoće), u analizu su uzeti i dostupni podaci za NSC (*normal strength concrete* – beton obične čvrstoće). U Eurokodu 2 navedeno je ograničenje što se tiče primjene na beton velike čvrstoće (veće od 50 MPa). Pokazat će se da model nije prikladan za beton takvih vrijednosti čvrstoće upravo zbog zanemarivanja sastava betona.

Budući da je u razdoblju od 2004. do 2007. godine u laboratoriju IGH u Splitu provedeno više programa istraživanja utjecaja sastava betona na različita svojstva betona, ova su iskustva upotrijebljena za provjeru postavki navedenih u eksperimentalnom programu [9]. Neka od navedenih istraživanja bila su provođena u suradnji s proizvođačima cementa, a neka su bila namijenjena određivanju najpovoljnijega sastava betona za posebne građevine. Skupljanje je ispitano na više od 300 uzoraka betona i puzanje na više od 80 uzoraka. Za analizu veličine deformacije puzanja uzeti su svi rezultati ispitiva-

nja, a za analizu veličine skupljanja nešto više od 150 uzoraka za koje su postojali pouzdani podaci o sastavu betona i tlačnoj čvrstoći.

Pretpostavka modela iz Eurokoda 2 (model EC2) da beton veće čvrstoće ima manje skupljanje i puzanje vrijedi u slučajevima kad se veća čvrstoća postiže smanjivanjem količine vode, odnosno kod betona različitih konzistencija, dok je kod betona iste konzistencije, gdje se povećanje čvrstoće postiže povećanjem količine cementa, zanemaren utjecaj povećanja ukupne količine cementnog kamena. Zbog toga navedenu pretpostavku modela eksperimentalni podaci nisu potvrdili.

Rezultati ispitivanja nisu uspoređivani s modelom preporučenim u ACI 209R-92 [1] jer je iz prijašnjih istraživanja [9] [11] poznato da navedeni model daje znatno veće vrijednosti skupljanja i puzanja za HSC.

Na konferenciji o deformacijskim svojstvima betona održanoj 2008. godine u Japanu (CONCREEP8), više je autora potvrdilo veliko rasipanje eksperimentalnih rezultata u odnosu na predviđanje prema Eurokodu 2, ali i u odnosu na ostale postojeće modele. Na navedenoj konferenciji objavljen je i rad [10] s eksperimentalnim podacima kojima se koristimo i u ovom radu. Osim usporedbe s modelom EC2, provedena je i usporedba s modelom B3, ali se uvode i novi eksperimentalni podaci skupljanja betona u starosti do 91 dan.

2 Skupljanje

2.1 Programi ispitivanja skupljanja

Analizirana su ukupno 52 sastava betona s otprilike 150 uzoraka za ispitivanje skupljanja u pet različitih istraživačkih programa prikazanih u tablici 1.

- Program CEM – Izrađeno je 20 mješavina betona s pet vrsta cementa: CEM II/A-M 42,5N, CEM II/B-M 32,5R, CEM II/A-S 42,5R, CEM II/A-L 32,5R, CEM I 42,5. Sa svakom vrstom cementa izrađene su po četiri mješavine betona s 310, 350, 390 i 430 kg cementa po m³ betona. Nije dodavan aditiv. Postignute su čvrstoće od 29 MPa do 47,8 MPa.
- Program KUP - Razni sastavi betona namijenjeni izboru sastava za izgradnju kupole sportske dvorane u Zadru. Izrađeno je 10 mješavina betona s agregatom iz dva izvora i s 420 do 477 kg cementa po m³ betona. Dvije su mješavine betona sadržavale mikrosiliku (5,8 % mase cementa), a jedna mikrosiliku i polipropilenska vlakna. Sve su mješavine izrađene s dodatkom superplastifikatora i usporivača. Postignute su čvrstoće od 58,6 MPa do 81,0 MPa.
- Program MUC - Tri mješavine betona s cementom CEM II/A-S 42,5R, bez superplastifikatora i sa su-

perplastifikatorom i mikrosilikom. Postignute su čvrstoće od 38,5 do 77,6 MPa.

- d) Program I. i II. - Osam mješavina betona s dvije vrste cementa CEM II/A-S 42,5R i CEM I 42,5R. Sa svakom vrstom cementa izrađene su po četiri mješavine sa po 330, 360, 390 i 420 kg cementa po m³ betona uz dodatak superplastifikatora i usporivača. Postignute su čvrstoće od 50,3 MPa do 73,0 MPa.
- e) Program K0-K3, K4-K7 i K8-K11 - Dvanaest sastava betona s cementom s dodatkom letećeg pepela svrstanih u tri skupine. Dvije su skupine izrađene bez dodatka superplastifikatora, s 300, 350, 400 i 450 kg cementa po m³ betona i dvije konzistencije (S3 i S4). Jedna je skupina izrađena s istom vrstom cementa i 360, 420, 440 i 480 kg cementa po m³ betona i dodatkom superplastifikatora i usporivača. Postignute su čvrstoće od 23,4 do 64,3 MPa.

2.2 Opis ispitivanja skupljanja

Uzorci betona oznaka „b“, „c“, „d“ i „e“ čuvani su u prostoriji temperature 20 ± 2 °C i relativne vlažnosti 55 ± 5 %, a uzorci betona s oznakom „a“ (program CEM) u prostoriji iste temperature i vlažnosti 70 ± 5 %. Ispitivanje skupljanja provedeno je prema HRN U.M1.029 [8]. Svaki rezultat ispitivanja skupljanja dobiven je kao srednja vrijednost rezultata ispitivanja triju prizama dimenzija 100 x 100 x 400 mm. Na svakoj je prizmi skupljanje mjereno na dvije suprotne stranice na mjernoj duljini od 150 mm. Uzorci su nakon vađenja iz kalupa u starosti

od jedan dan njegovani u vodi temperature 20 ± 2 °C dva dana. U starosti uzoraka od tri dana započinjalo je mjerenje skupljanja. Skupljanje je mjereno svakih sedam dana. Ukupno trajanje ispitivanja bilo je različito za razne programe, što je opisano u točki 2.6.

U starosti od 28 dana ispitana je i tlačna čvrstoća prema HRN EN 12390-3 [6] na valjcima promjera 15 cm i visine 30 cm.

2.3 Modifikacija izraza za skupljanje iz modela EC2 na temelju rezultata ispitivanja

Eksperimentalni rezultati uspoređeni su s vrijednostima dobivenim upotrebom modela iz Eurokoda 2 (model EC2 u daljnjem tekstu). Iz prikaza sastava betona opisanih u točki 2.1 vidi se da je upotrijebljeno više vrsta cementa, ali svi pripadaju grupama N i R, odnosno normalnim ili brzovežućim vrstama cementa. Budući da su uzorci njegovani na dvije različite vlažnosti, svrstani su u dvije skupine. Bez obzira na razlike u vrsti i količini cementa i konzistenciji, model EC2 vrednuje beton različitih sastava isključivo prema tlačnoj čvrstoći. Prema tom modelu, s porastom tlačne čvrstoće deformacije skupljanja se smanjuju. U Model Codeu 90 (CEB-FIP 1993, 1995) [3], na temelju kojeg je napravljen Eurokod 2, navodi se da je zanemarivanje utjecaja sastava betona na veličinu skupljanja i puzanja jedan od uzroka nepreciznosti modela.

U preporukama koje se odnose na Model Code 90 što se tiče HPC-a (high performance concrete – beton visokih performansi) [4], u poglavlju o skupljanju i puzanju na-

Tablica 1. Prikaz sastava mješavina

Oznaka programa	Broj mješavina u programu	Količina cementa (kg/m ³ betona)	Tip cementa	Aditivi i mineralni dodaci	Razred konzistencije	Tlačna čvrstoća (MPa)
a) CEM	20	310, 350, 390, 430	CEM II/A-M 42,5N CEM II/B-M 32,5R CEM II/A-S 42,5R CEM II/A-L 32,5R CEM I 42,5	-	S3	29, - 47,8
b) KUP	10	420 - 477	CEM II/A-S 42,5N	superplastifikator i usporivač – sve mješavine, mikrosilika – dvije mješavine, mikrosilika i PP vlakna – jedna mješavina	S5	58,6 - 81,0
c) MUC	3	360 - 490	CEM II/A-S 42,5 R	superplastifikator – dvije mješavine, jedna bez njega	S4-S5	38,5 - 77,6
d) I II	7	330, 360, 390, 420	CEM II/A-S 42,5R CEM I 42,5R	superplastifikator i usporivač	S4	50,3 - 73,0
e) K0-K3 K4-K7 K8-K11	12	300, 350, 400, 450 300, 350, 400, 450 360, 420, 440, 480	cement s letećim pepelom	-	S4 S3 S4	23,4 - 40,6

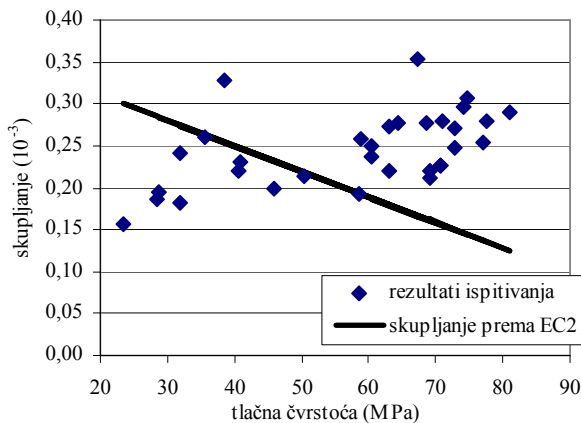
vodi se da modeli skupljanja i puzanja za HSC trebaju biti ponovno razmotreni i da se ulažu znatni naponi za dobivanje odgovarajućeg modela.

Rezultati ispitivanja skupljanja betona u starosti od 28 dana uspoređeni su s vrijednostima skupljanja proračunanim prema modelu EC2 na temelju tlačne čvrstoće uzoraka. Prema Eurokodu 2, srednji koeficijent varijacije za predviđanje skupljanja ovim modelom određen pomoću banke laboratorijskih podataka iznosi 35 %. Analiza eksperimentalnih podataka u ovom radu pokazuje da se samo dio njih nalazi u navedenim granicama. Za analizu je odabrano skupljanje u starosti od 28 dana jer je ispitivanje trajalo najmanje toliko vremena (program CEM).

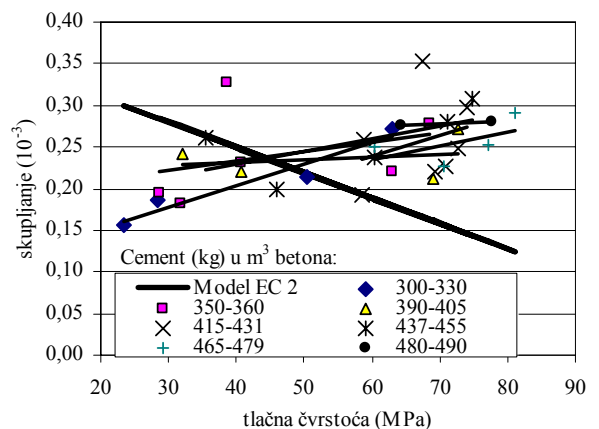
Na slikama 1., 2. i 3. prikazani su rezultati ispitivanja skupljanja u odnosu prema tlačnoj čvrstoći. Prikazane su i vrijednosti proračunane prema modelu EC2. Pregledom slika 1. i 2. uočava se da su rezultati ispitivanja grupirani u suprotnom smjeru u odnosu na vrijednosti skupljanja proračunane prema modelu EC2, odnosno da

s porastom tlačne čvrstoće skupljanje raste. Na slici 3. prikazani su rezultati grupirani prema programima ispitivanja koji su se razlikovali po vrsti cementa, konzistenciji, dodacima i namjeni. Iz rezultata pojedinog programa vidi se da s porastom čvrstoće skupljanje raste. Uzrok je u tomu što sve mješavine u jednoj grupi imaju isti razred konzistencije. Za postizanje iste konzistencije potrebna je približno jednaka količina vode. Uz istu količinu vode u betonu s porastom količine cementa tlačna čvrstoća raste jer se smanjuje vodocementni omjer, ali raste i količina cementne paste koja se skuplja, tako da je s porastom čvrstoće skupljanje veće. Skupljanje, naravno, ovisi i o vodocementnom omjeru cementne paste, tako da bi za istu količinu cementne paste manje skupljanje bilo kod cementne paste s manjim vodocementnim omjerom, odnosno većom tlačnom čvrstoćom. Međutim, tu bi se već radilo o usporedbi betona različite konzistencije.

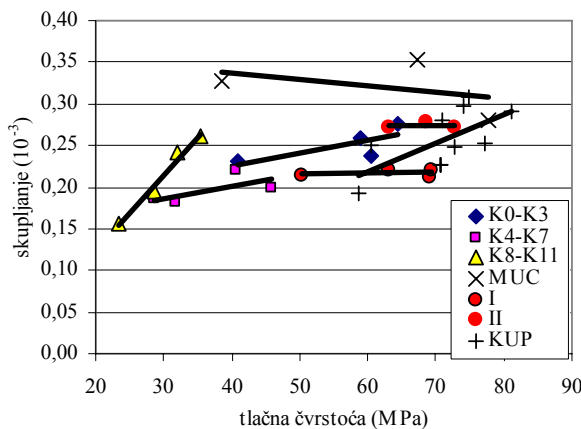
Analiza razlika eksperimentalnih podataka i rezultata proračunanih modelom EC2 napravljena je tako da je proračunan koeficijent koji predstavlja odnos između



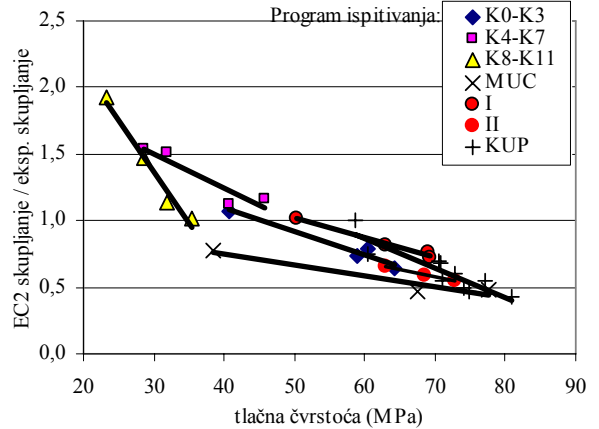
Slika 1. Odnos tlačne čvrstoće i skupljanja betona u starosti od 28 dana (RH 55 ± 5 %)



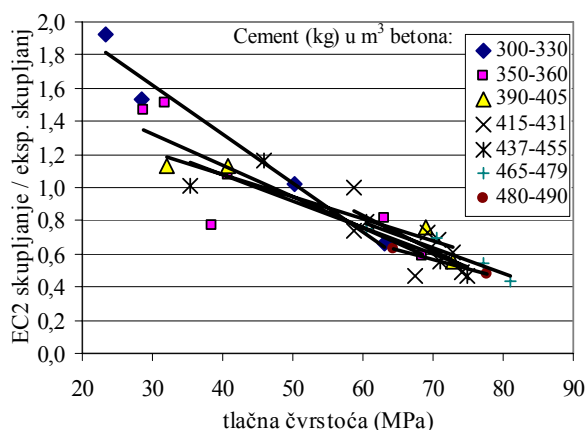
Slika 2. Odnos tlačne čvrstoće i skupljanja u starosti od 28 dana za mješavine betona grupirane prema količini cementa (RH 55 ± 5 %)



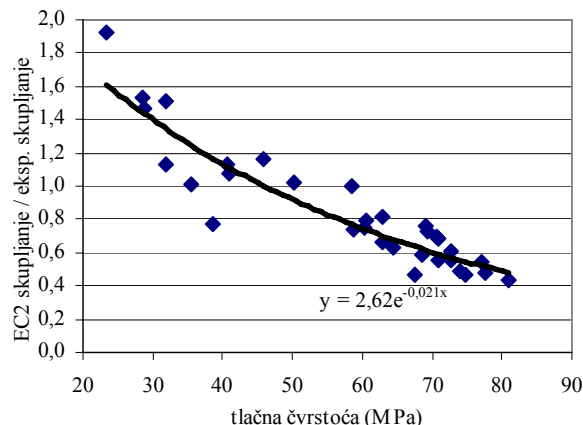
Slika 3. Odnos tlačne čvrstoće i skupljanja betona u starosti od 28 dana. Rezultati su grupirani prema programu (RH 55 ± 5 %)



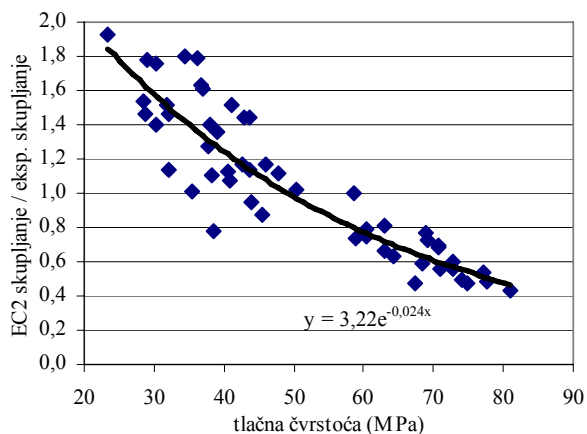
Slika 4. Odnos tlačne čvrstoće i koeficijenta „EC2 skupljanje / eksp. skupljanje“ za mješavine betona grupirane prema programima (RH 55 ± 5 %)



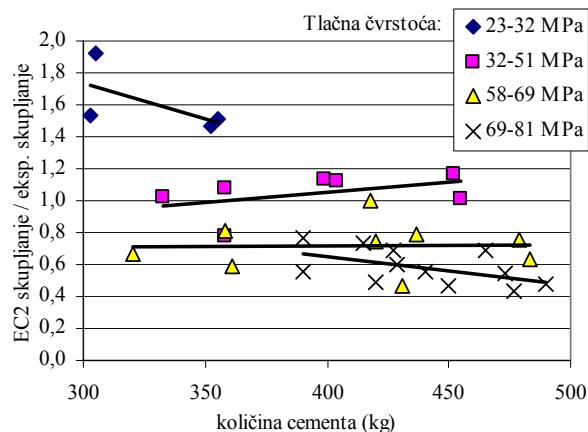
Slika 5. Odnos tlačne čvrstoće i koeficijenta „EC2 skupljanje / eksp. skupljanje“ za mješavine betona grupirane prema količini cementa (RH 55 ± 5 %)



Slika 6. Odnos tlačne čvrstoće i koeficijenta „EC2 skupljanje / eksp. skupljanje“ s aproksimacijskom krivuljom (RH 55 ± 5 %)



Slika 7. Odnos tlačne čvrstoće i koeficijenta „EC2 skupljanje / eksp. skupljanje“ sa zajedničkom aproksimacijskom krivuljom (RH 55 ± 5 % i RH 70 ± 5 %)



Slika 8. Odnos količine cementa i koeficijenta „EC2 skupljanje / eksp. skupljanje“ za sastave betona grupirane prema tlačnoj čvrstoći (RH 55 ± 5 %)

podataka proračunanih prema modelu i stvarno izmjereno skupljanje. Vrijednosti su navedenog koeficijenta od 0,43 do 1,92. Njegova ovisnost o tlačnoj čvrstoći prikazana je na slikama 4. do 7. S povećanjem čvrstoće smanjuje se vrijednost koeficijenta „EC2 skupljanje / eksp. skupljanje“. Za manje vrijednosti tlačne čvrstoće vrijednosti skupljanja predviđene modelom EC2 veće su od stvarno izmjerenih, a za veće vrijednosti tlačne čvrstoće vrijednosti skupljanja predviđene modelom EC2 manje su od stvarno izmjerenih. Na slici 8. prikazan je odnos količine cementa i koeficijenta „EC2 skupljanje / eksp. skupljanje“. Bez obzira na količinu cementa, model iz EC2 predviđa prihvatljivo točno vrijednost skupljanja za beton tlačne čvrstoće od 32 do 51 MPa. Za čvrstoću od 23 do 32 MPa skupljanje prema EC2 je 1,5 do 2 puta veće od stvarnog a za tlačnu čvrstoću od 59 do 81 MPa iznosi 0,5 do 1,0 stvarnog skupljanja (u prosjeku 0,64). Na slici 7. zajedno su prikazani rezultati ispitivanja dobiveni ispitivanjem pri vlažnostima od 55 ± 5 % i 70

± 5 % i zajednička eksponencijalna aproksimacijska krivulja.

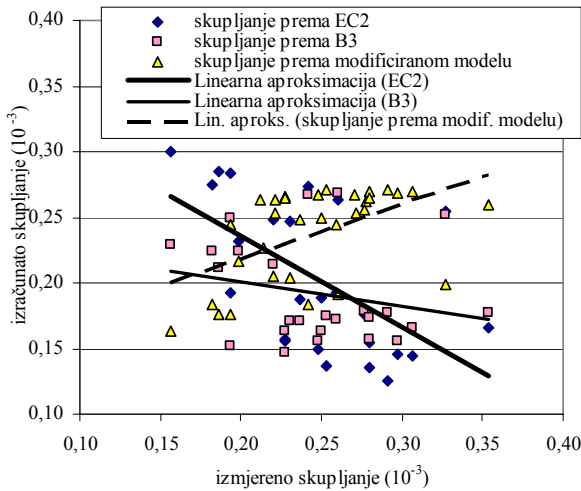
Odnos tlačne čvrstoće i vrijednosti „EC2 skupljanje / eksp. skupljanje“ aproksimiran je eksponencijalnom krivuljom, tako da se predlaže da se u modelu iz Eurokoda 2 vrijednost skupljanja, odnosno koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj tlačne čvrstoće na veličinu skupljanja korigira izrazom:

$$k = \frac{1}{3,22 e^{-0,024 f_{ct}}}, \quad (1)$$

gdje je k = koeficijent kojim se množi vrijednost skupljanja proračunana upotrebom modela EC2; $f_{ct} = 28$ – dnevna tlačna čvrstoća ispitana na valjku.

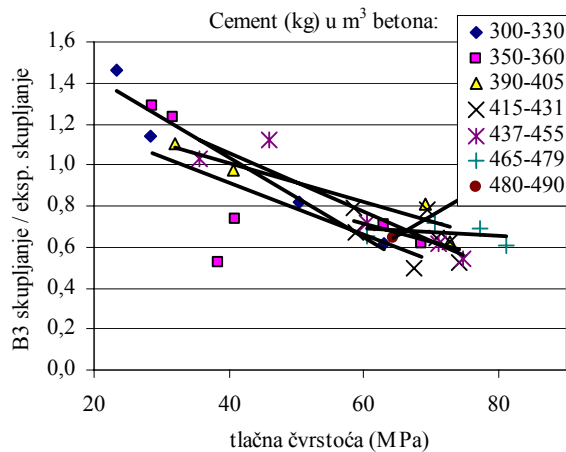
Proračunane su veličine skupljanja prema modifikaciji modela. Odnos proračunannog i izmjerenog skupljanja koji se kretao u rasponu od 0,43 do 1,92 (srednja vrijednost je bila 1,06) prema novom je proračunu od 0,60 do

1,31 (srednja vrijednost je 1,01). Standardno odstupanje smanjeno je s 0,43 na 0,16, što govori o povećanju pouzdanosti modela.



Slika 9. Odnos tlačne čvrstoće i skupljanja betona u starosti od 28 dana (RH 55 ± 5 %)

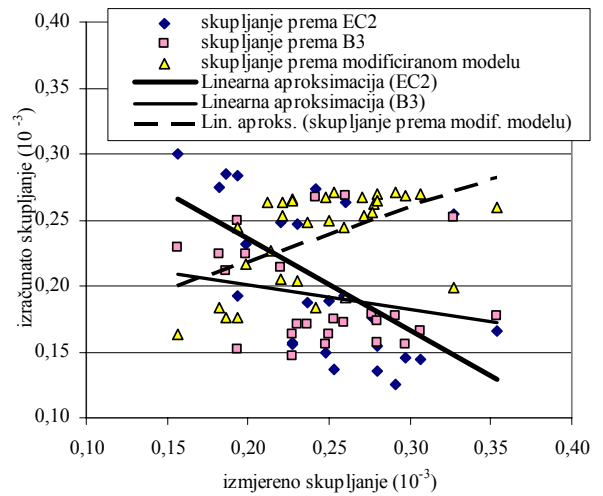
O povećanju pouzdanosti modificiranog modela u odnosu na model EC2 može se zaključiti i na temelju slika 9. i 10. Na slici 9. vidi se da je aproksimacijska krivulja u modificiranom modelu promijenila smjer i da slijedi eksperimentalne podatke. Usporedimo li slike 10. i /7. također se zaključuje o povećanju pouzdanosti modificiranog modela.



Slika 10. Odnos tlačne čvrstoće i koeficijenta „model / eksp. skupljanje” s aproksimacijskom krivuljom (RH 55 ± 5 %)

2.4 Usporedba rezultata ispitivanja skupljanja s teorijskim vrijednostima prema modelu B3

U modelu B3 [2] autori su, uviđajući nedostatke modela CEB-a, pokušali uzeti u obzir sastav betona pri predviđanju deformacija skupljanja i puzanja betona. Sastav betona u modelu za predviđanje skupljanja uzet je u obzir

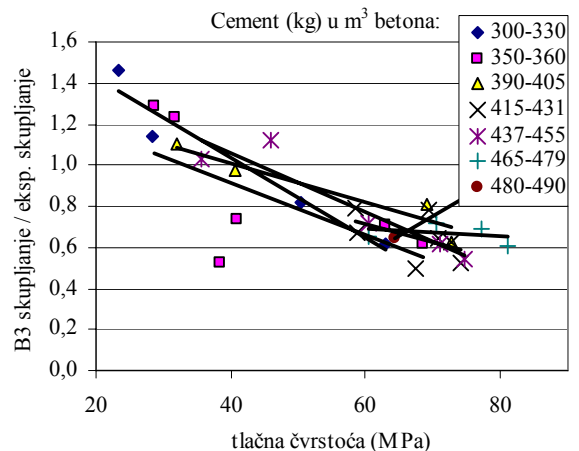


Slika 11. Korelacija izmjerenog skupljanja i skupljanja proračunano prema modelima

pomoću količine vode i tlačne čvrstoće betona u izrazu za konačno skupljanje.

Prema modelu B3 ovisnost skupljanja o tlačnoj čvrstoći predstavljena je krivuljama koje se razlikuju prema količini vode, tako da svaka krivulja predstavlja jednu konzistenciju betona. Za jednu količinu vode, s povećanjem tlačne čvrstoće smanjuje se skupljanje kao kod EC2 modela, što ne odgovara eksperimentalnim podacima. Model B3 također ima ograničenje upotrebe za beton velike čvrstoće.

Vrijednosti skupljanja proračunane prema modelu B3 uspoređene su s eksperimentalnim podacima. Rezultati su prikazani na slici 11. Iz navedenog prikaza vidi se da je korelacija izmjerenog skupljanja i skupljanja prema modelu B3 nešto bolja od korelacije dobivene upotrebom modela EC2, ali daleko lošija od korelacije dobive-



Slika 12. Odnos tlačne čvrstoće i koeficijenta „B3 skupljanje / eksp.skupljanje” za mješavine betona grupirane prema količini cementa (RH 55 ± 5 %)

ne upotrebom novog modela koji predstavlja modifikaciju modela EC2. Raspon vrijednosti koeficijenta „B3 skupljanje / eksp.skupljanje“ također potvrđuje poboljšanje modela B3 u odnosu na model EC2, što se vidi uspoređimo li sliku 12. sa slikom 5.

Odnos skupljanja proračunanog prema modelu B3 i izmjerenog skupljanja za uzorke čuvane na zraku vlažnosti $55 \pm 5 \%$ iznosi od 0,48 do 1,47 (srednja vrijednost je 0,80). Standardno odstupanje smanjeno je na 0,25.

2.5 Skupljanje – usporedba svih modela

U tablici 2. uspoređeni su koeficijenti koji prikazuju odnos vrijednosti dobivenih upotrebom modela i eksperimentalnih podataka. Analizirani su modeli EC2, B3 i novi model koji predstavlja modifikaciju modela EC2 koeficijentom k opisanim u točki 2.3.

Iz podataka u tablicama 2. i 3. vidi se da je model B3 poboljšanje u odnosu prema modelu iz Eurokoda 2. Smanjeni su veličina najveće greške i rasipanje podataka. Ipak, modifikacija modela EC2 predložena u ovome radu najbolje aproksimira eksperimentalne podatke.

2.6 Vremenski razvoj skupljanja

U programu CEM ispitivanje skupljanja trajalo je 28 dana, u programima K0 – K11 42 dana, u programu KUP 63 dana, a u programima I., II. i MUC 91 dan. Za uspoređivanje rezultata dobivenih upotrebom modela i eksperimentalnih rezultata u prethodnim točkama uzeti su podaci o skupljanju u starosti betona od 28 dana. Međutim, analizirano je i skupljanje u ostalim starostima da bi se provjerila vremenska funkcija iz Eurokoda 2.

Iz slike 13. i tablice 4. vidljivo je da se s vremenom pouzdanost modela EC2 povećava, međutim kako se u

Tablica 2. Usporedba koeficijenata (vlažnost $55 \pm 5 \%$)

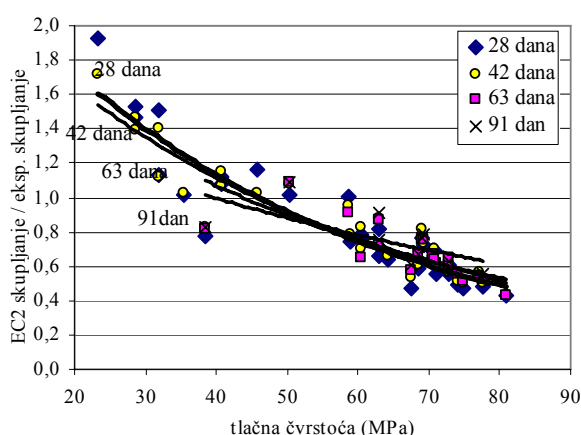
Starost uzoraka	28 dana		
Relativna vlažnost	$55 \pm 5 \%$		
Ukupan broj mješavina	32		
Koeficijent „vrijednost prema modelu / eksperimentalni podatak“	EC2 skupljanje / eksp. skupljanje	B3 skupljanje / eksp. skupljanje	novi model / eksp. skupljanje
min vrijednost	0,43	0,50	0,61
maks vrijednost	1,92	1,47	1,27
prosječna vrijednost	0,85	0,79	0,98
standardna devijacija	0,37	0,25	0,15

Tablica 3. Usporedba koeficijenata (svi podaci)

Starost uzoraka	28 dana		
Relativna vlažnost	$55 \pm 5 \%$ i $70 \pm 5 \%$		
Ukupan broj mješavina	52		
Koeficijent „vrijednost prema modelu / eksperimentalni podatak“	EC2 skupljanje / eksp. skupljanje	B3 skupljanje / eksp. skupljanje	novi model / eksp. skupljanje
min vrijednost	0,43	0,50	0,61
maks vrijednost	1,92	1,49	1,32
prosječna vrijednost	1,06	0,95	1,02
standardna devijacija	0,43	0,30	0,16

Tablica 4. Usporedba koeficijenata (vlažnost $55 \pm 5 \%$)

Relativna vlažnost	$55 \pm 5 \%$							
Ukupan broj mješavina	32	32	20	10	32	32	20	10
Koeficijent „vrijednost prema modelu / eksperimentalni podatak“	EC2 / eksp.podaci				novi model / eksp.podaci			
Starost uzoraka (dani)	28	42	63	91	28	42	63	91
min vrijednost	0,43	0,43	0,43	0,56	0,61	0,65	0,64	0,65
maks vrijednost	1,92	1,72	1,09	1,09	1,27	1,33	1,23	1,28
prosječna vrijednost	0,85	0,85	0,68	0,76	0,98	0,99	1,06	1,09
standardna devijacija	0,37	0,32	0,16	0,16	0,15	0,15	0,18	0,19



Slika 13. Odnos tlačne čvrstoće i koeficijenta „EC2 skupljanje / eksp. skupljanje“ u starostima od 28, 42, 63 i 91 dan sa zajedničkim aproksimacijskim krivuljama (RH $55 \pm 5\%$ i RH = $70 \pm 5\%$)

starosti od 63 dana i 91 dan broj podataka za analizu smanjio, ove se rezultate mora uzeti s rezervom. Odstupanje prosječne vrijednosti koeficijenta „model / eksp. skupljanje“ od 1,0 manje je kod modificiranoga, novog modela, ali je standardna devijacija nešto veća. model EC2 i u većim starostima betona daje znatno manje vrijednosti skupljanja HSC-a od rezultata ispitivanja, ali je rasipanje rezultata smanjeno.

U eksperimentalnom je dijelu rada [9] pokazano da razvoj skupljanja u vremenu ovisi također o sastavu betona. Ovdje se neće dalje razmatrati vremensku krivulju skupljanja; vremenska se krivulja skupljanja iz Eurokoda 2 može prihvatiti. Da se koeficijent k dobio iz podataka skupljanja u nekoj drugoj starosti betona bio bi nešto drukčiji što je vidljivo iz tablice 4.

3 Puzanje

3.1 Sastavi betona na kojima je ispitivano puzanje

Radi se o različitim sastavima betona koji nisu potpuno pouzdani jer je velik dio uzoraka izrađen na gradilištu i dostavljen na ispitivanje u laboratorij. Uglavnom se radi o HSC i HPC betonu za posebne konstrukcijske elemente. Osim puzanja ispitani su tlačna čvrstoća i modul elastičnosti u trenutku opterećenja i u starosti od 28 dana.

3.2 Opis ispitivanja puzanja

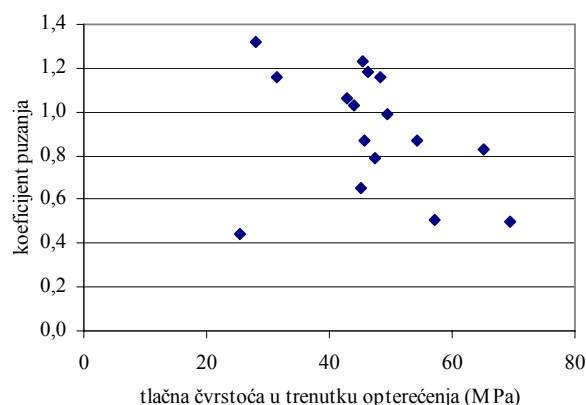
Puzanje se ispitivalo prema HRN U.M1.027 [7] na uzorcima oblika valjka promjera baze 150 mm i visine 300 mm. Nakon nanošenja opterećenja manjeg od $1/3$ tlačne čvrstoće, u trenutku opterećenja započinjalo je mjerenje ukupnih deformacija na uzorcima. Istovremeno, na tri uzorka iste mješavine mjereno je skupljanje. Uzorci su njegovani na isti način kao uzorci za ispitivanje puzanja. Temperatura pri kojoj se obavljalo ispitivanje bila je 20

± 2 °C, a relativna vlažnost prostorije $70 \pm 5\%$. U okviru za puzanje bilo je 5 uzoraka. Mjerenje je provedeno na tri srednja uzorka na četiri izvodnice i na krajnja dva uzorka na dvije izvodnice. Rezultat ispitivanja je aritmetička sredina mjerenja na 16 mjesta za puzanje i 6 (2 na svakom uzorku) za skupljanje.

3.3 Usporedba rezultata ispitivanja puzanja s teorijskim vrijednostima prema modelu EC2

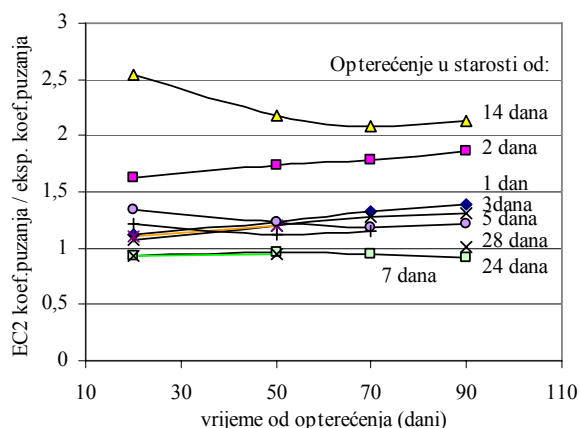
U Eurokodu 2 navodi se da srednji koeficijent varijacije za predviđanje koeficijenta puzanja ovim modelom, određen pomoću banke laboratorijskih podataka, iznosi 20%.

Puzanje se ispitivalo na šesnaest različitih sastava, na po pet uzoraka od svakog kao što je navedeno u opisu ispitivanja. Budući da izrada betona nije bila pod kontrolom, podaci o sastavima betona nisu potpuno pouzdani, tako da ovisnost sastava i koeficijenta puzanja nije razmatrana. Uzorci su opterećeni u različitim starostima.



Slika 14. Prikaz koeficijenta puzanja 20 dana nakon opterećenja u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći u trenutku opterećenja

Na slici 14. prikazana je ovisnost koeficijenta puzanja o tlačnoj čvrstoći u trenutku opterećenja budući da je to podatak koji se rabi i u EC2. Kao što je poznato, s povećanjem čvrstoće u trenutku opterećenja povećava se koeficijent puzanja. Eksperimentalni rezultati uspoređeni su s vrijednostima koje su dobivene pomoću modela iz EC2. Na slici 15. prikazane su srednje vrijednosti odnosa proračunog i eksperimentalnog koeficijenta puzanja u vremenu. Za opterećenje nanoseno u starosti uzoraka betona od 7 dana predviđanje koeficijenta puzanja prema EC2 je dobro. Za opterećenja nanosena u većim starostima model iz EC 2 daje do 35% veće vrijednosti koeficijenta puzanja od vrijednosti dobivenih eksperimentom 20 dana od početka ispitivanja. Za uzorke opterećene u starosti manjoj od 7 dana odnos predviđenog i izmjerenog koeficijenta puzanja s vremenom se povećava. Vidi se također da kod dvaju uzoraka rezultati ispitivanja znatno odstupaju.



Slika 15. Ovisnost omjera proračunalog i eksperimentalnog koeficijenta puzanja i vremena proteklog od trenutka opterećenja

Prema podacima o izradi betona, kod betona opterećenog u starosti od 14 dana radilo se o betonu s cementom CEM III/B-32,5 N, dodatkom usporivača i aeranta. Radi se o masivnom betonu namijenjenom za hidrotehničke građevine. On ima koeficijent puzanja za 2 do 2,5 puta manji od koeficijenta puzanja predviđenog modelom iz EC2. To je nedostatak modela uzrokovan zanemarivanjem sastava i vrednovanjem samo podatka o tlačnoj čvrstoći betona. Druga iznimka jest beton opterećen u starosti od 2 dana, koji je već u trenutku opterećenja postigao čvrstoću od 47,3 MPa i koji se rabi za prednapete montažne elemente. Postignuta čvrstoća u trenutku opterećenja bila je u razini tlačnih čvrstoća uzoraka opterećenih u starosti od 7 dana. Budući da je za sve uzorke osim za uzorke opterećene u starosti od 7 dana koeficijent puzanja veći od eksperimentalnog, očito je da pretpostavka o razvoju čvrstoća ne odgovara betonima velikih čvrstoća koji su uglavnom zastupljeni u ispitivanim uzorcima. Ovo je odstupanje na strani sigurnosti, ali kod projekatana može dovesti u sumnju rezultate ispitivanja.

4 Zaključci

Prema modelu za predviđanje skupljanja iz Eurokoda 2 (model EC2), skupljanje uzoraka betona istoga srednjeg polumjera koji su njegovani u istim uvjetima jednako dugo ovisi isključivo o tlačnoj čvrstoći. Prema modelu EC2, s porastom čvrstoće skupljanje se smanjuje. Eksperimentalni podaci nisu potvrdili takvu pretpostavku modela. Greška modela EC2 za beton čvrstoće od 30 do 50 MPa je u granicama od 20 % i prihvatljiva je. Za beton čvrstoće do 30 MPa veličina je skupljanja prema

modelu EC2 i do dva puta veća od stvarne, a za sastave betona čvrstoće veće od 50 MPa, odnosno za beton velike čvrstoće i do 50 % manja od stvarne veličine skupljanja. Za beton velike čvrstoće predviđanje skupljanja prema modelu EC2 nije na strani sigurnosti. U usporedbi s modelom EC2 model B3 predstavlja poboljšanje. U ovim je modelima navedeno da nisu predviđeni za predviđanje skupljanja betona velike čvrstoće. Vjerojatno je razlog tome upravo u pogrešnoj pretpostavci o smanjenju skupljanja s povećanjem tlačne čvrstoće za sastave betona s istom količinom vode.

Na temelju analize rezultata ispitivanja više od 150 uzoraka iz 52 različita sastava betona izrađenih u pet programa istraživanja svojstava betona, s više vrsta cementa, predložen je izraz za koeficijent kojim se modificira model EC2 za predviđanje veličine skupljanja betona obične i velike čvrstoće. Postojeći model iz Eurokoda 2 ne vrednuje razlike u sastavu betona koje za beton jedne konzistencije, odnosno približno iste količine vode, proizlaze uglavnom iz različite količine cementa. Pogrešna je pretpostavka modela iz EC2 da se s povećanjem tlačne čvrstoće uvijek smanjuje skupljanje. To je točno jedino za sastave betona različite konzistencije. Za beton jedne konzistencije povećanje količine cementne paste uzrokuje povećanje skupljanja i puzanja.

Predložena modifikacija modela djelomično ispravlja navedenu pretpostavku modela i uz nju se model iz Eurokoda 2 može upotrijebiti i za predviđanje skupljanja betona velike čvrstoće. Još bi se bolji model dobio ako bi se koeficijent modifikacije odredio za model B3, jer on djelomično uzima u obzir i sastav betona, ali to nije bio predmet ovog istraživanja.

Kao idući korak u istraživanju mogućnosti predviđanja veličine vremenskih deformacija, nameće se potreba uvođenja sastava betona u modele. Ovisnost skupljanja o tlačnoj čvrstoći u tom bi slučaju bila prikazana krivuljama koje bi se razlikovale prema sastavu.

Model za predviđanje puzanja ima iste nedostatke kao i model za predviđanje skupljanja, međutim daje prilično dobra predviđanja za beton velike čvrstoće opterećen u starosti od 7 dana pri čvrstoći od 40 do 50 MPa. Za beton koji je opterećen u manjim starostima, a čvrstoća mu je u razini navedenih, model daje prevelike vrijednosti koeficijenta puzanja. Isto tako, utjecaj cementa male topline hidratacije i aeranta na deformacije puzanja nije dovoljno istražen.

Zahvala

Zahvaljujemo se Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske na potpori znanstvenom projektu broj 082-0822161-2990 (glavni istraživač prof. dr. sc. Dunja Mikulić) u okviru kojeg je provedeno ovo istraživanje. Zahvaljujemo se svim građevinskim poduzećima sudionicima programa na temelju kojih je napravljeno istraživanje.

LITERATURA

- [1] ACI COMMITTEE 209: *Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures*, report No. ACI 209R-92. Reapproved 1997.
- [2] Bažant, Z.; Baweja, S.; RILEM Committee TC 107: *Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures – model B3*, *Materials and Structures*, (1995) 27, 357 – 365
- [3] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON: *CEB-FIP Model Code 1990, Design Code*, Thomas Telford, London, 1993
- [4] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON 1995. *High Performance Concrete*, Recommended Extensions to the Model Code 90, Research Needs, Report of the CEB-FIP Working Group on HS/ HPC. Bulletin d'Information No. 228. , 1995.
- [5] HRN ENV 1992-1-1, Eurokod 2: *Projektiranje betonskih konstrukcija – 1- 1. dio: Opća pravila i pravila za zgrade* (ENV 1992-1-1:1991), 2004.
- [6] HRN EN 12390-3, *Ispitivanje očvrsloga betona – 3.dio: Tlačna čvrstoća uzoraka*, 2002.
- [7] HRN U.M1.027, *Beton – Određivanje puzanja*, 1983.
- [8] HRN U.M1.029, *Beton – Određivanje zapreminskih deformacija*, 1983.
- [9] Marušić, E.: *Deformacijska svojstva superplastificiranog betona*, magistarski rad. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2004.
- [10] Marušić, E.; Akrap, N.: *Suggestions for improving creep and shrinkage models based on experimental results for high strength concrete*, Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and concrete structures, Proceedings of the International Conference , Ise-Shima, 30 september – 2 October 2008, CRC Press/Balkema, London, 2008
- [11] Marušić, E.; Ukrainczyk, V.: *Deformational Properties of High Strength Concrete Predicted According to Eurocode 2*. Application of Codes, Design and Regulations; Proceedings of the International Conference, Dundee, 5-7 July 2005. Tomas Telford, London, 2005.
-