

TALPA HOUSE

PRVÁ APLIKÁCIA BETÓNU S RECYKLOVANÝM KAMENIVOM NA SLOVENSKU

Ivan Hollý, Martin Pribila, Martin-Tchingnabé Palou, Adrián Ondák, Jaroslav Prokop

Jednou z možností, ako šetriť pri výstavbe niektorých konštrukcií prírodné zdroje, je náhrada prírodného kameniva do betónu určitým podielom recyklovaného materiálu. Článok sa v prvej časti zaoberá recyklovaným kamenivom a jeho možnosťami využitia do betónu, pričom poukazuje na odlišnosti od konštrukčného betónu iba s prírodným kamenivom. V druhej časti je predstavená praktická aplikácia recyklovaného betónu v nosných konštrukciách rodinných domov, ktoré sú pravdepodobne prvé konštrukcie zhotovené z tohto materiálu na Slovensku.

TALPA HOUSE: FIRST APPLICATION OF CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATE IN SLOVAKIA

One of the ways to save natural resources during the construction of some constructions is to replace natural aggregate in concrete with a certain proportion of recycled material. In the first part, the article deals with recycled aggregate and its possibilities of use in concrete, while pointing out the differences from structural concrete with only natural aggregate. In the second part, the practical application of recycled aggregate concrete in load-bearing structures of family houses is presented, which are probably the first structures made from this material in Slovakia.



1 Vizualizácia Talpa House navrhnutého z RAC (Ing. arch. Miroslav Kováč a jeho tím)
1 Visualization of the Talpa House designed from RAC (Ing. arch. Miroslav Kováč and his team)

Betón je najpoužívateľnejším stavebným materiálom na svete, ktorý však čelí najťažšej výzve od svojho objavenia. Tá spočíva v jeho udržateľnosti pre ďalšie generácie. S postupom času začína byť čoraz väčší deficit po neobnoviteľných zdrojoch, s čím súvisí prechod z lineárneho na obehové (cirkulárne) hospodárstvo. Jednou z možných a v súčasnej chvíli skúmaných ciest, ktorá sa týka jednotiek percent objemu výroby betónu, je náhrada časti prírodného kameniva (NA – natural aggregate) recyklovaným betónovým kamenivom. Recyklovaný betón (RAC – recycled aggregate concrete alebo RC – recycled concrete) je spoločné pomenovanie pre betóny, ktoré využívajú recyklované kamenivo (RA – recycled

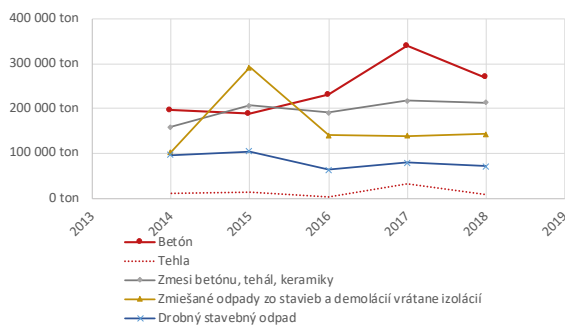
aggregate) vyrobené čiastočným alebo úplným drvením odpadového betónu a jeho následným triedením. Využitie recyklovaných kamenív je možné v niektorých inžinierskych konštrukciách, pozemných stavbách, ako aj v prefabrikácii. Niektoré krajiny Európy túto metódu výroby „zeleného betónu“ využívajú už niekoľko rokov.

Možnosti využitia RAC pri výstavbe nových budov v zahraničí demonštrujú napr. bytový dom Upcycle Studios v Kodani, Kunsthaus Zürich, Hanil Visitors Center & Guest House v Južnej Kórei či projekt znovuvybudovania vojnovou zničeného mesta Aleppo v Sýrii. V Českej republike bol betón s recyklovaným kamenivom použitý napr. pri výstavbe Obytného súboru Čertův vršek

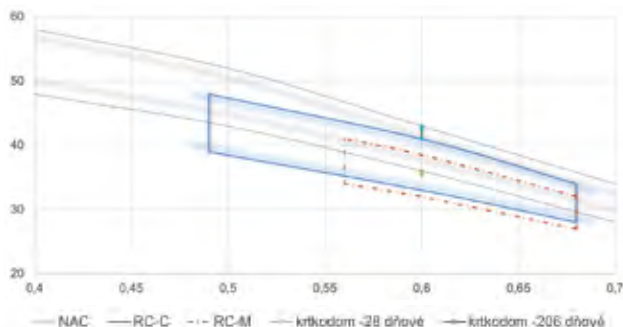
(rezidencia bola prezentovaná v Betóne 2/2023). Na Slovensku žiaľ ešte ani v dnešnej dobe nepoužívame tento materiál pre návrh nosných konštrukcií budov, ojedinele sa použije napr. na podkladové betóny. Pred slovenskými výrobcami betónu a zhotoviteľmi stavieb preto stojí výzva a možnosť ďaleko vyššieho využitia recyklovaného betónového kameniva v praxi. Jeho aplikácia je samozrejme výzvou aj pre oblasť vývoja a výskumu, pričom skúmanie vlastností recyklovaného betónu vo svete prebieha už niekoľko rokov. Dostupné výskumy sa však väčšinou zaoberajú mechanickými vlastnosťami a teda krátkodobými parametrami nosných konštrukcií z recyklovaného betónu.

Stavebný odpad

Dôsledkom demolácie starých objektov vzniká stavebný odpad (C&D waste – construction and demolition waste), ktorý častokrát nemá opätovné využitie. Na Slovensku bola v roku 2018 celková produkcia všetkých stavebných odpadov (vrátane výkopovej zemin, kovov, plastov atď.) zhruba 4 mil. t, z toho minerálny C&D odpad tvorí takmer 22 % [1]. Po odpočítaní výkopovej zemin a kameniva predstavuje produkcia betónu vzhľadom na množstvo C&D odpadov zhruba 18,5 % (obr. 2). Betónové konštrukcie sa vyznačujú dlhou životnosťou a trvanlivosťou. Aj napriek tomu je potrebné ich niekedy odstrániť z dôvodu straty funkčnosti, za účelom



2



3

2 Produkcia minerálneho C&D odpadu na Slovensku [1] **3** Pevnosť betónu vzhľadom na použitý vodný súčiniteľ a typ kameniva: NAC – betón s prírodným kamenivom, RC-C – betón s recyklovaným betónovým kamenivom, RC-M – betón s recyklovaným tehlovým kamenivom [13], [14] a hodnoty z pilotnej konštrukcie Talpa House **2** Production of mineral C&D waste in Slovakia [1] **3** Strength of concrete with regard to the used water coefficient and type of aggregate: NAC – concrete with natural aggregate, RC-C – concrete with recycled concrete aggregate, RC-M – concrete with recycled brick aggregate [13], [14] and values from the Talpa House pilot structure

uvolnenia miesta stavbám s novým využitím alebo z dôvodu nadmerných porúch, ktoré nie je možné sanovať, príp. je sanácia príliš nákladná. Hodnotenie životného cyklu stavby (LCA – life cycle assessment) počíta s uhlíkovou stopou celej stavby. Výroba cementu sa na celkovej produkcii CO₂ na zemi podieľa približne 8 % a využitím recyklovaných materiálov je možné CO₂ stopu stavebnej výroby výrazne znížiť.

Kamenivo používané na výrobu betónu tvorí asi 60 až 70 % z celkového objemu vyťaženeho kameniva. Zvyšok je použitý v iných odvetviach priemyslu. Je treba si uvedomiť, že prírodné zdroje na výrobu plnív do betónov sú obmedzené a otváranie nových dobývacích lokalít je náročné. Pritom súčasná dynamika výstavby si vyžaduje neustále zvyšujúci dopyt po prírodných materiáloch na výrobu betónu. Z tohto dôvodu môže byť použitie recyklovaného kameniva v betóne, aj keď iba v časti konštrukcie alebo určitom množstve, vhodnou náhradou prírodného kameniva. Recyklované kamenivo musí byť v procese výroby podľa potreby drvené, triedené a čistené od prípadných znečisťujúcich látok, ktoré by výrazne znehodnocovali jeho opätovné použitie.

Limity použitia betónu s recyklovaným kamenivom sú napr. pri mostných konštrukciách (vyššia pórovitosť betónu s RA a tým menšia trvanlivosť) alebo pri predpätých konštrukciách (nižšie pevnostné triedy a nižší modul pružnosti oproti NAC). Určité problémy, ktoré sú s využitím alternatívnych stavebných materiálov spojené, je ale treba chápať ako výzvu pre ďalší experimentálny výskum.

Použitie RAC v nosných konštrukciách

Pevnosť v tlaku

Možnosť aplikácie RAC v nosných konštrukciách je podmienená zárukou jeho fyzikálnych a mechanických vlastností. Podobne ako pri betóne vyrábanom z prírodného kameniva, aj v betóne vyrábanom z recyklovaného betónového kameniva je jedným z najdôležitejších parametrov jeho pevnosť v tlaku. Mnoho dostupných štúdií preukazuje pri použití podobných receptúr pokles v pevnosti recyklovaného betónu oproti normálnemu betónu [2], [3], [4]. Zaručiť pevnosť v tlaku betónu vyrábaného zo 100 % náhradou hrubým RA (frakcia 4–16 mm) nepredstavuje v praxi taký vážny problém. Výsledná pevnosť v tlaku RAC bude závisieť predovšetkým od pevnostnej triedy RA, množstva nahradzaného prírodného kameniva recyklovaným kamenivom, veľkosti zrn RA, množstva, druhu použitého cementu a taktiež použitého vodného súčiniteľa w/c .

Z hľadiska zabezpečenia trvanlivosti konštrukcie je pri betónoch s RA významným parametrom jeho pórovitosť. S narastajúcim podielom náhrady RA v betóne sa zvyšuje aj jeho pórovitosť, čo vedie k poklesu jeho odolnosti voči karbonatácii [5].

Na obr. 3 sú zobrazené intervaly pevnosti betónov pre rôzne typy použitého kameniva – betón s prírodným kamenivom, betón s recyklovaným betónovým kamenivom, resp. betón s recyklovaným tehlovým kamenivom – v závislosti od použitého vodného súčiniteľa. Grafy sú navyše doplnené o výsledky kontrol-

ných skúšok pevnosti betónov z pilotného projektu Talpa House, pri ktorom bol použitý betón s 55 % náhradou hrubého riečneho kameniva betónovým recyklátom (frakcia 4–16 mm). Kontrolné skúšky boli robené v čase odstojkovania konštrukcie (28 dní) a v čase nástupu zaťaženia od zemného násypu (206 dní).

Modul pružnosti

Modul pružnosti je definovaný ako pretvorenie betónu vplyvom jednorozovového krátkodobého zaťaženia. Určovaný je na hranoloch so základňou 100 mm a výškou 400 mm. Norma prEN 1992-1-1 [15] definuje výpočet modulu pružnosti pre RAC ako:

$$E_{cm} = \eta_{ERA} \cdot f_{cm}^{1,3}, \quad (1)$$

kde η_{ERA} je konverzný súčiniteľ pre modul pružnosti $\eta_{ERA} = k_E \cdot (1 - 0,25 \cdot \alpha_{RA})$, k_E opravný koeficient pre modul pružnosti betónu vzhľadom na typ použitého kameniva a α_{RA} množstvo zamieňaného

Tab. 1 Pokles pevnosti RAC v závislosti od nahradzovaných frakcií

Tab. 1 Decrease in strength of RAC depending on the replaced fractions

Autor	fr < 4	fr > 4	Pokles pevnosti f_c [%]
Wainwright et al. [6]	RA	RA	20
Dillmann [7], Wesche and Schulz [8], [9]	NA	RA	10 až 25
Beckerová [10]	NA/RA	NA/RA	25
Fraaij et al. [11]	NA	RA	10
Gómez-Soberón [12]	RA	RA	10

RA ku NA (α_{RA} = množstvo RA / množstvo NA).

Vo všeobecnosti platí, že modul pružnosti podlieha väčšiemu rozptylu ako pevnosť v tlaku, bez ohľadu na to, či bol betón vyrobený z prírodného alebo recyklovaného kameniva. Rozptyl $\pm 10\ 000$ MPa je pri betóne s prírodným kamenivom bežný. V prípade betónu s recyklovaným kamenivom sa modul pružnosti môže líšiť ešte viac v závislosti od použitého recyklovaného kameniva [16].

Talpa House

Talpa House je označenie nového projektu rodinných domov, pri výstavbe ktorých je použitý betón s recyklovaným kamenivom a ktoré zároveň využívajú hmotu zeme na sezónnu akumuláciu tepla. Tento typ konštrukcie je vystavený vysokým zaťaženiám a vyžaduje si dlhodobu bezpečnosť, z vnútra opraviteľnú hydroizoláciu. Tieto stavby v zemi majú úroveň základovej škáry, meranej od hornej hrany zásypu, v hĺbke 3,85 m pre jednopodlažný objekt, resp. 6,65 m pre dvojpodlažnú stavbu. Stropné dosky sú zasypané výkopovou zemínou hrúbky 500 mm, pričom sa uvažuje aj s pojazdom traktora. Využitie pôvodnej zeminu z výkopu je základom šetrenia nákladov na dopravu aj vykurovanie, resp. chladenie a ekologického prístupu k návrhu stavieb. Vo vnútri objektov sú často použité hlinené omietky, drevené podlahy aj veľké okná s výškou až 6 m. Kontro-

la priehybu stropnej dosky je tu veľmi dôležitá, súvisia s tým aj požiadavky na dosiahnuté moduly pružnosti betónu. Vizualizácia domu je uvedená na obr. 1, v súčasnosti sú vo výstavbe domy pri Trnave a v Rohožníku.

Nosný systém objektov je navrhnutý ako dosko-stenová konštrukcia. Objekty sú založené na základovej doske hrúbky 250 mm. Zvislé obvodové nosné konštrukcie v styku so zemínou sú navrhnuté zo železobetónu C25/30 - RC - C₅₅ - XC1(SK) - Cl 0,2 - D_{max} 16 mm - S3 hrúbky 200 mm, resp. 300 mm. Stropné konštrukcie na bočných stranách objektov na kóte +3,100 sú navrhnuté ako železobetónová monolitická doska hrúbky 280 mm z betónu C25/30 - RC - C₅₅ - XC1(SK) - Cl 0,2 - D_{max} 16 mm - S3. Betóny s recyklovaným kamenivom, ktoré boli použité pri výstavbe, dodávala spoločnosť Alas Slovakia a pochádzali z betonárne Vysoká pri Morave. Priemerná hodnota objemovej hmotnosti betónu, meraná na kockách v čase 28 a 206 dní, bola $2\ 222\ \text{kg/m}^3 \pm 10,2\ \text{kg/m}^3$, resp. $2\ 248\ \text{kg/m}^3 \pm 8,9\ \text{kg/m}^3$. Fotodokumentácia z betonáže je uvedená na obr. 4 a 6. Výkres tvaru stropu na kóte +3,100 v prípade objektu v Rohožníku je na obr. 5.

Stropné dosky sú okrem vlastnej tiaže zaťažené zásypom hrúbky 500 až 3 000 mm (šikmý násyp) s vodou nasiaknutou ílovitou zemínou. Uvažovaná hodnota vlastnej tiaže zásypovej zeminu vyťaženej pri výkopoch bola $21\ \text{kN/m}^3$ a úžitkové zaťaženie $5\ \text{kN/m}^2$. Pri beto-

náži stropu boli odobraté skúšobné telesá (kocky, hranoly a valce), ktoré boli použité na overenie skutočných fyzikálno-mechanických parametrov betónu v čase odformovania stropu a v čase nástupu zaťaženia od zásypu zemínou. Výsledky pevnosti betónu skúšané na kockách v čase 28 a 206 dní (čas zasypávania stropnej dosky zemínou) sú uvedené na obr. 3.

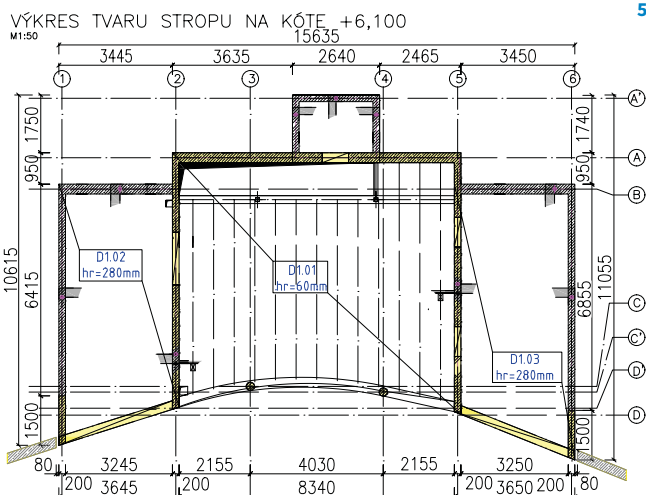
Na základe týchto skúšok bola priemerná hodnota pevnosti betónu v čase 28 dní $35,6\ \text{MPa} \pm 0,3\ \text{MPa}$, resp. v čase 206 dní $42,1\ \text{MPa} \pm 0,9\ \text{MPa}$. Okrem pevnosti betónu v tlaku boli overované aj moduly pružnosti betónu, ktorých hodnota v čase 28 dní bola $28,2\ \text{GPa} \pm 0,2\ \text{GPa}$.

V súčasnosti (november 2023) sú železobetónové stropné dosky vybetónované a v strede rozponu dosky D1.03 domu v Rohožníku sú osadené výchylkomery (obr. 7), ktoré slúžia na overenie skutočných deformácií stropnej dosky.



4

4 Betonáž obvodových stien z RAC v Trnave 5 Výkres tvaru stropu testovaného objektu na kóte +3,100 v Rohožníku 6 Hotové nosné konštrukcie z RAC v Rohožníku 4 Concreting of perimeter walls with RAC in Trnava 5 General arrangement drawing of the tested object at elevation +3,100 in Rohožník 6 Finished load-bearing structures built from RAC in Rohožník



5



6

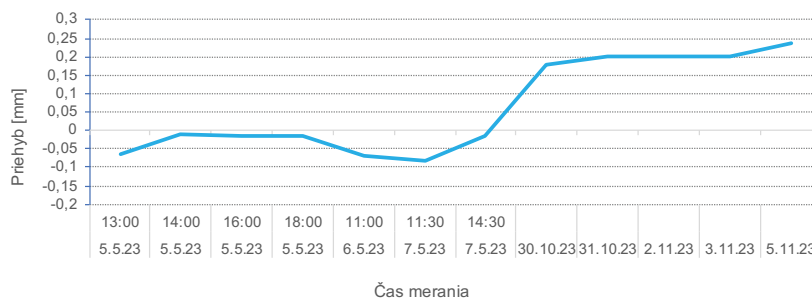


7

Priebeh pretvoreni stropnej dosky je na obr. 8. Odčitavanie hodnôt priehybov (5. 5. 2023 o 13:00) bolo v čase odstojkovania konštrukcie. Vývoj pretvoreni v počiatkových fázach bol ovplyvnený aj kolísaním teplôt v letnom období, kedy dochádzalo k ohrievaniu horného povrchu stropnej dosky a k zaznamenaniu záporných priehybov. Po zaťažení stropnej dosky vrstvou zásypovej zeminu (30. 10.) boli namerané maximálne prevarenia stropnej dosky o hodnote 0,235 mm.

Závery

Príspevok v krátkosti prezentuje príklad prvej praktickej aplikácie betónu s recyklovaným kamenivom na Slovensku. Dôvera investorov, ktorým nie je myšlienka trvalej udržateľnosti výstavby ľahostajná, je pomerne vysoká. Na základe prieskumu, ktorý sme vykonali medzi záujemcami o ekologické stavby vyplýva, že až 90 % z nich žiada betón s recyklovaným kamenivom. Väčšinová populácia má však o recyklovanom betóne obmedzené informácie. Normové predpisy už dnes umožňujú navrhovať nosné konštrukcie s určitým podielom recyklovaného kameniva pri dodržaní stanovených parametrov betónu, resp. pri overení vlastností materiálu skúškami. Dostupnosť RA je spojená nádobou s povedomím o RAC. Komplikácie, s ktorými sa pri navrhovaní stavieb z recyklovaným betónom stretávame, treba chápať ako výzvy, nie ako prekážky. Pri zohľadnení špecifik tohto materiálu už v procese návrhu konštrukcie je možné predísť mnohým



Čas merania

8

7 Osadený snímač v strede rozpätia pre kontrolu priehybu stropnej dosky 8 Priebeh pretvoreni v strede rozpätia stropnej dosky v čase

7 A sensor installed in the middle of the span to check the deflection of the floor slab

8 Deformations of the floor slab in the center of the span over time

komplikáciám. Kontrolné merania stropných dosiek in situ potvrdzujú, že betón s čiastočnou náhradou prírodného kameniva kamenivom recyklovaným môže byť použiteľnou alternatívou k betónu s iba prírodným kamenivom. Kontrolné merania priehybov v strede rozpätia stropnej dosky, pri ktorej bol použitý betón s 55 % náhradou hrubého prírodného kameniva recyklovaným betónovým kamenivom, potvrdzujú jeho úspešné použitie na prvej konštrukcii z RAC na Slovensku.

Táto práca vznikla s podporou výskumného projektu VEGA č. VEGA 1/0358/23 Navrhovanie a zosilňovanie betónových konštrukcií s ohľadom na životné prostredie a Interreg CENTRAL EUROPE 2021-2027 CE0100390 – ReBUILT.



doc. Ing. Ivan Holly, PhD.
Stavebná fakulta STU Bratislava
Katedra betónových konštrukcií a mostov
ivan.holly@stuba.sk



Ing. Martin Pribila
Pribila spol. s r.o.
info@talpahouse.com



prof. Dr. Ing. Martin-Tchingnabé Palou
Ústav stavebníctva a architektúry SAV
martin.palou@savba.sk



Ing. Adrián Ondák
Stavebná fakulta STU Bratislava
Katedra betónových konštrukcií a mostov
adrian.ondnak@stuba.sk



Ing. Jaroslav Prokop
Stavebná fakulta STU Bratislava
Katedra betónových konštrukcií a mostov
jaroslav.prokop@stuba.sk

Literatúra:

- [1] MŽP SR. Program odpadového hospodárstva SR na roky 2021–2025. 08/2021.
- [2] Volume of tires produced in the European Union (EU) from 2010 to 2020. *Statista* [online]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/411255/eu-tire-production/>
- [3] Metal Removal in Rubber Tire Recycling – Magnetic Separation. *Bunting* [online]. Dostupné z: <https://buntingmagnetics.com/industry-blog/metal-removal-in-rubber-tire-recycling-magnetic-separation/>
- [4] *Cmshredders* [online]. Dostupné z: <https://cmshredders.com/wp-content/uploads/2022/04/CM-Zero-Waste-System-Brochure.pdf>
- [5] SILVA, R. V. et al. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2015, Vol. 62, s. 22–32.
- [6] WAINWRIGHT, P. J., TREVORROW, A., YU, Y., WAND, Y. Modifying the performance of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregate. In: *ILEM symposium on demolition and reuse of concrete and masonry*. Odense, Denmark, 1993, pp. 319–330.
- [7] DILLMANN, R. Einfluss der Altbetonfestigkeit auf die Eigenschaften des unter Verwendung von Betonsplitt hergestellten Betons. Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen 91. Universität Essen, 2002.
- [8] WESCHE, K., SCHULZ, R. R. Beton aus aufbereitetem Altbeton – Technologie und Eigenschaften. *Beton Band* 32. 1982, Heft 2: 64–68.
- [9] WESCHE, K., SCHULZ, R. R. Beton aus aufbereitetem Altbeton – Technologie und Eigenschaften. *Beton Band* 32. 1982, Heft 3: 108–112.
- [10] BECKEROVÁ, L. Substitution of natural aggregates with recycled concrete in a fine fraction area. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 1998, s. 27–29.
- [11] FRAAIJ, A. L., PIETERSEN, H. S., VRIES, J. Performance of concrete with recycled aggregates. In: *Sustainable Concrete Construction. Proceeding of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK*. 2002.
- [12] GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study. *Cement and concrete research*. 2002, 32: 1301–1311.
- [13] BJEGOVIC, D., BARICEVIC, A., LAKUSIC, S., DAMJANOVIC, D., DUVNJAK, I. Positive interaction of industrial and recycled steel fibres in fibre reinforced concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2014, Vol. 19, No.1, pp. 50–60. ISSN 1392-3730. DOI:10.3846/13923730.2013.802710
- [14] BARICEVIC, A., BJEGOVIC, D., SKAZLIC, M. Hybrid Fiber-Reinforced Concrete with Unsorted Recycled-Tire Steel Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017, Vol. 29, No. 6. ISSN 0899-1561. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001906
- [15] YILMAZ, K., DEGHANPOUR, H. Mechanical and impact behavior on recycled steel fiber reinforced cementitious mortars. *Research Gate*. 2018, Vol. 39, No. 3. ISSN 2542-0526.
- [16] NAJIM, K. B., SAEB, A., AL-AZZAWI, Z. Structural behaviour and fracture energy of recycled steel fibre self-compacting reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering*. 2018, Vol. 17, pp. 174–182. ISSN 2352-7102. DOI:10.1016/j.jobe.2018.02.014
- [17] SAMARAKOON, S. M., SAMINDI, M. K., RUBEN, P., WIE PEDERSEN, J., EVANGELISTA, L. Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, Vol. 11. ISSN 2214-5095. DOI:10.1016/j.cscm.2019.e00259