

IZBOR KOMPONENTNIH MATERIJALA ZA BETON SA ASPEKTA TRAJNOSTI CHOICE OF COMPONENT MATERIALS FOR CONCRETE FROM THE DURABILITY ASPECT

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC:

Rad primljen / Paper received:

Adresa autora / Author's address:

Institute for Materials Testing (IMS), Belgrade, Serbia

*email: ksenija.jankovic@institutims.rs

Ključne reči

- trajnost betona
- dejstvo mraza
- Sika Aer Solid
- koeficijent migracije hlorida

Izvod

Betonske konstrukcije su često u eksploataciji izložene spoljašnjim uticajima. Preporuke koje definiše evropski standard SRPS EN 206 za korišćenje betona u pojedinim klasama izloženosti nisu dovoljne i iz tog razloga je usvojen i standard SRPS U.M1.206 koji predstavlja nacionalni dodatak za njegovu primenu. Dejstvo mraza značajno utiče na trajnost betonske konstrukcije jer može da dovede do razaranja strukture betona. Zaštita se postiže dodavanjem hemijskih dodataka koji uvlače vazduh u svež beton. U radu je prikazana mogućnost primene novog dodatka Sika Aer Solid. Ispitivana je otpornost betona na dejstvo mraza, mraza u prisustvu soli za odmrzavanje, prodiranje vode pod pritiskom i koeficijent migracije hlorida u laboratorijskim uslovima i uzorcima izvađenim iz betonskih prefabrikovanih elemenata. Betoni sa Sika Aer Solid su za istu klasu konzistencije u odnosu na aerirane betone imali bolja svojstva i u svežem i u očvrslom stanju.

UVOD

U Republici Srbiji je u toku implementacija evropskih standarda u oblasti betona i betonskih konstrukcija. U Evropi, krovni standardi za betonske konstrukcije koji se bave proračunom konstrukcija su Evrokodovi. Za izvođenje betonskih konstrukcija Evrokodovi se pozivaju na standard SRPS EN 13670, a betonom kao materijalom koji se koristi za izvođenje ovih konstrukcija bavi se standard SRPS EN 206. Veoma bitan deo standarda SRPS EN 206 su klase izloženosti konstrukcije ili njenih delova. Standard prepoznaje nekoliko klasa izloženosti: XC klasa izloženosti karbonatizaciji, XS klasa izloženosti hloridima i sulfatima iz morske vode, XD klasa izloženosti hloridima, XF klasa izloženosti dejstvu mraza i reagenasa za odmrzavanje i XA klasa izloženosti hemijskim delovanjima sredine. SRPS EN 206 definiše granične vrednosti za sredine u kojima se nalaze konstrukcije ili njeni delovi. U zavisnosti od agresivnosti datog uticaja, klase izloženosti se dele u podklase. Pored klase izloženosti i stepena agresivnosti, standardom se definišu i preporuke za projektovanje betona u vidu klase pri pritisku betona, količine cementa po kubnom metru betona, vodocementnog odnosa i količine vazduha u betonu za svaku klasu izloženosti.

Preporuke koje definiše SRPS EN 206 za korišćenje betona u pojedinim klasama izloženosti nisu dovoljne posebno

Keywords

- durability of concrete
- effect of frost
- Sika Aer Solid
- chloride migration coefficient

Abstract

Recommendations defined by the European standard SRPS EN 206 for use of concrete in certain classes of exposure are not sufficient, and for this reason the standard SRPS U.M1.206 was also adopted, which is a national annex for its application. The effect of frost significantly affects the durability of the concrete structure because it can lead to its destruction. Protection is achieved by adding chemical admixture that entrains air into fresh concrete. The paper shows the possibility of applying the new additive Sika Aer Solid. Concrete resistance to frost, freeze-thaw resistance with de-icing salt, depth of penetration of water under pressure and chloride migration coefficient are tested in laboratory conditions and samples taken from concrete prefabricated elements. For the same class of consistency, concrete with Sika Air Solid, compared to concrete with air entraining admixture, had better properties both in the fresh and hardened state.

ako se uzme u obzir da su na tržištu dostupne razne vrste agregata, cemenata i aditiva koji mogu značajno uticati na kvalitet i trajnost betona. Glavno pitanje svih učesnika u procesu izgradnje betonskih konstrukcija bilo je kako dokazati da li betonska konstrukcija zadovoljava uslove trajnosti. Načini dokazivanja nisu definisani evropskim normama pa je stoga bilo neophodno definisati nacionalnim propisima postupke i kriterijume prihvatljivosti. Na tlu Republike Srbije pribeglo se donošenju standarda u obliku smernica za primenu SRPS EN 206 i izradi Pravilnika za beton.

Standard SRPS U.M1.206 predstavlja nacionalni dodatak za primenu standarda SRPS EN 206 sa svim ograničenjima koja važe na tlu Republike Srbije. Standard sadrži i priloge u kojima su definisane i opisane procedure za ispitivanja koja su specifična za ovdašnje klimatske uslove i koje su se u praksi dokazale kroz dugi niz godina. Nacionalnim dodatkom isključena je klasa XS iz korišćenja na tlu Srbije, uvedeno je ispitivanje na dejstvo mraza na način koji je definisao povučeni standard SRPS U.M1.016 i mnogo drugih delova koji su specifični za Srbiju.

Pored donošenja standarda pristupilo se izradi Pravilnika za beton u kojem se definišu prava i obaveze proizvođača i izvođača kao i sertifikacionih i kontrolnih tela. Pored toga, definisani su načini kontrole svih osobina betona koje nisu definisane gore navedenim standardima i kriterijumi prihvatljivosti. Najznačajnije je da je Pravilnik za beton uveo kon-

trolu otpornosti betona na dejstvo mraza i kontrolu betona na prodor hlorida u beton. Otpornost betona na dejstvo mraza podeljena je u dve grupe: bez reagenasa za odmrzavanje (za klase izloženosti XF1 i XF3); sa reagensima za odmrzavanje (za klase izloženosti XF2 i XF4). Za obe grupe definisani su načini ispitivanja tj. standardi prema kojima se vrši provera i kriterijumi prihvatljivosti. Otpornost betona na prodiranje hlorida podeljena je u tri klase, definisan je standard za ispitivanje ove karakteristike betona, kao i kriterijumi prihvatljivosti za svaku klasu.

Da bi se obezbedila trajnost betona, potrebno je zaštititi betonske infrastrukturne objekte u zemljama u kojima se smenjuju godišnja doba i različiti vremenski uslovi, jer je njihovo izlaganje ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja (eng. *FTC - freezing and thawing cycles*) u prisustvu soli za odmrzavanje, jedan od najagresivnijih mehanizama za propadanje betona.

Šteta od mraza, progresivno pogoršanje koje započinje ljuštenjem površinskog maltera i završava potpunim urušavanjem betonskih elemenata, glavna je briga kada se beton koristi u hladnijim regionima. Ponavljanjem ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja javljaju se prsline i pukotine, a beton postepeno gubi svoja prvobitno projektovana svojstva.

Betoni koji će biti izloženi dejstvu mraza u svom sastavu imaju veće količine cementa, a problem primene veće količine cementa se poslednjih godina posebno naglašava zbog sve većeg zagađenja životne sredine i stvaranja efekta staklene bašte.

Efekat zamrzavanja i odmrzavanja je složen fenomen koji se proučava već dugi niz godina, ali još uvek nije u potpunosti objašnjen. Radovi proistekli iz nekoliko istraživanja /1-4/, prikazuju uspostavljanje glavnih teorija mehanizama delovanja mraza, koje su povezane sa kretanjima i promenom rastvora u porama i čvrstoće u betonu tokom cikličnog zamrzavanja i odmrzavanja, što je generisalo širenjem i skupljanjem materijala, /5/.

Betoni koji se izlažu dejstvu mraza i/ili mraza i soli štite se aeriranjem. Aeranti su hemijski dodaci koji se u fabricama betona doziraju u toku spravljanja betonske mešavine kako bi se postigla željena količina sadržaja vazduha u svežem betonu. Usled dodavanja aeranta stvaraju se sitne sferične pore vazduha u strukturi betona. One imaju za cilj da nakon procesa očvršćavanja spreče unutrašnja naprezanja koja nastaju usled širenja zamrznute vode u kapilarnim porama. Mehanizam zaštite koji se danas primenjuje koristi se već decenijama unazad.

Prednosti betona sa dodatkom aeranata su:

- mala količina prilikom doziranja,
- sadržaj vazduha u svežem betonu od 4-6 % čini beton otpornim na dejstvo mraza,
- čini betonsku mešavinu manje kohezivnom,
- svojim sitnim sferičnim porama vazduha čini beton pokretljivijim tako da se ima utisak da on utiče na povećanje konzistencije,
- potrebna je manja količina vode za spravljanje u odnosu na beton bez aeranta,
- lako je ugradljiv i obradljiv,
- smanjuje skupljanje,
- sprečava pojavu lokalnih pukotina usled sušenja.

Mane betona sa dodatkom aeranata su:

- povećana količina cementa prilikom projektovanja betonske mešavine,
- smanjenje zapreminske mase očvrstlog betona,
- smanjenje čvrstoće betona pri pritisku za oko 5.5 % za 1 % povećanja sadržaja vazduha u betonu,
- smanjenje proizvodnog kapaciteta fabrike betona usled produženog mešanja svakog mešungaa,
- povećana učestalost kontrole sadržaja vazduha svežeg betona,
- nekonstantnost sadržaja vazduha od fabrike do gradilišta,
- skuplji beton po 1 m³.

Jedno od rešenja koje se u skandinavskim državama koristi kao zamena za aerant je Sika Aer Solid.

U izveštaju o Tehničkoj proceni koja je data od strane Nemačkog Građevinskog Instituta izvršena su istraživanja i mogućnost primene ovog materijala kao zamene za aerant. Izvršena su početna ispitivanja, ispitivanja otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje sa elastičnim mikro sferičnim kuglicama Sika Aer Solid, prema CEN/TS 12390-9, tačka 7, CDF-testom. Preporučeni relativni dinamički modul elastičnosti prema CEN/TR 15177 je veći ili jednak 0,75 i površinsko ljuštenje manje ili jednako od 1500 g/m² nakon 28 ciklusa zamrzavanja-odmrzavanja. Elastične mikro sferične kuglice u svežem betonu proveravane su ispiranjem prema ASTM C173/C173M-01. Tipično smanjenje klase čvrstoće kao za beton sa dodacima za uvlačenje vazduha (EN 206, Tabela F.1) se ne dešava.

Kako bi Sika Aer Solid mogao da se primenjuje na našem podneblju i sa našim materijalima, obavljena su ispitivanja svojstava betona u svežem i očvrstlom stanju, sa posebnom osvrtom na trajnost betona.

EKSPERIMENTALNI RAD

Komponentni materijali

Za spravljanje betonskih mešavina korišćeni su sledeći materijali:

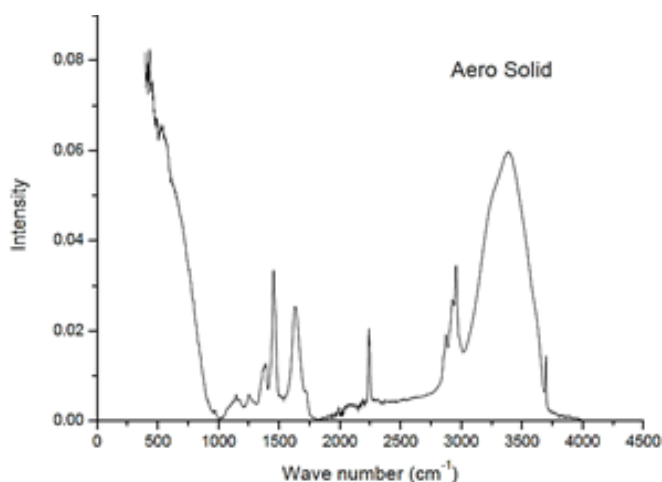
- prirodni fracionisani kameni agregat, frakcija 0/4, 4/8 i 8/16 mm, Transkop Đusić - Adrani,
- cement CEM I 52.5 R, CRH Popovac,
- hemijski dodatak: superplastifikator, Sika Viscocrete 4077, Sika Srbija, Beograd,
- plastične kuglice: Sika Aer Solid, Sika Švajcarska
- voda iz vodovoda.



Slika 1. Izgled plastičnih kuglica Sika Aer Solid.

Za dobijanje betona sa poboljšanim svojstvima u svežem i očvrslom stanju korišćen je dodatak *Sika Aer Solid* proizvođača Sika - Švajcarska. *SikaAer® Solid* se sastoji od malih prefabrikovanih vazдушnih kuglica sa elastičnim plastičnim omotačem. Slično vazдушnim porama koje stvaraju agensi za uvlačenje vazduha koje oni obezbeđuju.

Hemijska analiza *Sika Aer Solid* prikazana je u Tabeli 1.



Slika 2. Intenzitet broja talasa *Sika Aer Solid*.

Tabela 1. Hemijski sastav *Sika Aer Solid* (%).

Hemijski sastav	<i>Sika Aer Solid</i>
SiO ₂	0.05
Al ₂ O ₃	0.007
Fe ₂ O ₃	0.00008
CaO	0.002
MgO	0.007
Na ₂ O	<0.003
K ₂ O	0.0001
SO ₃	0.004

Rezultati ispitivanja betona

Za potrebe ovog istraživanja spravljene su tri betonske mešavine i to:

- Mešavina 1 - običan beton,
- Mešavina 2 - beton sa *Sika Aer Solid*,
- Mešavina 3 - beton sa aerantom.

Betonska Mešavina 1 i betonska Mešavina 2 su projektovane tako da nema povećanja sadržaja vazduha u svežem betonu i da je njihova granica od 1 do 3 %, dok je u slučaju betonske Mešavine 3 ovaj sadržaj projektovan od 5 do 7 %. Količina dodataka za zaštitu betona od dejstva mraza dozira se prema preporuci proizvođača. Sastavi betonskih Mešavina prikazani su u Tabeli 2.

Tabela 2. Sastav betonskih mešavina (kg/m³).

Meš. br.	C	A	VSC 4077	V	<i>Sika Aer</i>	<i>Sika Aer Solid</i>	w/c
1	360	1755	2.16	162	-	-	0.45
2	360	1750	2.16	162	-	3.6	0.45
3	360	1730	2.16	162	0.036	-	0.45

Kao što je u uvodnom delu naglašeno, SRPS EN 206 daje preporuke za sastav betonskih mešavina. U mešavinama koje su korišćene u radu ispoštovan je uslov za minimalnu količinu cementa u betonu za XF4 klasu izloženosti prema SRPS EN 206 (340 kg/m³), ali nije prema nacionalnom dodatku SRPS U.M1.206 (380 kg/m³). S obzirom da se jedna meša-

vina radila sa sasvim novim materijalom koji ne radi po klasičnom principu uvlačenja vazduha u beton, nije se mogao ispoštovati uslov za minimalnu količinu vazduha u betonu. Ipak, standardi i pravilnici daju preporuke a ne obavezujuće uslove, te stoga ukoliko se dokaže primena novih materijala u betonu ne treba izbegavati njihovu primenu. Veoma bitno kod novih materijala je da se prati njihovo ponašanje tokom nekog dužeg perioda u praksi kako bi se potvrdio kvalitet dobijen u laboratorijskim uslovima.

- Svež beton

Izvršeno je ispitivanje svojstava betona u svežem stanju: konzistencije metodom sleganja, sadržaja vazduha i zapreminske mase betona (5 min. nakon dodavanja vode), /6-8/. Rezultati ispitivanja su prikazani u Tabeli 3.

Tabela 3. Svojstava svežeg betona.

Meš. br.	Konzistencija sleganjem (mm)	Zapreminska masa (kg/m ³)	Sadržaj vazduha (%)
1	180	2270	1.3
2	190	2260	2.3
3	200	2240	5.1

Dobijene vrednosti konzistencije betona za Mešavine od 1 do 3 odgovaraju klasi konzistencije S4 (160-210 mm). Najveću vrednost imala je Mešavina 3. Ovo se može pripisati sadržaju mikro pora vazduha u svežem betonu, što doprinosi većoj pokretljivosti svežeg betona. Zapreminska masa svežeg betona kretala se u granicama od 2260 do 2339 kg/m³, respektivno. Sadržaj vazduha u svežem betonu kretao se od 1.3% do 5.1%, respektivno. Najveća vrednost sadržaja vazduha dobijena je za Mešavinu 3 (mešavina u koju je dodat aerant).



Slika 3. Provera konzistencije metodom sleganja (levo).

Slika 4. Izrada uzoraka za ispitivanje očvrslag betona (desno).

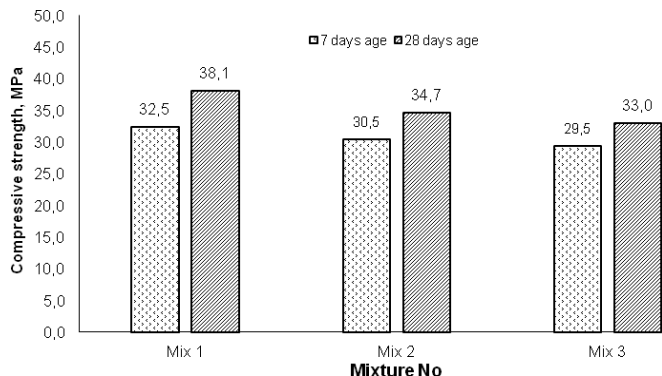
- Očvršli beton

- Čvrstoća pri pritisku

Urađeni su uzorci za ispitivanje čvrstoće betona pri pritisku. Beton je ugrađivan vibroiglom u kalupe oblika kocke, dimenzija ivica d = 150 mm (sl. 4), koji su očvršćavali u vodi na temperaturi od +20 °C do trenutka ispitivanja prema standardu SRPS EN 12390-2, /9/.

Ispitivanje čvrstoće betona pri pritisku u starosti od 7 i 28 dana sprovedeno je prema SRPS EN 12390-3, /10/. Rezultati su prikazani na sl. 5.

Najveće dobijene vrednosti čvrstoće pri pritisku u starosti od 7 i 28 dana imao je beton Mešavine 1. U poređenju sa Mešavinom 1, smanjenje čvrstoće pri pritisku kod Mešavine 2 iznosi 6.6 %, a kod Mešavine 3 ona iznosi 10.2 %. Smanjenje čvrstoće pri pritisku u starosti od 28 dana u odnosu na Mešavinu 1 kod Mešavine 2 iznosilo je 9.8 %, dok je kod Mešavine 3 ono iznosilo 15.5 %.



Slika 5. Čvrstoća pri pritisku betona u starosti od 7 i 28 dana.

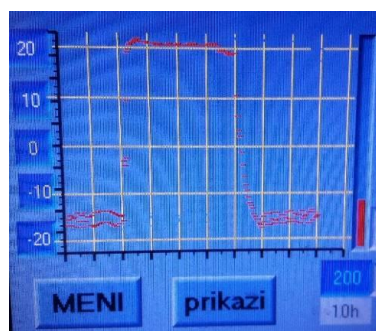
- Otpornost betona prema dejstvu mraza

Uslovi smrzavanja i odmrzavanja se postižu digitalnom hladnjačom koja ima podešen temperaturni režim prema SRPS U.M1.206:2013, Dodatak R, /11/. U toku 24 časa izvode se 3 ciklusa. Beton je izložen dejstvu 100, 150 i 200 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja. Uzorci betona se podvrgavaju cikličnom zamrzavanju/odmrzavanju na temperaturi od -20 do +20 °C. Da bi se utvrdila otpornost betona na mraz,

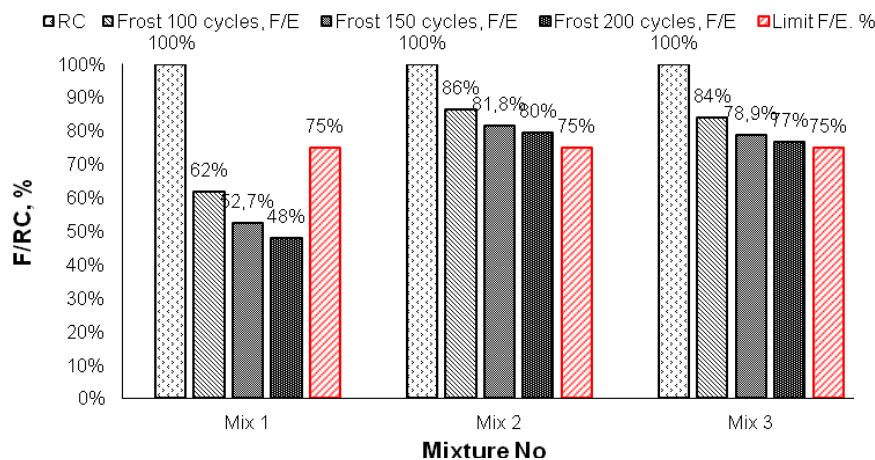
srednja čvrstoća pri pritisku izloženih naizmeničnom zamrzavanju i odmrzavanju upoređuje se sa prosečnom čvrstoćom pri pritisku uzoraka - etalona (uzorci koji nisu izloženi ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja) ispitanih u ekvivalentnoj starosti. Uzorci kao i dijagram jednog ciklusa ispitivanja prikazani su na sl. 6-7. Rezultati su prikazani na sl. 8-9.



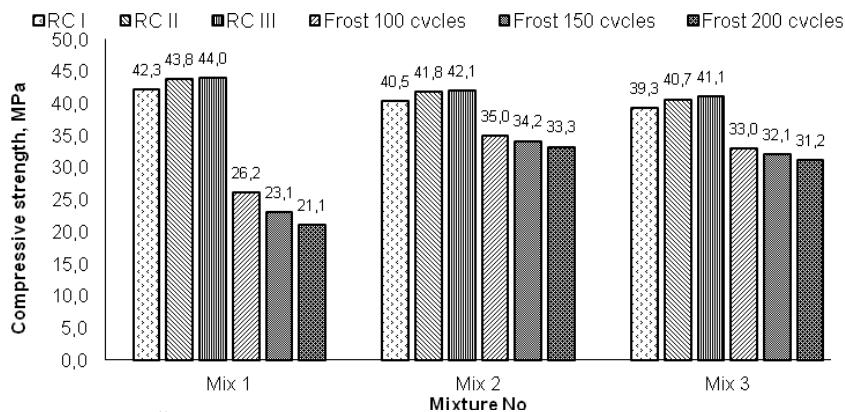
Slika 6. Uzorci u komori za ispitivanje otpornosti betona na mraz.



Slika 7. Režim ispitivanja jednog ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja.



Slika 8. Odnos dobijenih čvrstoća betona pri pritisku (uzorci izloženi dejstvu mraza / etalonski uzorci).



Slika 9. Čvrstoća pri pritisku etalona i uzoraka izloženih dejstvu mraza.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja može se zaključiti da Mešavina 1 nije zadovoljila u pogledu otpornosti betona na dejstvo mraza prema SRPS U.M1.206:2013, Prilog R. Uzorci ispitivane Mešavine 2 (sa dodatkom Sika Aer Solid) i Mešavine 3 (sa dodatkom Sika Aer) su zadovoljili uslove navedenog standarda.

- Dubina penetracije vode pod pritiskom

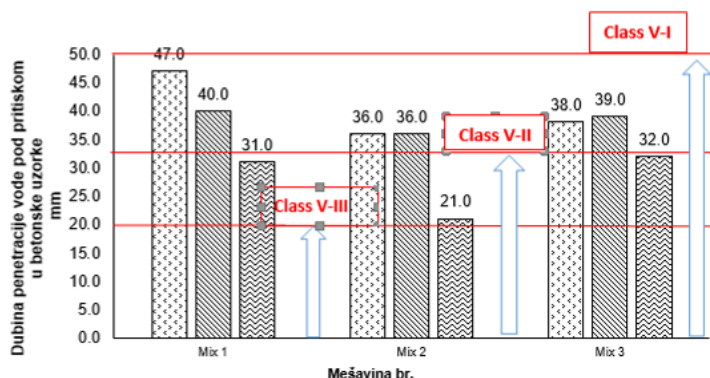
Prekidanjem kapilarnih pora u betonu dodavanjem hemijskih dodataka povećava se vodonepropustljivost betona. U cilju utvrđivanja uticaja dodavanja različitih vrsta dodataka na vodonepropustljivost korišćena je standardna metoda za određivanje dubine penetracije vode pod pritiskom u betonske uzorke prema SRPS EN 12350-8:2019 /12/. Za ispitivanje je korišćena kocka ivice $d = 150$ mm.



Slika 10. Podela uzorka na dva dela.



Slika 11. Merenje najveće dubine penetracije vode u beton.



Slika 12. Dubina penetracije vode pod pritiskom.

Korišćen je režim ispitivanja prema standardu po kome se voda pod pritiskom od 500 kPa (5 bara) nanosi na površinu uzorka betona u trajanju od 72 sata. Nakon ispitivanja, meri se količina upijene vode u betonu. Da bi se izmerila dubina penetracije vode u beton, uzorak betona se izlaže linearnom opterećenju na središnjem delu gornje i donje

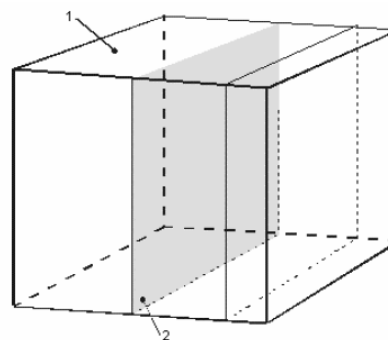
strane uzorka, upravno na pravac penetracije vode pod pritiskom, i na taj način se on razdvojio na dva dela, sl. 10-11.

Rezultati dobijenog maksimalnog prodora vode pod pritiskom u beton prikazani su na sl. 12.

Posle ispitivanja, uzorci očvrstlog betona Mešavine 1 su imali najveće dubine penetracije vode pod pritiskom koje su iznosile 47, 40 i 31 mm; Mešavina 3 je imala 38, 39 i 32 mm; dok su najmanje maksimalne dubine penetracije vode zabeležene kod Mešavine 2 i one su iznosile 36, 36 i 21 mm.

- Otpornost betona na dejstvo mraza (u prisustvu soli za odmrzavanje)

Betonske konstrukcije izložene efektima zamrzavanja i odmrzavanja treba da budu trajne, da imaju pogodnu otpornost na ove uticaje, a u slučaju saobraćajnih konstrukcija - zamrzavanje i odmrzavanje u prisustvu soli za odmrzavanje. Ovo se primenjuje na betonske mešavine betonske proizvode, prefabrikovani beton, betonske elemente ili beton spravljen na gradilištu. Ukoliko beton nema pogodnu otpornost na zamrzavanje i odmrzavanje, tada će se ovakav uticaj odraziti na dva tipa oštećenja - ljuštenje (atmosfersko dejstvo na površinu) i unutrašnje oštećenje strukture. Ispitivanje otpornosti površine za zamrzavanje i odmrzavanje betona se zasniva i sa vodom i sa NaCl rastvorom. Može se koristiti za poređenje novih konstitutivnih materijala ili novih mešavina betona u odnosu na komponentne materijale ili mešavine za koje se zna da daju pogodne performanse u lokalnom okruženju ili za prihvatanje ispitnih rezultata prema nekim apsolutnim numeričkim vrednostima zasnovanih na lokalnom iskustvu. Za sprovođenje ovog ispitivanja iz spravljenih kocki ivice $d = 150$ mm isečeni su pločasti uzorci, koji su izloženi zamrzavanju i odmrzavanju u prisustvu soli 3 % rastvora NaCl. Otpornost na zamrzavanje i odmrzavanje se procenjuje merenjem oljuštenog materijala sa pločastih uzoraka posle 56 ciklusa. Sečenje, priprema za ispitivanje i temperaturni režim ispitivanja sprovedeni su prema SRPS U.M1.206:2013, Prilog O, sl. 13-15, /13/.



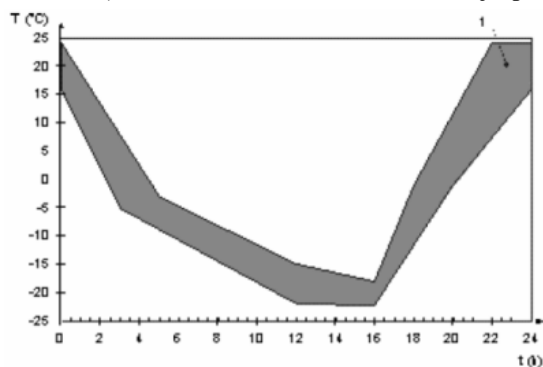
Slika 13. Sečenje pločastog uzorka iz kocke.



Slika 14. Uzorci pripremljeni za ispitivanje.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja može se zaključiti da Mešavina 1 nije zadovoljila u pogledu otpornosti

betona na dejstvo mraza u prisustvu soli za odmrzavanje. Uzorci ispitivane Mešavine 2 (sa dodatkom Sika Aer Solid) i Mešavine 3 (sa dodatkom Sika Aer) nisu imali ljušpanje.



Slika 15. Odnos vremena (t) i temperature (T) u toku ciklusa u tečnosti za zamrzavanje merene na sredini uzorka.

Tabela 4. Srednje vrednosti količine oljuspalog materijala (kg/m^3).

Oznaka mešavine		Srednje vrednosti količine oljuspalog materijala (kg/m^3)
7 ciklusa	Mešavina 1	0.511
	Mešavina 2	0
	Mešavina 3	0
14 ciklusa	Mešavina 1	0.873
	Mešavina 2	0
	Mešavina 3	0
28 ciklusa	Mešavina 1	1.015
	Mešavina 2	0
	Mešavina 3	0

- Određivanje karakteristika vazдушnih pora u očvrslom betonu

Pore, koje se najčešće nazivaju i zarobljeni vazduh, uglavnom su posledica nepotpune zbijenosti betona ili naknadnog izdvajanja vode, obično su veće od 1 mm pa je stoga njihova uloga u smrzavanju betona neznatna.

Hidratacijom cementa nastaju produkti hidratacije koji stvaraju kvazislojevitú strukturu, a između slojeva postoje prostori koji predstavljaju pore gela. Gelske pore su suviše male, 1-5 nm, tako da se u njima praktično ne stvara led, ali i difuzija gelske vode prema kapilarnim porama koje već sadrže led usled pada temperature doprinosi širenju betona.

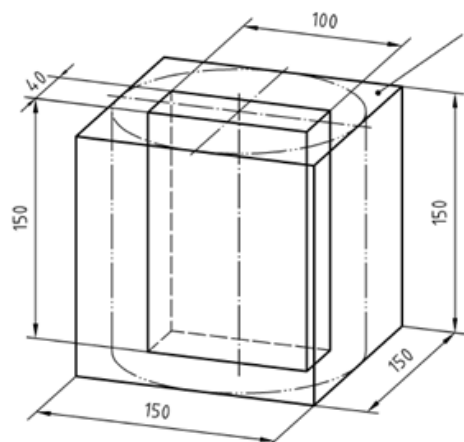
Kapilarne pore su na mestima gde nisu nastali produkti hidratacije. Količina ovih pora zavisi od vode prilikom izrade betonske mešavine. One su povezane i veličine od 5 nm do 5 μm . Mržnjenje počinje od krupnih kapilara i progresivno ide ka sve manjim.

Pod vazduhom uvučenim u beton podrazumevamo samo onaj vazduh koji je namerno uvučen u beton korišćenjem hemijskih dodataka-aeranata. To su sferični mehurići, čiji se prečnik kreće od 5 μm do 1250 μm , raspoređeni u cementnoj pasti, koji nisu povezani, a oni se ne popunjavaju ni proizvodima hidratacije cementa pošto se gel može obrazovati samo u prisustvu vode. Zajedničko za sve vrste pora je da u betonu nastaju u cementnom kamenu i na spoju cementnog kamena i agregata.

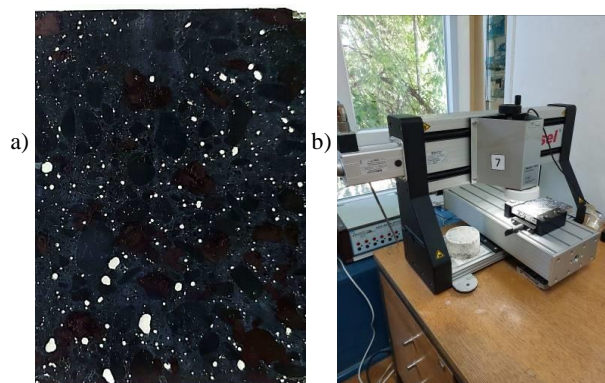
Karakterizacija pora izvršena je prema SRPS EN 480-11/14/. Za ispitivanje se koristi pločasti uzorak dimenzije 150×100×20 mm koji je isečen iz kocke ivice $d = 150$ mm, sl. 16. Površine uzoraka su pripremljene na mašini za poliranje kako bi se dobio njihov matiran izgled. Nakon poliranja, površina

je premazana crnom bojom, a pore su zapunjene barijum sulfatom, sl. 17a. Karakterizacija pora izvršena je pomoću automatskog digitalnog mikroskopa Rapid Air 457, sl. 17b.

Nakon ispitivanja dobijeni su rezultati koji su prikazani u Tabeli 5.



Slika 16. Uzorak 150×100×20 mm isečen iz betonske kocke.



Slika 17. a) Površina uzorka pripremljena za karakterizaciju pora, b) uređaj za karakterizaciju pora.

Tabela 5. Rezultati ispitivanja SRPS EN 480-11.

Rezultati ispitivanja SRPS EN 480-11	Mešavine		
	1	2	3
Sadržaj pora (%)	2.64	2.23	6.15
Specifična površina pora (mm^{-1})	44.13	40.05	40.57
Faktor razmaka pora (mm)	0.212	0.169	0.142

Kada se projektuje betonska mešavina koja treba da bude otporna na dejstvo mraza mora se štiti aeriranjem. Prema SRPS U.M1.206, data je tabela koja definiše potreban sadržaj pora na osnovu najveće frakcije agregata. Dobijene vrednosti kod Mešavina 1 i 2 su očekivane za betone kojima nije dodat aerant, a Mešavina 3 je zadovoljila uslove navedenog standarda u pogledu sadržaja pora.

Kod Mešavine 1 dobijena je veća specifična površina zbog sadržaja pora nepravilnog oblika (zarobljeni vazduh) za razliku od sfernih mehurića uvučenog vazduha kod Mešavine 3 i prefabrikovanih elastoplastičnih kuglica u Mešavini 2, koje su takođe pravilnog oblika. To je uzrok veće specifične površine koja je dobijena kod Mešavine 1.

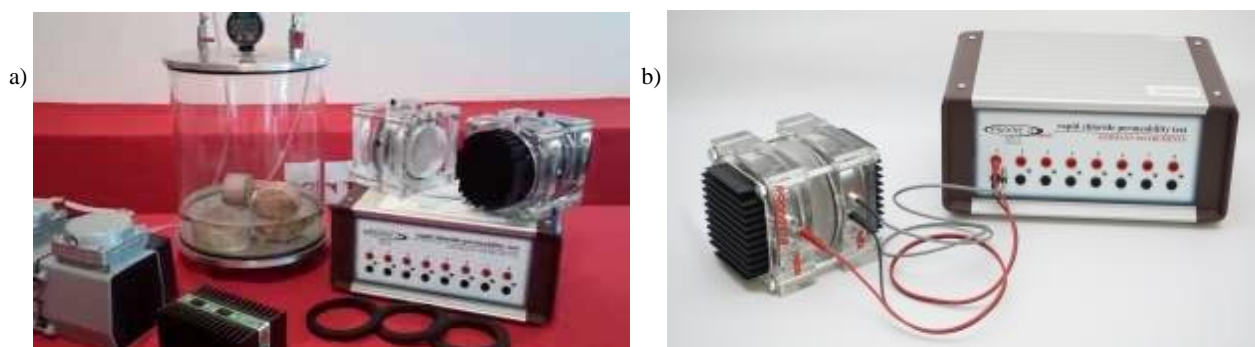
Na osnovu dobijenih rezultata faktora razmaka pora, Mešavina 1 je postigla vrednost koja je veća od 0.180 mm koja je propisana prema SRPS U.M1.206. Mešavine 2 i 3 su u pogledu faktora razmaka pora zadovoljile uslove navedenog standarda.

- *Određivanje koeficijenta migracije hlorida*

Otpornost betona na prodiranje hlorida određuje se prema standardu SRPS EN 12390-18:2021, /15/. Uzorak betona se postavlja između rastvora bez hlorida i alkalnog rastvora koji sadrži hlorid, a električni napon se primenjuje između dve spoljne elektrode da bi hloridne jone ubacio u betonski uzorak. Nakon određenog vremenskog perioda, uzorak se izlaže zatezanju cepanjem i dubina penetracije slobodnih hloridnih jona se određuje korišćenjem odgovarajućeg rastvora indikatora boje.

Koeficijent migracije hlorida se izračunava na osnovu izmerene dubine prodiranja, veličine primenjenog napona i drugih parametara. Oprema za ispitivanje kao i raspored mernih mesta za određivanje dubine prodiranja hlorida prikazani su na sl. 18.

Najveće dobijene vrednosti koeficijenta migracije hlorida imao je beton Mešavine 1. U poređenju sa Mešavinom 1, smanjenje koeficijenta migracije hlorida kod mešavine 2 iznosi 32 %, a kod Mešavine 3 ono iznosi 19 %.



Slika 18. Oprema za određivanje koeficijenta migracije hlorida, a) set sa ćelijama, b) oprema za ispitivanje prema SRPS EN 12390-18.

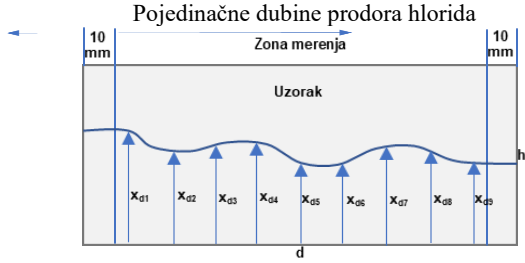
Tabela 6. Koeficijent migracije hlorida - Mešavina 1.

Oznaka ispitnog uzorka			Mešavina 1/1	Mešavina 1/2	Mešavina 1/3					
Dimenzije ispitnih uzoraka	Visina, h^* ($\pm 0,1$ mm)	srednja	50.4	50.4	50.3					
	Prečnik, d ($\pm 0,1$ mm)		99.5	99.7	99.3					
			x_{d1}	10	14	10	10	8	9	
			x_{d2}	8	10	7	12	10	11	
			x_{d3}	6	8	5	5	6	3	
			x_{d4}	5	8	7	3	5	5	
			x_{d5}	10	10	3	7	3	6	
			x_{d6}	7	8	4	6	2	4	
			x_{d7}	6	7	2	8	4	3	
			x_{d8}	8	9	5	9	6	7	
			x_{d9}	10	10	8	11	7	10	
Prosečna dubina prodora hlorida, x_d ($\pm 0,5$ mm)*			8.5		6.5		6.0			
Najveća dubina prodora hlorida, x_{max} (± 1 mm)					14.0					
Koeficijent migracije hlorida, M_{nss} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) $M_{nss} = (RT/zFE)(x_d - \alpha \sqrt{x_d})/t$			pojedinačni		3.7		2.8		2.5	
			srednji				3.0			
			najveći				3.7			

Tabela 7. Koeficijent migracije hlorida - Mešavina 2.

Oznaka ispitnog uzorka			Mešavina 2/1	Mešavina 2/2	Mešavina 2/3					
Dimenzije ispitnih uzoraka	Visina, h^* ($\pm 0,1$ mm)	srednja	50.2	50.1	50.4					
	Prečnik, d ($\pm 0,1$ mm)		99.7	99.2	99.5					
			x_{d1}	7	2	10	9	8	9	
			x_{d2}	5	9	5	7	6	5	
			x_{d3}	4	7	6	9	2	3	
			x_{d4}	2	5	5	4	5	6	
			x_{d5}	6	4	2	6	4	8	
			x_{d6}	8	2	5	5	3	5	
			x_{d7}	3	6	6	7	8	9	
			x_{d8}	5	8	8	4	7	7	
			x_{d9}	7	9	2	7	3	4	
Prosečna dubina prodora hlorida, x_d ($\pm 0,5$ mm)*			5.5		6.0		5.5			
Najveća dubina prodora hlorida, x_{max} (± 1 mm)					10.0					
Koeficijent migracije hlorida, M_{nss} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) $M_{nss} = (RT/zFE)(x_d - \alpha \sqrt{x_d})/t$			pojedinačni		2.3		2.5		2.3	
			srednji				2.4			
			najveći				2.5			

Tabela 8. Koeficijent migracije hlorida - Mešavina 3.

Oznaka ispitnog uzorka		Mešavina 3/1		Mešavina 3/2		Mešavina 3/3		
Dimenzije ispitnih uzoraka	Visina, h* ($\pm 0,1$ mm)	srednja		50.3		50.2		
	Prečnik, d ($\pm 0,1$ mm)	99.3		99.4		99.7		
		x _{d1}	8	4	7	11	7	5
		x _{d2}	10	5	8	10	8	11
		x _{d3}	6	7	11	5	4	7
		x _{d4}	5	11	6	7	11	5
		x _{d5}	3	3	10	3	6	3
		x _{d6}	7	5	9	4	9	8
		x _{d7}	5	8	7	6	5	5
		x _{d8}	8	5	4	4	2	2
		x _{d9}	6	9	8	2	7	8
		Prosečna dubina prodora hlorida, x _d ($\pm 0,5$ mm)*		6.5		7.0		6.5
Najveća dubina prodora hlorida, x _{max} (± 1 mm)				11.0				
Koeficijent migracije hlorida, M _{nss} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) $M_{nss} = (RT/zFE)(x_d - \alpha \sqrt{x_d})/t$		pojedinačni		2.7		3.0		
		srednji				2.8		
		najveći				3.0		

Rezultati ispitivanja betonskih prefabrikovanih elemenata (ivični venci)

Na osnovu dobijenih rezultata laboratorijskih ispitivanja sprovedenih u akreditovanoj Centralnoj laboratoriji za ispitivanje materijala Instituta IMS, Beograd, zaključeno je da je moguća primena Sika Aer Solid, kao zamene za aerant u proizvodnji betonskih prefabrikovanih elemenata. Industrijske probe su urađene u fabrici betona GP „Nikolić“ d.o.o., sada „Marera Construction“ d.o.o., Kraljevo.

U industrijskoj hali za proizvodnju prefabrikovanih betonskih elemenata proizvođač je pripremio oplatu za izradu ivičnih venaca, betonskih bočnih elementa na konzolama betonskih rasponskih konstrukcija.

Ivični venac 1 (Mešavina 1) je urađen na isti način kao u redovnoj proizvodnji, a ivični venci 2 (Mešavina 2) i 3 (Mešavina 3) sa Sika Aer Solid, odnosno, Sika Aer.

Priprema oplate za ivične vence prikazana je na sl. 19.

Nakon pripreme oplate vrši se spravljanje betona i to:

- ivični venac sa Mešavinom 1,
- ivični venac sa Mešavinom 2 (Sika Aer Solid),
- ivični venac sa Mešavinom 3 (Sika Aer).

Fabrika betona poseduje mešalicu za spravljanje betona zapremine 0,75 m³ sa horizontalnim mešanjem.



Slika 19. Priprema oplate za ivične vence.

Fabrika betona poseduje neophodne uređaje za doziranje tečnih hemijskih dodataka, preko kojih su prema zadatom doziranju dodati superplastifikator i aerant. Sika Aer Solid je prema preporukama proizvođača doziran sa agregatom, sl. 20. Na istoj slici prikazan je postupak mešanja, kao i izgled svežeg betona prilikom mešanja.



Slika 20. Fabrika betona, doziranje Sika Aer Solid, mešalica za beton, mešanje betona.

Nakon mešanja izvršna je provera svojstava svežeg betona a nakon toga izrada ivičnih venaca (sl. 21).



Slika 21. Izrađeni ivični venci.

Ivični venci su negovani 24 č. na vazduhu na temperaturi 20 ± 5 °C, a nakon toga su prekriveni filcom koji je kvašen do starosti ivičnih venaca od 28 dana.

Iz ivičnih venaca isečeni su uzorci na kojima je izvršeno:

- ispitivanje otpornosti površine betona na dejstvo mraza u prisustvu soli za odmrzavanje, prema SRPS U.M1.206: 2013, Prilog O,
- karakterizacija pora, prema SRPS EN 480-11:2010,
- određivanje koeficijenta migracije hlorida SRPS EN 12390 18: 2021.

- Ispitivanje otpornosti površine betona ivičnih venaca na dejstvo mraza u prisustvu soli za odmrzavanje

Iz ivičnih venaca isečeni su pločasti uzorci 150×150×50 mm, pripremljeni i ispitani u svemu prema SRPS U.M1.206 : 2013, Prilog O. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tab. 9.

Tabela 9. Srednje vrednosti količine oljuspalog materijala kg/m³.

Oznaka ivičnih venaca		Srednje vrednosti količine oljuspalog materijala (kg/m ²)
7 ciklusa	Ivični venci 1	0.722
	Ivični venci 2	0
	Ivični venci 3	0
14 ciklusa	Ivični venci 1	0.901
	Ivični venci 2	0.091
	Ivični venci 3	0.132
28 ciklusa	Ivični venci 1	1.621
	Ivični venci 2	0.152
	Ivični venci 3	0.241

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja može se zaključiti da Ivični venci 1 nisu zadovoljili u pogledu otpornosti betona na dejstvo mraza u prisustvu soli za odmrzavanje. Ivični venci 2 (sa dodatkom Sika Aer Solid) i Ivični venci 3 (sa dodatkom Sika Aer) imali su neznatno ljušpanje koje zadovoljava za klasu izloženosti XF4 prema SRPS U.M1.206:2013.

- Karakterizacija pora ivičnih venaca

Iz ivičnih venaca isečeni su pločasti uzorci 150×100×20 mm, pripremljeni i ispitani u svemu prema SRPS EN 480-11:2010. Rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 10.

Tabela 10. Rezultati karakterizacije pora.

Rezultati ispitivanja SRPS EN 480-11	Oznaka ivičnih venaca		
	Ivični venci 1	Ivični venci 2	Ivični venci 3
Sadržaj pora (%)	2.87	2.41	6.32
Specifična površina pora (mm ⁻¹)	45.09	41.12	42.24
Faktor razmaka pora (mm)	0.227	0.177	0.163

Dobijene vrednosti kod Ivičnih venaca 1 i 2 su očekivane za betone kojima nije dodat aerant, a Ivični venac 3 je zadovoljio uslove navedenog standarda u pogledu sadržaja pora.

Kod Ivičnog venca 1 dobijena je veća specifična površina zbog sadržaja pora nepravilnog oblika (zarobljeni vazduh) za razliku od sfernih mehurića uvučenog vazduha kod Ivičnog venca 3 i prefabrikovanih elastoplastičnih kuglica kod Ivičnog venca 2, koje su takođe pravilnog oblika. To je uzrok veće specifične površine, dobijene kod Ivičnog venca 1.

Na osnovu dobijenih rezultata faktora razmaka, pora Ivičnog venca 1 je postigla vrednost koja je veća od 0.180 mm koja je propisana prema SRPS U.M1.206. Ivični venci 2 i 3 su u pogledu faktora razmaka pora zadovoljili uslove navedenog standarda.

- Određivanje koeficijenta migracije hlorida

Za sprovođenje ovog ispitivanja iz ivičnih venaca izvađena su jezgra prečnika ~ 100 mm koja su isečena na visinu ~ 50 mm. Uzorci za ispitivanje su pripremljeni i ispitani u svemu prema SRPS EN 12390-18:2021.

Najveće dobijene vrednosti koeficijenta migracije hlorida imao je beton Mešavine 1. U poređenju sa Mešavinom 1,

smanjenje koeficijenta migracije hlorida kod Mešavine 2 iznosi 30 %, a kod Mešavine 3 je 18 %.

Tabela 11. Koeficijent migracije hlorida ivičnih venaca.

Oznaka ivičnih venaca	Ivični venac 1	Ivični venac 2	Ivični venac 3	
Koeficijent migracije hlorida, $M_{nss} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ $M_{nss} = (RT/zFE)(xd - \alpha\sqrt{xd})/t$	srednji	3.2	2.6	3.0
	najveći	4.0	2.8	3.3

ZAKLJUČAK

Često, u praksi, za betone viših klasa čvrstoće, je takođe potrebna otpornost na smrzavanje/odmrzavanje. Za ove potrebe može se preporučiti aditiv Sika Aer Solid, jer se njegov mehanizam za poboljšanje otpornosti betona na mraz razlikuje od aditiva za zaštitu vazduha i nema negativnog uticaja na vrednost pritisne čvrstoće.

U radu su prikazane mogućnosti u slučaju primene novih materijala u betonu sa aspekta povećanja njegove trajnosti. Standardi i pravilnici koji su usvojeni u Srbiji ne poznaju primenu ovakvih materijala. Njihova primena ne omogućava da se ispoštuju sve preporuke i zahtevi iz propisa, ali svakako ukoliko se dokaže njihova podobnost na prethodnim ispitivanjima moguće ih je primeniti u betonu. Za ovo je potrebno uraditi dodatna ispitivanja i prikaz malo većeg broja rezultata koji će pokazati da novi materijali sa ovakvim karakteristikama mogu doprineti povećanju trajnosti i opšteg kvaliteta betona.

Primenom Sika Aer Solid kao zamene za aerant, moguće je proizvesti betonske elemente čija svojstva zadovoljavaju zahtevane klase izloženosti koje su definisane prema SRPS EN 206 i SRPS U.M1.206.

Dodavanjem Sika Aer Solid u beton postiže se trajnost betonskih prefabrikovanih elemenata kroz postizanje otpornosti na dejstvo mraza, otpornosti na dejstvo mraza u prisustvu soli za odmrzavanje, otpornosti na penetraciju vode pod pritiskom, kao i otpornosti na migraciju hloridnih jona.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na finansijskoj podršci za istraživanja kroz Ugovor br. 451-03-68/2022-14/200012.

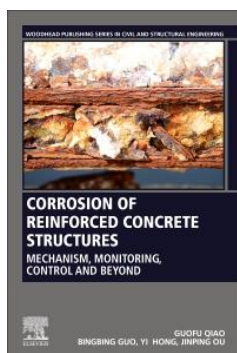
REFERENCES

- Li-kun, Q., *Study on the strength and deformation of concrete under multiaxial stress after high-temperature of freeze-thaw cycling*, PhD Thesis, Dalian University of Technology, Liaoning, China, 2003.
- Powers, T.C., Helmuth, R.A. (1953), *Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing*, Proc. of Highway Research Board, 32: 285-297.
- Fagerlund, G. (1977), *The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete*, Mater. Constr. 10(4): 231-253. doi: 10.1007/BF02478694
- Setzer, M.J. (2001), *Micro-ice-lens formation in porous solid*, J Colloid Interf. Sci. 243(1): 193-201. doi: 10.1006/jcis.2001.7828
- Valenza, J.J., Scherer, G.W. (2007), *A review of salt scaling: II. Mechanisms*, Cement & Concrete Res. 37(7): 1022-1034. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.03.003

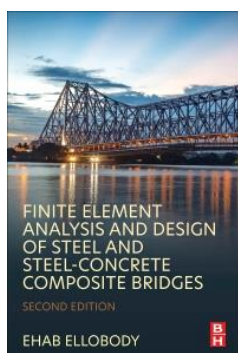
6. SRPS EN 12350-2:2019, Ispitivanje svežeg betona - Deo 2: Ispitivanje sleganja. (Testing fresh concrete - Part 2: Slump test)
7. SRPS EN 12350-6:2019, Ispitivanje svežeg betona - Deo 6: Zapreminska masa. (Testing fresh concrete - Part 6: Density)
8. SRPS EN 12350-7:2019, Ispitivanje svežeg betona - Deo 7: Sadržaj vazduha - Metode pritiska. (Testing fresh concrete - Part 7: Air content - Pressure methods)
9. SRPS EN 12390-2:2019, Ispitivanje očvrsllog betona - Deo 2: Izrada i negovanje uzoraka za ispitivanje čvrstoće. (Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests)
10. SRPS EN 12390-3:2019, Ispitivanje očvrsllog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje. (Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens)
11. SRPS EN 206:2021, Beton - Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost - Pravila za primenu standarda Ispitivanje otpornosti betona na dejstvo mraza. (Concrete - Specification, performance, production and conformity)
12. SRPS EN 12390-8:2019, Ispitivanje očvrsllog betona - Deo 8: Dubina penetracije vode pod pritiskom. (Testing hardened concrete - Part 8: Depth of penetration of water under pressure)
13. SRPS EN 206, Beton - Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost - Pravila za primenu standarda Prilog O - Metoda za određivanje otpornosti betona na dejstvo mraza (u prisustvu soli za odmrzavanje). (Concrete - Specification, performance, production and conformity)
14. SRPS EN 480-11:2010, Dodaci betonu, malteru i injekcionoj masi - Metode ispitivanja - Deo 11: Određivanje karakteristika vazdušnih pora u očvrslom betonu. (Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods - Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete)
15. SRPS EN 12390-18:2021, Ispitivanje očvrsllog betona - Deo 18: Određivanje koeficijenta migracije hlorida. (Testing hardened concrete - Part 18: Determination of the chloride migration coefficient)

© 2023 The Author. Structural Integrity and Life, Published by DIVK (The Society for Structural Integrity and Life 'Prof. Dr Stojan Sedmak') (<http://divk.inovacionicentar.rs/ivk/home.html>). This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](#)

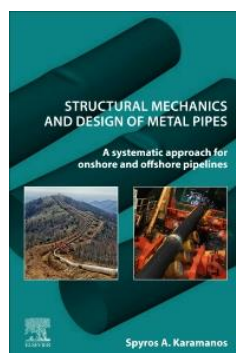
New Elsevier Book Titles – Woodhead Publishing – Academic Press – Butterworth-Heinemann – ...



Corrosion of Reinforced Concrete Structures - Mechanism, Monitoring, Control and Beyond, 1st Edition
Guofu Qiao, Bingbing Guo, Jinping Ou
Woodhead Publishing, Feb 2023
ISBN: 9780128195482
EISBN: 9780128195727



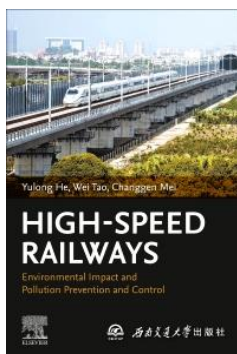
Finite Element Analysis and Design of Steel and Steel-Concrete Composite Bridges 2nd Edition
Ehab Ellobody
Butterworth-Heinemann, Jan 2023
ISBN: 9780443189951
EISBN: 9780443189968



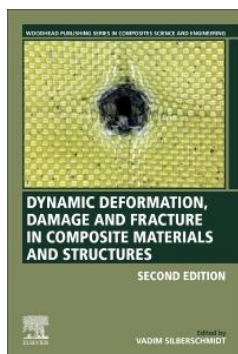
Structural Mechanics and Design of Metal Pipes A Systematic Approach for Onshore and Offshore Pipelines, 1st Edition
Spyros Karamanos
Elsevier, Dec 2022
ISBN: 9780323886635
EISBN: 9780323886482



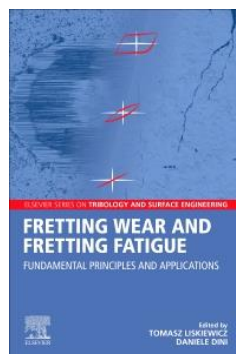
Advances in Metal Additive Manufacturing, 1st Edition
S. Salunkhe, S. Amancio-Filho, J.P. Davim (Eds.)
Woodhead Publishing, Oct 2022
ISBN: 9780323912303
EISBN: 9780323914680



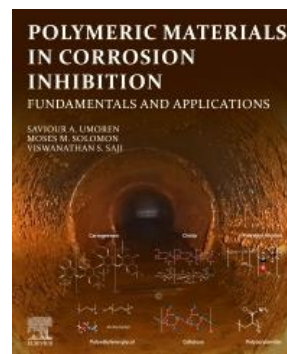
High-Speed Railways Environmental Impact and Pollution Prevention and Control, 1st Edition
Yulong He, Wei Tao, Changgen Mei
Elsevier, Mar 2023
ISBN: 9780443136771
EISBN: 9780443136788



Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures, 2nd Edition
Vadim Silberschmidt
Woodhead Publishing, Sep 2022
ISBN: 9780128239797
EISBN: 9780128239803



Fretting Wear and Fretting Fatigue Fundamental Principles and Applications, 1st Edition
T. Liskiewicz, D. Dini (Eds.)
Elsevier, Dec 2022
ISBN: 9780128240960
EISBN: 9780128240977



Polymeric Materials in Corrosion Inhibition, Fundamentals and Applications, 1st Edition
Saviour Umoren, Moses Solomon, Viswanathan Saji
Elsevier, Jun 2022
ISBN: 9780128238547
EISBN: 9780128238707