

PREGLED RAZISKAV LASTNOSTI IN UPORABNOSTI BETONOV Z DODATKOM MLETE GUME IZ ODPADNIH PNEVMATIK

OVERVIEW ABOUT RESEARCH OF PROPERTIES AND APPLICABILITY OF CONCRETE WITH ADDED GRANULAR RUBBER FROM SCRAP TIRES

dr. Andreja Popit, univ. dipl. inž. geol.

andreja.popit@isit.si

Inštitut za sonaravne inovativne tehnologije, EGIZ

Pot za Brdom 104, 1000 Ljubljana

dr. Anatolij Nikonov, univ. dipl. inž. str.

anatolij.nikonov@fs.uni-lj.si

prof. dr. Igor Emri, univ. dipl. inž. str.

igor.emri@fs.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo,

Center za eksperimentalno mehaniko, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 504.06:629.11.012.5.004.14

Povzetek | Elastomerni materiali (guma) sodijo v skupino časovno odvisnih (viskoelastičnih) materialov, katerih lastnosti so močno odvisne od časa, temperature in časovnega poteka mehanske obremenitve. Skoraj neizčrpen vir elastomerne komponente so zavržene pnevmatike, ki so obenem velik ekološki problem. Reševanje tega ekološkega problema je mogoče z reciklažo gume, na primer za izdelovanje elastomerno-termoplastičnih in/ali elastomernobetonskih kompozitov. Iz pregleda svetovne znanstvene literature s področja fizikalnih lastnosti betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik je razvidno, da imajo vrsto prednosti pred navadnim betonom, kot so večja deformabilnost, boljša sposobnost dušenja mehanskih vibracij, manjša toplotna prevodnost in boljša odpornost proti zmrzovanju/tajanju. Tako bi bilo beton z dodatkom gumenega granulata možno uporabiti v gradbeništvu za aplikacije, kjer je potrebno dušenje mehanskih vibracij (npr. temelji zgradb in strojev).

Summary | Elastomeric materials (tire-rubber) are time dependent (viscoelastic) materials, the characteristics of which highly depend on time, temperature, and the rate of mechanical loading. Almost inexhaustible source of elastomeric component is represented by scrap tires, which are also a major ecological problem. Due to the presence of sulphur, the removal of tire-rubber with combustion is a very expensive and environmentally questionable procedure. Solving this ecological problem is possible by recycling of tire-rubber, for example for producing elastomeric-thermoplastic and elastomeric-concrete composites. The review of world scientific literature in the field of physical properties of the elastomeric concretes shows that they have a number of advantages over conventional concrete, such as: better deformability, better ability of damping mechanical vibrations, lower thermal conductivity, lower capillary water absorption, and better resistance to freezing and thawing. Thus, it would be possible to use elastomeric concrete in construction applications, where damping of mechanical vibration is needed (eg. buildings and machinery foundations) or for thermal insulation of buildings, especially those parts of buildings that are under the surface.

1 • UVOD

Odpadne pnevmatike so velik ekološki problem. Na leto je v svetu odvržena okoli ena milijarda odpadnih pnevmatik (Ozbay, 2011). Od tega jih samo v ZDA vsako leto odvrže več kot 270 milijonov (Siddique, 2004), medtem ko jih Evropska unija letno zavrže okoli 180 milijonov (Skripkiunas, 2009).

V preteklosti so odpadne pnevmatike večinoma skladiščili na odlagališčih ali pa so bile nezakonito zavržene. Sedanji trgi lahko sprejemajo do 80,4 % odpadnih pnevmatik, kar je bistveni porast od leta 1990, ko je bil ta delež le 17-odstoten (<http://www.epa.gov/osw/conserves/materials/tires/basic.htm>). Trgi, ki izkoriščajo odpadne pnevmatike v postopkih recikliranja in ponovne uporabe, še vedno rastejo, dejstvo pa je, da preostale odpadne pnevmatike pristanejo na odlagališčih ali pa so uničene s sežigom. Zakonodaja v ZDA za-

hteva, da se odpadne pnevmatike (v dodatku do 20 % gumenega granulata) uporabljajo za gumiasfaltne cestišča (Jang, 1998).

V zahodni Evropi je problem onesnaževanja z neposrednim odmetavanjem odpadnih pnevmatik skoraj v celoti odpravljen z ustrežno zakonodajo in predvsem z vzgojo ljudi. Pnevmatike se sistematično zbirajo in sežigajo po metodologiji, predpisani z zakonom. V Sloveniji je bila sprejeta Uredba o ravnanju z izrabljenimi gumami (Uradni list RS, št. 63/2009, z dne 7. 8. 2009), ki je namenjena zagotovitvi okolju prijaznega ravnanja z izrabljenimi gumami ter določa pravila zbiranja in predelave izrabljenih gum. V Sloveniji ustreznih predelovalnih zmogljivosti za recikliranje izrabljenih avtomobilskih gum, v skladu z določbami nove Uredbe, še nimamo v potrebnem obsegu. Med ukrepi za okoljevar-

stveno zaščito čedalje večji pomen dobivajo zahteve po zmanjšanju odpadkov v okolju, ki v ospredje prinašajo potrebo po iskanju novih izdelkov na osnovi odpadnih materialov.

Uporaba reciklirane gume pri izdelavi konstrukcijskih elementov v gradbeništvu prispeva po eni strani k reševanju problema onesnaževanja okolja, po drugi strani pa k razvoju novih inovativnih izdelkov z izboljšano funkcionalnostjo, ki bodo prispevali k dvigu konkurenčne sposobnosti slovenskih podjetij. Guma iz odpadnih pnevmatik je lahko idealen vir elastomerne komponente za dodajanje v betonsko mešanico in izdelavo elastomerno-betonskih kompozitov, pri čemer tovrstna uporaba odpadne gume ne predstavlja dodatne obremenitve za okolje.

Članek podaja pregled sedanjega poznavanja lastnosti betonov z dodatkom gumenega granulata in je namenjen izdelovalcem konstrukcijskih elementov v slovenskem prostoru, ki bi v svoj proizvodni program lahko vključili gumenobetonske izdelke.

2 • FIZIKALNE LASTNOSTI BETONOV Z DODATKOM MLETE GUME IZ ODPADNIH PNEVMATIK

V nadaljevanju so predstavljeni pregled lastnosti svežega betona z dodatkom gumenega granulata (obdelavnost svežega betona) in lastnosti strjenega betona z dodatkom gumenega granulata (tlačna, upogibna in natezna trdnost, statični modul elastičnosti, deformabilnost, dinamični modul elastičnosti, akustične lastnosti, dušenje vibracij, toplotna izolativnost, kapilarna absorpcija vode in vpliv zamrzovanja/tajanja).

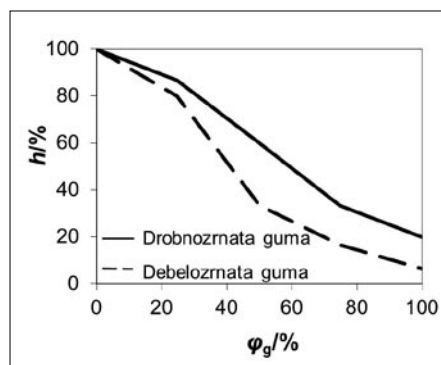
2.1 Lastnosti svežega betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

2.1.1 Obdelavnost svežega betona

Raziskave obdelavnosti svežih gumenobetonskih mešanic so pokazale zmanjšanje posedka ob povečanju deleža gumene komponente, s katero so zamenjali kameni agregat ((Toutanji, 1996), (Khatib, 1999), (Li, 2004), (Khaloo, 2008), (Nehdi, 2001), (Taha, 2008), (Guneyisi, 2010), (Najim, 2010), (Ozbay, 2011)).

Taha in sodelavci so merili posedek po ASTM-standardu C-143. Ugotovili so, da se je posedek gumenobetonske mešanice z debelo-zrnato gumo (10–70 mm) zmanjšal bolj kot

v primeru drobnozrnate gume (0,425–4,75 mm) (slika 1) (Taha, 2008). Posedek se je pri zamenjavi 50-odstotnega volumskega deleža agregata v betonski mešanici z drobnozrnato gumo zmanjšal za 40 %, v mešanici z debelo-zrnato gumo pa za 67 % glede na betonsko mešanico brez gume. Najnižje vrednosti posedka so bile izmerjene pri zamenjavi vsega agregata z gumo, kjer je bil posedek betonske mešanice z drobnozrnato gumo

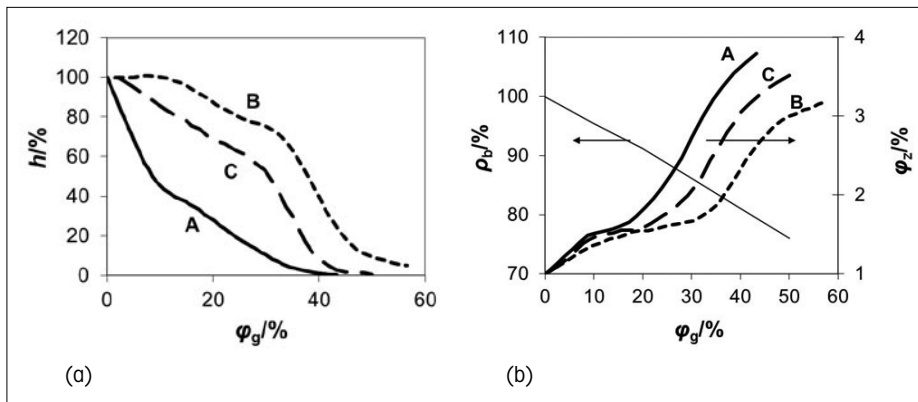


Slika 1 • Vrednosti posedka h (%) glede na volumenski delež φ_g (%) zamenjave kamenega agregata z gumenimi delci (Taha, 2008)

za 80 % manjši, v mešanici z debelo-zrnato gumo pa za 93 % manjši glede na betonsko mešanico brez gume, ki se je posedla za 150 mm.

Tudi Khatib in sodelavci (Khatib, 1999) so merili posedek (slika 2a) po standardu ASTM C-125. Posedek vzorca betonske mešanice brez gume je bil 76 mm, kar je za polovico manj, kot so poročali Taha in sodelavci (slika 1). Vrednosti posedka, ki so jih izmerili Khatib in sodelavci, so se približale vrednosti 0 pri 40 % dodane gumene komponente glede na celoten volumen agregata (slika 2a), medtem ko Taha in sodelavci poročajo, da so se vrednosti posedka približale vrednosti 0 šele pri 90-odstotnem volumskem deležu dodane gume (slika 1). Mešanice, ki so vsebovale drobnozrnate gumene delce dimenzij 0,5–5 mm (krivulja B), so izkazale boljše obdelavnost in manjše zmanjšanje posedka kot mešanice z debelo-zrnatimi gumenimi delci dimenzij 10–50 mm (krivulja A) in tiste z mešano granulacijo, ki so vsebovale drobnoin debelo-zrnate gumene delce (krivulja C) (Khatib, 1999). Podobne ugotovitve o vplivu velikosti delcev gume na obdelavnost svežih gumenobetonskih mešanic so opisane tudi v člankih (Taha, 2008) in (Zheng, 2008a).

Li in sodelavci so merili posedek po standardu ASTM C-125. Pri zamenjavi do 15 % debelo-zrnatega (10–50 mm) mineralnega agregata v betonu z gumenimi delci dimenzij



Slika 2 • Vpliv velikosti (krivulja A – granulacija 10–50 mm; krivulja B – granulacija 0,5–5 mm; krivulja C – mešana granulacija A in B) in volumenskega deleža gumenih delcev φ_g (%) na posedek h (%) svežega betona (a), vpliv velikosti in volumenskega deleža gumenih delcev φ_g (%) na gostoto ρ_b (%) svežega betona ter vsebnost zraka φ_z (%) v svežem betonu b) (Khatib, 1999)

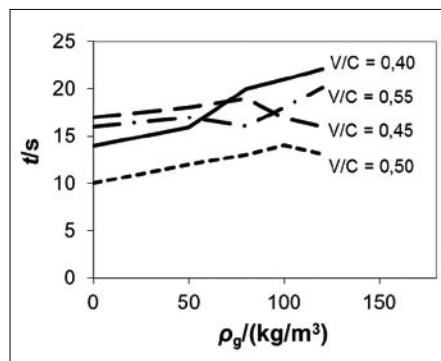
(25 mm × 25 mm × 5 mm ali 50 mm × 5 mm × 5 mm) je bila sprememba obdelavnosti gumenobetonske mešanice zanemarljiva (preglednica 1) (Li, 2004), kar se ujema z rezultati Taha in sodelavcev (Taha, 2008), prikazanimi na sliki 1, medtem ko rezultati Khatiba s sodelavci (Khatib, 1999) kažejo, da se pri zamenjavi 15 % debelozrnatega agregata z gumenimi delci velikosti 10–50 mm obdelavnost gumenobetonske mešanice značilno zmanjša (slika 2a).

Št. vzorca	Posedek h/cm
1	14,7
2	14,4
3	14,3
4	14,2
5	14,6
6	15,2
7	14,0
8	14,8
9	15,2
10	14,8

Preglednica 1 • Posedek svežega betona s 15 % dodane gumeni komponente (vzorci 2 do 9) glede na posedek svežega betona brez dodatka gume (vzorec 1) (Li, 2004)

Jingfu in Zhenli (Jingfu, 2009) sta merila obdelavnost betona po Vebe-metodi (BS 1881-104), pri kateri se meri čas, ko se stožčasta oblika svežega betona preoblikuje v valjasto

zaradi vibracij podlage (frekvenca 50 Hz in amplituda 0,5 mm), ta je bil za gumeno betonsko mešanico 5–30 s. Na sliki 3 je prikazan čas vibracijskega kompaktiranja gumenobetonske mešanice v odvisnosti od količine dodane gume (Jingfu, 2009). Vebe-čas z dodajanjem gume narašča, kar pomeni, da je obdelavnost gumenobetonske mešanice z dodajanjem gume slabša. Opažanja so v skladu z ugotovitvami številnih avtorjev ((Toutanji, 1996), (Khatib, 1999), (Li, 2004), (Khaloo, 2008), (Nehdi, 2001), (Taha, 2008), (Guneysi, 2010), (Najim, 2010), (Ozbay, 2011)).



Slika 3 • Vebe-čas t (s) gumenobetonske mešanice v odvisnosti od vsebnosti gume ρ_g (kg/m³) (Jingfu, 2009)

Glede na nizko specifično maso gume se gostota gumenobetonskih mešanic znižuje z naraščajočo vsebnostjo gumene komponente v betonu (slika 2b) ((Khatib, 1999), (Nehdi, 2001), (Khaloo, 2008), (Zheng, 2008a), (Taha, 2008), (Aiello, 2010), (Benazzouk, 2003), (Ozbay, 2011)). Standardni preizkus za merjenje gostote betona določa ASTM C 138. Gostota betonske mešanice se zmanjša

za dobrih 6 % pri 15-odstotni zamenjavi agregata z gumo ter za 21 % pri 45-odstotni zamenjavi agregata z gumo (slika 2b) (Khatib, 1999). Stoodstotna vrednost gostote na sliki 2b ustreza velikosti 2380 kg/m³. Podobne rezultate zmanjšanja gostote betona z dodajanjem gume je objavil tudi Zheng (Zheng, 2008a).

Vsebnost zraka se v gumenobetonski mešanici poveča za 3,8 %, če vsebnost granulirane gume povečamo do 50 % (slika 2b) (Khatib, 1999).

Rezultati meritev posedeka betonskih mešanic so pokazali, da se je z naraščajočim deležem gume v svežem betonu njegova obdelavnost zmanjševala. Pri volumskem deležu gume do 15 % se v večini primerov obdelavnost betonske mešanice ni spremenila značilno glede na obdelavnost svežega betona brez gume. Obdelavnost svežega betona z debelozrnato gumo (10–70 mm) je bila manjša od obdelavnosti betona z drobnozrnato gumo (0,425–4,75 mm).

Zmanjšano obdelavnost svežega betona z dodatkom gume avtorji hipotetično pripisujejo višji stopnji trenja med gumenimi delci in drugimi delci v svežem betonu kot tudi zmanjšanju gostote gumenobetonskih mešanic ((Najim, 2010), (Taha, 2008)).

2.2 Lastnosti strjenega betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

2.2.1 Tlačna, upogibna in natezna trdnost betona z dodatkom gumenega granulata

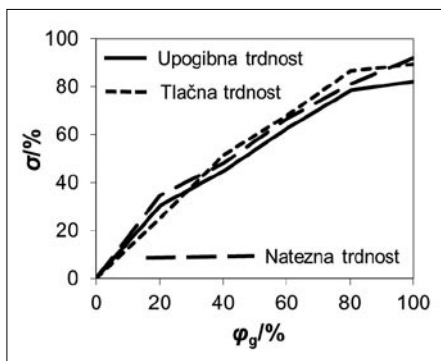
V zadnjih letih je bilo veliko raziskav usmerjenih v analizo trdnostnih lastnosti betonov z dodatkom gume, na primer ((Topcu, 1995), (Toutanji, 1996), (Benazzouk, 2003), (Benazzouk, 2006), (Benazzouk, 2007), (Bignozzi, 2006), (Jingfu, 2008), (Skripkiunas, 2009), (Nehdi, 1999), (Khatib, 1999), (Zheng, 2008a), (Zheng, 2008b), (Khaloo, 2008), (Ganijan, 2009), (Aiello, 2010), (Najim, 2010), (Najim, 2012), (Son, 2011), (Ozbay, 2011)). Iz vseh navedenih virov je razvidno, da se trdnost betonov z dodatkom mlete gume zmanjšuje z večanjem vsebnosti gume v betonu.

Batayneh s sodelavci (Batayneh, 2008) so preučevali vpliv zamenjave drobnozrnatega agregata z gumenimi delci velikosti 0,15–4,75 mm na trdnost betona. Tlačni preizkus so opravili po standardu ASTM C39, nateznega po ASTM C496 in upogibni preizkus v skladu s standardom ASTM C78. Ugotovili so, da se z naraščajočo vsebnostjo gume zmanjšujejo

tlačna, natezna in upogibna trdnost, kot je prikazano v preglednici 2 in na sliki 4. Pri zamenjavi 40-odstotnega volumenskega deleža drobnozrnatega agregata z gumenimi delci (0,15–4,75 mm) se je tlačna trdnost betona zmanjšala za okoli 50 % (slika 4), z vsebnostjo gume od 40–100 % pa se je tlačna trdnost betona zmanjšala do 90 %. Delež gume v betonu je tako omejen glede na zahtevano trdnost betona.

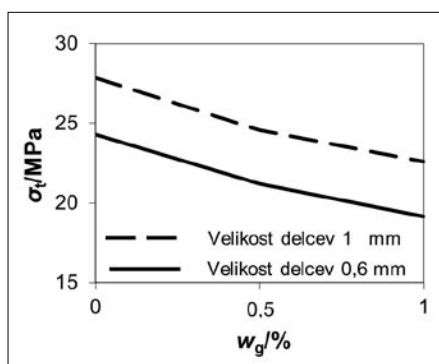
Vsebnost gume φ_g /%	Natezna trdnost σ_n /MPa	Tlačna trdnost σ_t /MPa
0	2,820	25,330
20	1,840	18,960
40	1,470	12,270
60	0,940	8,070
80	0,533	4,470
100	0,220	2,500

Preglednica 2 • Vpliv vsebnosti gume na tlačno in natezno trdnost betona (Batayneh, 2008)



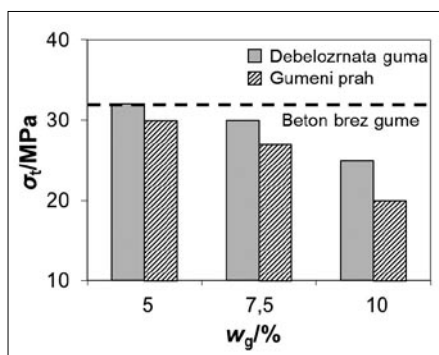
Slika 4 • Zmanjšanje tlačne, upogibne in natezne trdnosti σ (%) betona v odvisnosti od vsebnosti gume φ_g (%) (Batayneh, 2008)

Son in sodelavci (Son, 2011) so preučevali tlačno trdnost betona v odvisnosti od vsebnosti gume. Tlačno trdnost so merili po korejskem standardu KS F 2405 na valjastih vzorcih betona, 28 dni po izdelavi vzorcev. Avtorji članka poročajo, da se je pri betonu s tlačno trdnostjo 28 MPa, ki so mu dodali 0,5- do 1-odstotni masni delež gumenih delcev iz odpadnih pnevmatik velikosti 1 mm, tlačna trdnost zmanjšala za 12–19 %, pri betonu s tlačno trdnostjo 24 MPa, ki so mu dodali 0,5- do 1-odstotni masni delež gumenih delcev velikosti 0,6 mm, pa se je tlačna trdnost zmanjšala za 13–20 % (slika 5).



Slika 5 • Tlačna trdnost σ_t (MPa) betona v odvisnosti od vsebnosti gume w_g (%) (Son, 2011)

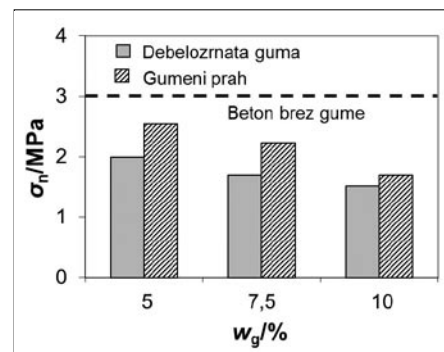
Ganijan in sodelavci (Ganijan, 2009) so preučevali mehanske lastnosti betona, v katerem so masne deleže 5 %, 7,5 % in 10 % kamenega agregata ali cementa zamenjali z gumenimi delci iz odpadnih pnevmatik. Tlačno trdnost so merili po britanskem standardu BS 1881: del 116:1993. Ugotovili so, da se tlačna trdnost betona v splošnem zmanjšuje s povečevanjem deleža zamenjave kamenega agregata z gumenimi delci, pri čemer je zmanjšanje tlačne trdnosti po 28 dneh pri zamenjavi do 5 % debelozrnatega (10–70 mm) kamenega agregata z gumenimi delci velikosti 13–76 mm ali pri zamenjavi 5 % cementa z gumenim prahom (0,075–0,475 mm) manjše od 5 % (slika 6). Pri zamenjavi 7,5–10 % debelozrnatega kamenega agregata z gumenimi delci velikosti 13–76 mm se je tlačna trdnost po 28 dneh zmanjšala za 10–23 %, v primeru zamenjave 7,5–10 % cementa z gumenim prahom granulacije 0,075–0,475 mm pa se je tlačna trdnost zmanjšala za 20–40 % (Ganijan, 2009).



Slika 6 • Rezultati 28-dnevnega preizkusa tlačne trdnosti σ_t (MPa) (Ganijan, 2009)

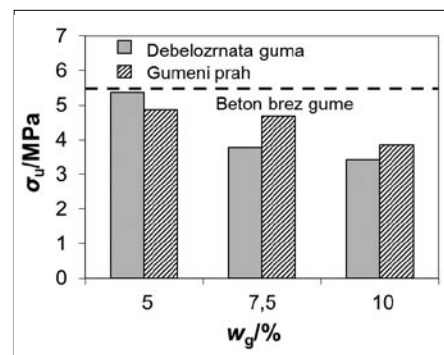
Natezno trdnost so merili po britanskem standardu BS 1881: del 117:1983. Tudi natezna trdnost se je s povečevanjem deleža za-

menjave kamenega agregata ali cementa z gumenimi delci zmanjševala (Ganijan, 2009). V primeru zamenjave 5–10 % debelozrnatega agregata z gumenimi delci granulacije 13–76 mm se je natezna trdnost zmanjšala za 30–60 %, v primeru zamenjave 5–10 % cementa z gumo v prahu (0,075–0,475 mm) pa za 15–30 % (slika 7) (Ganijan, 2009).



Slika 7 • Rezultati preizkusa natezne trdnosti σ_n (MPa) (Ganijan, 2009)

Upogibno trdnost so merili po britanskem standardu BS 1881: del 118:1983 z uporabo vzorcev v obliki prizem dimenzij 100 mm × 100 mm × 500 mm. Zmanjšanje upogibne trdnosti pri zamenjavi 5–10 % debelozrnatega agregata z gumenimi delci granulacije 13–76 mm je bilo okoli 37-odstotno (slika 8), pri zamenjavi cementa z gumenim prahom granulacije 0,075–0,475 mm pa 29-odstotno (Ganijan, 2009).

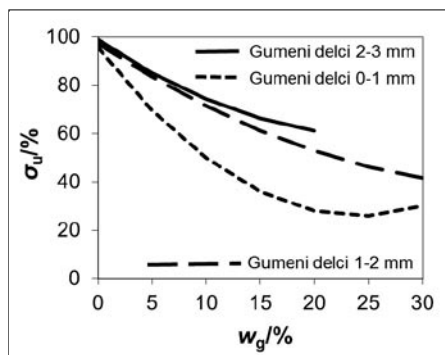


Slika 8 • Rezultati preizkusa upogibne trdnosti σ_u (MPa) (Ganijan, 2009)

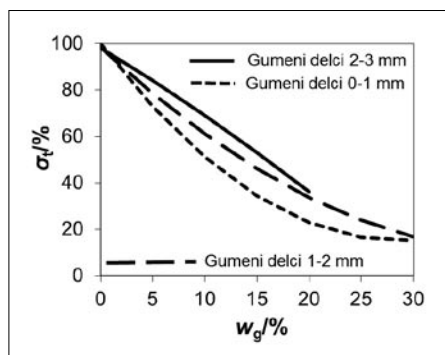
Rezultati analiz Ganijana in sodelavcev so pokazali, da se tlačna, natezna in upogibna trdnost betona z naraščajočim deležem gume v betonu zmanjšujejo (Ganijan, 2009), kar je v skladu z ugotovitvami v članku (Batayneh, 2008). Ugotovili so, da se je tlačna trdnost betona dvakrat bolj znižala v primeru zamenjave 10 % cementa z gumenim prahom kot pa v

primeru zamenjave 10 % kamenega agregata z gumenimi delci, medtem ko je za natezno trdnost veljalo nasprotno.

Zmanjšanje tlačne in upogibne trdnosti z zamenjavo 5- do 30-odstotnega masnega deleža drobnega peska (0–4 mm) v betonu z gumenimi delci različnih granulacij (0–1,1–2 in 2–3) mm so ugotavljali tudi Skripkiunas in sodelavci (Skripkiunas, 2009). Tlačno trdnost so merili po standardu EN 12390-3, upogibno trdnost pa po standardu EN 12390-5. Ugotovili so, da sta se tlačna in upogibna trdnost betona z naraščajočim deležem gumenih delcev zmanjševali v obliki polinoma drugega reda (sliki 9 in 10). Čim manjša je bila velikost gumenih delcev, tem slabše trdnostne lastnosti so imeli vzorci betona.

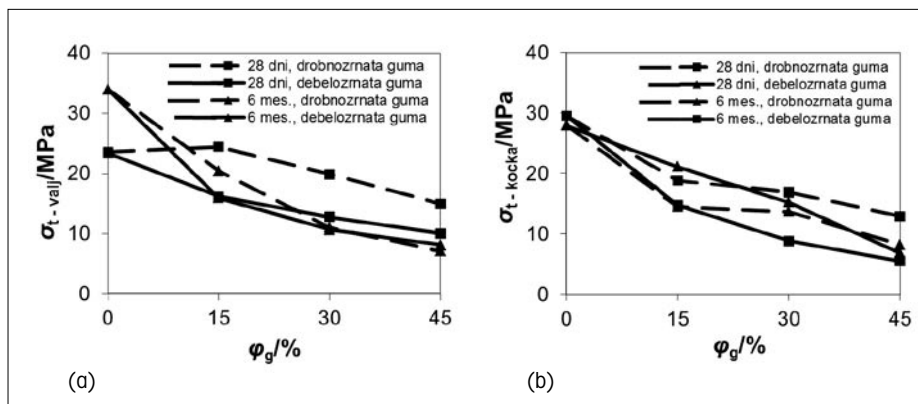


Slika 9 • Upogibna trdnost σ_u (%) betona z različnimi granulacijami in vsebnostjo gumenih delcev w_g (%) (Skripkiunas, 2009)



Slika 10 • Tlačna trdnost σ_t (%) betona z različnimi granulacijami in vsebnostjo gumenih delcev w_g (%) (Skripkiunas, 2009)

Trdnost betonov v odvisnosti od velikosti gumenih delcev je preučeval tudi Topcu (Topcu, 1995). Tlačno trdnost je meril po ameriškem standardu ASTM C39. Pripravil je tri valjaste vzorce (dimenzij 150 mm × 300 mm) in tri kockaste vzorce (dimenzije 150 mm), na ka-



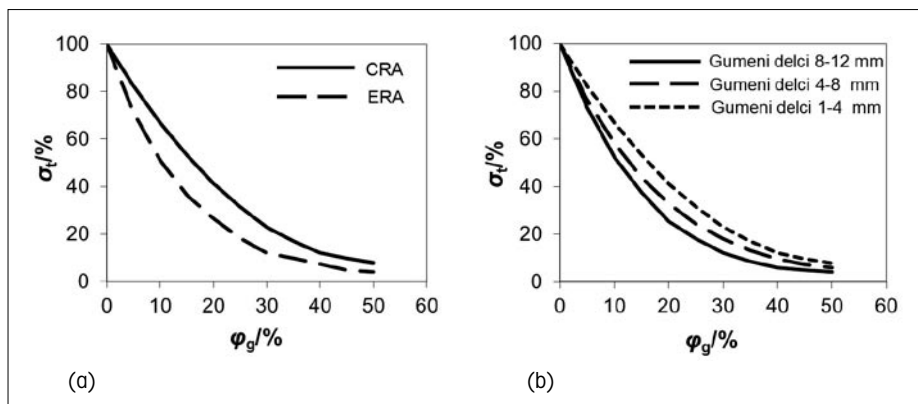
Slika 11 • Tlačna trdnost $\sigma_{t\text{-valj}}$ (MPa) vzorcev betona v obliki valja v odvisnosti od vsebnosti gume ϕ_g (%) (a) in tlačna trdnost $\sigma_{t\text{-kocka}}$ (MPa) vzorcev betona v obliki kocke v odvisnosti od vsebnosti gume ϕ_g (%) (b) (Topcu, 1995)

terih je opravljal tlačne preizkuse po 7, 28, in 180 dneh. Natezno trdnost je meril na valjastih vzorcih po standardu ASTM C496.

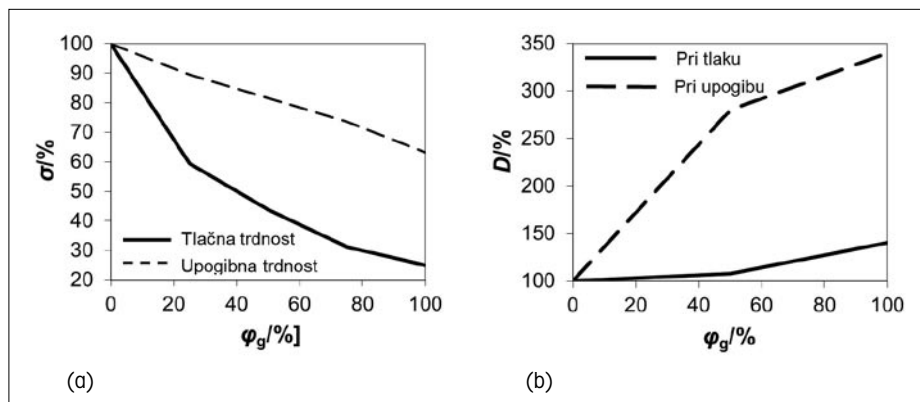
Pri betonu, v katerem je 15- do 45-odstotni volumenski delež kamenega agregata (4–16 mm) zamenjal z drobnozrnato gumo (0–1 mm), se je tlačna trdnost zmanjšala za 50 % (vzorci v obliki valja in kocke) (sliki 11a in 11b), natezna trdnost pa za 64 %, medtem ko se je pri betonu, v katerem je 15- do 45-odstotni volumenski delež kamenega agregata zamenjal z debelozrnato gumo (1–4 mm), tlačna trdnost zmanjšala za 60 % (vzorec v obliki valja) (slika 11a) in do 80 % (slika 11b) (vzorec v obliki kocke), natezna trdnost pa do 74 % (Topcu, 1995). Rezultati preizkusov so pokazali, da ima beton z drobnozrnato (0–1 mm) gumo boljše trdnostne lastnosti kot tisti z debelozrnato (1–4 mm). Podobne rezultate so objavili tudi Aiello in sodelavci (Aiello, 2010), kar pa je v nasprotju s tem, kar so poročali Skripkiunas in sodelavci (Skripkiunas, 2009).

Benazzouk in sodelavci ((Benazzouk, 2003), (Benazzouk, 2006), (Benazzouk, 2007)) so raziskovali vpliv vrste, velikosti in količine gumenih delcev na mehansko trdnost betona. Cementno-gumeni kompoziti so bili pripravljani z uporabo dveh vrst gumenih agregatov, tj. kompaktnega gumenega agregata (CRA), katerega delci imajo gladko površino, in ekspandiranega gumenega agregata (ERA), katerega delci imajo alveolarno strukturo.

Za pripravo vzorcev so bile izbrane tri skupine granulacij gumenega agregata iz odpadnih pnevmatik: 1–4 mm, 4–8 mm in 8–12 mm (Benazzouk, 2003). Tlačno trdnost so merili v skladu s standardom EN 196-1. Tlačna trdnost se je zmanjševala s povečevanjem dodatka gumenega agregata pri obeh vrstah agregata, tj. kompaktnega gumenega agregata (CRA) in ekspandiranega gumenega agregata (ERA), kot je prikazano na sliki 12a, pri čemer je bila tlačna trdnost višja pri CRA. Stoodstotna vrednost tlačne trdnosti na slikah 12a in 12b ustreza velikosti 82,5 MPa. Pri materialu CRA



Slika 12 • Tlačna trdnost σ_t (%) betona v odvisnosti od vsebnosti gume ϕ_g (%) (a) dveh različnih vrst gumenega agregata CRA in ERA z granulacijo 1–4 mm in (b) za gumeni agregat CRA pri treh različnih granulacijah (Benazzouk, 2003)



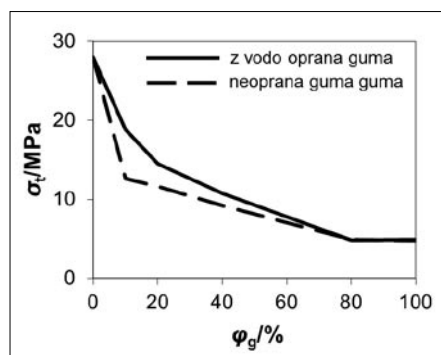
Slika 13 • Tlačna in upogibna trdnost σ (%) (a) ter deformabilnost D (%) (b) v odvisnosti od vsebnosti gumenih delcev φ_g (%) (Toutanjij, 1996)

se je z 10-odstotnim dodatkom gume tlačna trdnost zmanjšala do 30 %, pri ERA pa do 50 %. Dodatek gume nad 30 % je močno znižal tlačno trdnost (Benazzouk, 2003). Zmanjšanje tlačne trdnosti je večje v primeru kompaktnega gumenega agregata CRA večje granulacije, kot prikazuje slika 12b, kar je v skladu z ugotovitvami, objavljenimi v člankih (Topcu, 1995), (Aiello, 2010), ter v nasprotju z rezultati v (Skripiunas, 2009).

Vpliv zamenjave 25- do 100-odstotnega volumenskega deleža kamenega agregata (4,76–19 mm) z gumenim granulatom na tlačno in upogibno trdnost je bil objavljen v članku (Toutanjij, 1996). Vzorci valjaste oblike višine 200 mm in premera 100 mm so bili izdelani za opravljanje meritev tlačne trdnosti po standardu ASTM C39, meritve upogibne trdnosti so bile opravljene na prizmah dimenzij 100 mm × 100 mm × 350 mm po standardu ASTM C78. Glede na volumenski delež dodatka gumenih delcev je bilo zmanjšanje tlačne trdnosti lahko tudi do 75-odstotno, upogibne trdnosti pa do 35-odstotno (slika 13a). Stoodstotna vrednost tlačne trdnosti na sliki 13a ustreza velikosti 32 MPa, 100-odstotna vrednost upogibne trdnosti pa ustreza velikosti 3,8 MPa.

Rezultati analiz so pokazali, da na trdnost betonov z dodatkom gume vpliva tudi hrpa-vost površine gumenih delcev (Nehdi, 2001). Čim bolj je površina gumenih delcev hrpava, tem boljša povezanost med gumenimi delci in cementnim vezivom se razvije ter večjo tlačno trdnost ima beton. Adhezijo gumenih delcev je mogoče povečati s pranjem z vodo ali z jedkanjem v kislini ter namakanjem v raztopini NaOH ((Nehdi, 2001), (Segre, 2000)). Rezultati analiz (Tantala, 1996) so pokazali, da je beton, ki je vseboval z vodo oprane gumene

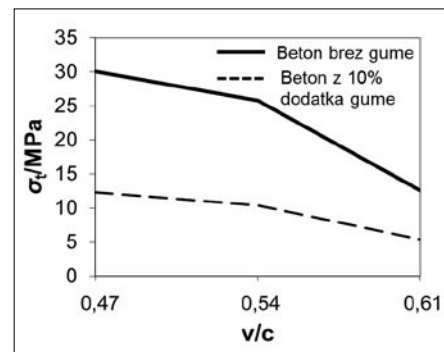
delce, dosegel za okoli 16 % večjo tlačno trdnost kot beton z gumenimi delci, ki niso bili oprani (slika 14).



Slika 14 • Vpliv pranja gumenih delcev z vodo na tlačno trdnost σ_t (MPa) betona z dodatkom gumenega granulata (Tantala, 1996)

Ghaly in Cahill sta analizirala vpliv razmerja voda/cement na tlačno trdnost betonov s 5- do 10-odstotnim volumenskim deležem gumenih delcev velikosti 0,425–4,75 mm (Ghaly, 2005). Uporabljena so bila tri različna razmerja voda/cement: 0,47, 0,54 in 0,61. Iz rezultatov avtorjev lahko povzamemo, da se je tlačna trdnost zmanjševala z naraščajočo vrednostjo razmerja voda/cement (v/c) za vse mešanice z različno vsebnostjo gume. Iz tlačnega preizkusa 28 dni starega betona in gumenobetonskih mešanic, ki je prikazan na sliki 15, lahko opazimo, da kontrolni vzorec iz navadnega betona izkazuje zmanjšanje tlačne trdnosti s 30,1 MPa pri razmerju voda/cement 0,47 na 12,6 MPa pri razmerju voda/cement 0,61, kar pomeni za dobrih 58 %. Beton z 10-odstotnim volumenskim deležem gume izkazuje relativno manjše zmanjšanje tlačne trdnosti (za 49 %), in sicer s 15,9 MPa pri

razmerju voda/cement 0,47 na 8,1 MPa pri razmerju voda/cement 0,61.



Slika 15 • Tlačna trdnost σ_t (MPa) 28 dni starega betona z 10 % gumenih delcev in navadnega betona v odvisnosti od razmerja voda/cement (Ghaly, 2005)

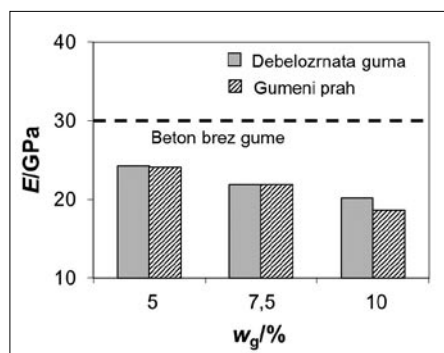
Eksperimentalni rezultati so pokazali, da se tlačna, upogibna in natezna trdnost v betonu z naraščajočim deležem gumene komponente zmanjšujejo. Zmanjšanje upogibne trdnosti je manjše kot zmanjšanje tlačne trdnosti ((Benazzouk, 2003), (Benazzouk, 2006), (Benazzouk, 2007), (Skripiunas, 2009)). Nekateri avtorji so priporočili naslednje maksimalne količine gume v betonu, pri katerih se mehanske lastnosti betona pomembno ne poslabšajo: do 20 % (Khatib, 1999), do 25 % (Khaloo, 2008) in do 30 % (Zheng, 2008b). Rezultati preizkusov so pokazali, da ima beton z drobnozrnato (0–1 mm) gumo boljše trdnostne lastnosti kot tisti z debelozrnato (1–4 mm). Podobni rezultati so objavljeni tudi v člankih (Aiello, 2010) in (Topcu, 1995), kar pa je v nasprotju s tem, kar so poročali v (Skripiunas, 2009).

Povzamemo lahko, da ni dovolj dobro raziskan vpliv velikosti gumenih delcev na tlačno in upogibno trdnost betona. Z manjšanjem dimenzij gumenega granulata se povečuje razvita površina gumenih delcev in s tem stična površina med gumo in cementnim kamnom, kar pomeni, da bo povezanost med gumenim granulatom in cementnim kamnom verjetno boljše. To odvisnost velja podrobneje raziskati.

2.2.2 Statični modul elastičnosti betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

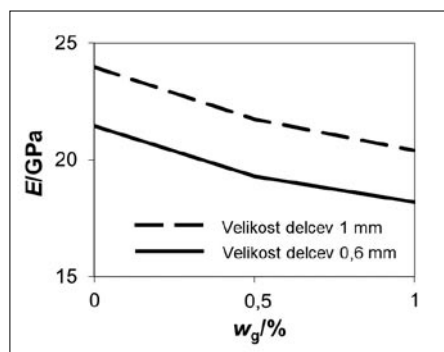
Ganijan je s sodelavci (Ganijan, 2009) preučeval, kako se je spreminjal statični modul elastičnosti betona pri zamenjavi debelozrnatega agregata in cementa z gumenimi delci

(slika 16). Modul elastičnosti so merili v skladu z britanskim standardom BS 1881: del 121:1983. Zmanjšanje modula elastičnosti pri zamenjavi 5- do 10-odstotnega masnega deleža debeložrnatega (10–70 mm) agregata z gumenimi delci granulacije 13–76 mm je bilo 17- do 25-odstotno, pri zamenjavi cementa z gumenim prahom granulacije 0,075–0,475 mm pa 18- do 36-odstotno. Beton z gumenim prahom je imel nižji modul elastičnosti.



Slika 16 • Rezultati preizkusa modula elastičnosti E (GPa) (Ganijan, 2009)

Son in sodelavci (Son, 2011) so merili modul elastičnosti v skladu s korejskim standardom KS F 2405. Rezultati so pokazali, da se je modul elastičnosti z dodajanjem gume zmanjševal, podobno kot so ugotovili Ganijan in sodelavci (Ganijan, 2009). Son in sodelavci poročajo, da se je pri betonu s statičnim modulom elastičnosti 24 kN/mm², ki so mu dodali 0,5- do 1-odstotni masni delež gumenih delcev velikosti 1 mm, modul elastičnosti zmanjšal za 9–15 %, pri betonu z modulom elastičnosti 21,5 kN/mm², ki so mu dodali 0,5–1 % gumenih delcev velikosti 0,6 mm, pa za 10–15 % (slika 17).



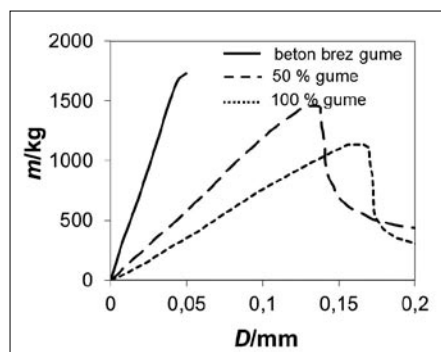
Slika 17 • Statični modul elastičnosti E (GPa) betona v odvisnosti od vsebnosti gumenih delcev, w_g (%) (Son, 2011)

Rezultati preizkusov so pokazali, da se statični modul elastičnosti z naraščajočim deležem gume zmanjšuje.

2.2.3 Deformabilnost betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

Vpliv zamenjave 25- do 100-odstotnega volumenskega deleža kamenega agregata (4,76–19 mm) z gumenim granulatom na deformabilnost betona pri tlačni in upogibni obremenitvi je preučeval Toutanji (Toutanji, 1996). Vzorci valjaste oblike višine 200 mm in premera 100 mm so bili izdelani za opravljanje meritev tlačne trdnosti po standardu ASTM C39, meritve upogibne trdnosti so bile opravljene na prizmah dimenzij 100 mm × 100 mm × 350 mm v skladu s standardom ASTM C78. Maksimalne deformacije v betonu z dodatkom gumenega granulata so bile bistveno večje kot v betonu brez gume, kar pomeni, da je beton z dodatkom gumenih delcev bolj deformabilen. Značilno naraščanje deformabilnosti z večanjem vsebnosti gumenega granulata opazujemo pri upogibu (slika 13b). Stoodstotna vrednost deformabilnosti betona brez gume pri tlačnem preizkusu na sliki 13b ustreza velikosti 0,37 mm, pri upogibnem preizkusu pa velikosti 0,05 mm.

Porušitev vzorcev betona z dodatkom gume pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu je spremljal duktilni način porušitve v primerjavi z referenčnim vzorcem betona brez gume (slika 18) (Toutanji, 1996). Čim večjo deformacijo je material sposoben prenesti brez preloma, tem bolj je duktilen. Vzorca betona z dodatkom gume sta izkazala večjo kapaciteto za absorpcijo energije. Zdržala sta obtežbo po formiranju prve razpoke in se značilno deformirala, kar je posledica tega, da je gumeni agregat, ki je mnogo bolj deformabilen,

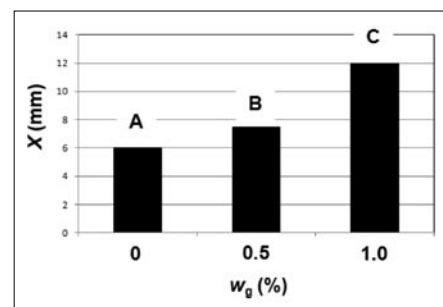


Slika 18 • Upogibna deformacija D (mm) vzorcev betona s 50- in 100-odstotno zamenjavo debeložrnatega agregata z gumo in vzorca betona brez dodane gume pri upogibni obremenitvi m (kg) (Toutanji, 1996)

prevzel del obtežbe, preden se je vzorec porušil (Toutanji, 1996).

Son in sodelavci (Son, 2011) so preučevali deformabilnost betonskih stebrov, dimenzij 200 mm × 300 mm × 1600 mm s tlačno trdnostjo 24 MPa, ki so jim dodali 0,5- do 1-odstotni masni delež gumenih zrn velikosti 0,5 mm (slika 19). Merili so uklonske deformacije na sredini stebra pri tlačni obremenitvi, pri čemer sta bila stebra vpeta zgoraj in spodaj. Maksimalna uklonska deformacija (pred porušitvijo) betonskega vzorca z masnim deležem gumenih zrn 0,5 % je bila za 25 % večja glede na navadni beton, maksimalna uklonska deformacija betonskega vzorca z masnim deležem dodane gume 1 % pa za 100 % večja glede na navadni beton brez gume.

Izkazalo se je, da je uporaba gumenih delcev v betonu ugodna, ker je deformabilnost betona z dodatkom gume pred porušitvijo večja od navadnega betona. Son in sodelavci sklepajo, da bi bilo zaradi večje deformabilnosti betone z dodano gumeno komponento mogoče uporabiti kot konstrukcijske elemente pri protipotresni gradnji, kjer morajo elementi vzdržati velike deformacije, ne da bi se porušili (Son, 2011).



Slika 19 • Uklonska deformacija D (mm) betonskih stebrov višine h (cm) s tlačno trdnostjo 24 MPa: (A) betonski stebel brez gume, (B) betonski stebel z 0,5-odstotnim masnim deležem gumenih delcev granulacije 0,5 mm ter (C) betonski stebel z 1-odstotnim masnim deležem gumenih delcev granulacije 0,5 mm (Son, 2011)

Rezultati tlačnih in upogibnih preizkusov so pokazali, da je beton z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik bolj deformabilen od navadnega betona in pred porušitvijo dosega večje plastične deformacije.

Pri upogibni obremenitvi betona z dodatkom gumenega granulata zaznamo duktilni način porušitve (proces rušenja je postopen) v primerjavi z referenčnim vzorcem betona brez

gume, kjer je porušitev trenutna (material je krhek).

2.2.4 Dinamični modul elastičnosti betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

Veliko raziskav je bilo usmerjenih v analizo dinamičnih lastnosti betonov z dodatkom gume ((Hernandez-Olivares, 2002), (Benazzouk, 2003), (Benazzouk, 2007), (Topcu, 2007), (Zheng, 2008a), (Najim, 2010), (Najim, 2012)). Rezultati raziskav so pokazali, da se dinamični modul betona z naraščajočim deležem gume zmanjšuje.

Zheng in sodelavci (Zheng, 2008a) so dinamični modul elastičnosti merili E_d (GPa) z ultrazvočnim preizkusom, tj. na podlagi meritev hitrosti ultrazvočnega valovanja v vzorcih betona z dodatkom gume:

$$E_d = \rho c_L^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}, \quad (1)$$

kjer je c_L (m/s) eksperimentalno izmerjena hitrost ultrazvočnega valovanja in ρ (kg/m³) gostota materiala, ν pa Poissonovo število.

Ker je razmerje $\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \cong 1$, so dinamični modul izračunali po formuli:

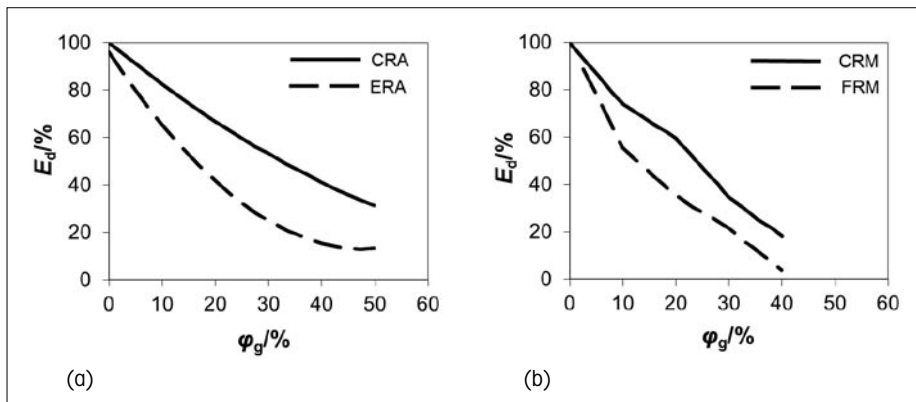
$$E_d = \rho c^2, \quad (2)$$

kjer je ρ (kg/m³) gostota materiala, c (m/s) hitrost transversalnega valovanja v betonu z dodatkom mlete gume in ν Poissonovo število.

Zheng in sodelavci so v betonu, v katerem so volumenski delež 15–45 % debelozrnatega (10–50 mm) kamenega agregata zamenjali z drobnozrnatimi (2,62 mm) ali debelozrnatimi (15–40 mm) gumenimi delci, preučevali statični in dinamični modul elastičnosti. V preglednici 3 so prikazane razlike med dinamičnim modulom elastičnosti in statičnim modulom elastičnosti med betonom z dodatkom mlete gume in betonom brez gume. Dinamični modul elastičnosti betona z dodatkom gumene komponente je nižji kot v betonu brez gume. V betonu s 15- do 45-odstotnim deležem drobnozrnatih gumenih delcev velikosti 2,62 mm se je dinamični modul elastičnosti zmanjšal od 5,7 % do 28,6 % glede na referenčni beton, medtem ko se je v betonu z debelozrnatimi gumenimi delci velikosti 15–40 mm dinamični modul elastičnosti zmanjšal od 19 % do 25 % (Zheng, 2008a).

	Beton brez gume	Beton z drobnozrnatno gumo (2,62 mm)			Beton z debelozrnatno gumo (15–40 mm)		
		15 %	30 %	45 %	15 %	30 %	45 %
Dinamični modul elastičnosti E_d /GPa	43,7	41,2	35,2	31,2	35,4	36,5	32,8
Statični modul elastičnosti E_s /GPa	31,8	27,1	24,1	22,3	23,1	24,3	22,1

Preglednica 3 • Razlike v dinamičnem in statičnem modulu elastičnosti med betonom z dodatkom mlete gume in navadnim betonom brez gume (Zheng, 2008a)



Slika 20 • Sprememba dinamičnega modula elastičnosti E_d (%) betona: a) za gumeni agregat CRA in ERA (Benazzouk, 2003) in b) za kompozit FRM in CRM (Topcu, 2007) v odvisnosti od vsebnosti gume ϕ_g (%)

Statični modul elastičnosti se je v betonu z vsebnostjo 15–45 % drobnozrnatih gumenih delcev velikosti 2,62 mm zmanjšal od 14,8 % do 29,9 % glede na referenčni beton, medtem ko se je v betonu z debelozrnatimi gumenimi delci velikosti 15–40 mm statični modul elastičnosti zmanjšal od 27,3 % do 30,5 % (Zheng, 2008a).

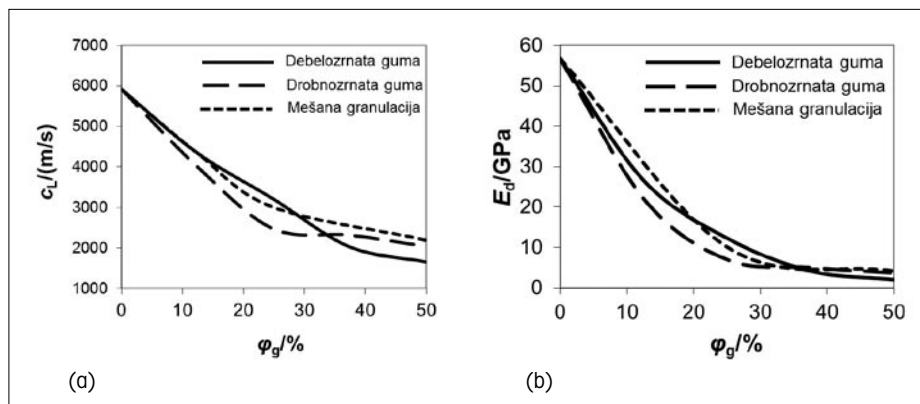
Analize so pokazale, da je imela debelozrnata guma večji vpliv na dinamični in statični modul elastičnosti betona kot drobnozrnata ((Zheng, 2008a), (Najim, 2012)). V referenčnem betonu je bil dinamični modul elastičnosti od statičnega modula elastičnosti za 37,4 % višji, medtem ko je bila ta razlika v betonu z dodatkom mlete gume okoli 50 % (Zheng, 2008a).

Benazzouk in sodelavci ((Benazzouk, 2003), (Benazzouk, 2007)) so merili dinamični modul elastičnosti betona na podlagi longitudinalnih ultrazvočnih vibracij, kot to določa francoski standard NF P 18-418. Preizkus so opravljali na prizmah betona dimenzij 40 mm × 40 mm × 160 mm. Dinamični modul elastičnosti, E_d (GPa) so izračunali po enačbi 2.

Benazzouk in sodelavci (Benazzouk, 2003) so analizirali, kako se hitrost ultrazvočnih valov v betonu spreminja z dodajanjem gumenih

delcev granulacije 1–4 mm. Ugotovili so, da se zmanjšuje. Na podlagi izmerjenih hitrosti ultrazvočnih valov so izračunali dinamične module elastičnosti kompozitov z različno vsebnostjo gumene komponente.

Slika 20a prikazuje spremembe dinamičnega modula elastičnosti betonov v odvisnosti od vsebnosti različnih vrst gumenih agregatov (CRA – kompaktni gumeni agregat, in ERA – ekspanzirani gumeni agregat) z velikostjo granulacije 1–4 mm (Benazzouk, 2003). Vrednosti dinamičnega modula elastičnosti so se zmanjševale z naraščajočim volumenskim deležem gumene komponente (0–50 %) približno od 25 GPa do 10 GPa za beton z gumenim agregatom CRA in od 25 GPa do 4 GPa za beton z gumenim agregatom ERA. Topcu in sodelavci (Topcu, 2007) so preučevali zmanjšanje dinamičnega modula elastičnosti vzorcev betona, v katerem so 10- do 30-odstotni volumenski delež drobnozrnatega kamenega agregata zamenjali z gumenimi delci velikosti 1–4 mm. Dinamični modul elastičnosti so določali na podlagi meritev hitrosti ultrazvočnega valovanja. Preizkus so naredili na dveh vrstah kompozitov, in sicer iz malte z dodatkom drobnozrnate (0–1 mm) gume (FRM) in iz malte z dodatkom debe-



Slika 21 • Hitrost ultrazvočnih valov c_L (m/s) v odvisnosti od vsebnosti gume φ_g (%) v betonu (a) in (b) dinamični modul elastičnosti E_d (GPa) v odvisnosti od vsebnosti gume φ_g (%) v betonu (Khaloo, 2008)

lozrnate (1–4 mm) gume (CRM) (slika 20b) (Topcu, 2007). Vpliv dodajanja debelozrnate gume na zmanjšanje dinamičnega modula elastičnosti je za 10–20 % manjši v primerjavi z dodajanjem drobnozrnate gume, kar je v nasprotju z ugotovitvami, objavljenimi v člankih (Zheng, 2008a) in (Najim, 2012). Avtorji članka (Khaloo, 2008) so merili hitrost ultrazvočnih valov v betonu, v katerem so 12,5 %, 25 %, 37,5 % in 50 % debelozrnatega (10–50 mm) in drobnozrnatega (0,5–5 mm) kamenega agregata zamenjali z gumenimi delci velikosti 10–70 mm in 0,425–4,78 mm. Hitrost ultrazvočnih valov in dinamični modul elastičnosti sta se značilno zmanjšala z naraščajočo vsebnostjo gume (sliki 21a in 21b). Na podlagi teh rezultatov so avtorji članka (Khaloo, 2008) sklepali, da je beton z dodatkom gumenega granulata potencialno primeren za dušenje zvoka in bi ga lahko uporabili za zvočni izolator.

Rezultati preizkusov so pokazali, da se dinamični modul betona z naraščajočim deležem gume zmanjšuje. Debelozrnata guma je imela večji vpliv na zmanjšanje dinamičnega modula elastičnosti kot drobnozrnata guma ((Zheng, 2008a) in (Najim, 2012)), kar je v nasprotju z ugotovitvami, objavljenimi v članku (Topcu, 2007).

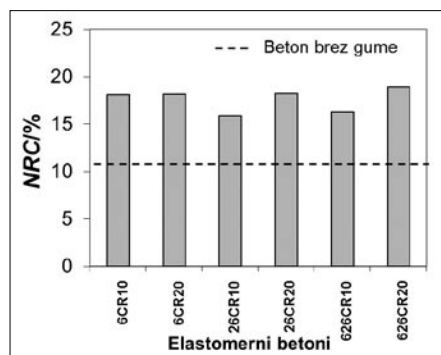
2.2.5 Akustične lastnosti betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

Sposobnost betona z dodatkom gume, da absorbira zvok, lahko pokažemo na podlagi koeficienta dušenja hrupa (Noise Reduction Coefficient, NRC). Koeficient dušenja hrupa je v standardu ASTM 423 90a določen kot aritmetična povprečna vrednost izmerjenih koeficientov absorpcije zvoka pri štirih osrednjih frekvencah terčnih pasov, tj. pri 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz in 2000 Hz:

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4}, \quad (3)$$

kjer je α koeficient absorpcije zvoka pri različnih frekvencah.

Sukontasukkul je meril absorpcijski koeficient betona po standardu ISO 10534-1:1996. Koeficient dušenja hrupa betona, v katerem so drobnozrnati kamni agregat (0,5–5 mm) zamenjali z 10- do 20-odstotnim volumenskim deležem gumenih delcev (0,425–4,75 mm), je bil le za 4–8 % boljši kot v betonu brez dodatka gume (slika 22) (Sukontasukkul, 2009).



Slika 22 • Koeficient dušenja hrupa NRC (%) (Noise reduction coefficient) betona z volumenskim deležem gume 10 % in 20 % v primerjavi z navadnim betonom (prva dva vzorca vsebujeta gumene delce velikosti 5–10 mm, druga dva delce mešane granularcije) (Sukontasukkul, 2009)

2.2.6 Dušenje vibracij betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

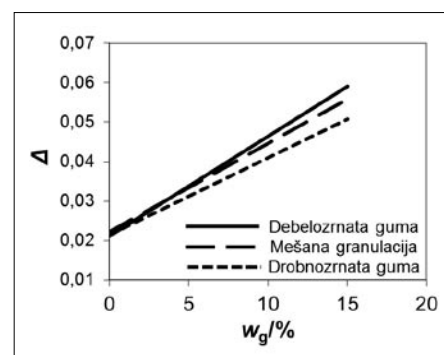
Logaritemski dekrement Δ je fizikalna veličina, ki podaja dušilne lastnosti materiala (tj.

sposobnost dušenja mehanskih vibracij) in ga lahko zapišemo kot (Steidel, 1989):

$$\Delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n}, \quad (4)$$

kjer je A_0 (m) začetna amplituda, A_n (m) pa amplituda po n ciklih.

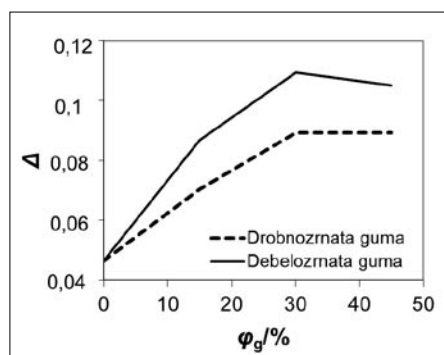
Najim in Hall (Najim, 2012) sta ocenila kapaciteto dušenja vibracij betona na podlagi meritev logaritemskega dekrementa. Avtorja sta preučevala spreminjanje logaritemskega dekrementa v betonih, v katerih so 5- do 15-odstotni masni delež kamenega agregata drobne (0–0,5 mm), debele (0,5–5 mm) ali mešane (0–5 mm) granularcije zamenjali z gumenimi delci velikosti 0,5–5 mm. Logaritemski dekrement v betonu se je z naraščajočo vsebnostjo gumenih delcev večal (slika 23). Za beton, v katerem so 5–15 % drobnozrnatega (0–0,5 mm) kamenega agregata zamenjali z gumenimi delci (0,5–5 mm), se je logaritemski dekrement zvišal z 0,022 na 0,048 (za 116 %), za beton, v katerem so 5–15 % debelozrnatega (0,5–5 mm) kamenega agregata zamenjali z gumenimi delci (0,5–5 mm), pa se je logaritemski dekrement zvišal z 0,022 na 0,0058 (za 163 %). Debelozrnata guma je imela večji vpliv na zvečanje logaritemskega dekrementa kot drobnozrnata.



Slika 23 • Vpliv vsebnosti gume w_g (%) na logaritemski dekrement Δ (Najim, 2012)

Zheng in sodelavci (Zheng, 2008a) so preučevali spreminjanje logaritemskega dekrementa pri dinamičnem upogibu grede iz betona z dodatkom gumenega granulata, nastalega zaradi trka. Meritve logaritemskega dekrementa so opravljali na vzorcih betona, v katerem so 15- do 45-odstotni volumenski delež debelozrnatega (10–50 mm) kamenega agregata zamenjali z drobnozrnatimi (2,62 mm) ali debelozrnatimi (15–40 mm) gumenimi delci. Avtorji so enačbo za loga-

ritemski dekrement (4) delili z 2π . Zaradi primerjave teh rezultatov z drugimi avtorji smo te podatke ustrezno prilagodili, tako da smo vrednosti pomnožili s faktorjem 2π . Logaritemski dekrement betona se je večal z večanjem vsebnosti gumene komponente od 15–30 %, pri nadaljnjem večanju vsebnosti gumenih delcev na 45 % pa se je pri debelozrnati gumi manjšal, pri drobnozrnati pa je ostal enak (slika 24). Optimalna vsebnost gumenih delcev za doseganje najboljšega dušenja je bila pri volumenskem deležu 30 % (Zheng, 2008a).



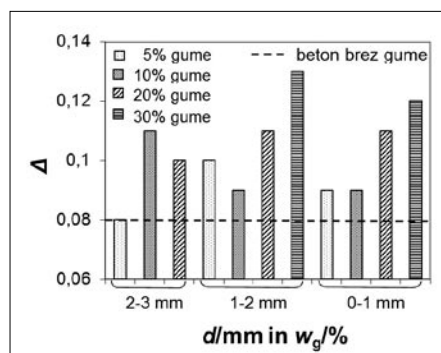
Slika 24 • Logaritemski dekrement Δ betona, v katerem so 15- do 45-odstotni volumenski delež ϕ_g (%) debelozrnatega (10–50 mm) kamenega agregata zamenjali z drobnozrnatimi (2,62 mm) ali debelozrnatimi (15–40 mm) gumenimi delci (Zheng, 2008a)

Skripkiunas in sodelavci so preučevali vpliv zamenjave 5- do 30-odstotnega masnega deleža drobnega peska (0–4 mm) v betonu z gumenimi delci različnih granulacij (0–1, 1–2 in 2–3) mm na dušenje vibracij (Skripkiunas, 2009). V ta namen so pripravili vzorce v obliki prizem dimenzij 100 mm × 100 mm × 300 mm in opravili preizkus resonančne frekvence, na podlagi katerega so izmerili resonančno frekvenco (f_0) in frekvenci (f_1 in f_2), kjer amplituda vibracije pade na 0,707 maksimalne vrednosti. Iz izmerjenih frekvenc so izračunali logaritemski dekrement po formuli (Nashif, 1985):

$$\Delta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (5)$$

Logaritemski dekrement betona z vsebnostjo 20 % gume (glede na celoten masni delež kamenega agregata) se je povečal za okoli 37,5 %, pri čemer je imela količina dodane gume večji vpliv kot velikost delcev gume (slika 25). Čim višji je logaritemski dekrement,

tem boljše je dušenje. Beton z dodatkom gumenih delcev bolje duši strukturni hrup kot beton brez dodatka gume, čeprav se poslabšajo njegove trdnostne lastnosti in bi ga lahko uporabili za aplikacije v gradbeništvu, kjer je potrebno dušenje mehanskih vibracij, npr. temelji zgradb in strojev (Skripkiunas, 2009).



Slika 25 • Logaritemski dekrement Δ betona z dodatkom gumenega granulata v odvisnosti od velikosti delcev d (mm) in vsebnosti gume w_g (%) (Skripkiunas, 2009)

Ekperimentalni rezultati so pokazali, da se je logaritemski dekrement betona večal z večanjem vsebnosti gume. Optimalna vsebnost gume za doseganje najboljšega dušenja je bila 30-odstotna. Debelozrnata guma je imela večji vpliv na zvečanje logaritemskega dekrementa kot drobnozrnata.

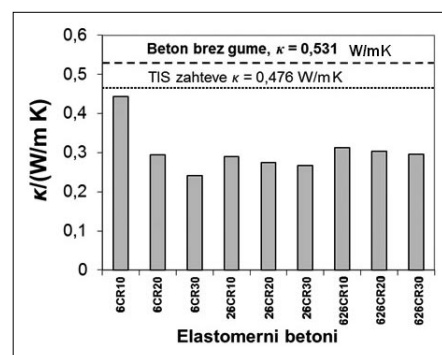
2.2.7 Toplotna izolativnost betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

Sukontasukkul (Sukontasukkul, 2009) je preučeval vpliv zamenjave 10- do 30-odstotnega volumenskega deleža drobnozrnatega kamenega agregata v betonu z gumenimi delci velikosti 0,5–5 mm na toplotno prevodnost betona κ (W/m K), ki so jo računali po naslednji formuli:

$$\kappa = q_s \frac{d}{(T_1 - T_2)}, \quad (6)$$

kjer je q_s (W/m²) specifični toplotni tok, d (m) je debelina stene, $(T_1 - T_2)$ je temperaturna razlika med notranjo in zunanjo temperaturo (K).

Sukontasukkul je pokazal, da je toplotna prevodnost betona z 10–30 % gumenega granulata (0,241–0,443 W/(m K)) za 20–50 % nižja kot v betonu brez dodatka gume (0,531 W/(m K)) (slika 26).



Slika 26 • Toplotna prevodnost κ (W/m K) betona z volumenskim deležem gumenega granulata 10 %, 20 % in 30 % v primerjavi z navadnim betonom (prvi trije vzorci vsebujejo gumeni delce velikosti 5–10 mm, drugi trije 1–2,5 mm in zadnji trije delce mešane granulacije) (Sukontasukkul, 2009)

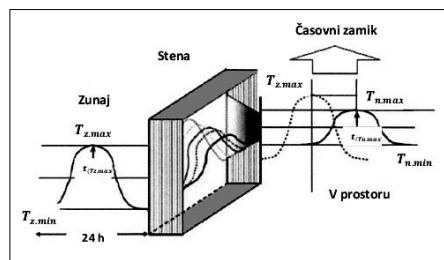
Yesatila in sodelavci (Yesatila, 2011) so preučevali nihanje temperature v modelu sobe dimenzij 139 cm × 139 cm × 106 cm. Stene modelne sobe so bile narejene iz betona, v katerem so 60-odstotni volumenski delež kamenega agregata zamenjali z gumenimi delci velikosti 0,5–5 mm. Strop in talno ploščo modelne sobe so naredili iz betonskih plošč debeline 8 cm, v sredino le-teh pa so vgradili gumene plošče dimenzij 15 cm × 35 cm × 1,5 cm. Poleg tega so zgradili še identični model sobe iz betona brez gume in oba modela postavili na prosto ter celo leto spremljali temperaturna nihanja v obeh modelnih sobah. Meritve sobne temperature so pokazale, da beton z dodatkom gume zmanjša tako nihanje sobne temperature kot tudi vpliv zunanje temperature (Yesatila, 2011). Poleg tega so merili tudi faktor časovnega zamika prehoda toplotne energije (φ) na podlagi časovne (t) razlike med zunanjo maksimalno $T_{z,max}$ (ali minimalno $T_{z,min}$) temperaturo in sobno maksimalno $T_{s,max}$ (ali minimalno $T_{s,min}$) temperaturo (slika 27) (Yesatila, 2011):

$$\varphi (T_{max}) = t_{(Tz,max)} - t_{(Ts,max)} \quad (7)$$

$$\varphi (T_{min}) = t_{(Tz,min)} - t_{(Ts,min)} \quad (8)$$

Vrednosti faktorja časovnega zamika prehoda toplotne energije za sobo, narejeno iz betona z dodatkom gumenega granulata (φ_{EB}), so bile večinoma višje kot za sobo iz navadnega betona (φ_{NB}). Razmerje $\varphi_{EB}/\varphi_{NB}$ je bilo v glavnem večje ali enako 1, le izjemoma manj kot 1. Povprečna letna vrednost toplotnega

časovnega zamika za sobo iz betona z dodatkom gumenega granulata je bila 3,28 h, za sobo iz navadnega betona pa 2,96 h, iz česar avtorji članka (Yesatila, 2011) sklepajo, da ima soba iz betona z dodatkom gumenega granulata za 11 % boljše toplotno zaščito. To predstavlja tudi prihranek pri ogrevanju in ohlajanju. Avtorji člankov (Turgut, 2008), (Yesilata, 2009), in (Yesilata, 2011) so s študijo pokazali, da beton z dodatkom mlete gume zmanjša toplotno prehodnost in s tem poveča toplotno izolativnost.

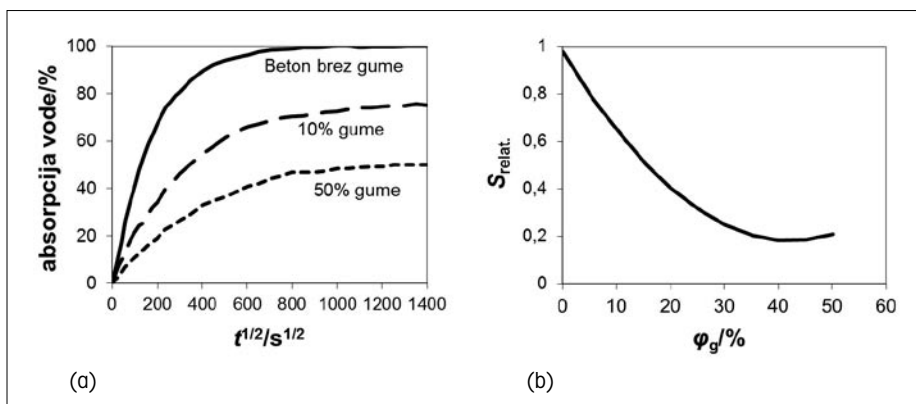


Slika 27 • Širjenje toplotnega valovanja z zunanje površine stene na notranjo (Yesatila, 2011)

2.2.8 Kapilarna absorpcija vode betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

Obstojnost materiala je odvisna od njegove odpornosti proti absorpciji vode, zlasti če so v vodi raztopljeni agresivni ioni. Razumevanje transportnih mehanizmov vlage v materialu je pomembno za oceno uporabnosti materiala za gradbeni material in tudi zato, da se v primeru potrebe izboljša njegova kvaliteta (Benazzouk, 2007).

Primarna transportna mehanizma, preko katerih agresivne snovi vstopijo v beton, sta difuzija in kapilarni transport, kjer je slednji dominanten. Čim manjša je kapilarnost, tem večja je trajnost materiala. Da bi lahko ocenili obnašanje materiala, ko ga postavimo v stik z vodo, določimo sorptivnost (merilo sposobnosti materiala absorbirati tekočino) na podlagi preizkusa kapilarne absorpcije vode (Benazzouk, 2007). Preizkus so avtorji opravili tako, da je bil proces difuzije zagotovljen v eni smeri. Stranske ploskve predhodno posušenega vzorca so hermetično zaprili s plastično tanko plastjo in vzorec potopili v posodo z vodo na globino 5 mm tako, da je bila difuzija mogoča le skozi spodnjo ploskev vzorca, nato pa so ohranili konstantno raven te globine. Vzorce so večkrat stehali, dokler se proces absorpcije ni stabiliziral. Ocenjeno je bilo, da 1 g vode odgovarja volumnu 1 cm³. Sorptivnost so izračunali po naslednji enačbi (Hall, 1986):



Slika 28 • Absorpcija vode (%) v kompozitu v odvisnosti od kvadratnega korena časa $t^{1/2}$ (s^{1/2}) (a) in relativna sorptivnost $S'_{relat.}$ v odvisnosti od volumenskega deleža gumenih delcev ϕ_g (%) (b) (Benazzouk, 2007)

$$S = \frac{i - i_0}{\sqrt{t}}, \quad (9)$$

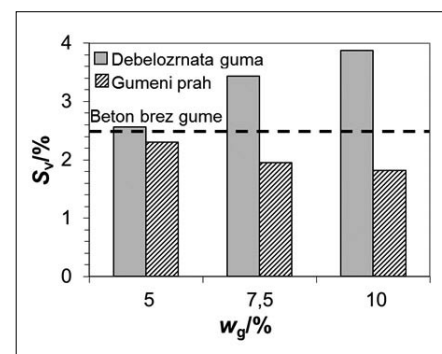
kjer je i (m³/m²) kumulativni volumen absorbirane vode v vzorcu na enoto ploščine, S (m/s^{1/2}) je sorptivnost materiala, i_0 (m³/m²) je koeficient, ki je odvisen od površinske ploskve vzorca, ki je v stiku z vodo in predstavlja neenotno porazdelitev por (Hall, 1986). Sprememba absorpcije vode v kompozitu je kot funkcija kvadratnega korena časa za različne volumenske deleže gumenih delcev v betonu prikazana na sliki 28a (Benazzouk, 2007). Kompozite so pripravili tako, da so 0- do 50-odstotni volumenski delež cementa zamenjali z gumenimi delci velikosti manj kot 1 mm. Slika 28a prikazuje zmanjšanje kapilarne absorpcije vode in hitrosti absorpcije vode s povečevanjem vsebnosti gume v betonu.

Stoodstotna vrednost absorpcije vode na sliki 28a ustreza velikosti $4,7 \times 10^{-2}$ m³/m². Kapilarna absorpcija vode v betonih z dodatkom gume se z naraščajočo vsebnostjo gume (10–50 %) zmanjšuje (25–50 %).

Slika 28b predstavlja relativno sorptivnost v odvisnosti od volumenskega deleža gumenih delcev. Z grafa na sliki 28b je razvidno, da se je relativna sorptivnost S/S' (kjer je S sorptivnost kompozita in S' sorptivnost betona) kompozitnega materiala s 40-odstotnim volumenskim deležem gume glede na referenčni beton brez gume zmanjšala za 80 %.

Avtorji članka (Ganjan, 2009) so preučevali absorpcijo vode v betonu, v katerem so masne deleže debelozrnatega kamenega agregata ali cementa 5 %, 7,5 % in 10 % zamenjali z gumenimi delci. Pri zamenjavi 5–10 % debelozrnatega (10–70 mm) kamenega agregata z gumenimi delci velikosti 13–76 mm se je

absorpcija vode povečala za 4–44 %. Pri zamenjavi 5–10 % cementa z gumenim prahom (0,075–0,475 mm) pa se je absorpcija vode zmanjšala za 7–22 % (slika 29) (Ganjan, 2009).



Slika 29 • Rezultati absorpcije vode S_v (%) v betonu, v katerem so 5- do 10-odstotni masni delež w_g (%) debelozrnatega kamenega agregata zamenjali z gumenimi delci velikosti 13–76 mm in 5- do 10-odstotni masni deleže cementa z gumenim prahom granulacije 0,075–0,475 mm (Ganjan, 2009)

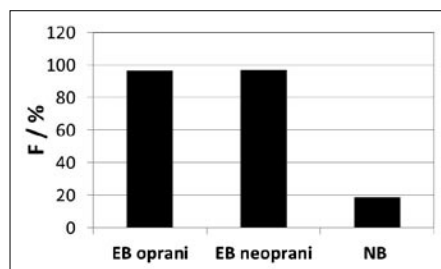
Eksperimentalni rezultati so pokazali, da se je kapilarna absorpcija vode v betonu z naraščajočo vsebnostjo gume povečevala ali zmanjševala v odvisnosti od velikosti gumenih delcev kot tudi od tega, ali so gumeni delci nadomeščali kameni agregat oziroma cementno osnovo. Pri zamenjavi cementa z gumenimi delci dimenzij manj kot 1 mm se je kapilarna absorpcija vode zmanjševala, medtem ko se je pri zamenjavi debelozrnatega kamenega agregata z gumenimi delci velikosti 13–76 mm povečevala.

2.2.9 Vpliv zamrzovanja/tajanja na trajnost betona z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik

Zamrzovanje absorbirane vode je eden izmed glavnih vzrokov za propadanje betonskih konstrukcij.

Avtorji članka (Richardson, 2012) so preučevali faktor trajnosti betona na podlagi preizkusa zamrzovanja/tajanja v skladu s standardom ASTM C 666, 1997. Preučevali so faktor trajnosti betona z 0,6-odstotnim masnim deležem gumenih delcev velikosti 0,5–5 mm v betonu. Preizkus zamrzovanja in odtajevanja so opravili na treh vzorcih, in sicer so pri prvem uporabili z vodo oprane gumene delce, pri drugem neoprane, pri tretjem pa beton brez gume. Zamrzovanje pri $-17,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ je trajalo 7 h, odtajevanje pri $4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa 20 min. Rezultati poskusov (Richardson, 2012) so pokazali, da je po 56 ciklih zamrzovanja in

odtajevanja faktor trajnosti betona z opranimi gumenimi delci 96,4 %, betona z neopranimi gumenimi delci 96,9 % in betona brez gume 18,85 % (slika 30), kar pomeni, da je bil beton z dodatkom gumenih delcev pri teh preizkusih mnogo bolj odporen proti zamrzovanju in tajanju kot navadni beton.



Slika 30 • Faktor trajnosti betona (EB) z 0,6-odstotnim masnim deležem gumenih delcev (oprani in neoprani) in navadnega betona (NB)

Savas in sodelavci (Savas, 1996) so izvedli raziskavo vpliva zamrzovanja in tajanja na trajnost betonov z dodatkom gumenega granulata. Raziskava je pokazala, da so faktorji trajnosti po 300 ciklih zamrzovanja/tajanja v betonu z 10–15 % gumenih delcev več kot 60-odstotni, medtem ko so bili faktorji trajnosti v betonu z 20–30 % gumenih delcev pre nizki, da bi zadostili standardom. Podobne ugotovitve so objavljene tudi v članku (Paine, 2002).

V našem preglednem članku smo trajnost betona z dodatkom gumenega granulata glede na navadni beton povzeli le na podlagi faktorja trajnosti, ki je bil določen s preizkusi zamrzovanja/tajanja. Ker obstajajo številni drugi pokazatelji obstojnosti betona, velja trajnost betona z dodatkom mlete gume podrobneje raziskati.

3 • SKLEP

Odpadne pnevmatike so velik ekološki problem, ki bi ga lahko rešili z reciklažo, na primer za izdelovanje gumenobetonskih kompozitov za uporabo v gradbeništvu. Pregled svetovne znanstvene literature s področja fizikalnih lastnosti betonov z dodatkom gumenega granulata pokaže, da imajo vrsto prednosti pred navadnim betonom brez dodane gume, kot so večja deformabilnost, večja sposobnost dušenja mehanskih vibracij, manjša toplotna prevodnost ter večja odpornost proti zamrzovanju in tajanju. Sklepamo, da bi na podlagi teh lastnosti beton z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik lahko uporabili v gradbeništvu.

Obdelavnost sveže betonske mešanice, ki vsebuje do 15 volumenskih odstotkov gumene komponente, se ne spremeni značilno glede na obdelavnost svežega betona brez gume. Možne aplikacije v gradbeništvu so naslednje:

- Čeprav ima beton z dodatkom gumenega granulata nižjo trdnost kot beton brez dodatka gume, bi ga lahko uporabili za gradbene elemente, za katere so zahtevane nižje vrednosti trdnosti. Nekateri avtorji so priporočili naslednje maksimalne volumenske deleže gumene komponente v betonu, pri katerih se mehanske lastnosti betona ne poslabšajo signifikantno: do 20 % (Khatib, 1999), do 25 % (Khaloo, 2008) in do 30 % (Zheng, 2008b). Priporočajo tudi uporabo drobnozrnate gume granulacije 0–1 mm, pri kateri ima beton boljše trdnostne karakteristike, kot če bi uporabili debelozrnato gumo granulacije 1–4 mm.
- Izkaže se, da se z dodajanjem gumene komponente trdnost betona na enoto mase zmanjšuje v manjšem obsegu kot trdnost na enoto volumna, kar je lahko konstrukcijska prednost.

- Beton z dodatkom mlete gume kljub manjši trdnosti glede na beton brez dodatka gume izkazuje večjo deformabilnost oziroma prenese večjo deformacijo pred porušitvijo. Avtorji članka (Son, 2011) sklepajo, da bi bilo zaradi večje deformabilnosti betone z dodatkom gumenega granulata mogoče uporabiti kot konstrukcijske elemente pri protipotresni gradnji, kjer morajo elementi vzdržati velike deformacije, ne da bi se porušili.
- Logaritemski dekrement (sposobnost dušenja mehanskih vibracij) betona z dodatkom mlete gume je večji kot logaritemski dekrement navadnega betona brez gume. Optimalna vsebnost gumenih delcev za doseganje najboljšega dušenja je bila 30 volumenskih odstotkov. Debelozrnata guma je imela večji vpliv na zvečanje logaritemskega dekrementa kot drobnozrnata guma. Beton z dodatkom gumenega granulata bi lahko uporabili za aplikacije v gradbeništvu, kjer je potrebno dušenje mehanskih vibracij, npr. temelji zgradb in strojev.

5 • LITERATURA

- Aiello, M. A., Leuzzi, F., Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state, *Waste Management*, 30, 1696–1704, 2010.
- Batayneh, M. K., Marie, I., Asi, I., Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries, *Waste Management*, 28, 2171–2176, 2008.
- Benazzouk, A., Mezreb, K., Doyen, G., Goullieux, A., Queneudec, M., Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 25, 711–720, 2003.
- Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Queneudec, M., Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste, *Cement and Concrete Composites*, 28, 650–657, 2006.
- Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Roucoult, J. M., Queneudec, M., Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes, *Cement and Concrete Composites*, 29, 732–740, 2007.
- Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A. K., Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Construction and Building Materials*, 23, 1828–1836, 2009.
- Ghaly, A. M., Cahill, J. D., Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32, 1075–1081, 2005.
- Guneyisi, E., Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash, *Materials and Structures*, 43, 1037–1048, 2010.
- Hernandez-Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, M., Witoszek, B., Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 1587–1596, 2002.
- Jang, J. W., Yoo, T. S., Oh, J. H., Iwasaki, I., Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea, *Resources, Conservation and Recycling*, 22, 1–14, 1998.
- Jingfu, K., Yongqi, J., Improvement of cracking-resistance and flexural behavior of cement-based materials by addition of rubber particles, *Journal of Wuhan University of Technology – Mater. Sci. Ed.*, 579–583, 2008.
- Jingfu, K., Chuncui, H., Zhenli, Z., Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives, *Materials and Structures*, 42, 1117–1124, 2009.
- Khaloo, A. R., Dehestani, M., Rahmatatabadi, P., Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles, *Waste Management*, 28, 2472–2482, 2008.
- Khatib, Z. K., Bayomy, F. M., Rubberized portland cement concrete, *Journal of Materials and Civil Engineering*, 206–213, 1999.
- Li, G., Stubblefield, M. A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B., Development of waste tire modified concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, 2283–2289, 2004.
- Najim, K. B., Hall, M. R., A review of the fresh/hardened properties and applications for plain (PRC) and self-compacting rubberized concrete (SCRC), *Construction and Building Materials*, 24, 2043–2051, 2010.
- Najim, K. B., Hall, M. R., Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete, *Construction and Building Materials*, 27, 521–530, 2012.
- Nashif, A. D., Jones, D.I.G., Henderson J.P., *Vibration Damping*, John Wiley & Sons, Inc., 453 p, 1985.
- Nehdi, M., Khan, A., Cementitious composites containing recycled tire rubber: An overview of engineering properties and potential applications, *Cement, Concrete and Aggregates*, 23, 3–10, 2001.
- Ozbay, E., Lachemi, M., Sevim, U. K., Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption capacity of rubberized concretes with and without slag, *Materials and Structures*, 44, 1297–1307, 2011.
- Paine, K. A., Dhir, R. K., Moroney, R., Kopasakis, K., Use of crumb rubber to achieve freeze thaw resisting concrete, v: Dhir, R.K. (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Concrete for Extreme Conditions*, University of Dundee, Scotland, UK, 486–498, 2002.
- Richardson, A. E., Coventry, K. A., Ward, G., Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content, *Journal of Cleaner Production*, 23, 96–103, 2012.
- Savas, B. Z., Ahmad, S., Fedroff, D., Freez-thaw durability of concrete with ground waste tire rubber, *Transportation Research Record No. 1574*; Transportation Research Board, Washington, DC, 80–88, 1996.
- Segre, N., Joekes, I., Use of tire rubber particles as addition to cement paste, *Cement and Concrete Research*, 30, 1421–1425, 2000.
- Siddique, R., Naik, T. R., Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview, *Waste Management*, 24, 563–569, 2004.
- Skripkunas, G., Grinyas, A., Miškinis, K., Damping properties of concrete with rubber waste additives, *Materials Science (Medžiagotyra)*, 15, 266–272, 2009.
- Son, K. S., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns, *Construction and Building Materials*, 25, 218–226, 2011.

- Steidel, R. F., *An introduction to mechanical vibrations*, 3rd edition, John Wiley & Sons, 439 p, 1989.
- Sukontasukkul, P., Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel, *Construction and Building Materials*, 23, 1084–1092, 2009.
- Taha, M. M. R., Asce, M., El-Dieb, A. S., El-Wahab, M. A. A, Abdel-Hameed, M. E., Mechanical, fracture and microstructural investigations of rubber concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20, 640–648, 2008.
- Tantala, M.W., Lepore, J. A., and Zandi I., *Quasi-Elastic Behavior of Rubber Included Concrete*, Proceedings, 12th International Conference on Solid Waste Technology and Management, 1996.
- Topcu, I. B., The properties of rubberized concretes, *Cement and Concrete Research*, 25 (2), 304–310, 1995.
- Topcu, I. B., Demir, A., Durability of rubberized mortar and concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 173–178, 2007.
- Toutanji, H. A., The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 18, 135–139, 1996.
- Turgut, P., Yesilata, B., Physico-mechanical and thermal performance of newly developed rubber-added bricks, *Energy and Buildings*, 40, 679–688, 2008.
- Zheng, L, Huo, X. S., Yuan, Y., Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete, *Construction and Building Materials*, 22, 939–947, 2008a.
- Zheng, L, Huo, X. S., Yuan, Y., Strength, modulus of elasticity and brittleness index of rubberized concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20, 692–698, 2008b.
- Yesilata, B., Isiker, Y., Turgut, P., Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces, *Construction and Building Materials*, 23, 1878–1882, 2009.
- Yesilata, B., Bulut, H., Turgut, P., Experimental study on thermal behavior of a building structure using rubberized exterior-walls, *Energy and Buildings*, 43, 393–399, 2011.