

Istraživanja kriterija održivosti armiranog betona

Dubravka Bjegović, Marijana Serdar, Marija Jelčić Rukavina, Ana Baričević

Ključne riječi

armirani beton, armiranobetonska konstrukcija, kriterij održivosti, trajnost, istraživanje, prirodni resursi, emisija CO₂

Key words

reinforced concrete, reinforced-concrete structure, sustainability criterion, durability, research, natural resources, CO₂ emission

Mots clés

béton armé, construction en béton armé, critère de durabilité, durabilité, étude, ressources naturelles, émissions CO₂

Ключевые слова

железобетон, железобетонная конструкция, критерий жизнестойкости, долговечность, исследование, природные ресурсы, эмиссия CO₂

Schlüsselworte

Stahlbeton, Stahlbetonkonstruktion, Erhaltungskriterium, Dauerhaftigkeit, Untersuchung, natürliche Ressourcen, CO₂ - Emission

D. Bjegović, M. Serdar, M. Jelčić Rukavina, A. Baričević

Pregledni rad

Istraživanja kriterija održivosti armiranog betona

U radu se daje prikaz istraživanja usmjerenih na zadovoljenje kriterija održivosti u području armiranog betona kao materijala od kojeg su izrađene trajnije armiranobetonske konstrukcije, koja su proveli autori rada sa suradnicima, tijekom nekoliko zadnjih godina. Temelji održivosti leže u tri osnovne postavke, koje su detaljno obrađene u ovom radu: očuvanje prirodnih resursa, smanjenje emisije CO₂, te projektiranje, gradnja i održavanje trajnijih armiranobetonskih konstrukcija.

D. Bjegović, M. Serdar, M. Jelčić Rukavina, A. Baričević

Subject review

Study of reinforced-concrete sustainability criteria

An overview is given of research conducted by the authors and their associates over the past several years, with the focus on meeting sustainability criteria in the field of reinforced concrete, regarded as material that is used for making more durable reinforced-concrete structures. The foundations of sustainability lie in three basic assumptions, which are presented in great detail in this paper: preservation of natural resources, reduction of CO₂ emissions, and the design, construction and maintenance of more durable reinforced-concrete structures.

D. Bjegović, M. Serdar, M. Jelčić Rukavina, A. Baričević

Ouvrage de synthèse

Etude de critères de durabilité du béton armé

L'étude faite par les auteurs et leurs associé au cours des quelques dernières années, avec l'accent sur le respect des critères de durabilité dans le domaine du béton armé, considéré comme matériau utilisé pour construire les constructions de béton plus durables, est présentée dans l'ouvrage. Les fondations de durabilité résident dans trois suppositions de base qui son présentées en détail dans l'ouvrage: préservation des ressources naturelles, réduction des émissions CO₂, et l'étude, la construction et l'entretien des constructions en béton armé plus durables.

Д. Бегович, М. Сердар, М. Йелчић Рукавина, А. Баричевич

Обзорная работа

Исследование критерия жизнестойкости железобетона

В работе приведен обзор исследований, направленных на удовлетворение критерия жизнестойкости железобетона как материала, из которого выполняются долговечные железобетонные конструкции. Исследования проведены авторами и их сотрудниками в течение последних нескольких лет. Основы жизнестойкости базируются на трех основных предпосылках, подробно рассмотренных в данной работе: сохранении природных ресурсов, снижении эмиссии CO₂, проектировании, строительстве и обслуживании долговечных железобетонных конструкций.

D. Bjegović, M. Serdar, M. Jelčić Rukavina, A. Baričević

Übersichtsarbeit

Untersuchung der Kriterien der Erhaltbarkeit des Stahlbetons

Im Artikel beschreibt man die Untersuchungen orientiert zur Erfüllung der Erhaltbarkeitskriterien im Bereich des Stahlbetons als Baustoffs für die Herstellung dauerhafterer Stahlbetonkonstruktionen, durchgeführt von den Autoren des Artikels mit Mitarbeitern während einiger der letzten Jahre. Die Fundamente der Erhaltbarkeit liegen in drei Grundsätzen die in diesem Artikel detailliert bearbeitet sind: Erhaltung der natürlichen Ressourcen, Minderung der CO₂ - Emission sowie Entwurf, Bauen und Wartung dauerhafterer Stahlbetonkonstruktionen.

Autorice: Prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. grad.; **Marijana Serdar**, dipl. ing. grad.; **Marija Jelčić Rukavina**, dipl. ing. grad.; **Ana Baričević**, dipl. ing. grad., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale, Zagreb

1 Uvod

Zaštita okoliša, uštedom energije i smanjenom potrošnjom prirodnih resursa predstavlja glavni izazov današnjice u svim područjima ljudske djelatnosti, poglavito u proizvodnji i industriji. Za očuvanje okoliša bilo je potrebno osmisliti novi pristup proizvodnji i industriji, te je 1992. na Earth Summitu u Rio de Janeiru definiran pojam održivosti. Od tada se svaka gospodarska djelatnost koja je u skladu sa zemljinim ekosustavom smatra održivom [1].

Upravo, građevinarstvo spada u glavne onečišćivače okoliša. Snažan razvoj građevinarske industrije doveo je do godišnje proizvodnje betona od 750 milijuna m³ samo na području Europe [2]. Valja istaknuti da proizvodnja betona nema negativnih učinaka na okoliš, ali ima proizvodnja osnovnih sirovina, poglavito cementa.

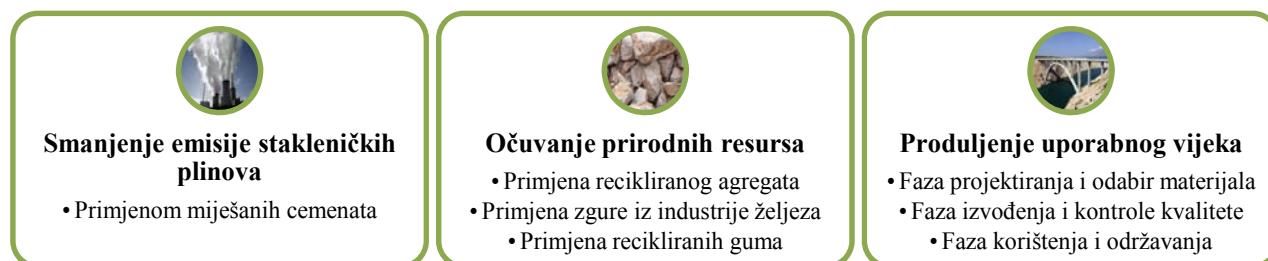
Održivost armiranog betona očituje se u: smanjenju emisije CO₂ zamjenom dijela cementa upotrebom nusprodukata drugih industrija (zgurom, letećim pepelom, silikatnom prašinom, vapnencom), oporabi otpada u cilju zamjene dijela neobnovljivih izvora obnovljivima, te projektiranjem i izvedbom, a potom i održavanjem konstrukcija (slika 1.).

2 Smanjenje emisije stakleničkih plinova

Prema Kyoto protokolu, u razdoblju od 2008.-2012. ukupna emisija stakleničkih plinova razvijenih zemalja mora se smanjiti najmanje za 5 % u odnosu na razinu ostvarenu 1990. godine. U Hrvatskoj, proizvodnja portland cementa uzrokuje 8 % - 9 % ukupne emisije stakleničkih plinova [3]. S obzirom na visok udio u ukupnoj emisiji stakleničkih plinova, veliki napori uloženi su u smjeru pronalaska novih materijala koji bi omogućili smanjene potrebe za cementom.

Primjenom sekundarnih sirovina iz različitih industrija, poput zgure, letećeg pepela, silikatne prašine, vapnenca gdje su ti materijali smatrani otpadnim osigurava se ekonomska i ekološka opravdanost njihove primjene u proizvodnji cementa. Provedenim istraživanjima [4] utvrđena je opravdanost primjene ovih materijala pri proizvodnji cementa s obzirom da oni svojim svojstvima osiguravaju konkurentnost s običnim betonom te prepoznatljivost kod krajnjeg potrošača (slika 2.).

Puculanska svojstva ovih materijala omogućavaju potrošnju zaostalog Ca(OH)₂ pri hidrataciji cementa i na taj način osiguravaju stvaranje dodatne količine CSH gela, čime direktno utječu na smanjenje propusnosti betona



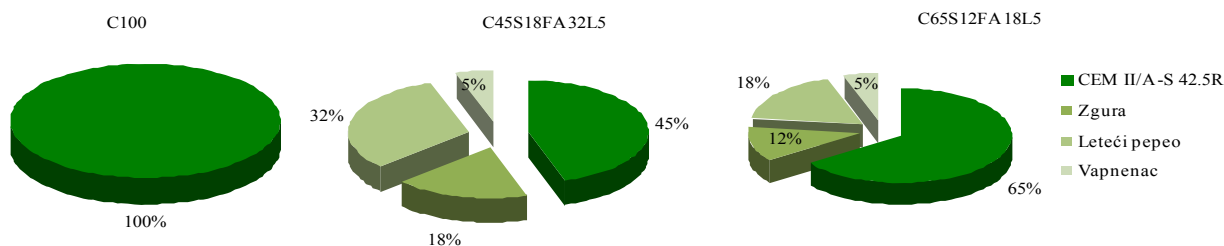
Slika 1. Okolišno održiva industrija betona



Slika 2. Primjena miješanih cemenata u proizvodnji betona

Ovdje se prikazuju istraživanja sustava održivosti u području armiranog betona kao materijala trajnijih konstrukcija, koja su u Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu proveli autori rada sa suradnicima.

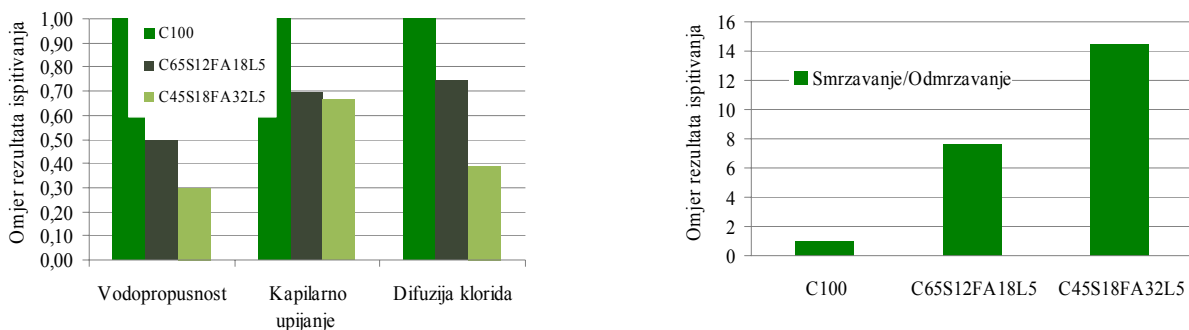
[5]. Za ispitivanje te tvrdnje provedeno je istraživanje mehaničkih i trajnosnih svojstava betona na tri mješavine pripremljene s različitim udjelima sekundarnih sirovina (slika 3.) [6].



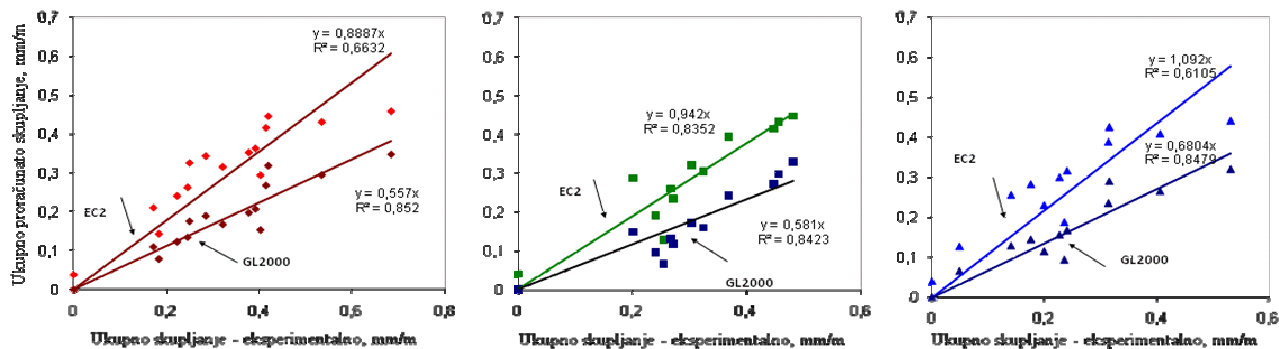
Slika 3. Prikaz zamjene udjela cementa u pripremljenim mješavinama

S obzirom da je potvrđeno poboljšanje trajnosnih svojstava (kapilarno upijanje, plinopropusnost, difuzija klorida) ekoloških betona u odnosu na običan beton dokazana je mogućnost njihove upotrebe u agresivnom morskom okolišu (slika 4.). Međutim, pri upotrebi miješanih

Rezultati provedene usporedbe eksperimentalnih i proračunom dobivenih rezultata pokazuju da se pri projektiranju betonske konstrukcije s miješanim cementima mogu rabiti isti modeli kao i za obične betone što omogućava njihovu širu primjenu (slika 5.).



a) Slika 4. Rezultati ispitivanja ekoloških betona: a) Ispitivanje vodopropusnosti, kapilarnog upijanja i difuzije klorida, b) Ispitivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje



a) C100 Slika 5. Usporedba eksperimentalno i proračunski određenih vrijednosti skupljanja prema EC2 i GL2000 modelu za sve tri vrste mješavina

cemenata u okolišu s izraženim smrzavanjem i odmrzavanjem potrebna je dodatna pozornost pri projektiranju sastava mješavine.

Osim ispitivanja trajnosnih svojstava, kako bi se dokazao utjecaj sinergije sekundarnih sirovina na svojstva skupljanja i puzanja ekoloških betona istraživanje je obuhvatilo ispitivanje navedenih svojstava. Eksperimentalno dobiveni podatci koeficijenata skupljanja i puzanja su uspoređeni s izračunatim vrijednostima prema EN 1992-1 [7] i Gardner/Lockman GL2000 modelu [8].

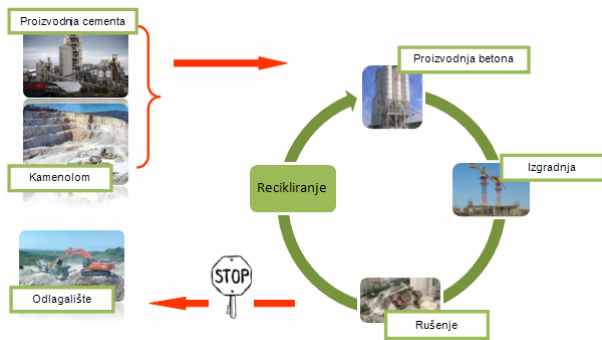
3 Očuvanje prirodnih resursa

Nerazvijena svijest jednako kao i nebriga za okoliš u kojem živimo uzrokovali su gomilanje različitih vrsta otpada tijekom desetljeća, pa pravilno gospodarenje otpadom postaje prioritet.

Kvalitetno gospodarenje otpadom podrazumijeva smanjenje masovne proizvodnje novog otpada, pronalaženje načina za recikliranje i ponovnu uporabu postojećeg otpada, te na kraju sigurno i ekološki prihvatljivo odlaganje neuporabljene otpada [9].

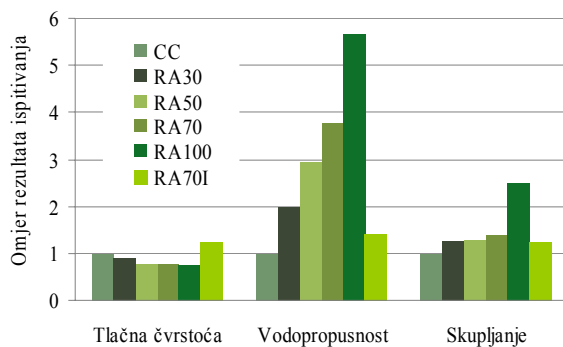
3.1 Primjena recikliranog agregata

Uzlet građevinarstva praćen velikom potrošnjom betona kao osnovnog građevnog materijala, uzrokovao je nastajanje velikih količina građevinskog otpada. Međutim, pravilnim odvajanjem te oporabom većina nastalog otpada može se ponovno upotrijebiti u pripremi betona. Oporaba otpada i ponovna upotreba kao zamjena dijela agregata za posljedicu ima smanjenje postojećih i novih količina otpada kao i značajno očuvanje okoliša zbog smanjene potrebe za eksploatacijom prirodnih resursa (slika 6.).



Slika 6. Očuvanje prirodnih resursa zatvaranjem životnog ciklusa građevine

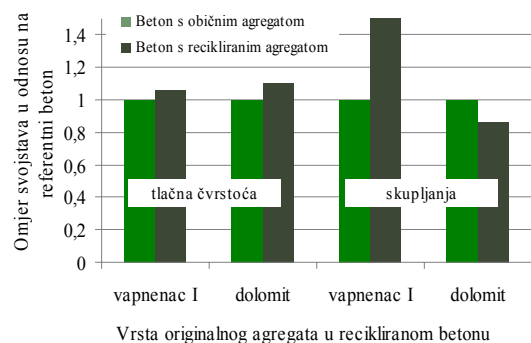
U okviru istraživanja utjecaja zamjene riječnog i drobljenog agregata onim dobivenim recikliranjem građevinskog otpada [10] pripravljene su betonske mješavine s udjelima recikliranog agregata 30, 50, 70 i 100 % (oznake RA30, RA50, RA70 i RA100) te su svojstva takvih betona uspoređena sa svojstvima referentnog betona (oznaka CC). Na slici 7. prikazani su rezultata nekih svojstava.



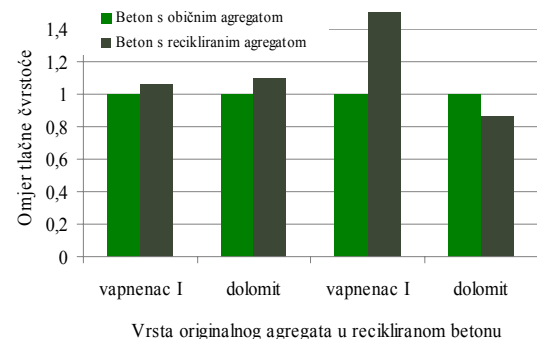
Slika 7. Prikaz rezultata ispitivanja betona s različitim udjelima recikliranog agregata

Analizom rezultata ovih istraživanja utvrđena je najveća preporučena količina recikliranog agregata u betonu koja iznosi 30 %, s obzirom da je primijećeno da veća količina recikliranog agregata uzrokuje značajne promjene u svojstvima betona u odnosu na referentnu mješavinu. Također je zaključeno da uporaba kemijskih dodataka i posebnih metoda miješanja betona znatno utječe na poboljšanje svojstva betona.

Svojstva recikliranog agregata ovise u najvećoj mjeri i o svojstvima betona od kojeg je taj agregat proizveden. Također je od velike važnosti i način miješanja recikliranog agregata, cementa i vode pri pripremanju betona. Upravo iz tog razloga provedena su detaljnija istraživanja [11] utjecaja recikliranog agregata na svojstva betona za reciklirane agregate dobivene od različitih vrsta betona i s primijenjenim poboljšanim metodama miješanja betona. Tijekom istraživanja ispitivani su betoni s agregatom dobivenim recikliranjem betona s vapnenačkim, dolomitnim i riječnim agregatima, s različitih područja. Na slikama 8.a i 8.b prikazana je usporedba svojstava vodonepropusnosti i skupljanja betona pripremljenih s običnim i recikliranim agregatom različitog porijekla.



a)



b)

Slika 8. Usporedba svojstava betona s običnim i recikliranim agregatom različitog porijekla

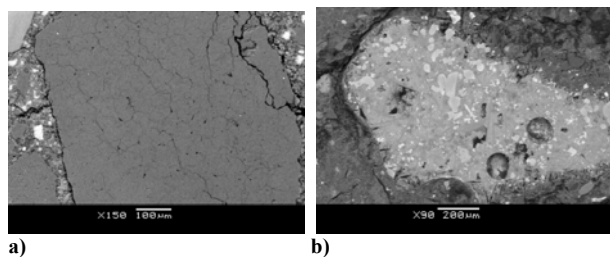
Provedena su istraživanja pokazala da utjecaj recikliranog agregata na svojstva betona nije jednoznačan i varira ovisno o porijeklu recikliranog agregata, metodi miješanja betona i korištenju kemijskih dodataka. Upravo se iz tog razloga, preporuke o uporabi recikliranog agregata, a posebno dopuštene količine mogu uzeti uvjetno, te ih je za primjene potrebno potvrditi ispitivanjima s realno dostupnim materijalima.

3.2 Primjena zgure iz industrije željeza

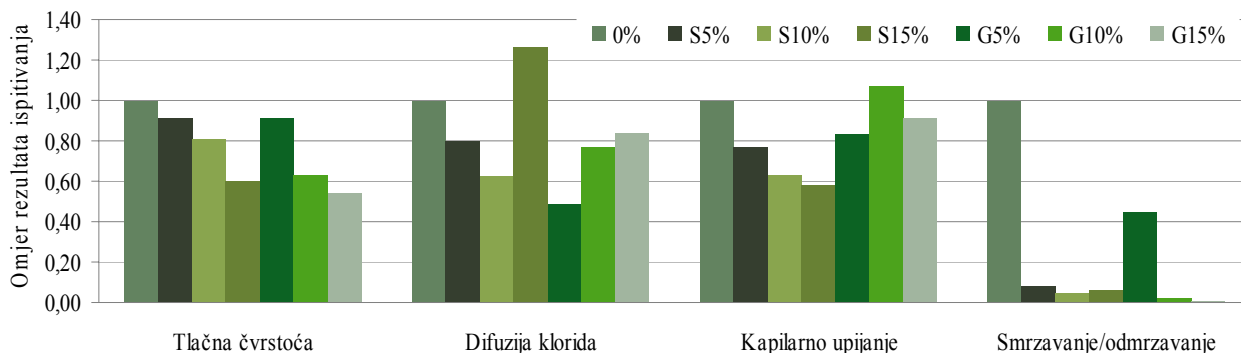
U usporedbi s granuliranim zgurama visokih peći, za koje postoje propisi i dugotrajno iskustvo u proizvodnji

cementa, primjena čeličanske zgure je mnogo manja. Prema provedenim istraživanjima u zemljama Europske Unije se oko 11% proizvedene čelične zgure deponira na odlagališta [12], ali postotak može varirati od zemlje do zemlje. U Hrvatskoj se deponije zgure nalaze uz tvornice željeza u Splitu i Sisku (cca 2-3 mil. tona), međutim njihova velika tvrdoća uzrokuje velike troškove mljevenja. To je bio osnovni razlog da ove zgure do sada nisu primjenjivane u nas.

Novija istraživanja [13] upućuju na mogućnost uporabe zgure, koja nastaje kao nusproizvod iz proizvodnje željeza, kao agregata u betonu. U istraživanju se rabila domaća zgura iz Siska i Splita koja se uspoređivala s konvencionalnim dolomitnim agregatom. Dobiveni rezultati su pokazali da obje istraživane zgure zadovoljavaju zahtjeve za agregat iz Tehničkog propisa za betonske konstrukcije [14] te se prema hrvatskim propisima mogu smatrati prikladnom zamjenom za uobičajeni agregat iz prirodnih izvora, što bi doprinijelo i očuvanju okoliša [15]. Također, s obzirom da se zgura proizvodi na visokim temperaturama, u radu je uspoređeno ponašanje betona sa zgurom i dolomitom kao agregatom pri visokim temperaturama. Rezultati su pokazali lošije ponašanje betona sa zgurom zbog toplinske nekompatibilnosti agregata i cementne matrice. Međutim, činjenica da se zrno zgure nije raspucalo pri visokim temperaturama (800 °C) upućuje da treba dodatno istražiti načine poboljšanja kontakta cementne matrice i agregata zgure kako bi se dobila bolja svojstva takvog betona u uvjetima visokih temperatura (slika 9.) [16].



Slika 9. Izgled agregata nakon izlaganja temperaturi od 800 °C, a) dolomit i b) zgura [15]



Slika 10. Prikaz rezultat ispitivanja mehaničkih i trajnosnih svojstava betona s dodatkom reciklirane gume

3.3 Primjena recikliranih guma

Procjenjuje se da samo u Europi godišnje treba zbrinuti oko 250 milijuna komada istrošenih guma [17]. Negativni učinak na okoliš zbog dugotrajnog procesa razgradnje u prirodi primorala je EU da Direktivom 1999/31/EC [18] u potpunosti zabrani bilo koju vrstu odlaganja otpadnih guma od 2006. Primjenom Direktive zemlje obuhvaćene u EU15 danas svega 5 % otpadnih guma odlaze na deponije. Slaba osviještenost stanovništva i manjkavi propisi doprinose lošem gospodarenju otpadom u ostalim zemljama Europe, gdje stopa nekontroliranog odlaganja u okoliš iznosi 29 % ukupne količine otpadnih guma [17]. Iz navedenih razloga Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva RH donijelo je Pravilnik o gospodarenju otpadnim gumama [19] (slika 10.).



Slika 11. Hijerarhija gospodarenja otpadnim gumama

Provedenim opsežnim ispitivanjima na Građevinskom fakultetu u Zagrebu potvrđena je mogućnost primjene betona s dodatkom recikliranih otpadnih guma [20 – 28] za proizvodnju betona posebne namjene. Dodatak reciklirane gume u betonu utječe na poboljšanje trajnosnih svojstava, osiguravajući smanjenu propusnost betona, čime se povećava otpor prodoru agresivnih tvari u strukturu materijala. Analizom rezultata potvrđeno je poboljšanje trajnosnih svojstava, te se njihova primjena poglavito preporučuje u područjima s izraženom degradacijom uslijed smrzavanja i odmrzavanja (slika 11.).

Reciklirana guma, osim na trajnost utječe i na poboljšanje mehaničkih svojstava materijala. Povećana duktilnost, otpornost na habanje i udar samo su dio rezultata o svojstvima obuhvaćenim navedenim istraživanjima. Rezultati provedenih ispitivanja potvrđuju ekološku i ekonomsku opravdanost reciklirane gume kao zamjene dijela agregata u betonu za izradu betona posebne namjene.

4 Produljenje uporabnog vijeka

Trajnost konstrukcije je njezina sposobnost da uslijed očekivanih djelovanja tijekom uporabe zadrži zahtijevanu razinu sigurnosti i uporabljivosti te odgovarajući izgled bez povećanih troškova za održavanje i popravke. Projektiranje, izgradnja i održavanje trajnijih konstrukcija jedna je od najvažnijih postavki održivog razvoja (slika 12.). Istraživanja su pokazala da bi se iskoristivost prirodnih resursa u tehnologiji betona povećala 5 puta kada bi se za betonske konstrukcije projektirao uporabni vijek 250 umjesto 50 godina [29].



Slika 12. Sveobuhvatan pristup trajnosti konstrukcija

Problemima trajnosti armiranobetonskih konstrukcija bave se posljednjih desetljeća mnogi istraživači, prijedloge za rješenja rade mnoge međunarodne udruge [30 - 32] i tema su mnogih konferencija. Zaključak svih inicijativa na području trajnosti armiranobetonskih konstrukcija je potreba primjenjivanja sveobuhvatnog pristupa trajnosti, što uključuje projektiranje i odabir materijala, izvođenje i kontrolu kvalitete tijekom i nakon izvođenja, te uporabu, održavanje i zbrinjavanje nakon dostizanja zahtijevanog uporabnog vijeka [33].

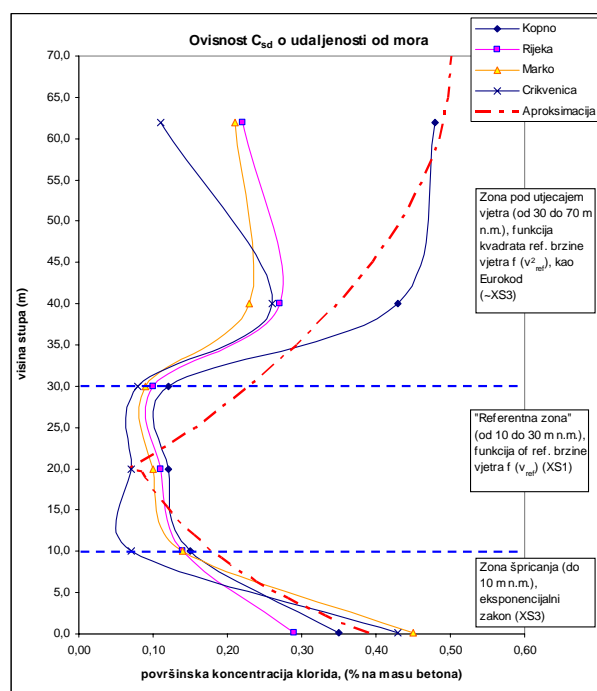
4.1 Faza projektiranja i odabir materijala

Danas se sve više promatraju djelovanja iz okoliša i mehanizmi degradacije uslijed tih djelovanja kao takozvanog trajnosnog djelovanja te se na to modelira ponašanje odabranog materijala, a potom projektira i propisuje zahtijevana otpornost materijala. Projektiranje trajnosti na osnovu trajnosnih djelovanja i svojstava betona za ta djelovanja (engl. *performance based design*) temelji se na pokazateljima kao što su parametri betona izmjereni na laboratorijskim uzorcima i na licu mjesta te geometrijskim karakteristikama presjeka elementa. Parametri trajnosti poput plinopropusnosti, vodonepropusnosti, difuzije klorida i geometrijske karakteristike zaštitnog sloja su parametri koji se uzimaju kao ulazni podaci pri proračunu trajnosti na osnovu svojstava. Tako se na primjer u morskome okolišu (razred okoliša XS) kloridi iz mora promatraju kao djelovanje iz okoliša odnosno djelovanje na konstrukciju. Temeljem opsežnih analiza i modeliranja djelovanja klorida ustanovljene su korelacije između djelovanja na beton klorida iz okoliša i razreda okoliša, udaljenosti konstrukcije od mora, orijentacije

elementa te djelovanja vjetra [34]. U navedenom radu su predložene zone utjecaja vjetra na djelovanje klorida na beton za analizirane uvjete izloženosti vjetrom (slika 13.). Porastom brzine vjetra po visini raste i količina čestica morske vode u zraku i količina akumuliranih klorida na površini betona.

U sklopu istraživanja predloženi su proračunski postupci s pomoću kojih se mogu predvidjeti parametri betona bitni za trajnost konstrukcije, te je opisana matematička ovisnost trajnosnih svojstava betona o sastavu, udjelu pojedinih sastojaka, vrsti i porijeklu. Dobivene zakoni-

osti uvedene su u matematički model CHLODIF++ za proračun uporabnog vijeka armiranobetonske konstrukcije izložene djelovanju klorida [35].

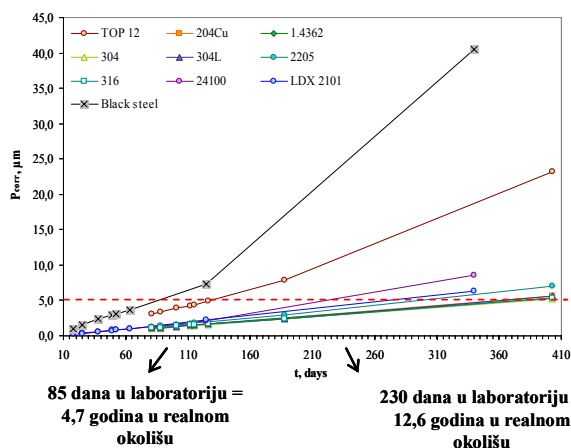


Slika 13. Predložene zone vjetra za određivanje djelovanja klorida na betonsku konstrukciju

Osim modeliranjem ponašanja i projektiranjem otpornosti betona na zahtijevana djelovanja iz okoliša, povećanje trajnosti armiranog betona u svijetu se uvelike rješava i primjenom nehrđajućih armatura. Takva su rješenja uz prednosti i skupa. Upravo iz tih razloga novija istraživa-

nja usmjerena su prema iznalaženju takve vrste niskolegirano čelika koji će imati povećanu korozivnu otpornost u usporedbi s ugljičnim čelikom, zadovoljavajuća mehanička svojstva, uz cijenu koja ne bi značajnije povećala početne troškove [36].

Ako se pretpostavi da laboratorijsko izlaganje u komori 46 puta ubrzava proces korozije u odnosu na realno djelovanje morskog okoliša [37] moguće je proračunati očekivano vrijeme dosezanja određenog graničnog stanja u pogledu korozivnog oštećenja. Granična stanja su definirana dosežanjem određene dubine korozije, koja se određuje iz ukupnog vremena izlaganja i prosječne godišnje korozivne struje izmjerene na uzorcima. Na slici 14. prikazano je očekivano vrijeme, u realnom morskome okolišu, dosezanja prvog graničnog stanja u pogledu oštećenja uslijed korozije, takozvane inicijacije korozije, koja je definirana dubinom korozije od 5 μm [38].



Slika 14. Proračun dubine korozije i očekivano vrijeme dosezanja prvog graničnog stanja [39]

Rezultati ovih istraživanja upozoravaju na različite razine korozivne otpornosti pojedinih vrsta čelika u betonu ovisno o stupnju agresivnosti okoliša. Za upotrebu u armiranobetonskim konstrukcijama to bi značilo da se vrsta korozivski otporne armature bira ovisno o zahtjevanom uporabnom vijeku i razredu izloženosti projektirane armiranobetonske konstrukcije, a doprinosi značajnom produljenju uporabnog vijeka, smanjenju troškova održavanja, bez značajnijih povećanja početnih troškova konstrukcije.

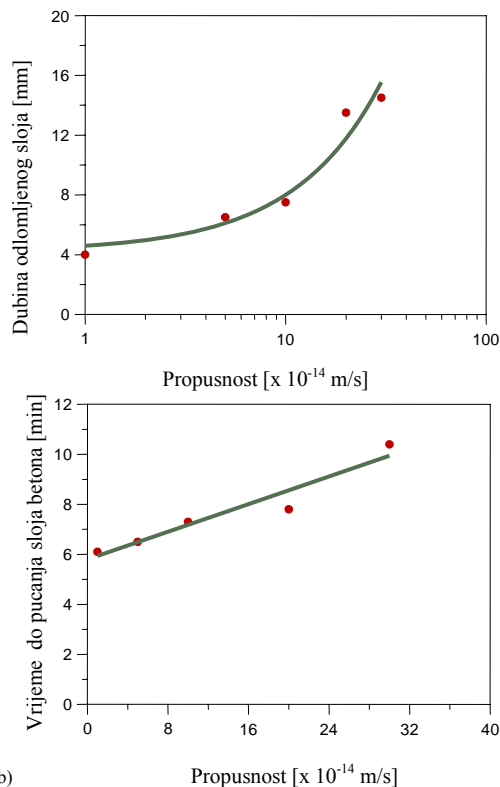
Pri projektiranju konstrukcija u posljednje vrijeme se sve više vodi računa o riziku pojave požara. To je posljedica činjenice da djelovanje požara na građevine izjednačeno u europskim i hrvatskim propisima s ostalim djelovanjima na građevine. Iako se može općenito reći da se beton dobro ponaša u požaru, ovisno o njegovoj vrsti, visoke temperature mogu nepovoljno djelovati na mehanička svojstva betona (čvrstoća, krutost, modul elastičnosti i sl.), a posebno kod betona visokih čvrstoća i samozbijajućih betona. Također, osnovni problem koji se

može pojaviti pri izlaganju betonskog elementa visokim temperaturama jest eksplozivno pucanje (engl. *spalling*), tj. odvajanje slojeva ili dijelova betona s površine konstrukcijskog elementa kada je beton izložen visokim temperaturama ili naglom porastu temperature (slike 15. i 16.). Iako mehanizam pojave eksplozivnog pucanja nije u potpunosti istražen, smatra se da najveću ulogu imaju svojstva betona, a najviše propusnost, početna vlažnost, vlažna čvrstoća i sl. [40].



Slika 15. Izgled armiranobetonskog elementa nakon eksplozivnog pucanja [41]

Započela su se istraživanja vezana za bolje razumijevanje ponašanja betona u uvjetima visokih temperatura eksperimentalno ali i pomoću numeričkih modela koji su dobra alternativa eksperimentima na visokim temperaturama [42].

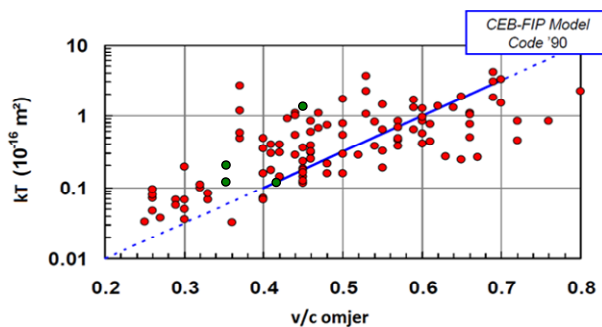


Slika 16. Utjecaj propusnosti na eksplozivno pucanje betona visokih čvrstoća, a) dubina odlomljenog sloja dijela betona u ovisnosti o propusnosti i b) vrijeme pojave eksplozivnog pucanja u ovisnosti o propusnosti betona [42]

4.2 Faza izvođenja i kontrole kvalitete

Početak inicijative projektiranja trajnosti na osnovu svojstava vidljiv je na primjeru propisivanja ispitivanja vodonepropusnosti, otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje ili habanje prema važećim hrvatskim propisima [14], odnosno prema hrvatskom nacionalnom dodatku [43].

Jedan od primjera inicijative projektiranja na osnovi svojstava je i propisivanje razreda plinopropusnosti kao parametra betona, koji se može propisivati u fazi projektiranja armiranobetonske konstrukcije, jednostavno potvrđivati tijekom gradnje i kontrole sukladnosti te naknadno utvrđivati ako se ustanovi ili se sumnja u kvalitetu ugrađenog betona. Prednost upotrebe ove metode je činjenica da je eksperimentalno određena ovisnost koeficijenta plinopropusnosti (kT) o vodocementom omjeru kao i korelacija između koeficijenta plinopropusnosti i ostalih trajnosnih svojstava betona. Na slici 17. prikazana su usporedno ispitivanja dostupna iz literature i eksperimentalni podaci dobiveni ispitivanjima provedena pomoću uređaja Permea Torra, za različite vrijednosti vodocementnog omjera [44, 45].



Slika 17. Usporedba rezultata ispitivanja i literarnih podataka [44,45]

Ovakve korelacije i ovisnosti omogućile bi propisivanje koeficijenta plinopropusnosti ovisno o zahtijevanom vodocementom omjeru i debljini zaštitnog sloja, sve u ovisnosti o razredu izloženosti okolišu betonskog elementa, što je definirano u propisima.

4.3 Faza korištenja i održavanja

Korozijsko praćenje moguće je provoditi u sklopu istražnih radova ocjene stanja ili periodično tijekom uobičajenih pregleda u sklopu gospodarenja građevinom. Najčešće se rabi galvanostatička impulsna metoda, kojom se utvrđuje stanje armature u konstrukciji, te kriteriji prema kojima se može dati procjena preostalog životnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija [46].

Osim periodičnog provođenja korozijskog praćenja moguće je provođenje kontinuiranog praćenja ugrađenim korozijskim sensorima. U većini velikih armiranobetonskih mostova smještenih u morskome okolišu ugrađeni

su senzori za kontinuirano praćenje korozijskih parametara (slika 18.) kako bi se omogućilo pravodobno djelovanje prije nego nastupe znatnija oštećenja armiranobetonskih elemenata uslijed korozije [47].

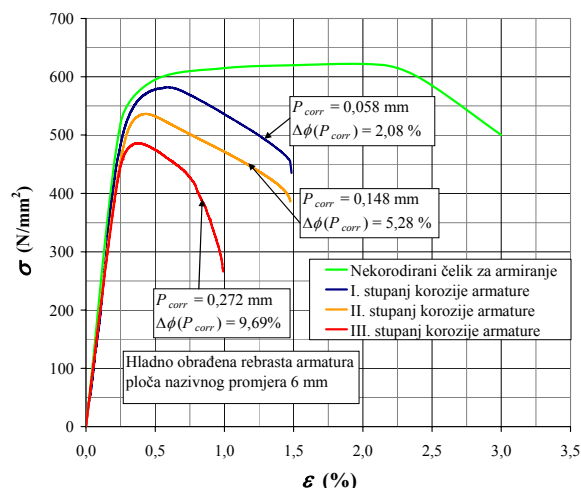


Slika 18. Mostovi s ugrađenim sensorima za korozijsko praćenje: most Krka (gore); most preko rijeke Cetine (dolje)

Poznavanje korozijskih parametara armature u betonu, podataka koji su lako i nerazorno mjerljivi na konstrukciji, omogućava proračun širine i vremena pojave pukotina uzrokovanih korozijom armature u armiranobetonskim konstrukcijama [48].

Osim modela za proračun pojave pukotina u betonu uslijed korozije provode se istraživanja i na razvijanju modela koji povezuje stanje korodiranosti armature i preostalu nosivost i uporabljivost betonskih konstrukcija oštećenih korozijom armature na teorijski dosljedan, praktično primjenljiv i eksperimentalno dokazan način. U okviru rada [49] provedeno je opsežno eksperimentalno istraživanje, u kojem su armiranobetonski elementi bili istodobno izloženi dugotrajnom opterećenju i kloridnoj koroziji. Programom eksperimenta predviđena su tri stupnja korozije armature nakon čijeg se približnog dostizanja pristupalo ispitivanju uzoraka greda i ploča do sloma i utvrđivanju stvarnog stanja korodiranosti armature na uzorcima korodirane armature izvađenim iz

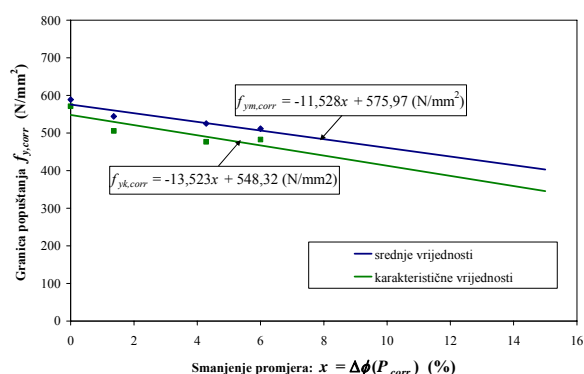
greda i ploča. Nakon analize stanja korozijskog oštećenja ispitana su mehanička svojstva uzoraka korodirane armature izvađenih iz uzoraka greda i ploča te su dobiveni dijagrami naprezanje-deformacija korodirane armature [50], a kao primjer ovdje se prikazuje samo dijagram za ploče (slika 19.).



Slika 19. Dijagrami naprezanje-deformacija (σ - ϵ) reprezentativnih uzoraka hladno obrađene armature ploča [49]

Ovim istraživanjima eksperimentalno je ustanovljena veza između dubine korozije armature, tj. smanjenja promjera armature, te nosivosti i uporabljivosti armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata [49]. Na slici 20. prikazan je dijagram odnosa proračunate dubine korozije (iz izmjerenih korozijskih parametara) i smanjenja srednje i karakteristične vrijednosti granice popuštanja armature.

Upravo ovakav pristup omogućava proračun ukupnog gubitka nosivosti i uporabljivosti armiranobetonskih elemenata uslijed korozije, kao logičan nastavak ocjene stanja pri kojem su izmjereni korozijski parametri armature u betonu [49].



Slika 20. Odnos promjene granice popuštanja armature i dubine korozije [50]

5 Zaključak

Održivi razvoj podrazumijeva sklad između ljudskih potreba i zemaljskih mogućnosti, odnosno balans pri korištenju neobnovljivih resursa, uporabe i odlaganja otpada. Kada se govori o armiranom betonu, materijalu koji zadovoljava visoke tehničke i relativno niske tehnološke zahtjeve, valja istaknuti da proizvodnja betona nema negativnih učinaka na okoliš, ali ima proizvodnja osnovnih sirovina, poglavito cementa. Slijedi da se održivost očituje u: smanjenju emisije CO_2 zamjenom dijela cementa upotrebom nusprodukata drugih industrija (zgurom, letećim pepelom, i sl.), uporabom otpada u cilju zamjene dijela neobnovljivih resursa obnovljivima, te projektiranjem i izvedbom, a potom i održavanjem konstrukcija s ciljem zadovoljenja uvjeta nosivosti, ali i trajnosti. U ovom radu je temeljem istraživanja koja se provode u Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu dokazana mogućnost udovoljavanja kriterija održivosti armiranog betona.

Zahvala

Prikazana istraživanja provedena su u sklopu znanstvenog projekta Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta „Razvoj novih materijala i sustava zaštite betonskih konstrukcija“. Autorice zahvaljuju.

LITERATURA

- [1] Mehta, P.K.: *Concrete Technology for Sustainable Development*, Concrete International, Vol.21, No. 11, pp. 47-53, 1999.
- [2] Vision 2030 & Strategic Research Agenda, *Focus Area Materials*, Version 1, European Construction Technology Platform, September, 2005.
- [3] Report I-12-141/06 Croatian cement industry and climate changes, EKONERG – Institute for energetics and environmental protection, 2007.
- [4] Rosković, R., Bjegović, D.: *Role of mineral additions in reducing CO_2 emission*, Cement and Concrete Research 35 (2005) pp. 974–978
- [5] Rosković, R.: *Doprinos optimalizaciji izbora miješanih cementa i okolišno održivoj proizvodnji betona*, Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2007.
- [6] Stipanović, I., Bjegović, D., Serdar, M.: *Durability properties of ecologically friendly concrete*, Proceedings of fib 2007 Symposium Concrete Structures – Stimulators of Development, Dubrovnik, 2007., 337-344
- [7] European Committee for Standardisation (CEN), ENV 1992-1, Design of Concrete Structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings, 2004.

- [8] Gardner, N.J.; Lockman, M.J.: *Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete*, ACI Materials Journal, V. 98, No. 2, 2001, 159 – 167
- [9] Bjegovic, D.; Mikulic, D.; Stirmer, N.: *Construction and demolition waste management system*, International Conference on Sustainability in the Cement and Concrete Industry, Lillehammer, Norway, 2007.
- [10] Kovač, R.: *Beton od recikliranog agregata*, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [11] Sironić, H.: *Primjena recikliranih agregata u proizvodnji betona*, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilište u Rijeci, 2010.
- [12] The European Slag association, 2006: Legal status of Slags – Positions paper
- [13] Netinger, I.: *Predgotovljeni armiranobetonski elementi povećane požarne otpornosti*, Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilište u Osijeku, 2010.
- [14] Tehnički propis za betonske konstrukcije, NN 139/09 i 14/10
- [15] Netinger, I.; Jelčić R. M.; Bjegović, D.: *Mogućnost primjene domaće zgure kao agregata u betonu*, GRAĐEVINAR 62 (2010), 35-43.
- [16] Netinger, I.; Bjegović, D.; Mladenović, A.: *Fire Resistance of Steel Slag Aggregates Concrete*, High temperature materials and processes. 29 (2010), 1-2; 77-87.
- [17] www.etrma.com, ETRMA - European Tyre & Rubber Manufacturers' Association
- [18] European Commission, Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1996 on the landfill of waste, Official Journal, 1999.
- [19] Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, Pravilnik o gospodarenju otpadnim gumama, Zagreb, 2006.
- [20] Bjegovic, D.; Lakusic, S.; Serdar, M.; Opačak, K.: *Properties of concrete made with recycled waste tire*. iNDiS 2009. (2009). Novi Sad.
- [21] Beus, J.: *Influence of recycled rubber as aggregate replacement on concrete properties*. Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2009.
- [22] Biliskov, H.: *Optimization of concrete with recycled rubber*, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2009.
- [23] Marasovic, I.: *Influence of recycled fibers on properties of fiber reinforced concrete*, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2009.
- [24] Bjegović, D.; Lakušić, S., & Serdar, M.: *Primjena reciklirane gume na prometnicama*, Prometnice-nove tehnologije i materijali, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za Prometnice, 2010., 7-46
- [25] Bjegović, D.; Lakušić, S.; Serdar, M., & Baričević, A.: *Properties of concrete with components from waste tyre recycling*, Concrete Structures for Challenging Times, Marianske Lazne: Czech Concrete Society (CBS) and CBS Servis, 2010., 134-140
- [26] Pezer, M.; Alibegic, M.: *Ecological concrete with waste rubber particles*, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2010.
- [27] Juric, K.; Zadro, A.: *Ecological recycled fiber reinforced concrete*. Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2010.
- [28] Petti, K.; Marinac, L.: *Concrete with waste textile fibres*, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2010.
- [29] Mehta, P.K.: *Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development* Concrete International, 2002.Vol.24, No.7, pp.23-28
- [30] <http://www.rilem.net/>
- [31] <http://fib.epfl.ch/>
- [32] <http://www.iabse.ethz.ch/>
- [33] Bjegović, D.; Mikulić, D.; Stipanović Oslaković, I.; Serdar, M.: *Performance based durability design of coastal reinforced concrete structures*, MWW & IEMES 2008 Proceedings, 2008. p. 68-69
- [34] Stipanović Oslaković, I.: *Transport klorida u betonu - mjerenja i predviđanja*, doktorska disertacija, Zagreb, Građevinski fakultet, 05.10. 2009, 213 str.
- [35] Stipanović Oslaković, I.; Bjegović, D.; Mikulić, D.; Krstić, V.: *Development of service life model CHLODIF++, Computational modelling of concrete structures*, EURO-C 2010 London, Taylor & Francis Group, 2010. p. 573-578
- [36] Šajna, A.; Legat, A.; Bjegović, D.; Kosce, T.; Stipanović Oslaković, I.; Serdar, M.; Kuhar, V.; Gartner, N.; Pardi, L.; Augustynski, L.: *Deliverable D11 Recommendations for the use of corrosion resistant reinforcement*, FP6 Project Report, ARCHES, 2009
- [37] Li, C. Q.: *Corrosion initiation of reinforcing steel in concrete under natural salt spray and service loading - Results and analysis*, ACI Materials Journal 97, 6, p. 690 – 697
- [38] Grandić, D.; Bjegović, D.; Serdar, M.: *Chloride threshold for different levels of reinforcement corrosion propagation*, Concrete Durability and Service Life Planning, Bagnaux, France: RILEM, 2009. 416-422
- [39] Serdar, M.; Bjegović, D.; Stipanović Oslaković, I.: *Corrosion resistant steel reinforcement – laboratory and field testing, Concrete under severe conditions environment and loading*, Taylor & Francis Group, London, 2010. p. 1055-1062
- [40] Fib Committee 4.3.1., 2007 Chairman Houry, G.A., *Fire Design of concrete structures: Materials, structures and modelling*, State-of-the-art report.
- [41] Bjegović, D.; Stipanović, I.; Jelčić, M.: *Fire performance of concrete composite segments used as secondary tunnel linings*, Edinburgh: School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh, 2008. p.720-726
- [42] Ožbolt, J.; Periškić, G.; Jelčić, M.; Reinhardt, H.W.: *Modelling of concrete exposed to high temperature*, Concrete Spalling due to Fire Exposure - From Real Life Experiences and Practical Applications to Lab-scale Investigations and Numerical Modelling Leipzig, 2009.p. 461-469
- [43] HRN 1128:2007 Beton - Smjernice za primjenu norme HRN EN 206-1
- [44] Torrent, R.; Luco L.F.: *Non-destructive evaluation of the cover concrete*, RILEM report, 2006
- [45] Šimunović, T.: *Ispitivanje plinopropusnosti kao dio kontrole sukladnosti betona*, završni rad - diplomski/integralni studij, Zagreb : Građevinski fakultet, 16.09. 2010, 95 str.
- [46] Bjegović, D.; Stipanović, I.; Skazlić, M.; Ferić, K.; Barbalić, I.: *Case Study- Corrosion Monitoring in Marine Environment in Croatia*, Proceedings of Eurocorr 2003, The European Corrosion Congress, Budapest, 2003. paper No.219
- [47] Rak, M.; Bjegović, D.; Kapović, Z.; Stipanović, I.; Damjanović, D.: *Durability Monitoring System on the Bridge over Krka River*, Bridges, Zagreb : SECON HDGK, 2006. p. 1137-1146
- [48] Bjegović, D.; Baričević, A.; Serdar, M.: *Analitički modeli za proračun pukotina u armiranobetonskim konstrukcijama uzrokovanih korozijom armature*, Dosežki betonske stroke, Lipica, Združenje za beton Slovenije, 2009. p. 166-176
- [49] Grandić, D.: *Proračunski postupci za ocjenu nosivosti i uporabljivosti betonskih konstrukcija oštećenih korozijom armature*, doktorska disertacija, Zagreb, Građevinski fakultet, 06.03. 2008, 421 str.
- [50] Grandić, D.; Bjegović, D.; Sorić, Z.: *Proračunski dijagram naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu*, GRAĐEVINAR 61 (2009) , 2; 157-167