

Primljen / Received: 21.1.2013.

Ispravljen / Corrected: 9.8.2013.

Prihvaćen / Accepted: 10.9.2013.

Dostupno online / Available online: 10.10.2013.

Betonski proizvodi specijalne namjene od reciklata otpadnih guma

Autori:

Dr.sc. **Marijana Serdar**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet, Zavod za materijale

mserdar@grad.hr

Ana Baričević, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet, Zavod za materijale

abaricevic@grad.hrProf.dr.sc. **Stjepan Lakušić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet, Zavod za prometnice

laki@grad.hrProf.dr.sc. **Dubravka Bjegović**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet, Zavod za materijale

dubravka@grad.hr

Izvorni znanstveni rad

[Marijana Serdar, Ana Baričević, Stjepan Lakušić, Dubravka Bjegović](#)

Betonski proizvodi specijalne namjene od reciklata otpadnih guma

U radu je prikazano kako reciklati otpadnih guma, upotrijebljeni kao sekundarne sirovine, utječu na svojstva betona. S obzirom na dobivena svojstva, na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu osmišljeni su građevni proizvodi za specijalne namjene, koji u svom sastavu sadržavaju sirovine dobivene recikliranjem guma. Svaki od navedenih inovativnih proizvoda predstavlja ekološki, funkcionalno i ekonomski konkurentnu alternativu uobičajeno korištenim proizvodima u inženjerskoj praksi.

Ključne riječi:

reciklaža, otpadne gume, barijere, apsorpcija zvuka, žilavost, mikroarmirani betoni

Original scientific paper

[Marijana Serdar, Ana Baričević, Stjepan Lakušić, Dubravka Bjegović](#)

Special purpose concrete products from waste tyre recyclates

The ways in which concrete properties are influenced by waste tyre recyclates, used as secondary raw materials, are presented in the paper. Taking advantage of these properties, several special-purpose construction products, containing raw materials obtained by tyre recycling, have been developed at the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb. Each of these innovative products represents an environment-friendly, functional and cost-effective alternative to products traditionally used in engineering practice.

Key words:

recycling, waste tyres, noise barriers, sound absorption, ductility, fiber reinforced concrete

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

[Marijana Serdar, Ana Baričević, Stjepan Lakušić, Dubravka Bjegović](#)

Betonprodukte aus rezyklierten Altreifen für spezielle Anwendungen

In der vorliegenden Arbeit ist dargestellt wie Rezyklate aus Altreifen, als sekundäre Rohstoffe angewandt, auf Betoneigenschaften einwirken. In Bezug auf die erhaltenen Eigenschaften sind an der Fakultät für Bauwesen der Universität in Zagreb Bauprodukte für spezielle Anwendungen erdacht worden, die unter anderem aus durch das Rezyklieren von Altreifen gewonnenen Rohstoffen zusammengesetzt sind. Jedes dieser innovativen Produkte stellt eine ökologisch, funktionell und ökonomisch wettbewerbsfähige Alternative zu herkömmlich in der Baupraxis angewandten Produkten dar.

Schlüsselwörter:

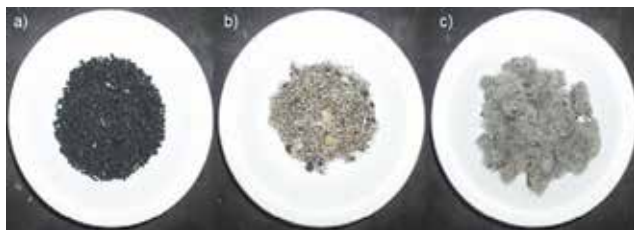
Rezyklieren, Altreifen, Barriere, Schallabsorption, Duktilität, mikroarmierter Beton

1. Uvod

Široka primjena gume u automobilskoj industriji uzrok je nakupljanja velikih količina rabljenih guma s kojima treba je nakon isteka roka trajanja pravilno postupiti. U svijetu se godišnje proizvede 1,4 milijarde guma za potrebe automobilske industrije, a samo na području zemalja članica Europske unije godišnje nastane gotovo 3,5 milijuna tona otpadnih guma [1]. Sukladno Direktivi 1999/31/EC [2], počevši od 2006. godine svako je odlaganje otpadnih guma u okoliš potpuno zabranjeno, pa je tom odlukom raspoloživa količina otpadnih guma znatno porasla. Direktivom 2008/98/EC [3] dana je hijerarhija postupanja s otpadom, prema kojoj je najpoželjnije:

- smanjiti masovnu proizvodnju novog otpada
- preraditi nastali otpad
- reciklirati ga i upotrijebiti kao sirovinu
- reciklirati u energetske svrhe te na kraju
- sigurno i ekološki prihvatljivo odlagati neiskorišteni otpad.

Noviji podaci pokazuju da se u Europi tijekom proteklog desetljeća znatno smanjila količina otpadnih guma koje se nekontrolirano odlažu, te danas iznosi samo četiri posto ukupne količine otpadnih guma. Istodobno, procjenjuje se da se na području novih članica EU i zemalja pristupnica nekontrolirano odlaže 29 % nastalih otpadnih guma (oko 450.000 t ili oko 42,5 milijuna komada). Recikliranje gume pripada djelatnosti održivog razvoja jer se od rabljenih proizvoda recikliranjem stvaraju vrijedne sirovine, koje se mogu koristiti za pripremu proizvoda s novom vrijednosti. Mehaničkom reciklažom otpadnih guma dobivaju se tri sirovine: a) gumene granule, b) čelična vlakna i c) tekstilna (slika 1.).



Slika 1. Proizvodi reciklaže otpadnih automobilskih guma: a) gumene granule, b) čelična i c) tekstilna vlakna

Trenutačno se samo pet posto recikliranih otpadnih guma koristi za potrebe u građevinarstvu premda su mogućnosti mnogo veće. Upravo je to razlog zato je trebalo osmisliti nove tehnologije kako bi se guma reciklirala i služila kao sirovina za dobivanje novih proizvoda. U zadnje vrijeme guma je pronašla svoju uporabu u industriji cementa kao zamjenski energent u proizvodnji podloga za igrališta i sportske terene te za razne obloge i pokrove. No osim toga, jedan od novijih pravaca koji se posljednjih godina istražuju jest upotreba otpadne gume i njezinih sastavnih dijelova u tehnologiji proizvodnje betona. Godišnje se u Europi proizvede više od 750 milijuna m³ betona,

što bi značilo da stanovnik Europe godišnje upotrijebi četiri tone betona [5]. Iako beton, kao gotovi materijal, sam po sebi ne šteti okolišu, proizvodnja njegovih sastojaka šteti. Za proizvodnju betona godišnje se potroši ukupno 1,5 milijarde tona cementa, 900 milijuna litara vode i 9 milijardi tona pijeska i kamena. Uzimajući u obzir zakonitost održivosti, glavni je cilj u tehnologiji betona pronaći alternativne izvore sirovina, čime bi se smanjio negativan utjecaj proizvodnje sastojaka betona na okoliš i očuvali prirodni resursi [6]. Upravo zato proizvodi dobiveni reciklažom gume predstavljaju zanimljivu sirovinu za pripremu posebnih vrsta betona specijalnih namjena.

U ovom radu prikazani su inovativni građevni proizvodi pripremljeni s različitim sirovinama dobivenim recikliranjem otpadnih guma. Svi proizvodi su razvijeni na temelju detaljnih izvornih znanstvenih istraživanja, koja su provedena na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Rezultati prikazani u radu pokazuju da su u određenim primjenama betoni pripremljeni s reciklatima dobivenim od otpadnih guma perspektivna ekonomska i ekološka alternativa klasičnim betonima.

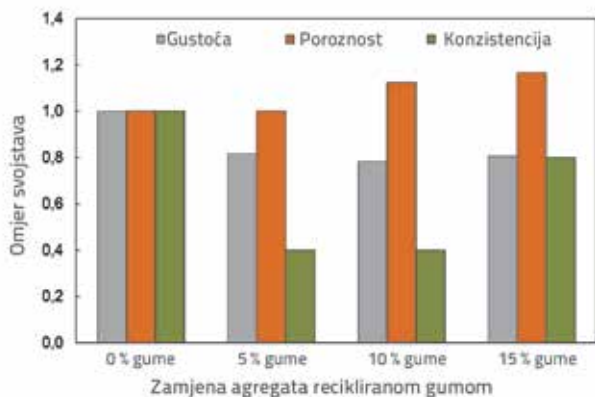
2. Primjena gumenih granulata

2.1. Utjecaj gumenih granulata na svojstva betona

Glavna obilježja koja recikliranu gumu čine atraktivnom za korištenje u građevinarstvu jesu: niska specifična težina, nizak modul elastičnosti, izolacijska svojstva i sposobnost apsorpcije nastale energije uslijed opterećenja. Upravo zbog tih svojstava osnovni pravci istraživanja upotrebe gume u betonima idu prema razvoju proizvoda kod kojih se iskorištavaju izolacijska i apsorpcijska svojstva gume [7, 8, 9], sposobnost apsorpcije energije kod betona visokih čvrstoća [10, 11] i kao zamjena za kemijske dodatke koji povećavaju otpornost na smrzavanje i odmrzavanje [4, 12].

Promjena svojstava betona s dodatkom gume u svježem stanju ovisi o veličini, udjelu i teksturi gume koja se koristi za pripremu betona. Jedna od prednosti gume kao zamjene dijela agregata odnosi se na smanjenje gustoće betonske mješavine jer je gustoća gume znatno niža od gustoće riječnog ili drobljenog agregata. Gustoća svježeg betona spravljenog od prirodnog agregata iznosi ~2400 kg/m³, dok je gustoća svježeg betona spravljenog od reciklirane gume niža i iznosi 1800 – 2100 kg/m³, što znači da gustoća betona upotrebom gume kao zamjene dijela agregata može biti smanjena za 20 do 30 %, ovisno o udjelu gume u betonskoj mješavini. Dodatno, zbog nepolarosti gume i hrapavosti njene površine, uvlači se dodatna količina zraka zato što nepolarna guma odbija vodu i privlači zrak [13]. Dodatak gume u svježoj betonskoj mješavini smanjuje i obradljivost, posebno kada se radi o većim udjelima (>30 % na ukupni volumen agregata) [14, 15]. Na dijagramu (slika 2.) vidljivo je da se dodatkom gume smanjuje gustoća betona otprilike 20 % [16]. Osim toga, povećavanjem dodatka gume vidljivo se smanjuje obradljivost svježeg betona i povećava udjel zračnih pora. Prikazani betoni pripremljeni

su u niskom vodocementnom omjeru, dodatkom silikatne prašine, superplastifikatorom te gumom koja zamjenjuje agregat volumenskim udjelima od 5 do 15 %.

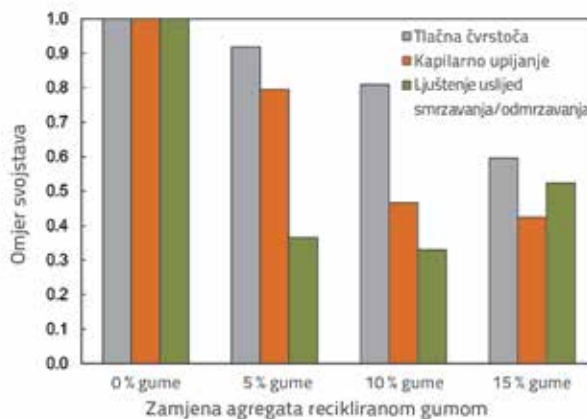


Slika 2. Utjecaj zamjene agregata recikliranom gumom na gustoću, udio zraka i konzistenciju svježeg betona

Zamjena agregata s gumom utječe na smanjenje tlačne čvrstoće i krutosti kompozita, što je i očekivano s obzirom na fizikalne i mehaničke karakteristike gume u odnosu na kameni agregat [17, 27]. Uobičajeno se uslijed tlačnih djelovanja u betonu razvijaju vlačna naprezanja koja su u slučaju kompozita s dodatkom gume lokalizirana oko samih gumenih čestica. Nastala naprezanja uzrokuju razvoj mikropukotina koje se dalje šire cementnom matricom dok ne naiđu na sljedeću gumenu česticu. Niski modul elastičnosti gume, 25 do 25 000 puta niži u odnosu na agregat, omogućava značajnu deformaciju gume u usporedbi s uobičajeno korištenim agregatom [18]. Sposobnost deformacije pri vlačnim naprezanjima bez otkazivanja utječe da se guma ponaša kao opruga u kompozitu i na taj način usporava daljnji razvoj pukotina i potpunu dezintegraciju kompozita. Kompoziti s gumom u usporedbi s običnim betonom ostvaruju duktilni lom zahvaljujući sposobnosti takvog kompozita da apsorbira znatnu količinu plastične energije i sukladno ima povećanu žilavost [17].

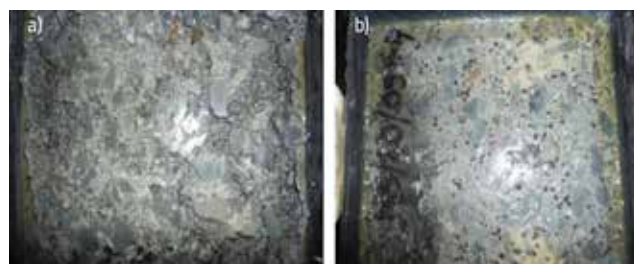
Sposobnost gume da odbija vodu, uslijed hidrofobnosti površine i posljedično uvlačenja dodatne količine zraka u mješavinu, osigurava veću količinu zatvorenih pora u strukturi kompozita koje nisu dostupne vodi [24]. Upravo stoga takvi kompoziti imaju smanjenu sposobnost upijanja vode kapilarnim putem. Apsorbirana voda, uslijed hidrofobnosti gume, svoj put pronalazi zaobilazeći gumu kako bi dalje napredovala i time se usporava proces prodiranja vode u strukturu materijala. Smanjeno kapilarno upijanje osigurava veću trajnost kompozita i smanjenu vjerojatnost korozije armature, posebice zbog prodora klorida, pa takva vrsta materijala postaje zanimljiva za upotrebu u agresivnom morskom okolišu [17]. Povećana otpornost betona na prodor klorida može se postići i povećanim udjelom gume u kompozitu [19], ali i primjenom mineralnih dodataka poput

silicijske prašine, posebno kada se radi o malim udjelima gume (5 % na ukupan volumen agregata, 0,1 – 3 mm) [20]. Unatoč smanjenom kapilarnom upijanju, prisutnost gumenih čestica utječe na povećani prodor vode pod tlakom [16]. To je posljedica lošije kvalitete sučeljka gume/cementne matrice, ali i fizikalnih karakteristika gume jer se zbog djelovanja vode pod tlakom guma "stišće" i na taj način dopušta prodor vode pod tlakom [21].



Slika 3. Utjecaj zamjene agregata recikliranom gumom na tlačnu čvrstoću, kapilarno upijanje i ljuštenje uslijed smrzavanja i odmrzavanja očvrsllog betona

Osim prethodno navedenih, jedno od osnovnih svojstava koja su bitna za primjenu betona svakako je otpornost na smrzavanje i odmrzavanje. Fizikalna svojstva gume omogućavaju da se ponaša kao amortizer nastalih unutarnjih naprezanja uslijed hidrostatičkog tlaka vode tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, što može biti pozitivno tijekom ciklusa smrzavanja kada dolazi do povećanja volumena vode pri prelasku u led [22].



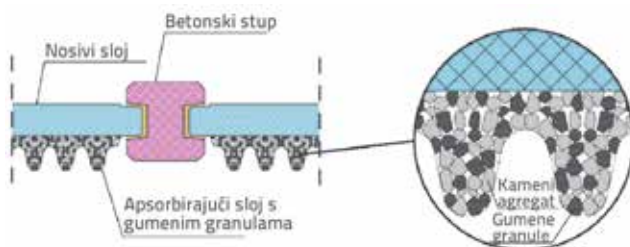
Slika 4. Struktura betona: a) bez gume; b) 10 % agregata zamijenjeno recikliranom gumom nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja uz soli za odmrzavanje [23]

2.2. Primjer inovativnoga građevnog proizvoda - barijere za zaštitu od buke

U skladu sa sadašnjim propisima i direktivama u području zaštite okoliša iznimno je važno znati tijekom projektiranja prometne infrastrukture kakva će biti zaštita od buke [25,

26]. Najčešće barijere ugrađivane duž prometnica u Hrvatskoj prije 2007. godine bile su drvene, aluminijske, odnosno od prozirnog PVC materijala i uglavnom su dolazile iz uvoza. Od 2007. do 2010. godine apsorbirajuće betonske barijere koje su u cijelosti osmišljene i proizvedene u Hrvatskoj, prateći trendove zapadnoeuropskih zemalja, prevladavaju kao zaštita od buke. Apсорbirajuće betonske barijere se na području Hrvatske najčešće proizvode uz dodatak ekspandirane gline. Prilikom proizvodnje ekspandirane gline dolazi do bespovratnog trošenja prirodnih resursa, ostavljajući pri tome ogoljen i devastiran okoliš te sama proizvodnja zahtijeva određenu količinu energije i otpušta stakleničke plinove. Osim onečišćenja okoliša, Hrvatska nema vlastitu proizvodnju ekspandirane gline, što predstavlja dodatni ekonomski problem za proizvođače barijera.

Sve su to bili nedostaci koji su potaknuli da se na Građevinskom fakultetu u Zagrebu nastave istraživanja o zaštiti od buke kako bi se dobila rješenja usklađena s održivim razvojem. Uzimajući u obzir izolacijska i apsorpcijska svojstva recikliranih guma, osmišljene su takve betonske barijere čiji je apsorpcijski sloj izveden od laganog betona s dodatkom gumenih granula dobivenih reciklažom otpadnih guma - RUCONBAR (Rubberized Concrete Noise Barriers) [28]. RUCONBAR u strukturi svojeg apsorbirajućeg sloja sadrži 40 % gumenog granulata (slika 5.), dobivenog recikliranjem otpadnih guma i kao takav predstavlja inovativno rješenje u proizvodnji barijera za zaštitu od buke te je za njega provedena patentna zaštita pri Državnom zavodu za intelektualno vlasništvo Republike Hrvatske (P20100483A).

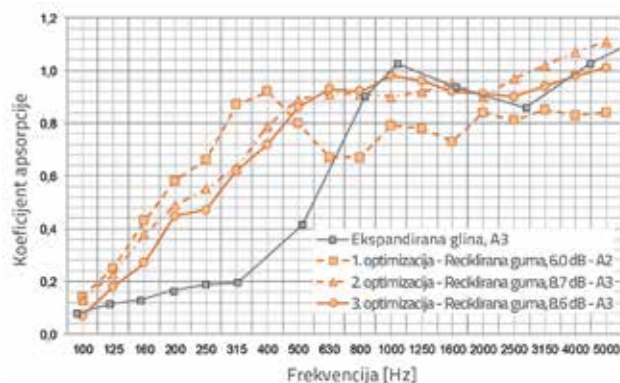


Slika 5. Poprečni presjek inovativnog rješenja RUCONBAR [28]

Najvažnija odlika opisanih barijera za zaštitu od buke jest njihovo svojstvo apsorpcije zvuka. Kako bi se usporedila sposobnost inovativnog materijala korištenog za pripremu RUCONBAR-a za apsorpciju zvuka, provedena su istraživanja na laboratorijskim uzorcima uz pomoć Kundtove cijevi, a onda su na realnim uzorcima površine 10.0 m² provedena ispitivanja u ječnoj komori (slika 6.) [29] u skladu s normama HRN EN ISO 354:2004 i HRN EN 1793-1:1999.

Na osnovi dobivenih rezultata, a u skladu s postojećim normama, barijera RUCONBAR svrstana je u razred A3 zvučne apsorpcije na temelju jednobrojne vrijednosti zvučne apsorpcije $DL\alpha = 8,7$ dB. Osim izuzetno dobrih i konkurentnih svojstava zvučne apsorpcije, barijera RUCONBAR ima poboljšana i ostala značajna svojstva poput otpornosti na

smrzavanje i odmrzavanje i vatrootpornost. Betonske barijere za zaštitu od buke s apsorbirajućim slojem od reciklirane gume prepoznate su i u Europskoj uniji. Projekt RUCONBAR sufinancira Europska unija u sklopu inicijative CIP Eko Inovacije, Izvršne agencije za konkurentnost i inovacije - EACI. Projekt RUCONBAR, sastavljen isključivo od hrvatskih partnera, oslanja se na dvije tvrtke: Gumiimpex GRP, koja je zadužena za proizvodnju gumenih reciklata, i Beton Lučko, koja je zadužena za proizvodnju barijera RUCONBAR. Partner Institut IGH zadužen je za ispitivanje zvučnih i izolacijskih svojstava barijera, ali i ostalih bitnih svojstava za osiguravanje trajnosti i nosivosti barijera RUCONBAR. Cilj projekta je razviti proizvodnu liniju pripremljenu s recikliranim gumenim granulama, gdje će se uspješno proizvoditi barijere RUCONBAR, ali i osigurati da one što prije nađu svoje mjesto na tržištu.



Slika 6. Akustička ispitivanja malih uzoraka

3. Mikroarmirani betoni s recikliranim čeličnim vlaknima

3.1. Utjecaj recikliranih vlakana na svojstva betona

Dodatak čeličnih vlakana u betonu osigurava poboljšana svojstva betona jer se povećava sposobnost apsorpcije energije. Mikroarmirani beton, s obzirom na sposobnost na vlakana da osiguraju prijenos opterećenja s oštećenoga na neoštećeni presjek, utječe na smanjenu krhkost u odnosu na obični beton [30]. Sposobnost vlakana da ograniče širenje pukotina osnovni je parametar u osiguranju produljene trajnosti i smanjenja troškova održavanja konstrukcija s obzirom na to da pojava pukotina na površini betona izloženog okolišnim opterećenjima utječe na dužinu uporabljivosti konstrukcije.

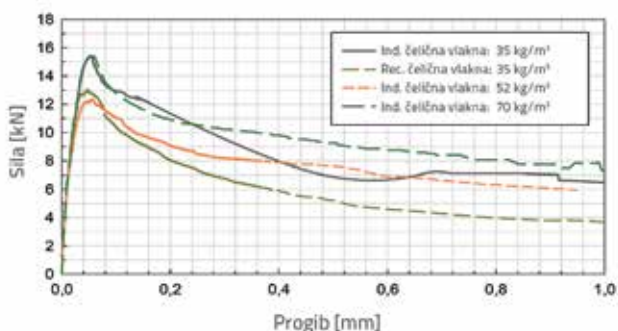
Reciklažom otpadnih guma nastaju čelična i tekstilna vlakna različitih dimenzija i kvalitete. Čelična i tekstilna vlakna dobivena reciklažom otpadnih guma danas se primjenjuju u manjoj mjeri u odnosu na recikliranu gumu. Reciklirana čelična vlakna (slika 7.) svoju primjenu u građevinarstvu mogu pronaći primjerice kao ekonomski isplativija zamjena za industrijska čelična vlakna: u predgotovljenim elementima,



Slika 7. Vrste čeličnih vlakana za pripremu mikroarmiranih betona: a) industrijska vlakna; b) reciklirana vlakna iz automobilskih guma, pročišćena; c) reciklirana vlakna iz automobilskih guma, nepročišćena

mlaznim betonima za osiguranje iskopa strmih pokosa i podzemnih radova, aerodromskim pistama, industrijskim podovima. Trenutačna potražnja za armaturom u Europi iznosi oko 12 milijuna tona godišnje [31] s time da cijena čelika zbog znatne potražnje, posebice na području Kine, neprekidno raste i zasad iznosi oko 700 eura po toni. Mikroarmirani beton trenutačno, unatoč dobrim karakteristikama, ima vrlo malo tržište jer zbog zahtjevnosti tehnologije proizvodnje vlakna znatno podižu cijenu kubičnog metra betona. Trenutačno je cijena industrijskih vlakana gotovo 10 puta veća od cijene recikliranih vlakana. Uzimajući u obzir podatke iz 2004. [31] i pretpostavljajući jednolik rast tržišta, količina recikliranih vlakana iz otpadnih guma više je nego dovoljna da zadovolji potrebe tržišta.

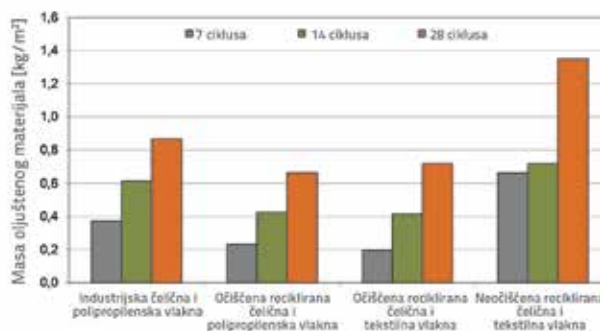
Dosadašnja istraživanja o mogućnosti primjene čeličnih vlakana iz otpadnih guma pokazuju višestruke pozitivne karakteristike primjene toga materijala [32, 33, 34]. Reciklirana vlakna predstavljaju ekonomski i ekološki opravdanu alternativu industrijskim vlaknima, posebice ako se koriste u većem udjelu i miješana s industrijskim vlaknima [39], osiguravajući ograničeno širenje pukotina, povećanu žilavost čak i u slučaju izvlačenja i razdvajanja kompozita u usporedbi s običnim betonom [38]. Upotrebom 2 % recikliranih čeličnih vlakana na ukupnu masu kompozita, postiže se znatno poboljšanje ponašanja materijala pri zamoru u usporedbi s običnim betonom [39].



Slika 8. Radni dijagram mikroarmiranih betona s različitim vrstama i količinama čeličnih vlakana pri ispitivanju žilavosti

Na dijagramu (slika 8.) prikazan je usporedno radni dijagram mikroarmiranog betona pripremljenog s industrijskim vlaknima te mikroarmiranih betona pripremljenih s istom i povećanom količinom recikliranih vlakana dobivenih recikliranjem automobilskih guma. Iz dijagrama je vidljivo da se projektiranjem mješavina s recikliranim vlaknima mogu postići jednaka svojstva kao kod mješavina pripremljenih s industrijskim vlaknima.

Osim utjecaja na žilavost, dodavanje recikliranih čeličnih vlakana u mikroarmirane betone može imati i druge pozitivne utjecaje. Preliminarna istraživanja (slika 9.) pokazala su da mješavine mikroarmiranih betona pripremljene s očišćenim čeličnim vlaknima imaju smanjeno ljuštenje prilikom djelovanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [33]. Također je pokazano da je kod takvih mikroarmiranih betona smanjen utjecaj habanja te utjecaj korozije prilikom izlaganja agresivnom morskom okolišu [35, 36].



Slika 9. Masa oljuštenog materijala prilikom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja mikroarmiranih betona s različitim vrstama vlakana

3.2. Primjer inovativnoga građevnog proizvoda – hibridni mikroarmirani betoni

Mikroarmirani betoni imaju veliku mogućnost primjene i kod niza predgotovljenih elemenata kod kojih se zahtijeva velika otpornost na savojna statička, ali i dinamička i udarna opterećenja. Jedna od takvih vrsta predgotovljenih elemenata su kolosijeci na

betonskoj podlozi [37]. Mnoga inozemna iskustva s kolosijecima na čvrstoj podlozi pokazuju da se na njihovu trajnost znatno utječe prilikom same ugradnje. Kvaliteta projektirane mješavine te način izvođenja i njegovanja znatno mogu utjecati na pojavu oštećenja tijekom uporabe. Vrlo je važno uzeti u obzir i skupljanje betona. Veće skupljanje betona može dovesti do pukotina nakon izvedbe kolosijeka (slika 10.a). Također je uočen problem pucanja ležajnih mjesta betonskih blokova dvodijelnih pragova. Takva puknuća nastaju uslijed dugotrajnih naprezanja koja se javljaju tijekom uporabe (slika 10.b). Upravo iz tog razloga javlja se potreba za betonima koji su otporni na udarna i dinamička opterećenja te znatno priječe pojavu pukotina uslijed skupljanja.



Slika 10. Degradacije na kolosijecima: a) Pukotine uslijed skupljanja betona, b) Oštećenja ležajnih mjesta tračnica, [42]

U sklopu projekta ECOTRACK – Kolosijek na betonskoj podlozi, provedena su opsežna istraživanja mogućnosti primjene recikliranih čeličnih vlakana za proizvodnju hibridnog mikroarmiranog betona, HMAB, [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48]. U suradnji s industrijskim partnerima, tvrtkama Viadukt d.d. (TBP Pojatno) i Gumiimpex-GRP d.o.o. te uz financijsku potporu agencije BICRO – Poslovno inovacijski centar RH, provedeno je istraživanje na ukupno 20 betonskih mješavina, pri čemu je ispitano 16 različitih mehaničkih i trajnosnih svojstava HMAB na ukupno više od 1200 uzoraka.

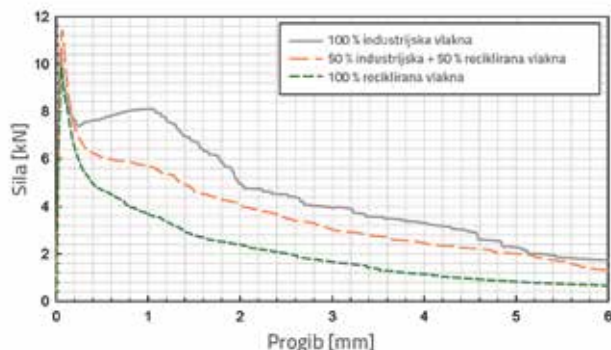


Slika 11. Konceptualni prototip Ecotrack-a [41]

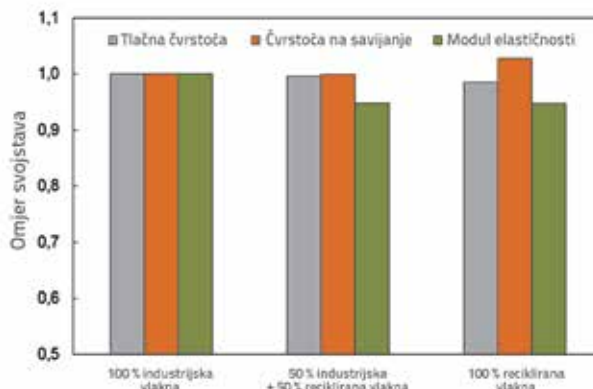
ECOTRACK je inovativni ekološki proizvod suvremenog željezničkog kolosijeka na betonskoj podlozi bez zastora (slika 11.). Proizvod se sastoji od dvodijelnih betonskih pragova ugrađenih u betonsku ploču te zajedno čine čvrstu betonsku kolosiječnu konstrukciju. Inovativnost proizvoda uključuje primjenu sastojaka reciklaže otpadnih guma u betonu dvodijelnih pragova i nosive betonske podloge kao zamjene dijela prirodnih sirovina.

Analizom ponašanja kompozita s recikliranim vlaknima tijekom zamora potvrđeno je da se pri opterećenju industrijska i reciklirana vlakna aktiviraju u različitim fazama; industrijska vlakna aktivno sudjeluju u premošćivanju makropukotina, a učinkovitost recikliranih vlakana znatno je veća kod mikropukotina i mezopukotina [40]. Uzimajući u obzir osnovne postulata projektiranja hibridnih mikroarmiranih betona, ali i rezultate istraživanja, nameće se logičnim zaključiti da bi kombinacija dviju vrsta vlakana – industrijskih i recikliranih – bila idealna za ojačanje krutih kompozita. U tom bi slučaju reciklirana vlakna sprječavala napredovanje mikropukotina u mezopukotine, te bi istodobno uz industrijska vlakna doprinijela sprječavanju napredovanja mezopukotina u makropukotine. U slučaju kad se i ako se pojave makropukotine, prijenos opterećenja s oštećena na neoštećeni presjek osigurala bi industrijska vlakna.

Variranjem udjela recikliranih čeličnih vlakana (0 %, 50 % i 100 %) bez promjene ukupne količine vlakana (30 kg/m³) u betonu omogućena je kvantifikacija doprinosa pojedine vrste vlakana svojstvima betona. Nepravilan oblik i dimenzije recikliranih vlakana utječu na manju sposobnost apsorpcije energije, ali je istodobno zamijećena sinergija dviju vrsta vlakana gdje hibridni kompoziti pokazuju izrazito poboljšano ponašanje poslije prve pukotine u odnosu na kompozit s isključivo recikliranim vlaknima (slika 12.).



Slika 12. Utjecaj udjela recikliranih čeličnih vlakana na ponašanje betona pri savojnom opterećenju



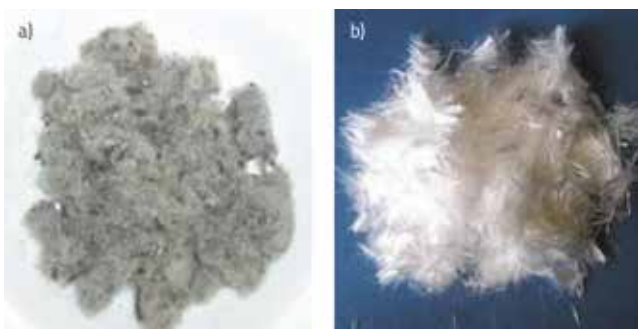
Slika 13. Utjecaj udjela recikliranih čeličnih vlakana na svojstvo tlačne i vlačne čvrstoće te modula elastičnosti

Sobzirom na to da zamjena industrijskih vlakana s reciklirana ne utječe negativno na ostala mehanička svojstva mikroarmiranih betona, poput tlačne i vlačne čvrstoće i modula elastičnosti (slika 13.), a poboljšava postpukotinsko ponašanje betona, smatra se da u odgovarajućem udjelu reciklirana vlakna mogu biti adekvatna primjerena industrijski proizvedenim vlaknima.

4. Tekstilna vlakna

4.1. Utjecaj recikliranih tekstilnih vlakana na svojstva betona

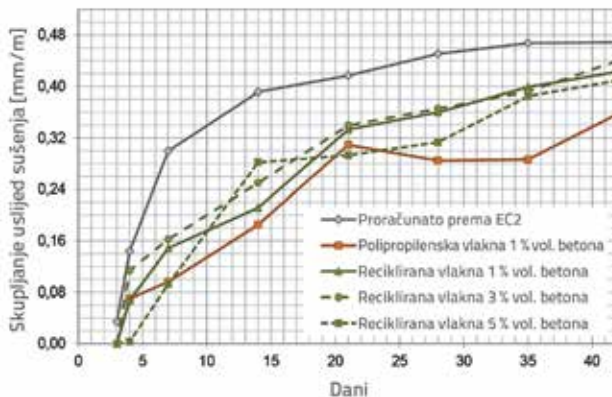
Zadnji produkt reciklaže otpadnih guma su tekstilna vlakna (slika 14.a). Ova vlakna do sada nisu pronašla upotrebu u građevinarstvu. U betonu se često koriste polipropilenska vlakna (slika 14.b), kako bi se spriječila pojava mikropukotina uslijed autogenog i skupljanja uslijed sušenja. Budući da su tekstilna vlakna dobivena reciklažom otpadnih guma sličnih dimenzija kao i polipropilenska vlakna, došlo se do spoznaje o zamjeni industrijskih vlakana vlaknima dobivenim reciklažom otpadnih guma.



Slika 14. Vrste polimernih vlakana: a) reciklirana tekstilna vlakna iz automobilskih guma, b) industrijska polipropilenska vlakna

Preliminarna istraživanja pokazuju da reciklirana tekstilna vlakna imaju sličan utjecaj na smanjenje skupljanja uslijed sušenja kao industrijska polipropilenska vlakna (slika 15.) [48]. Usporedi li se povećanje deformacije uslijed sušenja betona s vrijednostima za isti beton bez vlakana proračunanim prema Eurokodu 2, vidljivo

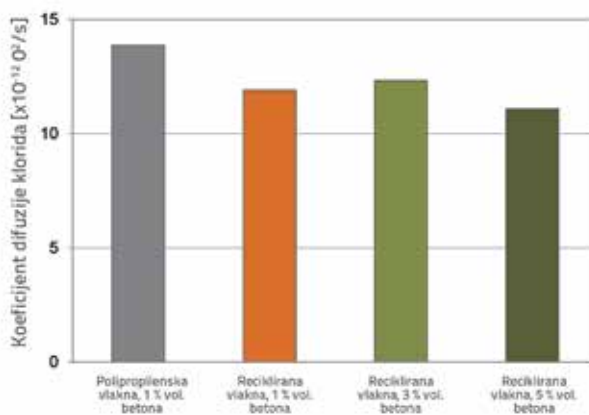
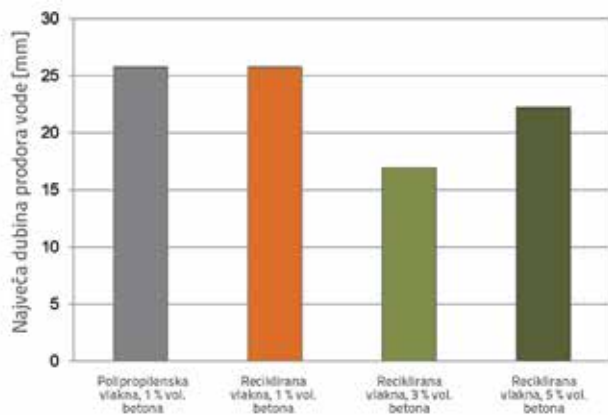
je smanjeno skupljanje u prvim danima očvršćavanja matrice betona. Upravo u tim prvim danima presudno je njegovanje i najčešće dolazi do pojave mikropukotina. Primjenom takvih recikliranih vlakana vidljivo se smanjuje skupljanje betona, a samim time se očekuje i smanjen rizik pojave pukotina zbog nepravilnog ili nedovoljnog njegovanja.



Slika 15. Skupljanje uslijed sušenja proračunano prema Eurokodu 2 za običan beton te izmjereno za isti beton pripremljen s različitim volumenskim udjelima tekstilnih vlakana

Osim smanjenja skupljanja uslijed sušenja, reciklirana tekstilna vlakna imaju dodatne pozitivne utjecaje na trajnosna svojstva betona. Istraživanja provedena na Građevinskom fakultetu pokazuju da betoni pripremljeni s recikliranim polimernim vlaknima imaju povećanu otpornost na prodor klorida te smanjeni prodor vode (slika 16.) [48].

Ovakvi rezultati dokaz su mogućnosti upotrebe recikliranih tekstilnih vlakana dobivenih iz otpadnih automobilskih guma za pripremu betona. Posebno zanimljiva upotreba može biti u pripremi sanacijskih mortova, kod kojih je od presudne važnosti spriječiti pojavu mikropukotina i prodor agresivnih tvari, a sve kako bi se osigurala projektirana i zahtijevana trajnost postojećih građevina. Daljnja istraživanja, osim što će se baviti upotrebom, bit će na to da se takva vrsta betona primijeni u industriji predgotovljenih elemenata.



Slika 16. Prodor vode pod tlakom i koeficijent prodora klorida za beton pripremljen s različitim volumenskim udjelima tekstilnih vlakana

5. Zaključak

Prilikom recikliranja otpadnih guma dobivaju se tri vrste materijala: gumeni granulati, čelična vlakna i polimerna vlakna. U radu je prikazano kako svaki od tih materijala, upotrijebljen kao sekundarna sirovina, utječe na svojstva betona. S obzirom na dobivena svojstva, na Građevinskom fakultetu u Zagrebu osmišljeni su građevni proizvodi za specijalne namjene, koji u svom sastavu sadržavaju sirovine dobivene recikliranjem guma te iskorištavaju specifična svojstva dodanih sekundarnih sirovina kako bi osigurali dodatne vrijednosti građevnih proizvoda.

Gumene granule smanjuju tlačnu čvrstoću betona, ali ujedno povećavaju otpornost prema smrzavanju i odmrzavanju te imaju sposobnost apsorpcije zvuka. Upravo se na spoznaji o tim svojstvima temeljila priprema zvučne barijere RUCONBAR. S druge strane, dodavanje recikliranih čeličnih vlakana povećava duktilnost betona te sprječava širenje pukotina. Prepoznatljivost svrhe tih svojstava bilo je polazište za pripremu inovativnog hibridnog mikroarmiranog betona izuzetnih ekoloških i ekonomskih prednosti. Dodavanje tekstilnih vlakana smanjuje deformacije uslijed skupljanja te pozitivno utječe na trajnosna svojstva betona, pa takva vlakna postaju svrhovita sirovina za pripremu mortova.

Svaki od navedenih inovativnih proizvoda, zbog svojih karakteristika, predstavlja ekološki, funkcionalno i ekonomski

konkurentnu alternativu uobičajeno korištenim proizvodima u inženjerskoj praksi. Većinu od prikazanih proizvoda prepoznale su hrvatske i međunarodne institucije zadužene za poticanje inovativnosti i održivosti u svim industrijama, čime je omogućena primjena tih proizvoda izvan laboratorijskih uvjeta i znanstvene zajednice.

Zahvala

Istraživanja prikazana u ovom radu provedena su u sklopu dva nacionalna znanstvena projekta koja je financiralo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta (pod oznakom 082-0822161-2159 i 082-0000000-2185). Projekt "Rubberized Concrete Noise Barriers", RUCONBAR ECO/10/277317 financirala je Europska komisija, u sklopu inicijative CIP Eko Inovacije, Izvršne agencije za konkurentnost I inovacije – EACI. Projekt ECOTRACK financirala je agencija BICRO u sklopu inicijative Proof of Innovative Concept. Autori zahvaljuju svim sudionicima u navedenim projektima bez kojih prikazana znanstvena istraživanja ne bi doživjela svoju primjenu. Posebnu zahvalu autori žele iskazati tvrtkama koje kontinuirano podržavaju istraživanje u ovom području: Viadukt d.d (TBP Pojatno), Gumiimpex – GRP d.o.o., Beton Lučkod.o.o. i Holcim Hrvatska.

LITERATURA

- [1] ETRMA – European tyre and rubber manufacturers association, "End of life tyres - A valuable resource with growing potential", 2010.
- [2] Council of the European Union, "Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the land fill of waste," 1999.
- [3] Council of the European Union, "Council Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive).
- [4] Bjegović, D., Lakušić, S., Serdar, M., Baričević, A.: Properties of concrete with components from waste tyre recycling, 6th Central European Congress on Concrete Engineering Marianske Lazne, Czech Republic, 30th September - 09th October 2010., pp.134-140.
- [5] Mehta, P.K.: Concrete Technology for Sustainable Development, *ConcreteInternational*(1999), Vol.21, No. 11, pp. 47-53.
- [6] Bjegović, D., Serdar, M., Jelčić Rukavina, M., Baričević, A.: Istraživanja kriterija održivosti armiranog betona. *GRAĐEVINAR* (2010) 62, 10; pp. 931-940.
- [7] Lakušić, S., Bjegović, D., Baričević, A., Haladin, I., Serdar, M.: Apsorpcijska svojstva laganog betona s recikliranom gumom – RUCONBAR, Međunarodni simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, Tara, Srbija, 19-21 October 2011, pp. 73-80.
- [8] Lakušić, S., Bjegović, D., Serdar, M., Baričević, A.: ECOBAR – betonske barijere za zaštitu od buke – inovativno rješenje, Ekološki problemi prometnog razvoja, Zagreb, pp. 123-131, 2011.
- [9] Biliškov, H.: Optimizacija betona s recikliranom gumom / diplomski rad. Zagreb, Građevinski fakultet, 03.12. 2009, 120 str. (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelj: Serdar, M.)
- [10] Bjegovic, D., Baricevic, A., Lakusic, S.: Rubberized hybrid fibre reinforced concrete, International Conference Microstructural - related Durability of Cementitious Composites, RILEM Proceedings PRO 83. Amsterdam: Rilem Publications s.a.r.l., 2012.
- [11] Bjegovic, D., Baricevic, A., Lakusic, S.: Innovative low cost fiber-reinforced concrete. Part I: Mechanical and durability properties, 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, CRC Press/Balkema, 2012.
- [12] Lakušić, S., Bjegović, D., Serdar, M.: Primjena reciklirane gume na prometnicama, Prometnice - nove tehnologije i materijali, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, 2010., str. 7-46.
- [13] Siddique, R., Naik, T.R.: Properties of concrete containing scrap-tyre rubber - an overview, *Waste management* (2004), vol. 24, no. 6, pp. 563-569.
- [14] Nehdi M., Khan, A.: Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber: An Overview of Engineering Properties and Potential Applications, *Cement, concrete and aggregates* (2001), vol. 23, no. 1, pp. 3-10.
- [15] Cairns, R., Kew, H.Y., Kenny, M.J.: The Use of Recycled Rubber Tyres in Concrete Construction, Final Report, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 2004

- [16] Pezer, M., Alibegić, M.: Ekološki beton s recikliranom gumom, Dekanova nagrada, Zagreb, Građevinski fakultet, 2010. (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelji: Baričević, A.)
- [17] Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Roucoult, J., Queneudec, M.: Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. *Cement and Concrete Composites* (2007), 29(10), pp. 732–740.
- [18] Khorami, M., Ganjian, E., Vafaii, A.: Mechanical Properties of Concrete with Waste Tire Rubbers as Coarse Aggregates., *Proceeding of Special sections on International conference on Sustainable Construction Materials and Technologies* (pp. 85–90). Coventry University, 2007.
- [19] Oikonomou, N., Mavridou, S.: Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires. *Cement and Concrete Composites* (2009), 31(6), pp. 403–407.
- [20] Gesoğlu, M., Güneyisi, E.: Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume. *Materials and Structures* (2007), 40(9), pp. 953–964.
- [21] Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A.: Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials* (2009), 23(5), pp. 1828–1836.
- [22] Skripkiūnas, G., Grinys, A., Janavičius, E.: (2010). Porosity and Durability of Rubberized Concrete. <http://www.claissse.info/2010%20papers/m55.pdf>
- [23] Beus, J.: Utjecaj reciklirane gume kao zamjene agregatu na svojstva betona / diplomski rad. Zagreb : Građevinski fakultet, 03.12. 2009, 80 str. (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelj: Serdar, M.)
- [24] Čović, M.: Optimalizacija svojstava morta s različitim udjelima reciklirane gume / završni rad - preddiplomski studij. Zagreb, Građevinski fakultet, 11.09. 2012, 61 str. (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelj: Baričević, A.)
- [25] Lakušić, S., Dragčević, V., Rukavina, T.: Mjere za smanjenje buke od prometa u urbanim sredinama. *GRAĐEVINAR* 57 (2005), 1; pp. 1–9
- [26] Lakušić, S., Dragčević, V., Rukavina, T.: Pregled europske regulative o buci od cestovnog prometa, *GRAĐEVINAR* 55 (2003), 6; pp. 349–356
- [27] Bjegović, D., Baričević, A., Serdar, M.: Durability properties of concrete with recycled waste tyres, 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components Porto, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2011. pp. 1659–1667
- [28] EU Projekt "Rubberized Concrete Noise Barriers", RUCONBAR ECO/10/277317, www.ruconbar.com
- [29] Kušević, I., Franolić, Z.: "Apsorbirajućii betonski paneli – Usporedba ispitivanja zvučne apsorpcije", Institut građevinarstva Hrvatske (IGH), Zagreb, 2010.
- [30] Seferović, E.: Primjena čeličnih vlakana u primarnoj podgradi tunela, *GRAĐEVINAR* 54 (2002) 8; pp. 473–478
- [31] Pilakoutas, K., Neocleous, K., Tlemat, H.: Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement. *Proceedings of the ICE: Engineering Sustainability* (2004), 157(3), 131–138.
- [32] Neocleous, K., Angelakopoulos, H., Pilakoutas, K., Guadagnini, M.: Fibre - reinforced roller-compacted concrete transport pavements. *Proceeding of the ICE – Transport* (2011), 164(2), 97–109.
- [33] Marasović, I.: Utjecaj mikroarmiranja recikliranim vlaknima na svojstva betona / diplomski rad. Zagreb : Građevinski fakultet, 03.12.2009, 120 str. (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelj: Serdar, M.)
- [34] Zadro, A., Jurić, K.: Ekološki reciklirani mikroarmirani betoni, Dekanova nagrada, Zagreb, Građevinski fakultet, 2010. (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelji: Serdar, M., Baričević, A.)
- [35] Mokos, I.: Procjena trajnosti mikroarmiranih betona u morskom okolišu primjenom potencijostatske anodne polarizacije / završni rad - diplomski/integralni studij. Zagreb : Građevinski fakultet, 14.02.2013, 87 str. (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelj: Baričević, A.)
- [36] Kovačević, J.: Promjena svojstava recikliranog hibridnog mikroarmiranog betona uslijed izloženosti agresivnom okolišu / završni rad - diplomski/integralni studij. Zagreb, Građevinski fakultet, 14.02.2013, 68 str. (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelj: Baričević, A.)
- [37] Lakušić, S., Vajdić, M.: Pregled suvremenih kolosiječnih konstrukcija na čvrstim podlogama. *GRAĐEVINAR* 63 (2011) ; pp. 125–134
- [38] Tlemat, H., Pilakoutas, K., Neocleous, K.: Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres. *Materials and Structures* (2006), 39, 365–377.
- [39] Achilleos, C., Hadjimitsis, D., Neocleous, K., Pilakoutas, K., Neophytou, P.O., Kallis, S.: Proportioning of Steel Fibre Reinforced Concrete Mixes for Pavement Construction and Their Impact on Environment and Cost. *Sustainability* (2011), 3(7), 965–983.
- [40] Graeff, A.G., Pilakoutas, K., Neocleous, K., Peres, M.V.N.: Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres, *Engineering Structures* (2012), vol. 45, pp. 385–395.
- [41] Lakušić, S., Bjegović, D., Baričević, A., Haladin, I.: Betoni visokih uporabnih svojstava kod kolosijeka za velike brzine. Međunarodni simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, Tara, Srbija, 19-21 October 2011, pp. 81–88.
- [42] Bjegovic, D., Baricevic, A., Lakusic, S.: Mechanical properties of high strength concrete with recycled steel fibres from waste tyres. 8th RILEM International symposium on fibre reinforced concrete: Challenges and Opportunities (BEFIB 2012). Guimarães, Portugal, 2012.
- [43] Lakušić, S., Baričević, A., Damjanović, D., Duvnjak, I., Haladin, I.: Kolosijek na betonskoj podlozi – ECOTRACK, Građenje prometne infrastrukture (ur. Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, 2012, pp. 7–49.
- [44] Lakušić, S., Bjegović, D., Baričević, A., Haladin, I.: Innovative materials for sustainable railway tracks, 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure, Dubrovnik, 7-9 May 2012, pp. 675–682
- [45] Bjegović, D., Baričević, A., Lakušić, S., Damjanović, D., Duvnjak, I.: Positive interaction of industrial and recycled steel fibres in fibre reinforced concrete. *Journal of Civil Engineering and Management* (2012). (prihvaćen za objavljivanje).
- [46] Pezer, M.: Mehanička svojstva betona mikroarmiranih recikliranim čeličnim vlaknima / završni rad - diplomski/integralni studij. Zagreb: Građevinski fakultet, 23.02. 2012, 91 str. (voditelj: Štirmir, N., neposredni voditelj: Baričević, A.)
- [47] Jurić, K.: Upotreba recikliranih čeličnih vlakana za proizvodnju mikroarmiranih betona / završni rad - preddiplomski studij. Zagreb, Građevinski fakultet, 13.09. 2011, 71 str. (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelj: Baričević, A.)
- [48] Petti, K., Marinac, L.: Betoni s otpadnim tekstilnim vlaknima, Dekanova nagrada, Zagreb, Građevinski fakultet, 2010., (voditelj: Bjegović, D., neposredni voditelj: Baričević, A.)