

Primljen / Received: 18.10.2021.

Ispravljen / Corrected: 26.4.2022.

Prihvaćen / Accepted: 30.5.2022.

Dostupno online / Available online: 10.9.2022.

Ispitivanje mehaničkih svojstava i svojstava smanjenja zračenja običnog i teškog betona s različitim agregatima i vodocementnim omjerima

Autori:



¹Izv.prof.dr.sc. **Ilker Ustabas**
ilker.ustabas@erdogan.edu.tr



²**Mustafa Demirci**, dipl.ing.građ.
mustafa.demirci@erdogan.edu.tr



³Prof.dr.sc. **Hasan Baltas**
hasan.baltas@erdogan.edu.tr



⁴Izv.prof.dr.sc. **Yilmaz Demir**
yilmaz.demir@erdogan.edu.tr



⁵Prof.dr.sc. **Sakir Erdogdu**
shake@ktu.edu.tr



¹**Zafer Kurt**, dipl.ing.građ.
zafer.kurt@erdogan.edu.tr
Autor za korespondenciju



¹**Talip Cakmak**, dipl.ing.građ.
talip.cakmak@erdogan.edu.tr

¹ Sveučilište Recep Tayyip Erdogan, Rize, Turska Fakultet inženjerstva i umjetnosti, Odjel za građevinarstvo

² Sveučilište Recep Tayyip Erdogan, Rize, Turska Tehnička strukovna škola, Program konstrukcijske tehnologije

³ Sveučilište Recep Tayyip Erdogan, Rize, Turska Fakultet znanosti i književnosti, Odjel za fiziku

⁴ Sveučilište Recep Tayyip Erdogan, Rize, Turska Fakultet inženjerstva i umjetnosti, Odjel za geološko inženjerstvo

⁵ Tehničko sveučilište Karadeniz, Trabzon, Turska Fakultet inženjerstva i umjetnosti, Odjel za građevinarstvo

Prethodno priopćenje

Ilker Ustabas, Mustafa Demirci, Hasan Baltas, Yilmaz Demir, Sakir Erdogdu, Zafer Kurt, Talip Cakmak

Ispitivanje mehaničkih svojstava i svojstava smanjenja zračenja običnog i teškog betona s različitim agregatima i vodocementnim omjerima

Ovim istraživanjem predstavljaju se rezultati sveobuhvatnog laboratorijskog rada kojemu je cilj ispitati mehanička svojstva i svojstva smanjenja zračenja teških betona u kojima se kao agregat koristio pirit, krom i magnetit te betona normalne težine koji su se proizveli s tri različita vodocementna omjera ($w/c = 0,4/0,5/0,6$). U laboratoriju su provedena ispitivanja tlačne čvrstoće, brzine prolaska ultrazvuka, eksperimentalni modul elastičnosti te koeficijenta prigušenja mase tih betona. Na temelju provedenih ispitivanja utvrđeno je da betoni normalne težine i teški betoni imaju slično ponašanje u smislu tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. U slučaju teških betona (njihovi w/c omjeri povećani su uslijed konstantne količine vode te smanjene količine cementa), gustoća se povećava zbog povećanja količine agregata veće gustoće u odnosu na cement u sastavu betona. To je razlog zašto teški betoni koji su proizvedeni s većim w/c omjerom te koji su manje čvrstoće mogu apsorbirati više rendgenskih zraka. Koeficijenti prigušenja mase konvergiraju pri visokim energijskim razinama kod teških i normalnih betona različitih gustoća.

Ključne riječi:

teški beton, modul elastičnosti, agregat magnetita, koeficijent prigušenja mase

Research Paper

Ilker Ustabas, Mustafa Demirci, Hasan Baltas, Yilmaz Demir, Sakir Erdogdu, Zafer Kurt, Talip Cakmak

Mechanical and radiation attenuation properties of conventional and heavy concrete with diverse aggregate and water/cement ratios

This paper presents the results of comprehensive laboratory work conducted for investigating the mechanical and radiation attenuation characteristics of heavyweight concrete produced with pyrite, chromium, and magnetite aggregates and normal weight concretes produced with three different water/ cement (w/c) ratios. Various experiments were conducted to determine the compressive strengths, ultrasound transmission velocities, experimental elasticity modules, and mass attenuation coefficients of these concretes. Heavy and normal weight concretes exhibited similar behaviour in terms of compressive strength and elasticity modules. In heavyweight concretes, with increased w/c ratios (by keeping the amount of water constant and decreasing the amount of cement), the corresponding density increased due to the increase in the amount of high-density aggregates rather than cement in the composition of concrete. Thus, heavyweight concretes produced with a high w/c ratio and low strength can absorb more X-rays. Mass attenuation coefficients converge in heavy and normal weight concretes with different densities at high energy levels.

Key words:

heavyweight concrete, elasticity modules, magnetite aggregate, mass attenuation coefficient

1. Uvod

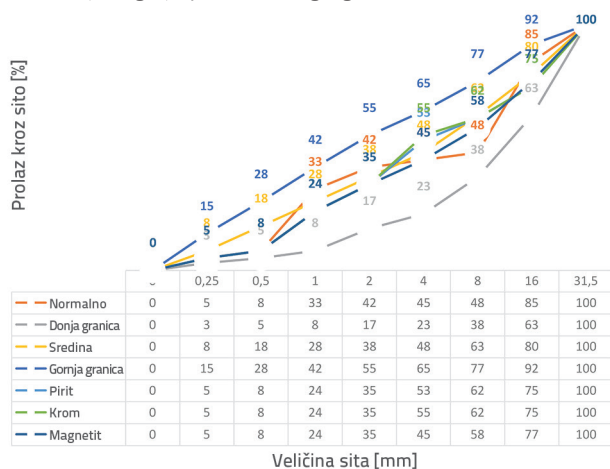
U posljednja dva desetljeća ljudima su vrlo bliska tehnološka postignuća, odnosno uređaji koji zrače. Materijali koji imaju visok koeficijent prigušenja zračenja koriste se kako bi spriječili štetu za okoliš izazvanu uređajima koji zrače. Jedan od takvih proizvoda je beton koji je jeftin, trajan materijal i štiti od radioaktivnog zračenja [1, 2]. Može se koristiti kao zaštitna barijera, pogotovo na mjestima poput nuklearnih postrojenja te radioaktivnih jedinica u bolnicama. Betoni visoke gustoće omogućavaju veću razinu zaštite od zračenja. U tom smislu upotreba agregata visoke gustoće povećava gustoću betona. Prema tome, manje debljine matrijala mogu se koristiti kako bi apsorbirali istu dozu zračenja [3, 4]. U skladu s normom TS EN 206, betoni težine veće od 2600 kg/m³ kategoriziraju se kao teški betoni (eng. *heavyweight concrete* - HWC) [5]. Teški betoni apsorbiraju više zračenja nego konvencionalni (eng. *conventional concrete* - CC) betoni. Mineral velike gustoće najpoželjniji je kod kamena koji se upotrebljava kao agregat u teškom betonu [1, 2, 6]. U literaturi [2, 4, 6-11] istražuju se svojstva apsorpcije betona koja se proizvode od agregata barita, magnetita, serpentina te hematita. Kada su u pitanju mješavine teškog betona koji koristi agregate s velikom jediničnom težinom, najvažnija je stavka određene vodocementnog omjera. Primjenom agregata visoke gustoće može doći do segregacije kod betona visoke konzistencije. Saidani i dr. [2] projektirali su beton čije slijeganje (ispitivano slump-testom) iznosi 10-12 cm kada je riječ o proizvodnji teškog betona s baritom kao agregatom. Lotfi-Omran [12] projektirao je teške betone s magnetitom u ulozi agregata koji omogućava slijeganje od 4 do 8 cm. Slijeganje teškog betona i normalnog betona u ovom istraživanju projektiralo se u iznosu od 18 cm. Na taj način cilj je bio projektirati teški beton koji ima veliku vrijednost slijeganja. Topcu [13] tvrdi da je omjer vode i cementa važan kako bi se smanjila radioaktivna propusnost te pukotina uslijed skupljanja betona. Prochon i dr. [14] tvrdili su da v/c omjer u betonu na bazi granita nije važan u apsorbiranju zračenja, već da je važna vrsta agregata/cementa. Bellum i dr. [15] usporedili su vlastite vrijednosti modula elastičnosti s određenim standardima te modulom elastičnosti za koji su istraživači ustanovili da je između 12.904 GPa i 31.107 GPa. Agregati i cementna veziva koja se koriste u betonu utječu na čvrstoću i elastičnost betona [16-21]. Modul elastičnosti među onim je svojstvima koja poboljšavaju mehanička svojstva betona [16-21]. Međutim, istraživanja pokazuju da postoji ključna korelacija između čvrstoće betona i njegova modula elastičnosti više nego vrste agregata [17, 25] i svojstva apsorpcije zračenja betona. Iako postoje radovi u literaturi vezani uz apsorpciju zračenja, ograničen je broj istraživanja koja se tiču apsorpcije zračenja teških betona. Prvi put se raspravlja o svojstvima apsorpcije zračenja teških betona dobivenih s agregatom poput kroma i piritita, a koji su se dobiveni od rude kroma i piritita. Odabrana su tri različita v/c omjera (0,4, 0,5 i 0,6) kako bi se odredio utjecaj v/c omjera na prigušenje zračenja kod teškog betona. Glavni je cilj ovog rada ispitati utjecaj različitih teških agregata (pirit, krom i magnetit) na ponašanje betona kada je u pitanju apsorpcija

zračenja. Provedeno je nekoliko eksperimenata koji uključuju ispitivanje tlačne čvrstoće, brzine prolaska ultrazvuka, tvrdoće i modula elastičnosti na konvencionalnim i teškim betonima koji su proizvedeni s različitim vrstama agregata (s normalnim agregatom, piritom, kromom i magnetitom). Trebalo se ispitati na koji način normalni i teški agregati utječu na modul elastičnosti običnih i teških betona. Zato je istražen utjecaj vrste teškog agregata na svojstva čvrstoće betona. Štoviše, procijenjene su konstante prigušenja zračenja mase konvencionalnih i teških betona.

2. Materijali i metode

2.1. Materijali

U proizvedenim betonima korišten je cement tipa CEM I42.5 R. Kao agregat korišteni su pirit, krom i magnetit prikupljeni u oblastima Kop (Bayburt), Murgul (Artvin) i Araklı (Trabzon) u Turskoj. Agregati piritita, kroma i magnetita samljeveni su u drobilnici, popotom i prosijan, a onda su grube i sitne frakcije agregata odvojene. Tada je teški beton proizveden s agregatom piritita (HWC-P) u v/c omjeru koji iznosi 0,4 do 0,6, teški beton s agregatom kroma (HWC-C), teški beton s agregatom magnetita (HWC-M) te konvencionalni beton (CC). Provedena je XRF analiza dijelova uzetih s konvencionalnog betona i teškog betona na materijalu u prahu. Tablica 1. prikazuje rezultate XRF analize betona. Izmjerena količina MgO u HWC-C betonu bila je između 15 % i 20 %. To je zato što MgO u agregatu kroma koji se koristi u betonu HWC-C iznosi 23 %. Količina FeS u betonu HWC-P procijenjena je kao količina Fe₂O₃ i SO₃. Razlog zašto je velika količina SO₃ u betonima s HWC-P jest taj što se sumpor (S) u FeS-u procijenjen kao SO₃. Višak MgO i SO₃ u cementu izaziva probleme u vezi s postojanošću volumena i vezivanja. U ovom istraživanju MgO je prisutan u agregatu kroma.



Slika 1. Rezultati prosijavanja agregata koji se koriste u CC, HWC-P, HWC-C i HWC-M

Slika 1. prikazuje krivulje raspodjele veličine čestica čime se predlaže konvencionalni beton prema TS802 te granulometrijske

Tablica 1. Kemijski sastav betona s v/c omjerom 0,4, 0,5 i 0,6 (izraženo u %)

	CC			HWC-P			HWC-C			HWC-M		
	0,40	0,50	0,60	0,40	0,50	0,60	0,40	0,50	0,60	0,40	0,50	0,60
LOI	4,8	4,3	3	6,04	6,14	6,64	7,5	6,9	6,5	6,9	6,5	6
Al ₂ O ₃	11	11,3	12	2,58	3,08	3,24	6,89	7,42	7,26	3,37	4,07	3,23
BaO	0,04	0,05	0,04	0,029	0,04	0,03	0	0	0	0,03	0,04	0,03
CaO	11,2	9,72	6,79	7,47	6,83	4,91	11,7	6,67	4,85	23,4	22	21,8
Cr ₂ O ₃	0,009	0,009	0,01	0,055	0,024	0,063	19,3	25,9	26,7	0,023	0,023	0,045
Fe ₂ O ₃	3,61	3,58	3,78	7,79	8,16	8,36	12,4	13,7	13,3	24,7	22,7	28,5
K ₂ O	0,89	1,06	0,92	0,75	0,66	0,74	0,5	0,37	0,31	0,46	0,61	0,38
MgO	1	0,97	1,11	0,67	0,48	0,48	15,2	17,5	20	1,87	1,76	2,19
MnO	0,1	0,09	0,1	0,06	0,04	0,04	0,21	0,17	0,15	0,84	0,93	0,93
Na ₂ O	3,89	3,84	4,33	0,43	0,42	0,36	0,31	0,19	0,14	0,46	0,8	0,42
P ₂ O ₅	0,077	0,078	0,077	0,045	0,037	0,029	0,043	0,02	0,015	0,142	0,138	0,193
SO ₃	0,5	0,45	0,38	11,05	12,64	13,45	0,63	0,4	0,3	0,72	0,94	0,42
SiO ₂	61,8	63,3	66,2	63,2	61,6	61,3	22,8	19,3	19,1	35,9	38,3	34,9
TiO ₂	0,32	0,33	0,35	0,1	0,09	0,09	0,15	0,15	0,14	0,09	0,1	0,08
V ₂ O ₅	0,015	0,014	0,011	0,019	0,016	0,012	0,056	0,069	0,066	0,014	0,014	0,012
ZnO	0,01	0,017	0,013	0,038	0,032	0,026	0,089	0,045	0,039	0,361	>1,000	0,456
ZrO ₂	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0	0	0	0,02	0	0,01
Ukupno	99,29	99,17	99,16	100,34	100,30	99,79	98,8	99,6	100,39	99,33	100,14	99,58

CC: obični beton; HWC-P: teški beton s piritom; HWC-C: teški beton s kromom; HWC-M: teški beton s magnetitom

Tablica 2. Vrijednosti specifične težine i apsorpcije vode agregata

	Normalni agregati			Magnetit			Pirit			Krom		
	Krupni 1	Krupni 2	Fini	Krupni 1	Krupni 2	Fini	Krupni 1	Krupni 2	Fini	Krupni 1	Krupni 2	Fini
SG	2,61	2,64	2,51	3,30	3,36	3,07	4,52	4,74	4,31	3,40	3,18	3,07
WA (%)	1,39	0,85	3,43	2,43	0,46	10,3	1,47	0,60	3,62	0,92	0,64	6,11

Krupni 1: najdeblji agregat; Krupni 2: agregat srednje veličine; Fini: najtanji agregat; SG - specifična težina (eng. *specific gravity*); WA - apsorpcija vode (eng. *water absorption*)

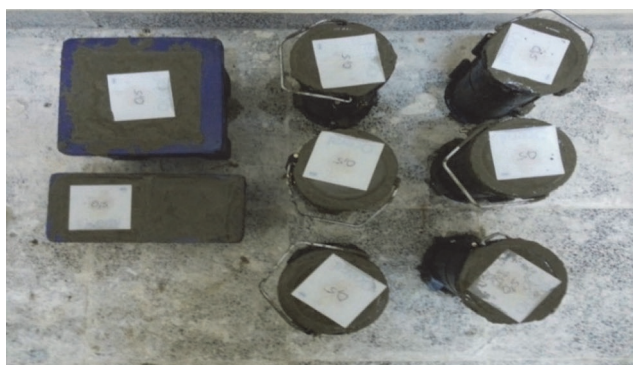
krivulje agregata koji se koriste u konvencionalnom betonu i HWC betonu. Tablica 2. prikazuje vrijednosti specifične težine i apsorpcije vode za agregate u betonu.

2.2. Sastojci mješavina

Uzorci betona izrađeni su upotrebom cementa CEM I 42.5R i normalnog agregata, agregata pirita, magnetita i kroma, oblika valjka dimenzija 100/200 (promjer/duljina, mm) te kockastog oblika dimenzija 150 x 150 x 150 mm, kao što to prikazuje slika 2.

Kako bi se ispitala mehanička i svojstva zračenja teških betona, proizvedeni su se betoni kod kojih dolazi do slijeganja od 18 cm, prema sastojcima prikazanim u tablici 3. što je u skladu s TS 802. Betoni su proizvedeni uz pomoć tri različita teška agregata te jednog normalnog agregata s tri različita v/c omjera (0,4, 0,5 i 0,6). Količine materijala za mješavine prikazane su u tablici 3.,

a ovisi o vrsti agregata. Zadržana je ista količina vode u svim mješavinama kako bi vezanje betona bilo podjednako. U sve betone dodano je 190 kg vode na kubični metar betona. Betoni su miješani miješalicom volumena 16 litara.



Slika 2. Oblikovanje cilindričnih i kockastih betonskih uzoraka

Tablica 3. Betonske mješavine

Vrste betona	Omjer v/c	Cement [kg]	Voda [kg]	Agregati [kg]			Kemijski dodatak [kg]	Ukupno [kg]	Slijevanje betona [mm]
				Krupni 1	Krupni 2	Fini			
CC	0,40	475	190	427	511	642	14,25	2259,25	185
	0,50	380	190	452	540	679	7,60	2248,60	195
	0,60	317	190	468	560	703	3,17	2241,17	210
HWC-M	0,40	475	190	525	619	711	14,25	2534,25	190
	0,50	380	190	555	655	751	7,60	2538,6	195
	0,60	317	190	575	678	779	3,17	2542,17	200
HWC-P	0,40	475	190	750	850	886	14,25	3165,25	150
	0,50	380	190	793	899	937	7,60	3206,6	165
	0,60	317	190	821	931	971	3,17	3233,17	160
HWC-C	0,40	475	190	538	616	726	14,25	2559,25	175
	0,50	380	190	569	651	767	7,60	2564,6	175
	0,60	317	190	589	654	795	3,17	2568,17	165

2.3. Metode ispitivanja

Jednoosne tlačne čvrstoće betonskih uzoraka starosti 90 dana ispitane su primjenom mehaničke preše UTEST (slika 3.) prema normi TS EN 12350-3. Brzina prolaska ultrazvuka kroz betonske uzorke te njihova površinska tvrdoća određeni su primjenom ultrazvučnog uređaja te Schmidtovog čekića (Proceq). Izmjerene su lateralne i aksijalne promjene duljine betona koje su u skladu s primijenjenom tlačnim opterećenjem (σ). Eksperimentalno je određen modul elastičnosti na temelju omjera koji prikazuje naprezanja i deformacije (ϵ), što je izmjerila preša. Izračunana su tri modula elastičnosti betona. To su modul tangente, modul sekante (statički) te modul tetive. Statički modul elastičnosti izračunan je iz nagiba linije kojom se spaja početna točka s vrijednošću koja odgovara 40 % vrijednosti krajnje tlačne čvrstoće na σ - ϵ krivulji. Tangentni modul elastičnosti izračunan je na temelju izbočenja tangente na $0,4 \times f_{ck}$ u odnosu na krivulju σ - ϵ . Modul tetive izračunan je na temelju izbočenja linije kojim se povezuje vrijednost deformacije koja iznosi 50×10^{-6} krivulje σ - ϵ i 40 % tlačne čvrstoće.

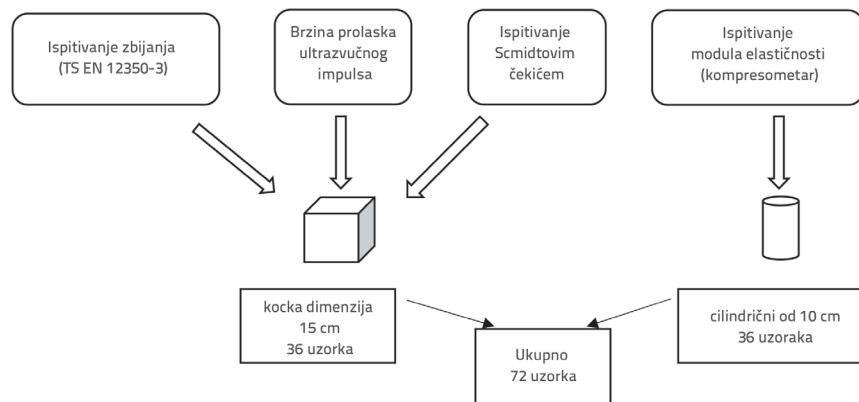
U istraživanju su se koristila tri testna uzorka za svaku skupinu betona. Prije nanošenja tlačnog opterećenja na betonskim kockama stranice od 15 cm, izmjerene su vrijednosti brzina prolaska ultrazvuka i površinske tvrdoće. Zatim su izmjerene tlačne čvrstoće za svaku skupinu betonskih uzoraka. Za određivanje vrijednosti tlačne čvrstoće, brzine prolaska ultrazvuka i površinske tvrdoće ispitano ju i 36 uzoraka promjera 15 cm. Osim toga, 36 cilindričnih betonskih uzoraka (D/H: (10/20 cm)

korištena su kako bi se izmjerio modul elastičnosti. Slika 4. prikazuje program ispitivanja.



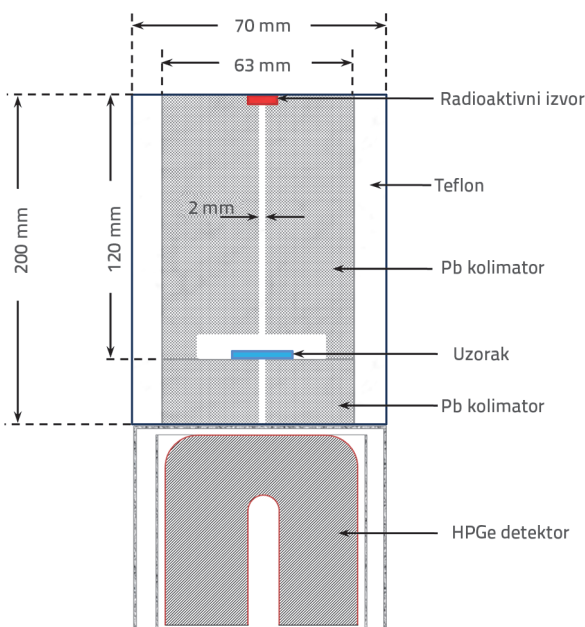
Slika 3. Preša za ispitivanje čvrstoće betona i kompresometar kojim se mjeri modul elastičnosti

Betoni koji su odrezani s proizvedenog betonskog uzorka samljeveni su u prstenastom mlinu i pretvoreni u prah. Kako bi ispario višak vode na uzorcima, ostali su jedan dan u pećnici na 105°C . Uzorci težine 4 g pripremljeni su za analizu



Slika 4. Program ispitivanja

i to prešanjem uz pomoć hidraulične preše pod pritiskom od 7 tona u trajanju od 20 sekundi u promjeru 40 mm. Kako bi se odredili koeficijenti prigušenja mase, provedena su ispitivanja primjenom uređaja proizvođača ORTEC modela GEM25P4-76 koji ima poluvodič HPGe za detektiranje gama-zračenja s 25 % relativne učinkovitosti te 1,33 MeV snage razlikovanja koja iznosi 1,70 keV. U svrhu eksperimentalnih istraživanja proizvedena je geometrija uskog snopa koju prikazuje slika 5.



Slika 5. Eksperimentalna geometrija primjenjena u mjerenjima koeficijenata prigušenja mase [26]

Kako bi se poništili geometrijski utjecaji na konvencionalni beton tijekom promjene uzorka/izvora, u ispitnoj se geometriji ostavljaju nezavisni prozori. Izmjereni su koeficijenti prigušenja mase u slučaju pet različitih energetske vrijednosti u rasponu od 59,5, 122, 661 i 1332 keV. Primjenom Lambert-Beerova zakona izračunani su koeficijenti prigušenja mase za materijale prema izrazu (1):

$$I = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} d} \quad (1)$$

gdje μ/ρ predstavlja koeficijent prigušenja mase materijala (cm^2/g), a d je površinska gustoća uzorka (g/cm^2). Količina I_0 je intenzitet snopa koji se emitira kroz izvor pod punim kutom u geometriji uskog snopa, a I je količina propuštanja uzorka i dosezanja detektora. Kako bi se izmjerio intenzitet (I_0) snopa koji se emitira od izvora i doseže detektor, mjerenje je provedeno bez postavljanja upijajućeg uzorka između izvora i detektora.

Zatim je određen intenzitet (I) snopa koji propušta uzorak i doseže detektor tako što je upijajući uzorak stavljen između njih tijekom mjerenja. Svako se mjerenje ponavljalo tri puta u trajanju od 5000 s.

2.4. Ispitne metode

Brzina ultrazvuka govori nešto o čvrstoći betona. Uređaj šalje i prima signale iz prijavnika i odašiljača kroz medij. Mjeri brzinu difuzije u betonu. Provedena su ispitivanja na cilindričnim uzorcima dimenzija 100 x 200 mm kako bi se izmjerila brzina prolaska. Niskofrekvencijski signali koje stvara uređaj prenose se iz unutrašnjosti uzorka na suprotnu stranu. Mjerni pretvarač to detektira na krajevima, a signali se prenose kroz uzorak. Određuju se vremena potrebna za prolazak. Vrijeme prolaska ovisi o gustoći uzorka i stoga daje informacije o kvaliteti. Sonde ultrazvučnog uređaja, na koje se stavlja gel, prislanjaju se na dvije suprotne, paralelne čiste plohe uzorka. Brzina prolaska zvuka (V) dobiva se prema izrazu (2), [28]:

$$v = \frac{L}{t} \quad (2)$$

Gdje su:

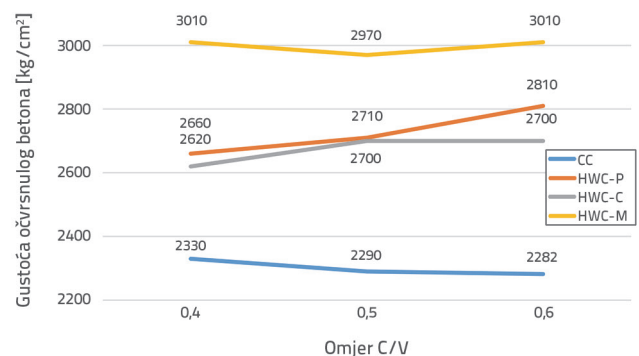
V - ultrazvučna brzina [m/s]

L - duljina prolaska [m]

T - vrijeme prolaska [s].

3. Rezultati i rasprava

Tablica 4. prikazuje jedinične volumenske težine svježeg i očvrstnalog betona, tlačnu čvrstoću, površinsku tvrdoću i brzinu prolaska ultrazvuka koje očitava Schmidtov ispitni čekić na CC, HWC-P, HWC-C, HWC-C i HWC-M betonima. Vrijednosti iz tablice 4. prosječne su vrijednosti dobivene iz tri uzorka betona.



Slika 6. Gustoće očvrstnalog betona u konvencionalnom betonu i teškim betonima s agregatom pirita, kroma i magnetita

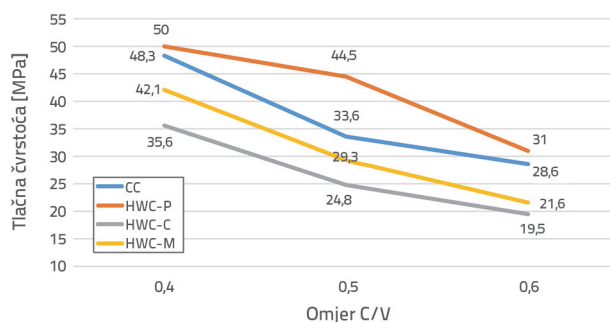
U očvrstnulim betonima s gustoćama koje su prikazane na slici 6. količina je vode konstantna, a količina cementa se povećava, dok se omjeri vode i cementa smanjuju. U sastav betona uključeno je više cementa pri čemu se smanjuje omjer v/c u konvencionalnom betonu. Povećanje v/c omjera razlogom je pada gustoće betona zbog smanjenja količine cementa koji je pridružen konvencionalnom betonu. Razlog je taj što je gustoća cementa veća nego gustoća agregata. Najveća gustoća među razmatranim uzorcima zabilježena je kod betona CC koji ima v/c omjer u iznosu 0,4, a CC beton ima najnižu gustoću čiji v/c omjer

Tablica 4. Vrijednosti gustoće, tlačne čvrstoće, površinske tvrdoće i ultrazvučnih brzina prolaska običnog betona (CC), HWC-P, HWC-C i HWC-M betona koji su proizvedeni s različitim omjerima vode i cementa

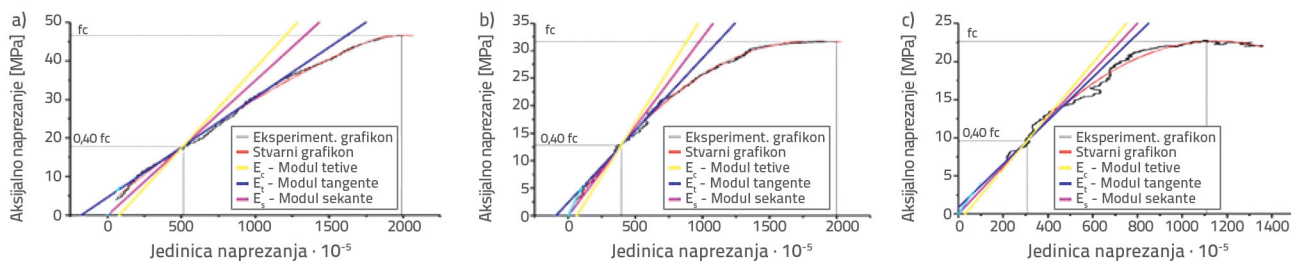
Vrste betona	v/c omjer	Gustoća svježeg betona [kg/m ³]	Gustoća očvrstnalog betona [kg/m ³]	Kockasti uzorci dimenzija 15 cm tlačna čvrstoća [N/mm ²]	Schmidtov testni čekić vrijednosti površinske tvrdoće	Brzine prolaska ultrazvuka [km/s] na kockastim uzorcima dimenzija 15 cm
CC	0,4	2297	2330	48,3	31	4,73
	0,5	2288	2290	33,6	29	4,49
	0,6	2282	2300	28,6	27	4,59
HWC-P	0,4	2601	2660	50,0	38	4,63
	0,5	2610	2710	44,5	34	4,46
	0,6	2615	2810	31,0	27	4,39
HWC-C	0,4	2604	2620	35,6	35	4,53
	0,5	2613	2700	24,8	25	4,57
	0,6	2619	2700	19,5	22	4,20
HWC-M	0,4	3213	3010	42,1	30	4,53
	0,5	3257	2970	29,3	28	4,62
	0,6	3286	3010	21,6	24	4,66

iznosi 0,6. U teškim betonima uočeno je suprotno. Povećanjem omjera v/c povećava se gustoća betona. Slika 6. prikazuje kako se povećanjem v/c omjera u HWC betonima smanjuje količina cementa koji se dodaje betonu, a povećava se količina agregata. To je zato što je gustoća agregata veća od gustoće cementa. Saidani i dr. [2] zamjenjuju agregat vapnenca za grubi agregat s baritom (čija gustoća iznosi 4,06 g/cm³) u betonima s v/c omjerom od 0,5 koje su proizveli u svom istraživanju te zamjenjuju gustoće stvrdnutog betona, a otkrilo se da su u rasponu od 32 do 2,48 g/cm³. Saidani i dr. [2] u svom betonu koristili su agregat vapnenca. U ovom istraživanju, budući da je fini agregat koji se koristio u HWC betonima bio teški agregat fine frakcije, gustoća je očvrstnalog betona u betonima čiji v/c omjer iznosi 0,5, iznosila između 2,7 i 2,97 g/cm³. S obzirom na to, proizvedeni su HWC betoni s agregatom velike gustoće, čak veće od 2,6 g/cm³. Prema Saidani i dr. [2], da se primijeni fini agregat niske gustoće, tada bi gustoća očvrstnalog betona ostala ispod 2,6 g/cm³ u ovom istraživanju. Da bi se odredili koeficijenti prigušenja mase, Sharifi i dr. [6] proizveli su betone gustoća 3,35 do 2,6 i 5,1 g/cm³ primjenom barita, serpentina i magnetita te su mjerili svojstva prigušenja zračenja na tim betonima. Otto i dr. [4] proizveli su betone koji imaju 100 % agregata magnetita i čija je gustoća 2,78 g/cm³ te teške betone koji imaju v/c omjer

u iznosu od 0,5. U ovom istraživanju izmjerena je gustoća betona s agregatom magnetita koji imaju v/c omjer u iznosu od 0,5 i ona iznosi 2,97 g/cm³. Lotfi-Omran i dr. [12] tvrde da se smanjenjem v/c omjera u teškim betonima koji su proizvedeni s magnetitom smanjuje i gustoća teškog betona. Kako je gustoća cementa u teškom betonu manja nego kod agregata magnetita, povećanjem količine cementa i smanjenjem v/c omjera gustoća teškog betona se smanjuje. U ovom istraživanju, okolnosti su slične onima koje su opisali Lotfi-Omran i dr. [12], otkriven je u slučaj agregata pirita, kroma i magnetita.



Slika 7. Tlačne čvrstoće izmjerene u konvencionalnom betonu i teškom betonu



Slika 8. Krivulje prikazuju odnos naprezanje-deformacija konvencionalnog betona nakon 90 dana njege, s različitim v/c omjerima: a) v/c = 0,4; b) v/c = 0,5; c) v/c = 0,6

Tablica 5. Modul elastičnosti za CC, HWC-C, HWC-P i HWC-M betone

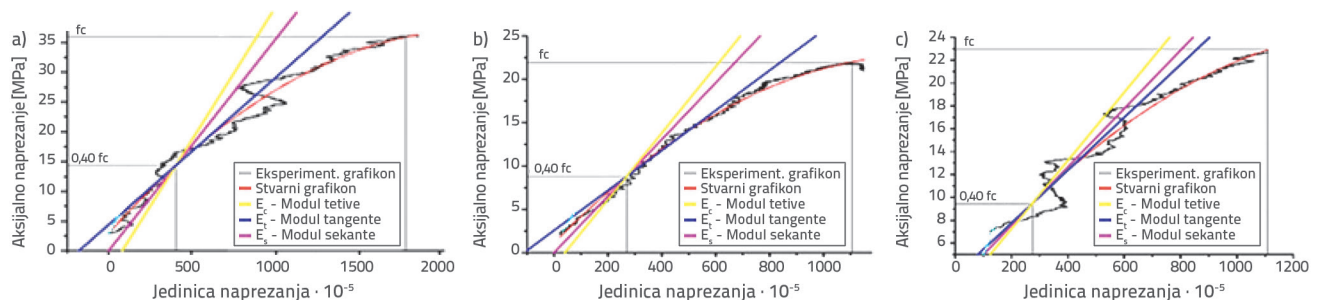
Vrste betona	Omjer V/C	Tlačna čvrstoća f_c [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]		
			Tangentni	Sekantni	Modul tetive
Obični betoni CC	0,4	46,50	31,630	36,214	36,471
	0,5	31,70	34,750	34,270	39,625
	0,6	22,80	32,350	26,824	31,448
HWC-C	0,4	36,20	30,920	35,692	30,919
	0,5	31,80	31,810	37,913	31,809
	0,6	22,90	29,220	26,941	29,219
HWC-P	0,4	53,00	32,950	38,545	32,949
	0,5	43,80	36,230	29,200	36,229
	0,6	33,50	25,260	28,511	25,590
HWC-M	0,4	40,50	38,540	36,400	36,000
	0,5	27,00	29,310	32,241	35,000
	0,6	18,00	14,260	21,818	25,714

Slika 7. prikazuje tlačne čvrstoće izmjerene na kockastim uzorcima dimenzija 15 cm CC, HWC-P, HWC-C i HWC-M betonima. Povećanjem v/c omjera smanjuje se tlačna čvrstoća betona. HWC-P ima najveću tlačnu čvrstoću, a HWC-C najmanju. Saidani i dr. [2] dobili su tlačne čvrstoće betona od 28 do 40 MPa u betonu s normalnim agregatom te u betonu s agregatom barita koji imaju v/c omjer 0,5. U ovom istraživanju otkrilo se da su tlačne čvrstoće između 25 i 45 MPa.

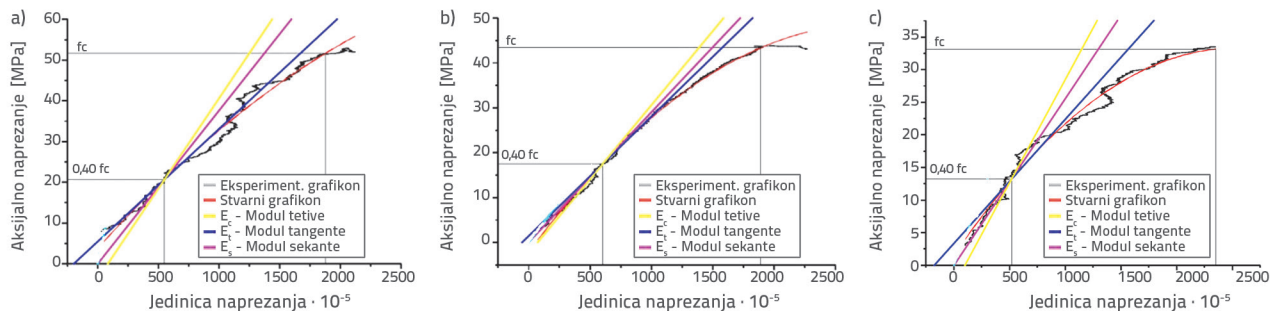
Saidani i dr. [2] otkrivaju kako je tlačna čvrstoća u betonima koji imaju 100 % agregata barita vrlo blizu tlačne čvrstoće HWC-M. Jednako tako, primjena finog agregata pirita povećala je čvrstoću betona. U ovom istraživanju, smanjenjem v/c omjera povećava se čvrstoća betona i on je gušće strukture. Tablica 2. prikazuje kako se povećava otpornost na tlak u betonima čiji se v/c omjer smanjuje. U betonima velike čvrstoće povećavaju se vrijednosti dobivene Scmidtovim testnim čekićem te brzina prolaska ultrazvuka. Tlak i duljina jedinice mijenjaju se u cilindričnim uzorcima s CC, HWC-P, HWC-C, HWC-M dimenzija 11/200 (mm/mm), a omjer promjera/duljine prikazan je na slici 8. Na temelju krivulja koje prikazuju odnos naprezanje-deformacija izračunani su sekantni, tangentni modul elastičnosti te modul tetive. Slika 8. prikazuje krivulje odnosa naprezanje-deformacija koji se dobije u običnom betonu s v/c omjerima 0,40 (a), 0,5 (b) i 0,6 (c).

Tablica 5. prikazuje izračunane vrijednosti modula elastičnosti. Uočava se da elastični moduli iz tablice 5. variraju između 26.824 GPa i 42.350 GPa. Povećanjem čvrstoće betona povećavaju se elastični moduli. Međutim, uočavaju se odstupanja u mjerenjima naprezanja i elastičnosti kad su u pitanju eksperimentalna mjerenja modula elastičnosti primjenom mehaničke preše (tablica 5.)

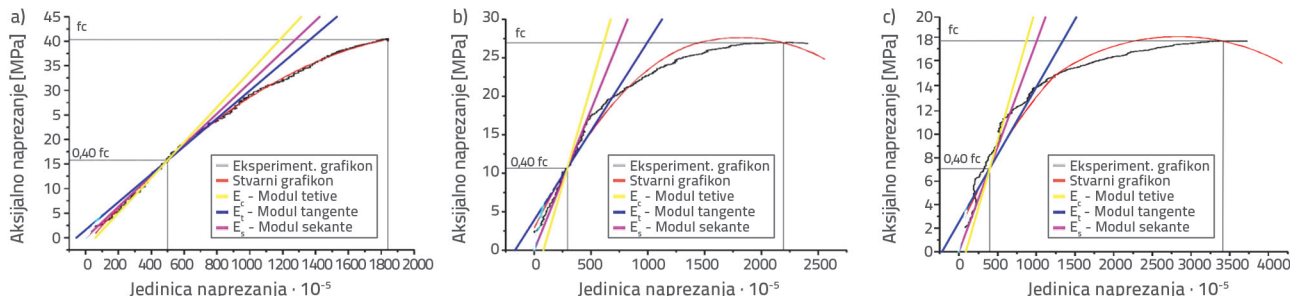
Slike 9. do 11. prikazuju krivulje odnosa naprezanja i deformacije teških betona. Povećanjem v/c omjera u CC, HWC-P, HWC-C i HWC-M povećani su tlačna čvrstoća i moduli elastičnosti betona. Što se tiče vrste agregata, nije uočena značajnija razlika između CC i HWC betona koji ovise o vrsti agregata. Bellum i dr. [15] izračunali su eksperimentalne statičke module između 13.362 GPa i 20.196 GPa u betonima koji imaju tlačnu čvrstoću koja iznosi 15,46 MPa, odnosno 38,24 MPa. Bilir [25] je usporedio eksperimentalne elastične module u betonima velike tlačne čvrstoće u rasponu od 70 do 100 MPa s elastičnim modulima koji su u skladu s preporučenim normama između 28 i 43 GPa. Yıldırım i Sengül [17] otkrili su da su elastični moduli u normalnim betonima između 15 i 50 GPa, što ovisi o v/c omjeru. U ovom istraživanju opisuju se moduli elastičnosti betona i uočava se da su oni kompatibilni s istraživačima [15, 18, 19].



Slika 9. Krivulje prikazuju odnos naprezanje-deformacija HWC-C nakon 90 dana njege s različitim v/c omjerima: a) v/c = 0,4; b) v/c = 0,5; c) v/c = 0,6



Slika 10. Krivulje prikazuju odnos naprezanje-deformacija HWC-P te nakon 90 dana njeges različitim v/c omjerima: a) v/c = 0,4; b) v/c = 0,5; c) v/c = 0,6



Slika 11. Krivulje prikazuju odnos naprezanje-deformacija za beton s agregatom magnetita nakon 90 dana njeges različitim v/c omjerima: a) v/c = 0,4; b) v/c = 0,5; c) v/c = 0,6

Yıldırım i Sengul [17] pripremili su beton različitih mješavina i otkrili da su vrijednosti statičkih modula elastičnosti između 15 i 90 GPa. Na slici 11. vide se elastični moduli sekante (statički) koji su eksperimentalno izmjereni s agregatima, a koji imaju normalne agregate, pirit, krom i magnetit. Modul sekante otkriven zahvaljujući ispitnim mjerjenjima povećava se smanjenjem omjera v/c betona. Međutim, povećanje tlačne čvrstoće betona zbog smanjenja omjera v/c u betonu uzrokom je razlike u izračunu elastičnih modula nekih betona kad je u pitanju mjerenje elastičnih modula. Elastični modul betona s omjerom v/c u iznosu od 0,4 na slici 11. manji je nego elastični modul normalnog betona s omjerom v/c u iznosu od 0,5. Nadalje, na slici 11. elastični modul betona s agregatom magnetita u omjeru v/c u iznosu od 0,4 manji je nego elastični modul s omjerom v/c u iznosu od 0,5. Eksperimentalno gledano, mjerenje elastičnog modula betona vrlo je osjetljivo, a razlike se uočavaju kako je ovdje navedeno.

Modul elastičnosti betona normalne težine prema TS 500 izračunan je izrazom (3):

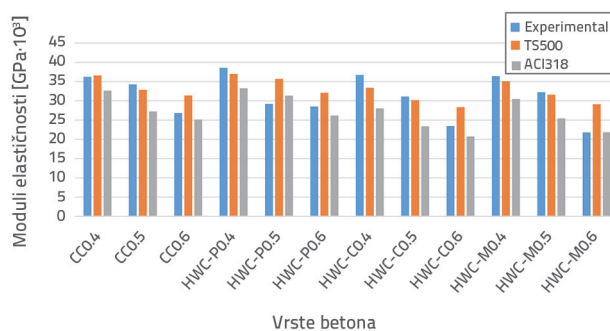
$$E_{cj} = 3250\sqrt{f_{ckj}} + 14000 \tag{3}$$

U skladu s normom ACI 318 M-95,

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \tag{4}$$

Uočava se da se elastični moduli izračunani formulom koja se predlaže prema TS 500 veći nego elastični moduli izračunani na temelju odnosa koji se predlaže normom ACI 318M-95. Na slici 12. uočava se da elastični moduli izračunani eksperimentalno u

ovom istraživanju imaju vrijednosti koje su blizu vrijednostima elastičnih modula koje predlažu obje norme. Na elastične module teškog betona ne utječe razlika u gustoći agregata te su pokazali ponašanje slično ponašanju modula elastičnosti konvencionalnog betona.

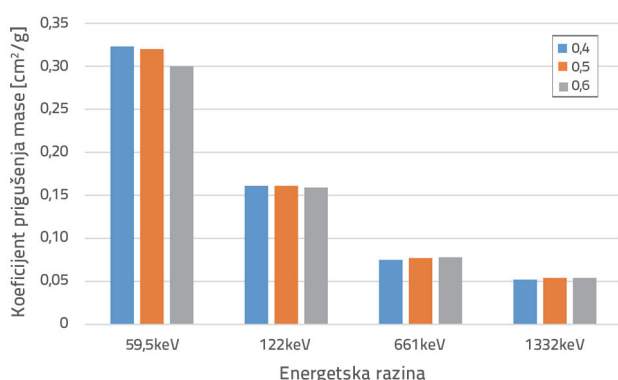


Slika 12. Sekantni modul elastičnosti betona

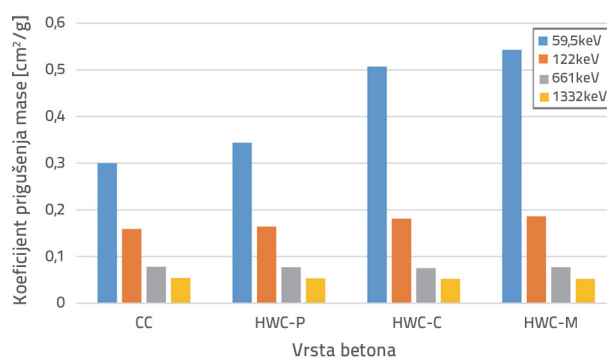
Tablica 6. prikazuje eksperimentalne i teorijske koeficijente apsorpcije mase betona. Slika 13. prikazuje koeficijente apsorpcije mase pri energetske razinama koje iznose 59,5-122-661 i 1332 keV u konvencionalnom betonu čiji v/c omjeri iznose 0,4, 0,5 i 0,6. Kako se v/c omjer smanjuje pri niskim energetske razinama od 59,5 i 122 keV, gustoća se betona povećava te se povećava koeficijent apsorpcije mase u betonima velike gustoće. U konvencionalnim betonima na slici 13. betoni s v/c = 0,4 imaju najveći koeficijent apsorpcije mase pri energetske razinama 59,5 i 122 keV, a slijede ga betoni s omjerom v/c = od 0,5 i 0,6. Otto i dr. [4] izračunali su koeficijente apsorpcije mase u rasponu od 0,7 do 0,05 pri energetske

Tablica 6. Eksperimentalni i teorijski koeficijenti prigušenja mase

Energetska razina		Koeficijenti prigušenja mase prema energetske razinama [cm ² /g]							
		59,5 keV		122 keV		661 keV		1332 keV	
Vrste betona	v/c omjer	Eksperimentalni	Teorijski	Eksperimentalni	Teorijski	Eksperimentalni	Teorijski	Eksperimentalni	Teorijski
CC	0,4	0,323 ± 0,007	0,317	0,161 ± 0,004	0,160	0,075 ± 0,001	0,077	0,052 ± 0,001	0,055
	0,5	0,320 ± 0,007	0,314	0,161 ± 0,004	0,159	0,077 ± 0,001	0,077	0,054 ± 0,001	0,055
	0,6	0,300 ± 0,007	0,304	0,159 ± 0,004	0,158	0,078 ± 0,001	0,077	0,054 ± 0,001	0,055
HWC-C	0,4	0,490 ± 0,009	0,484	0,179 ± 0,004	0,178	0,076 ± 0,001	0,076	0,052 ± 0,001	0,054
	0,5	0,513 ± 0,009	0,507	0,182 ± 0,004	0,180	0,075 ± 0,001	0,076	0,051 ± 0,001	0,054
	0,6	0,507 ± 0,009	0,500	0,181 ± 0,004	0,179	0,075 ± 0,001	0,076	0,052 ± 0,001	0,054
HWC-M	0,4	0,523 ± 0,009	0,517	0,184 ± 0,004	0,183	0,077 ± 0,001	0,077	0,053 ± 0,001	0,054
	0,5	0,511 ± 0,009	0,506	0,183 ± 0,004	0,181	0,077 ± 0,001	0,077	0,054 ± 0,001	0,054
	0,6	0,543 ± 0,009	0,537	0,186 ± 0,004	0,185	0,077 ± 0,001	0,076	0,052 ± 0,001	0,054
HWC-P	0,4	0,346 ± 0,007	0,340	0,164 ± 0,004	0,163	0,078 ± 0,001	0,077	0,052 ± 0,001	0,055
	0,5	0,347 ± 0,007	0,341	0,164 ± 0,004	0,163	0,077 ± 0,001	0,077	0,053 ± 0,001	0,055
	0,6	0,344 ± 0,008	0,337	0,164 ± 0,005	0,162	0,077 ± 0,001	0,077	0,053 ± 0,001	0,055



Slika 13. Koeficijenti apsorpcije mase običnog betona (CC) koji imaju v/c omjer 0,4, 0,5 i 0,6



Slika 14. Koeficijenti prigušenja mase običnog betona (CC) čiji je v/c omjer 0,60 te HWC-P, HWC, HWC-C i HWC-M prema različitim energetske razinama

razinama u rasponu od 59,5 do 1332 keV za konvencionalne betone te betone magnetnim agregatom čija gustoća je u rasponu od 2,58 do 2,78 g/cm³.

Sharifi i dr. [6] izračunali su koeficijente apsorpcije mase u iznosu od 0,0788 do 0,056 i 0,0781 do 0,052 cm²/g pri energetske razini 661 keV, odnosno 1332 keV u

konvencionalnim betonima gustoće 3,35 g/cm³ i 2,33 g/cm³. Shams i dr. [7] otkrili su da su koeficijenti prigušenja mase na energetske razini 1132 u betonima koji imaju 100 % agregata barita i hematita čije su gustoće 3,061, odnosno 3,007 g/cm³ bili jednaki 0,043 cm²/g. Istraživači koji se bave koeficijentima prigušenja mase za betone s agregatima barita, hematita i magnetita tvrde da se beton može proizvesti primjenom tih agregata te se mogu poboljšati njihova svojstva apsorpcije zračenja [4, 6, 7]. Uočava se da se teški betoni mogu proizvesti s agregatima pirita, kroma i magnetita koji se koriste u ovom istraživanju te da ti teški betoni mogu apsorbirati više rendgenskih zraka nego što to mogu konvencionalni betoni. Apsorpcija mase teškog betona u ovom istraživanju u skladu je s odgovarajućim istraživanjima u literaturi [4, 6, 7, 21]. Koeficijenti prigušenja mase konvencionalnih i teških betona jednaki su pri 661 keV, odnosno 1332 keV rastuće energetske razine, kao što to prikazuje slika 14. Yılmaz i dr. [27] otkrili su teorijski koeficijent prigušenja mase od 0,078 cm²/g pri energetske razini od 661 keV u uzorcima žbuke čija je gustoća između 1,89 g/cm³ i 2,09 g/cm³. Pri velikim energetske razine poput 661 i 1332 keV, iako je gustoća betona drugačija, koeficijenti prigušenja mase približavaju se jedan drugome, pa čak imaju istu vrijednost. U betonima s najnižom gustoćom stvrdnutog betona od 2,282 g/cm³ te najvišom gustoćom stvrdnutog betona s agregatom magnetita od 3,01 g/cm³ koeficijenti prigušenja mase betona su isti pri energetske razine od 661 i 1332 keV. Teški betoni proizvode se tako da im je količina vode konstantna s visokim omjerom vode i cementa, a koji ujedno apsorbiraju više rendgenskog zračenja. Gustoća betona važan je čimbenik u apsorpciji zračenja. Može se proizvesti beton niže čvrstoće, ali s boljom apsorpcijom zračenja. Slika 14. prikazuje eksperimentalno izmjerene koeficijente apsorpcije mase konvencionalnih betona koji imaju v/c omjer u iznosu od 0,6 te teških betona s agregatima pirita, kroma i magnetita pri energetske razine 59,5-122-661 keV i 1332 keV. Ti rezultati pokazuju da se koeficijenti apsorpcije smanjuju povećanjem energije. Štoviše, nije uočeno povećanje ni smanjenje koeficijenta apsorpcije zbog povećanja promjene omjera voda/cement. Tablica 6. prikazuje gustoću od 2,282 g/cm³ pri energetske razini 59,5 keV, 0,3 cm²/g pri energetske razini 1332 keV, 0,054 cm²/g konvencionalnog betona gustoće 3,01 g/cm³ pri energetske razini 59,5 keV. Debljina betona potrebna da se smanji energetska razina teških betona s 0,054 cm²/g agregata magnetita na energetske razinu 0,01 keV pri 1332 keV jest najmanje 12,69 cm konvencionalnog betona pri energetske razini od 59,5 keV, dok ona iznosi 5,32 cm u teškom betonu s agregatom magnetita. Primjenom teških betona umjesto konvencionalnih pri energetske razini od 59,5 keV omogućava se smanjenje od 41,92 % po jedinici volumena betona. Kako bi se smanjila energetska razina 1332 keV na energetske razinu 0,01 keV, potrebna je debljina betona od 95,93 cm kad je riječ o običnim betonima. Kad su posrijedi teški betoni s agregatom magnetita proizvedenog u

ovom istraživanju, tada je potrebna debljina betona u iznosu od 72,59 cm. U usporedbi s konvencionalnim betonima, smanjenje od 24,33 % dobiva se po jedinici volumena betona pri energetske razini od 1332 keV. Uzimajući u obzir da je teški agregat koji se koristi u betonu teže pripremiti i obraditi u drobilicama; teški agregat povećat će trošak betona. Zato primjena konvencionalnog betona pri visokim energijama može omogućiti prednost u odnosu na teški beton.

4. Zaključak

Temeljem provedenog istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Minerali pirita, kroma i magnetita mogu se koristiti u proizvodnji teškog betona. Beton ciljanog slijeganja i razreda čvrstoće može se proizvesti u teškim betonima koji su proizvedeni primjenom agregata koji sadržavaju krom, pirit i magnetit.
- Povećanjem v/c omjera, i to smanjenjem količine cementa te zadržavanjem količine vode konstantom, smanjuje se jedinična volumenska težina u betonima koji imaju agregat niže specifične težine nego cement. Ako je agregat specifične težine veći nego cement, to povećava gustoću betona.
- U betonima s istim v/c omjerom, primjena agregata različitih specifičnih težina ne utječe na modul elastičnosti betona. Tlačna čvrstoća u betonu normalne težine i teškom betonu; glavni je čimbenik koji određuje modul elastičnosti.
- Betoni veće gustoće pokazuju više zračenja. Tlačna čvrstoća teških betona smanjuje se u slučaju kad je količina vode konstantna te kad se poveća omjer vode i cementa. Međutim, gustoća se povećala zbog zamjene agregatom koji je veće gustoće nego cement, umjesto smanjene količine cementa. To povećava svojstva apsorpcije zračenja betona koji su veće gustoće te niže čvrstoće.
- Istraživanje pokazuje da ne postoji korelacija između čvrstoće betona i njegove apsorpcije zračenja. Velika čvrstoća betona ne znači da će koeficijent slabljenja zračenja biti visok.
- Povećanjem energetske razine, smanjuje se koeficijent prigušenja mase betona. Izmjereni su jednaki koeficijenti prigušenja mase u konvencionalnim i teškim betonima. Primjenom teškog betona u apsorpiranju niske energije zračenja veća je korist nego primjenom konvencionalnog betona. Smanjuje se razlika u debljini, a to je prednost teškog betona kada je u pitanju apsorpcija visokoenergetskog zračenja.
- Koeficijent prigušenja povećava se povećanjem jedinične težine betona. U betonima proizvedenim u ovom istraživanju, najveći je koeficijent zračenja zabilježen kod betona proizvedenih s agregatom magnetita.

Zahvala

Ovaj rad podržava Koordinator znanstvenoistraživačkih projekata Sveučilišta Recep Tayyip Erdoğan (RTEU-BAP, Projekt br: 2015.53001.109.03.02) 2015.

LITERATURA

- [1] Akyuz, S.: Heavy Concrete with Barite Aggregate for Protection from Gamma Rays, *İTÜ Journal*, (1977) 5, pp. 59-69
- [2] Saidani K., Ajam, L., Ouezdou, M.B.: Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 95 (2015), pp 287-295, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.140
- [3] Ozen, S., Sengul, C., Erenoglu, T., Çolak, U., Reyhancan, I.A. ve Taşdemir, M.A.: Properties of Heavyweight Concrete for Structural and Radiation Shielding Purposes, *Arab Journal Science Engineering*, (2016) 41, pp. 1573-1584
- [4] Otto, B., Gur, A., Kavaz, E., Cakir, T., Yaltay, N.: Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes, *Progress in Nuclear Energy*, (2016) 92, pp. 71-80, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.06.011>
- [5] TS EN 206, 2017. Concrete- Feature, manufacturing and suitability. Turkish Standard, Ankara.
- [6] Sharifi, Sh., Bagheri, R., Shirmard, S.P.: Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results, *Annals of Nuclear Energy*, (2013) 53, pp. 529-534, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.09.015>
- [7] Shams, T., Eftekhari, M., Shirani, A.: Investigation of gamma radiation attenuation in heavy concrete shields containing hematite and barite aggregates in multi-layered and mixed forms, *Construction and Building Materials*, 182 (2018), pp.35-42, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.032>
- [8] Quda, A.: Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding, *Progress in Nuclear Energy*, (2015) 79, pp. 48-55, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.11.009>
- [9] Waly, E.S.A., Bourham, M.A.: Comparative study of different concrete composition as gamma-ray shielding materials, *Annals of Nuclear Energy*, (2015) 85, pp. 306-310, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.05.011>
- [10] Ogawa, T., Morev, M.N., Limoto, T., Kosako, T.: Measurements of activation reaction rates in transverse shielding concrete exposed to the secondary particle field produced by intermediate energy heavy ions on an iron target, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 271 (2012), pp. 65-71, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.11.008>
- [11] Kilincarslan, S., Akkurt, I., Basyigit, C.: The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concretes. *Materials Science and Engineering*, (2006) A 424, pp. 83-86, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.033>
- [12] Lotfi-Omran, O., Sadrmomtazi, A., Nikbin, I.M.: A comprehensive study on the effect of water to cement ratio on the mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete, *Construction and Building Materials*, 229 (2019), pp. 116905, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116905>
- [13] Topcu, I.B.: Concrete Technology. Eskişehir.2006
- [14] Prochon, P., Piotrowski, T.: The effect of cement and aggregate type and w/c ratio on the bound water content and neutron shielding efficiency of concretes, *Construction and Building Materials*, 264 (2020), 120210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120210>
- [15] Bellum, R.R., Muniraj, K., Madduru, S.R.C.: Investigation on modulus of elasticity of fly ash-ground granulated blast furnace slag blended geopolymer concrete, *Materials Today: Proceedings*, 27 (2020), pp. 718-723, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.299>
- [16] Topçu, I.B., Bilir, T., Boga, A.R.: Estimation of the modulus of elasticity of slag concrete by using composite material models, *Construction and Building Materials*, 24 (2010), pp. 741-748, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.034>
- [17] Yıldırım, H., Sengul, O.: Modulus of elasticity of substandard and normal concretes, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 1645-1652, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.009>
- [18] Briševac, Z., Hrženjak, P., Buljan, R.: Models for estimating uniaxial compressive strength and elastic modulus, *GRAĐEVINAR*, 68 (2016) 1, pp. 19-28, <https://doi.org/10.14256/JCE.1431.2015>
- [19] Matulić, P., Juradin, S., Marušić, E., Domazet, A.: Effect of test specimen size on mechanical properties of shotcrete, *GRAĐEVINAR*, 68 (2016) 4, pp. 301-309, <https://doi.org/10.14256/JCE.1240.2014>
- [20] Vorobjovas, V., Vaitkus, A.: Use of local aggregates in high modulus asphalt concrete layers, *GRAĐEVINAR*, 65 (2013) 4, pp. 353-360, <https://doi.org/10.14256/JCE.886.2013>
- [21] Neira, P., Bennun, L., Pradena, M., Gómez, J.: Prediction of concrete compressive strength through artificial neural networks, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 7, pp. 585-592, <https://doi.org/10.14256/JCE.2438.2018>
- [22] Hussain, R.R., Shuraim, A.B., Aslam, F., Alhozaimy, A.M.A., Al-Humaiqani, M.M.: Coupled effect of coarse aggregate and micro-silica on the relation between strength and elasticity of high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 175 (2018), pp. 321-332, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.192>
- [23] Torić, N., Boko, I., Peroš, B.: Degradation of mechanical properties of high-strength concrete after exposure to fire, *GRAĐEVINAR*, 63 (2011) 12, pp. 1033-1041.
- [24] Barišić, I., Dimter, S., Rukavina, T.: Cement stabilizations - characterization of materials and design criteria, *GRAĐEVINAR*, 63 (2011) 2, pp. 135-142.
- [25] Bilir, T.: Investigation of performances of some empirical and composite models for predicting the modulus of elasticity of high strength concretes incorporating ground pumice and silica fume, *Construction and Building Materials*, 127 (2016), pp. 850-860.
- [26] Baltas, H., Sirin, M., Celik, A., Ustabas, İ, El-Khayatt, A.M.: Radiation shielding properties of mortars with minerals and ores additives, *Cement and Concrete Composites* (2019), 97 (2016), pp. 268-278, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.006>
- [27] Yılmaz, E., Baltas, H., Kiriş, E., Ustabas, İ., Cevik, U., ve El-Khayatt, A.M.: Gamma ray and neutron shielding properties of some concrete materials. *Annals of Nuclear Energy*, 38 (2011), pp. 204-212, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.06.011>
- [28] Yetim, M.: Investigation of the Effects of Sanliurfa Lime Powder on Physical and Mechanical Properties of Concrete by Cement Substitution. Sanliurfa, Turkey: Harran University Institute of Science and Technology, 2021.