

Primljen / Received: 20.7.2022.

Ispravljen / Corrected: 2.9.2022.

Prihvaćen / Accepted: 25.10.2022.

Dostupno online / Available online: 10.2.2023.

Odnos koristi i troškova korištenja betona s udjelom zgre iz visoke peći kao cestovnoga kolnika

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Tacettin Geçkil**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Inonu, Malatya, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
tacettin.geckil@inonu.edu.tr



Dr.sc. **Mehmet Mahmut Tanyıldızı**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Inonu, Malatya, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
mmtanyildizi@hotmail.com



Dr.sc. **Ceren Beyza İnce**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Inonu, Malatya, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
c.beyzaince@gmail.com
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Tacettin Geçkil, Mehmet Mahmut Tanyıldızı, Ceren Beyza İnce

Odnos koristi i troškova korištenja betona s udjelom zgre iz visoke peći kao cestovnoga kolnika

U ovome istraživanju ispitani su upotreba betona s udjelom zgre iz visoke peći (eng. blast furnace slag - BFS) u postotku od 15, 20, 25 i 30 % u odnosu na masu cementa, kao cestovnoga kolnika na tlima slabe nosivosti te odnos koristi i troškova u njegovoj upotrebi. Pripremljeni uzorci betona podvrgnuti su fizikalnim i mehaničkim ispitivanjima prateći njegovanje različitoga trajanja, čime je utvrđeno da se čvrstoća uzoraka kojima je dodan BFS povećala te da je bila najveća kod uzoraka s udjelom BFS-a od 20 %. Štoviše, prema metodi projektiranja AASHTO 1993, dokazano je da se debljina betonskoga kolnika kojemu je dodan BFS smanjila za 1,58 do 3,38 %, a da su se troškovi smanjili za 5,59 do 10,30 %.

Ključne riječi:

cestovni kolnik, beton s udjelom zgre iz visoke peći, tlo vrlo slabe nosivosti, betonska ploča, metoda projektiranja AASHTO

Research Paper

Tacettin Geçkil, Mehmet Mahmut Tanyıldızı, Ceren Beyza İnce

Benefit–cost relationship of using concrete with blast furnace slag as road pavement

In this study, the usability of concrete containing blast furnace slag (BFS; 15, 20, 25, 30 wt.%) as road pavement on soils with weak bearing strength and the corresponding benefit–cost relationship were investigated. The prepared concrete specimens were subjected to physical and mechanical tests following different curing times, and it was determined that the mechanical strength of the BFS-added specimens increased and peaked at the BFS content of 20 %. In addition, according to the AASHTO 1993 design method, it was determined that the thickness of the BFS-added concrete pavement decreased by 1.58 % to 3.38 % and the cost was reduced by 5.59 % to 10.30 %.

Key words:

road pavement, blast furnace slag, very weak bearing strength soil, concrete slab, AASHTO method

1. Uvod

Kako bi se zadovoljile potrebe koje su se pojavile zadnjih godina, sve je češća upotreba novorazvijenih vrsta betona različitih svojstava koje su rezultat novih proizvodnih metoda i metoda primjene te koje zahvaljujući tim svojstvima uklanjaju razne poteškoće s njihovom funkcionalnom upotrebom. Poboljšavanje svojstava tih betona, koji zajedno s raznim aditivima nastavljaju biti važan građevni materijal današnjice, i dalje je važan predmet istraživanja [1-3].

Paralelno s tehnološkim razvojem traže se povoljniji građevni materijali koji bi poboljšali svojstva betona. Točnije, kako bi se proizveo beton velikih razina tlačnih čvrstoća, čvrstoća na cijepanje te čvrstoća na savijanje, cilj je povećati druga mehanička svojstva betona dodavanjem pucolana [4]. Osim poboljšavanja svojstava betona istražuje se kako se čvrstoća i troškovi mijenjaju upotrebom pucolana umjesto cementa koji je vezivo te se navodi da se znatna povećanja razine čvrstoće postižu recikliranjem zgure iz visokih peći (eng. *blast furnace slag* - BFS), otpadnoga materijala te upotrebom betona s BFS-om do određenog udjela [5, 6]. Zahvaljujući tim svojstvima, cilj je vidjeti je li moguće osmisliti betonski cestovni kolnik koji će zadovoljiti ekonomski kriterij, kriterij vrhunske kvalitete te kriterije sigurnosti i udobnosti primjenom BFS-a u betonskim kolnicima u Turskoj. Svrha je ovog istraživanja izračunati debljinu betonske ploče tako da ne dođe do povećanih deformacija tijekom sigurnoga toka prometa koji će prolaziti preko kolnika tijekom projektiranoga vijeka trajanja te odrediti svojstva materijala koji čine kolnik [7, 8]. U istraživanju provedenom na betonima s dodatkom pucolana navodi se da betoni s BFS-om zahtijevaju manje vode nego betoni s portland cementom. Razlozi za to su tekstura površine čestica zgure i kasniji početak kemijskih reakcija zgure [9], što povećava razinu tlačne čvrstoće betona zbog činjenice da BFS bolje popunjava praznine u sučelju agregata i veziva. Pritom je sedmodnevna razina tlačne čvrstoće betona u kojima je cement djelomično zamijenjen zgurom niža od one kontrolnih uzoraka. Iako bi se ta situacija trebala razmatrati u betonima u kojima se traži rana čvrstoća betona, tlačne čvrstoće betona koji sadržavaju 25 % zgure nakon 28 i 90 dana veće su nego čvrstoće kontrolnih uzoraka te beton s BFS-om ima neznatno veće razine čvrstoće na cijepanje i čvrstoće na savijanje u usporedbi s betonima s portland cementom iste tlačne čvrstoće [10].

U drugim istraživanjima uočeno je da se razina obradivosti betona s dodatkom povećava zbog toga što BFS ima nižu razinu hrapavosti površine u usporedbi s klinkerom i zbog njegove niske specifične težine te se na taj način u volumenu postiže više cementne paste. Da bi se postigla ista razina obradivosti, određeno je da se omjer vode i veziva u mješavini smanjuje povećanjem udjela BFS-a u betonu. Na temelju toga utvrđeno je da BFS pozitivno utječe na obradivost [11, 12] te da je razina tlačne čvrstoće betona s udjelom zgure nakon sedam dana niža nego u kontrolnim uzorcima, neovisno o udjelu zgure, koja se djelomično koristi umjesto cementa i omjera vode i veziva. Zaključeno je da su tlačne čvrstoće uzoraka nakon 28 i 90 dana

imale tendenciju povećanja u usporedbi s kontrolnim uzorcima. U slučaju jednakog sadržaja cementa i jednakih omjera vode i cementa cementi s udjelom zgure rezultirali su relativno nižim vrijednostima čvrstoće betona nakon ugradnje betona e većim vrijednostima čvrstoće betona što su stariju usporedbi s običnim portland cementima [13-15]. Uočeno je da je zamjena cementa BFS-om pri tako visokome udjelu od 20 do 30 % vodila do blagoga pada čvrstoće u ranijim fazama. Međutim, razvojem pucolanske reakcije ta se razlika smanjila kod vrijednosti 28-dnevne čvrstoće, čija se razina povećala u usporedbi s kontrolnim uzorcima [16, 17]. Na tim su uzorcima primijenjena ispitivanja konzistencije betona (slump), tlačne čvrstoće i betona te čvrstoće betona na cijepanje, i to upotrebom BFS-a u postotku od 0, 10, 20 i 30 % u odnosu na masu cementa. Utvrđeno je da se s povećanjem udjela BFS-a povećala i obradivost mješavine betona, a kako se udio BFS-a povećao, tlačna se čvrstoća povećala do 20 % što je beton stariji te smanjila kada je udio zamjene iznosio 30 % [18].

Čini se da je cilj većine istraživanja koja se tiču BFS-a poboljšati svojstva čvrstoće betona. Ipak, beton se ne koristi samo u konstrukcijama poput zgrada i mostova, već i u cestovnim konstrukcijama. Primjećuje se da se izbjegava multidisciplinarn pristup u istraživanjima. Zbog toga se dosad u velikoj mjeri nije bavilo upotrebom poboljšanoga betona kao cestovnoga kolnika izloženoga uvjetima prometa i tla te odnosom njihove koristi i troška.

U ovome istraživanju, u odnosu na prethodna istraživanja, ispitana je primjenjivost betona proizvedenih tako što je cement zamijenjen BFS-om masenog udjela od 15, 20, 25 i 30 % u cestovnim kolnicima namijenjenima tlima vrlo slabih nosivosti. U tu svrhu nad betonima su provedena ispitivanja obradivosti, tlačne čvrstoće, čvrstoće pri savijanju, čvrstoće pri cijepanju i otpornosti pri smrzavanju i odmrzavanju te je prema rezultatima ispitivanja istražena upotreba tih betona u slučaju cestovnih kolnika. Uz pomoć projektne metode AASHTO 1993 debljine betonskoga kolnika određene su za čisti beton i za beton s udjelom BFS-a, a izračunani su trenutačni troškovi te je procijenjena iskoristivost BFS-a u cestovnim kolnicima.

2. Materijali korišteni u istraživanju

2.1. Cement

U istraživanju koristio se portland cement tipa CEM I 42,5 R proizvođača *Tracim Cimento San. ve Tic. A.S.* u skladu s normom TS EN 197-1 [19]. U betonskoj mješavini koristila se voda iz gradskoga vodovoda u Tekirdag/Corlu. U tablici 1. prikazana su kemijska i fizikalna svojstva cementa tipa CEM I 42,5 R.

2.2. Zgura iz visoke peći (BFS)

BFS je nabavljen od *Karcimsa Ltd. Sti.*, a koristio se kao zamjena masenoga udjela cementa u sklopu istraživanja. Na slici 1. prikazan je uzorak koji se koristio, dok su njegova svojstva prikazana u tablici 2.

Tablica 1. Kemijska i fizikalna svojstva cementa tipa CEM I 42.5 R

Kemijska svojstva									
Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Netopivi ostatak	Ostatak pri žarenju	Slobodno vapno
[%]	19,41	4,50	3,49	63,09	1,10	3,20	0,80	3,80	1,90
Fizikalna svojstva									
Početak vezivanja	155 [min]								
Kraj vezivanja	235 [min]								
Postojanost volumena	1,00 [mm]								
Specifična površina	3.720,00 [cm ² /g]								
Specifična težina	3,08 [g/cm ³]								
Tlačna čvrstoća									
Tlačna čvrstoća nakon dva dana	38,60 [%]								
Tlačna čvrstoća nakon sedam dana	57,40 [%]								

Tablica 2. Kemijska i fizikalna svojstva BFS-a

Kemijska svojstva												
Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Mn ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	S	Cl
[%]	34,01	11,95	1,18	31,65	8,51	0,61	0,52	3,58	0,71	1,32	0,47	0,014
Fizička svojstva												
Sadržaj vlage	0,10 [%]											
Specifična težina	2,90 [g/cm ³]											
Specifična površina	4,417 [cm ² /g]											
Ostatak na situ 45 mm	0,010 [%]											
Ostatak na situ 90 mm	0 [%]											

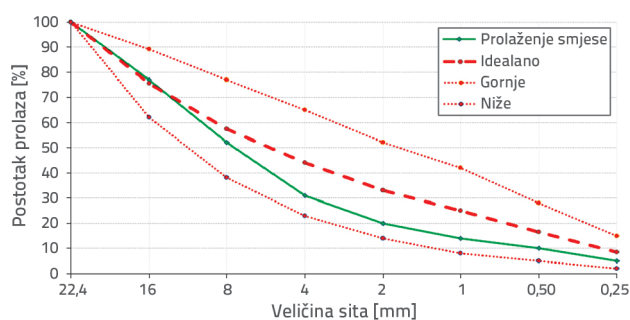


Slika 1. Uzorak BFS-a koji se koristio u istraživanju

2.3. Agregat

Agregat koji se koristio u istraživanju omogućila je tvrtka *Dalbay Tas Imalati San. ve Tic. d.o.o.* (Središnja pokrajina Kirklareli, naselje Kapakli). Agregat se dijeli u tri različita razreda materijala: 0 – 5 mm (drobljeni pijesak), 5 – 11

mm (drobljeni kamen) i 11 – 22 mm (drobljeni kamen). U proizvodnji betona čije je maksimalno zrno veličine 22 mm agregat razreda 0 – 5 mm koristio se u udjelu od 22 %, dok se agregat razreda 5 – 11 mm koristio u udjelu od 38 %, a agregat razreda 11 – 22 mm u udjelu od 40 %. Fizikalna i kemijska svojstva agregata prikazana su u tablici 3., a krivulja koja prikazuje distribuciju zrna agregata u mješavini prikazana je na slici 2., što je unutar granica norme TS EN 933-1 [20].



Slika 2. Granulometrijska krivulja agregata

Tablica 3. Fizička i kemijska svojstva agregata

Svojstva	0 – 5 [mm]	5 – 11 [mm]	11 – 22 [mm]	Standard
Upijanje vode [%]	1,40	0,70	0,40	≤ 2,5 (TS EN 1097- 6) [21]
Specifična težina [kg/m ³]	2,77	2,79	2,80	-
Otpornost na fragmentaciju za grubi agregat (<i>Micro Deval Abrasion Resistance</i>) [%]	-	18,00	18,00	≤ 25 (TS EN 1097- 2) [22]
Stabilnost volumena – skupljanje sušenjem [%]	0,022	0,022	0,022	≤ 0,075 (TS EN 1367-4) [23]
Alkalno-silikatna reakcija [%]	0,030	0,030	0,030	≤ 0,10 (CANADA, CSA23.2 25A [24])

2.4. Kemijski aditiv

Kako bi se povećala obradivost svježega betona i kako bi se omogućila njegova završna visoka performansa, koristio se superplastifikator s 1,34 % veziva u mješavini betona s omjerom vode i cementa u iznosu od 0,40. Specifična težina kemijskih aditiva pri temperaturi od 20 °C trebala bi iznositi između 1,08 g/cm³ i 1,12 g/cm³ prema normi TS 781 ISO 758 [25]. Određeno je da je specifična težina superplastifikatora koji se koristi 1,11 g/cm³ pri 20 °C.

3. Metode primjenjene u istraživanju

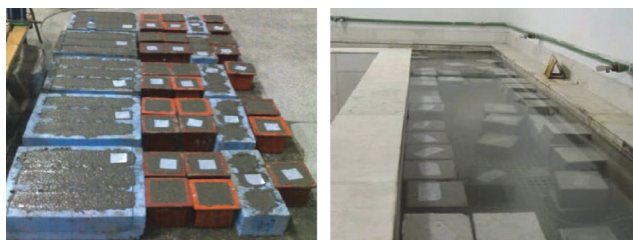
3.1. Eksperimentalne metode

3.1.1. Priprema mješavina betona

Tip cementa CEM I 42,5 R, agregati frakcije 0 – 5 mm, 5 – 11 i 11 – 22 mm, voda iz vodovoda i BFS koristili su se u uzorcima betona koji su nastali u ovome istraživanju. Određeno je da je u proizvedenim betonima omjer vode i cementa 0,40, a BFS je dodan u postotku od 0, 15, 20, 25 i 30 % po masi cementa. Projektirano je pet betonskih uzoraka za eksperimente. Proizvedeni kontrolni uzorci i mješavine dobili su sljedeće oznake:

- cement (K-C): kontrolni uzorak s cementom kao vezivom
- cement+15%BFS (C15B): BFS kao zamjena za 15 % veziva
- cement+20%BFS (C20B): BFS kao zamjena za 20 % veziva
- cement+25%BFS (C25B): BFS kao zamjena za 25 % veziva
- cement+30%BFS (C30B): BFS kao zamjena za 30 % veziva.

Omjeri miješanja prikazani su u tablici 4. Nakon što su izvagane sastavne komponente uzoraka, a na temelju omjera iz tablice 4., agregat je stavljen u miješalicu kapaciteta 80 dm³, i to od najvećega do najmanjega zrna, a zatim su dodani cement i BFS. Suhi je sadržaj tada miksan otprilike dvije minute kako bi se postigla homogenost, suha mješavina. Nakon što je dobivena suha mješavina, u mikser je dodano 90 % vode i proces miješanja bio je nastavljen još tri minute. Potom je dodan plastifikator s preostalih 10 % vode te je proces miješanja bio nastavljen sljedećih pet minuta. Proces je završio miješanjem materijala ukupno 10 minuta. Uočeno je da dostatno vrijeme miješanja omogućava da superplastifikator bude obradiv i postigne željeni učinak u mješavinama s niskim omjerom vode/veziva te visokom dozom aditiva. Uzorke se držalo pokrivenima 24 sata u laboratoriju kako bi se spriječilo isparavanje vode koja se miješa. Nakon što su uzorci bili izvađeni iz kalupa, njegovani su u bazenu ispunjenome vodom pri 23 ± 2 °C. Uzorci su bili držani u bazenu za njegovanje sedam, 28 i 90 dana. Svi uzorci izvađeni iz bazena za njegovanje u laboratoriju su zasićeni, površinski suhi (eng. *saturated surface dry*-SSD). Na SSD uzorcima provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće, čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri cijepanju. Na slici 3. prikazani su pripremljeni i njegovani uzorci betona.



Slika 3. Pripremljeni i njegovani uzorci betona

Tablica 4. Omjeri miješanja

Oznaka mješavine	Cement	BFS	Agregat [kg/m ³]			Voda [kg/m ³]	Superplastifikator [kg/m ³]	Voda/vezivo [%]
			0 – 5 [mm]	5 – 11 [mm]	11 – 22 mm			
(K-C)	450	0	410	709	746	180	6	0,4
(C15B)	382,50	67,50	409	707	744			
(C20B)	360	90	409	707	744			
(C25B)	337,50	112,50	409	706	743			
(C30B)	315	135	409	706	743			

3.1.2. Obradivost i konzistencija betona

Kako bi se dobila informacija o konzistenciji i obradivosti svježega betona prema normi TS EN 12350-2 [26], provedeno je ispitivanje slijeganja betona na proizvedenim uzorcima (slika 4.).

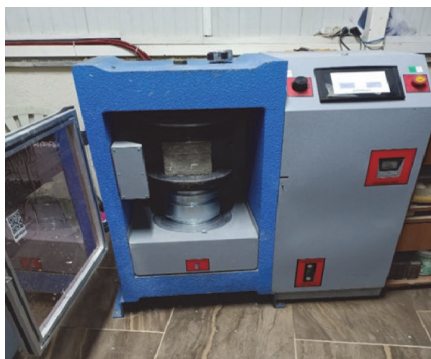


Slika 4. Ispitivanje konzistencije betona metodom slijeganja

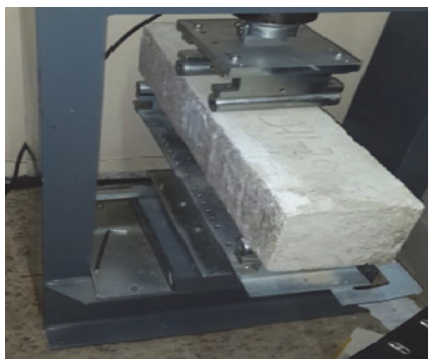
U ispitivanju slijeganja betona, nakon što beton ispuni trećinu lijevka, nabija se 25 puta i puni do vrha lijevka u tri koraka. Nakon što je gornja površina zaglađena špahtlom, lijevak se podigao okomito, ne dopuštajući podrhtavanje, te je izmjereno gdje je mjeri došlo do slijeganja stošca pod težinom betona.

3.1.3. Tlačna čvrstoća betona

Kontrolne mješavine i mješavine u kojima je cement zamijenjen BFS-om stavljene su u kalupe i držane u laboratoriju 24 sata. Nakon toga očvrstnuli su uzorci izvađeni iz kalupa i držani u bazenu za njegovanje sedam, 28 i 90 dana pri 23 ± 2 °C. Svi su uzorci izvađeni iz bazena na kraju razdoblja njege i držani u laboratoriju najmanje tri sata kako bi se postigla zasićena, površinski suha površina (SSD). Ispitana su tri SSD uzorka u obliku kocke, čije su dimenzije iznosile 150 x 150 x 150 mm. Ispitivanja su provedena uz pomoć preše kapaciteta 300 tona i pri brzini nanošenja opterećenja od 0,50 MPa/s. Na slici 5. prikazano je ispitivanje uzoraka.



Slika 5. Prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće



Slika 6. Prikaz ispitivanja čvrstoće pri savijanju

3.1.4. Čvrstoća betona pri savijanju

Razine čvrstoće pri savijanju kod pripremljenih uzoraka betona određene su ispitivanjem uzoraka grede dimenzija 150 x 150 x 525 mm i njihovim savijanjem u četiri točke. U pitanju su uzorci greda koji su bili njegovani sedam, 28 i 90 dana. Eksperiment je proveden uz primjenu brzine opterećenja od 0,05 MPa/s i uz pomoć preše čiji je kapacitet savijanja 20 tona. Na slici 6. prikazano je ispitivanje čvrstoće pri savijanju kontrolnih uzoraka i uzoraka kojima je dodan BFS.

3.1.5. Čvrstoća betona pri cijepanju

Tri cilindrična uzorka dimenzija $\varnothing 150 \times 300$ mm ispitana su kako bi se odredila čvrstoća pri cijepanju kontrolnih mješavina i mješavina s BFS-om nakon sedam, 28 i 90 dana njegovanja. Eksperiment je proveden uz pomoć preše kapaciteta 300 tona i pri brzini nanošenja opterećenja od 1,6 kN/s. Na slici 7. prikazano je ispitivanje pri cijepanju kontroliranih uzoraka i uzoraka kojima je dodan BFS.

3.1.6. Otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje

Eksperiment je proveden kako bi se odredila otpornost betonskoga kolnika kojemu je dodan BFS tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja tijekom njegova vijeka trajanja. Kontrolni betonski uzorci i uzorci betona kojemu je dodan BFS





Slika 7. Prikaz ispitivanja čvrstoće pri cijepanju

Tablica 5. Kategorije otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje (eng. *Freeze and Thaw - FT*)

Kategorija	Gubitak mase (nakon 28 dana)
FT0 (slobodna mjesta za smrzavanje i odmrzavanje)	-
FT1 (mjesta za smrzavanje i odmrzavanje)	Prosjek < 1,0 [kg/m ²]
FT2 (mjesta na kojima dolazi do smrzavanja i odmrzavanja i na kojima se koriste sredstva za odmrzavanje)	Prosjek < 0,5 [kg/m ²]

bili su izloženi ciklusima smrzavanja i odmrzavanja na temelju metode ispitivanja CDF koja je u skladu s normom TSE CEN/TS 12390-9. Prema tablici 5., koja je u skladu s Tehničkim specifikacijama betonskih kolnika TCK Highways [27] u Turskoj, kategorija otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje određena je kao FT2 na temelju klimatskih uvjeta područja na kojemu je istraživanje provedeno.

Prije eksperimenta, a nakon što je svježi beton stavljen u kalupe, kalupi su bili zaštićeni od sušenja jedan dan pri 20 ± 2 °C. Uzorci su bili izvađeni iz kalupa nakon 24 ± 2 sata i stavljeni u bazen za njegovanje ispunjen vodom iz slavine pri temperaturi od 20 ± 2 °C. Sedmoga dana uzorci su bili izvađeni iz bazena za njegovanje te pohranjeni na 21 dan u komoru za njegovanje pri temperaturi od 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti od 65 ± 5 % sve dok eksperiment nije počeo. Uzorci koji su njegovani 28 dana bili su prekriveni tekućinom za ispitivanje (97 % vode iz slavine po masi i 3 % NaCl) sedam dana, a eksperiment je počeo 35. dan. Proizvedeni uzorci procijenjeni su mjerenjem mase oljuštenoga materijala na kraju 28-dnevnoga ciklusa smrzavanja i odmrzavanja od četiri sata smrzavanja pri -20 °C i četiri sata odmrzavanja pri 20 °C. Oljušteni materijal odvojen je od uzoraka te izvagan. Tada su vrijednosti gubitka mase uzoraka određene u g/mm² uz pomoć izraza (1):

$$m_n = (\mu_s/A) \cdot 10^6 \quad (1)$$

gdje je:

- m_n - gubitak mase u slučaju CDF-a [g/mm²]
- μ_s - količina uzoraka koji se prekidaju u n ciklusima [g]
- A - površina uzorka izložena smrzavanju i odmrzavanju [mm²].

3.2. Metoda projektiranja

Cilj je projektiranja čvrstoga kolnika ceste odrediti debljinu sloja cestovnoga kolnika te odrediti svojstva materijala koja će oblikovati te slojeve kako bi mogli podnijeti promet koji će se ponavljati tijekom projektiranoga vijeka trajanja na siguran način i bez pukotina i deformacija. S obzirom na to da se u Turskoj godinama primjenjuje metoda AASHTO 1993 za projekte čvrstih i savitljivih kolničkih cesta, ta je metoda uzeta kao podloga za istraživanje. U tome kontekstu izraz (2) prikazuje jednadžbu AASHTO 1993 za izvedbu betonskoga kolnika koji se dobiva uzimajući u obzir utjecaj broja ponavljanja standardnoga ekvivalentnog opterećenja jedne osovine od 8,2 tone ($W_{8,2}$) na izvedbu kolnika. Debljina

betonskoga kolnika (d) računa se prema izrazu (2) [28]:

$$\begin{aligned} \log_{10} W_{8,2} = & Z_R \cdot S_o + 7,35 \cdot \log_{10}(d+1) - 0,06 + [\log_{10}[\Delta PSI / (4,5 - 1,5)]] / \\ & [1 + (1,624 \cdot 10^7) / (d+1)^{8,46}] + (4,22 - 0,32 \cdot p_c) \\ & \cdot \log_{10} [(S'_c \cdot C_d \cdot (d^{0,75} - 1,132)) / (215,63 \cdot J \cdot d^{0,75} \\ & \cdot (18,42 / (E_c / k^{0,25})))] \end{aligned} \quad (2)$$

gdje je:

- $W_{8,2}$ - ukupan broj ponavljanja standardnoga opterećenja (8,2 tone)
- Z_R - standardna normalna devijacija
- S_o - ukupna standardna devijacija
- d - debljina ploče kolnika (u inčima, 1 in = 0,0254 m)
- ΔPSI - razlika između početne mogućnosti projektiranja uporabivosti (p_c) i indeksa završne mogućnosti uporabivosti (p_t)
- S'_c - modul puknuća betona (psi) ($6,8950 \times 10^3$ Pa)
- J - koeficijent prijenosa opterećenja
- C_d - koeficijent drenaže ceste
- E_c - modul elastičnosti betona (psi) ($6,8950 \times 10^3$ Pa)
- k - modul reakcije baze (pci) ($27679,9$ kg/m³).

3.2.1. Servisna sposobnost (mjerilo izvedbe)

Procjenjuje se da je servisna sposobnost kolnika koji se uzima kao kriterij izvedbe u cestovnome inženjerstvu u rasponu 0 do 5. Nula (0) upućuje na najniži, a 5 na

najviši razred izvedbe. Početni indeks kriterija izvedbe (p_o) prikazuje se kao završni indeks kriterija izvedbe (p_t), a vrijednost (p_o) s vremenom se smanjuje do prihvatljive vrijednosti (p_t) uz učinke povećanja prometnoga opterećenja i u raznim okolišnim uvjetima. Prema metodi AASHTO 1993, vrijednost (p_o) određena je u iznosu od 4,5 za krute kolnike [7]. Za izračune koji su predmet ovoga istraživanja odabrani su $p_o = 4,5$ i $p_t = 2,5$ iz tablice 6.

Tablica 6. Vrijednost završne servisne sposobnosti

Razred ceste	p_t
Autocesta i državna cesta	2,5
Provincijska cesta	2,0

3.2.2. Pouzdanost

Pouzdanost se izražava kao otklanjanje nepravilnosti u radu koje se mogu pojaviti ako kolnik izdrži prometno opterećenje uz minimalan otpor. Razina pouzdanosti određuje se uz pomoć tablice 7. [7].

Tablica 7. Preporučene razine pouzdanosti

Razred ceste	R [%]
Autocesta i državna cesta	80 – 99,9
Provincijska cesta	75 – 95
Kolektorska cesta	75 – 95
Sekundarna i lokalna cesta	50 – 80

Preporučene (R) vrijednosti, koje bi trebale biti prihvaćene prilikom projektiranja u Turskoj, iznose 95 % za državne ceste i autoceste odnosno 85 % za provincijske ceste. Ovisno o stupnju pouzdanosti (R), standardna se devijacija pouzdanosti (Z_R) odabire uz pomoć tablice 8. [7].

Tablica 8. Preporučene razine pouzdanosti

Razred ceste	Vrijednost pouzdanosti specifikacije, R [%]	Standardna normalna devijacija, Z_R
Autocesta	95	-1,645
Državna	85	-1,037
Županijska	70	-0,524

U izračunima koji su predmet ovoga istraživanja iz tablice 9. odabran je postotak od 95 % kao vrijednost za autoceste i državne ceste (R), a za vrijednost Z_R odabrana je -1,645, što ovisi o izabranoj (R) vrijednosti. Za čvrste kolnike preporuča se 0,35 za ukupnu standardnu devijaciju (S_o) [7].

3.2.3. Modul reakcije podloge (k)

Modul reakcije koji se uzima za podlogu također se zove koeficijent nosivosti u betonskim (čvrstim) kolnicima. Potrebno je odrediti vrijednost (k) prije izračuna debljine betonske ili čvrste ploče. Ta se vrijednost izračunava uz pomoć izraza (3) [6]:

$$k = P/Y \quad (3)$$

gdje je:

P - opterećenje do podloge (psi ili kg/cm^2)

Y - deformacija u slijeganju (inči ili cm)

k - koeficijent reakcije podloge (psi/inch ili $\text{kg}/\text{cm}^2/\text{cm}$), koji može varirati ovisno o kapacitetu nosivosti, gustoći, sadržaju vlage i vrsti tla, a njegove tipične vrijednosti prikazane su u tablici 9. [28].

Tablica 9. Vrijednosti modula reakcije podloge

Uvjeti tla	k [pci]
Vrlo dobro (drobljeni kamen)	≥ 550
Dobro (šljunak)	400 – 550
Srednje dobro (pijesak i glineni šljunak)	250 – 350
Slabo (muljevita glina)	150 – 250
Vrlo slabo (plastična glina)	≤ 150

3.2.4. Modul elastičnosti i modul puknuća betona izrađenog od portland cementa

Prema normi TS EN 12390-13, dnevni modul elastičnosti betona "j" (E_{cj}) određuje se izrazom (4):

$$E_{cj} = 3250 \sqrt{f_{ckj}} + 14.000 \text{ [MPa]} \quad (4)$$

gdje je E_{cj} dnevni modul elastičnosti betona "j" (MPa), a f_{ckj} karakteristična tlačna čvrstoća betona (MPa, $j = 28$ dana). U vodiču za projektiranje prema AASHTO metodi prema izrazu (5) računaju se vrijednosti modula elastičnosti u skladu s razredom betona:

$$E_c = 6750 \cdot S'_c \quad (5)$$

gdje je:

S'_c - približni modul puknuća betona (psi) izrađenog od portland cementa ($6.8950 \cdot 10^3$ Pa)

E_c - modul elastičnosti betona (psi) izrađenog od portland cementa ($6.8950 \cdot 10^3$ Pa).

Čvrstoća pri savijanju i modul puknuća (S'_c) određuju se kao "najveća čvrstoća pri savijanju koju je postigla betonska greda tijekom loma". Razina čvrstoće pri savijanju određuje se lomom

Tablica 10. Preporučeni koeficijent drenaže za betonski kolnik (C_d)

Kvaliteta drenaže	Slobodno vrijeme za istjecanje vode	Postotak vremena u kojemu je kolnik izložen gotovo zasićenoj vodi [%]			
		< 1	1 – 5	5 – 25	> 25
Vrlo dobro	1 sat	1,25 – 1,20	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10
Dobro	1 dan	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00
Srednje dobro	1 tjedan	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90
Loše	1 mjesec	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80
Preloše	Voda se ne može procijediti	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80 – 0,70	0,70

betonske grede određene veličine izložene opterećenju na sredini grede ili u tri točke nakon 28 dana njegovanja [7].

Moduli puknuća ili čvrstoće pri savijanju računaju se pod tim opterećenjima na temelju izraza (6) za trećinu opterećenja odnosno izraza (7) za opterećenje na sredini grede:

$$S'_c = (P \cdot L) / (b \cdot h^2) \quad (6)$$

$$S'_c = (3 \cdot P \cdot L) / (2 \cdot b \cdot h^2) \quad (7)$$

u kojima je:

S'_c - posmični modul ili čvrstoća pri savijanju

b - širina grede

h - visina grede

P - primijenjeno opterećenje

L - duljina.

3.2.5. Drenaža

Preporučene vrijednosti koeficijenta drenaže (C_d) za betonske kolnike prikazane su u tablici 10. [31]. U ovome istraživanju u izračunima je vrijednost C_d iznosila 1.

3.2.6. Koeficijent prijenosa opterećenja (J)

Parametar (J) izražava sposobnost prijenosa opterećenja betonskoga kolnika na spojevima, a uzima se u obzir pri projektiranju betonskoga kolnika. Koeficijenti prijenosa opterećenja koji su u skladu s projektnim uvjetima prikazani su u tablici 11. [28]. U ovome istraživanju pretpostavilo se da je vrijednost $J = 2,7$ za sve izračune.

Tablica 11. Preporučeni koeficijenti prijenosa opterećenja

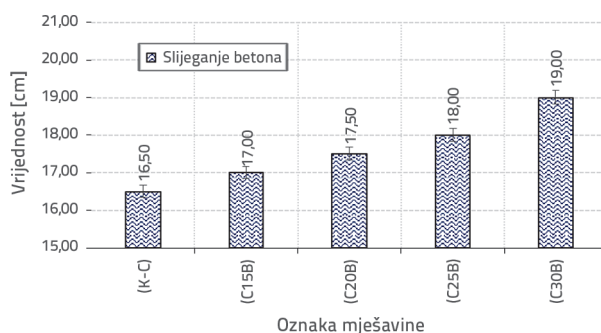
Berma	Asfaltirani kolnik		Betonski kolnik	
	Ima	Nema	Ima	Nema
Prijenos opterećenja				
Vrsta kolnika				
Armirani/nearmirani spoj	3,2	3,8 – 4,4	2,5 – 3,1	3,6 – 4,2
Trajno armiran beton	2,9 – 3,2	–	2,3 – 2,9	–

4. Rezultati

4.1. Eksperimentalni rezultati

4.1.1. Rezultati ispitivanja slijeganja betona

Na slici 8. prikazan je odnos udjela BFS-a i slijeganja betona kontrolnih uzoraka i uzoraka s udjelom BFS-a. Također, na njoj je prikazano da BFS ima pozitivan učinak na obradivost betona kada se poveća udio BFS-a koji zamjenjuje cement u mješavinama betona.



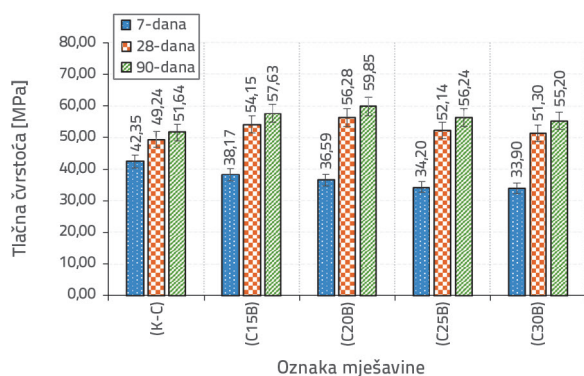
Slika 8. Grafikon promjene vrijednosti omjera slijeganja i udjela BFS-a

Upotreba BFS-a poboljšava obradivost svježega betona do određene mjere u usporedbi s kontrolnim uzorcima i dovodi do S4 razreda konzistencije. Prema literaturi, betoni se proizvode upotrebom BFS-a i cementa CEM I 42,5. Količina cementa bila je konstanta, a BFS se dodavao u različitim udjelima (17, 33 i 50 %) te je istražen utjecaj BFS-a na svojstva svježega i očvrnuloga betona. Uočeno je da se betonima kojima je dodan BFS u udjelu

17, 33 i 50 % povećala razina obradivosti u svježemu stanju [29, 30]. U istraživanjima se tvrdi da je to rezultat činjenice da BFS čestice imaju glatku i staklastu površinu koja je manje propusna za vodu [31, 32].

4.1.2. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

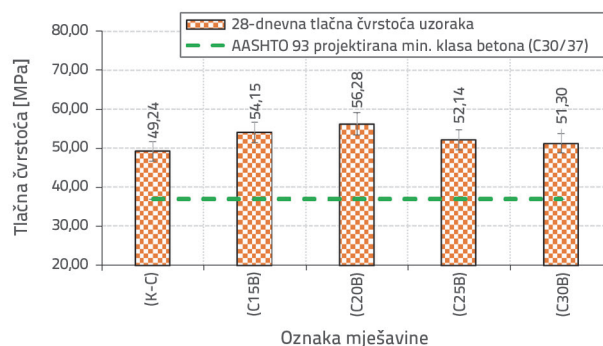
Na slici 9. prikazana je promjena tlačne čvrstoće uzoraka s udjelom BFS-a. Kao što je to vidljivo na slici 9., razina se tlačne čvrstoće uzoraka s BFS-om nakon sedam dana njegovanja smanjila, dok su se razine tlačne čvrstoće uzoraka povećale nakon 28 i 90 dana u usporedbi s kontrolnim uzorcima proizvedenima samo s cementom (K-C). To je povećanje doseglo maksimalnu vrijednost u (C20B) uzorku, a potom se povećanje smanjilo. Uzimajući u obzir njegovanje u razdoblju od 28 dana, utvrđeno je da se razina tlačne čvrstoće uzoraka betona povećala za 9,97 % u betonu s 15 % BFS-a odnosno za 14,30 % u betonu s 20 % BFS-a, za 5,89 % u betonu s 25 % BFS-a te za 4,18 % u betonu s 30 % BFS-a u usporedbi s referentnim kontrolnim uzorcima.



Slika 9. Grafikon koji prikazuje tlačnu čvrstoću kontrolnih uzoraka i uzoraka s BFS-om nakon 7, 28 i 90 dana

Uzimajući u obzir istraživanja u literaturi, razina se tlačne čvrstoće betona povećala za 9 % kod 10-postotnoga udjela BFS-a, za 8,5 % kod 20-postotnoga udjela BFS-a te za 6,2 % kod 30-postotnoga udjela BFS-a nakon 28 dana u usporedbi s kontrolnim uzorcima [33]. Uočeno je da su rezultati u skladu s literaturom. Međutim, nakon 90 dana razine tlačne čvrstoće povećale su se za 12,47, 15,90, 8,90 i 6,93 % u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Imajući u vidu ta povećanja uočeno je da se tlačna čvrstoća uzoraka nastavila povećavati u skladu s produljenjem njegovanja. Prema Tehničkim specifikacijama betonskih cestovnih kolnika TCK [27], rezultati tlačne čvrstoće betona nakon 28 dana uzeti su kao osnova za projektiranje te se preporuča izabrati minimalno C30/37 MPa za razred tlačne čvrstoće.

U sklopu ovoga istraživanja tlačna čvrstoća uzoraka nakon 28 dana uspoređena je s C30/37 MPa, a rezultati su prikazani na slici 10.



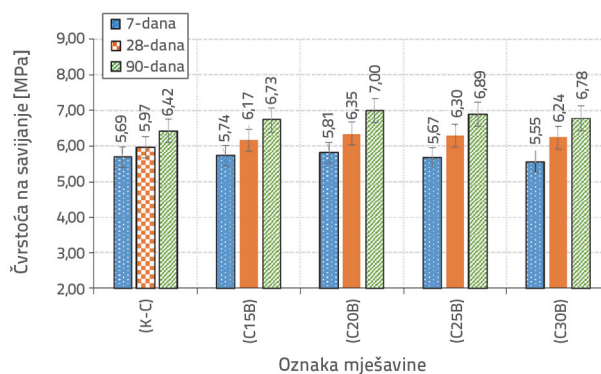
Slika 10. Kriterij projektiranja tlačne čvrstoće uzoraka nakon 28 dana

Na slici 10. prikazano je da razine tlačne čvrstoće svih uzoraka na kraju 28-dnevnoga razdoblja zadovoljavaju potrebne minimalne karakteristike tlačne čvrstoće (C30/37) prema Tehničkim specifikacijama betonskih cestovnih kolnika TCK.

4.1.3. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju

Na slici 11. prikazane su promjene u čvrstoći pri savijanju u kontrolnim uzorcima kao i u uzorcima s udjelom BFS-a.

Kao što je vidljivo na slici 11., razine čvrstoće pri savijanju svih uzoraka s udjelom BFS-a nakon sedam, 28 i 90 dana povećale su se u usporedbi s kontrolnim uzorcima proizvedenima samo s cementom (K-C). To je povećanje doseglo maksimalnu vrijednost u (C20B) uzorku, a nakon te vrijednosti povećanje se smanjilo. Uzimajući u obzir 28-dnevno njegovanje, utvrđeno je da se u usporedbi s referentnim kontrolnim uzorcima razina čvrstoće pri savijanju uzoraka betona povećala za 3,40 % u betonu s 15 % udjela BFS-a odnosno za 6,42 % u betonu s 20 % udjela BFS-a, za 5,58 % u betonu s 25 % udjela BFS-a te za 4,58 % u betonu s 30 % udjela BFS-a.

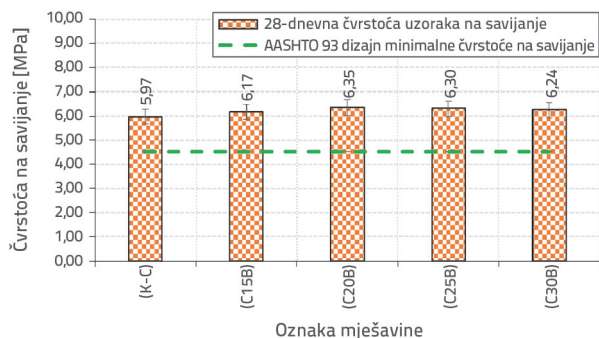


Slika 11. Grafikon koji prikazuje čvrstoću pri savijanju kontrolnih uzoraka i uzoraka s BFS-om nakon 7, 28 i 90 dana

Tijekom istraživanja u literaturi je uočeno to da se razina čvrstoće pri savijanju povećala kod mješavina pripremljenih s udjelima BFS-a, i to za 1,08 % s 10-postotnim udjelom BFS-a [34], no prema rezultatima ovoga istraživanja, došlo je do većega opsega

povećanja. Međutim, razine čvrstoće pri savijanju kod uzoraka nakon 90 dana povećale su se za 4,82, 9,03, 7,32 i 5,61 % u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Imajući u vidu ta povećanja, uočeno je da se razina čvrstoće pri savijanju uzoraka nastavila povećavati s produljenjem vremena njego vanja.

Prema Tehničkim specifikacijama betonskih cestovnih kolnika TCK [27], čvrstoća bi pri savijanju nakon 28 dana trebala biti veća od 4,50 N/mm². U sklopu istraživanja uspoređene su razine čvrstoće pri savijanju uzoraka nakon 28 dana, a rezultati su prikazani na slici 12.

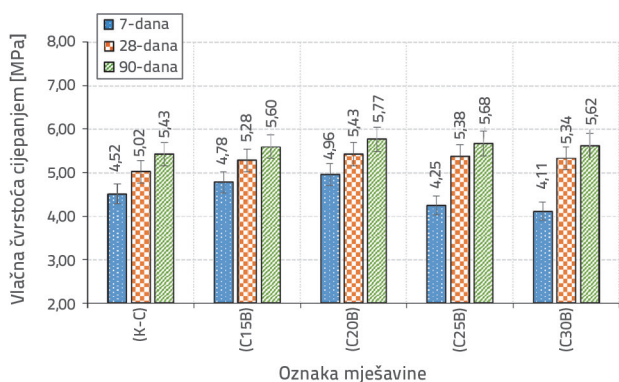


Slika 12. Kriterij projektiranja čvrstoće pri savijanju uzoraka nakon 28 dana

Na slici 12. prikazano je to da čvrstoće pri savijanju svih uzoraka na kraju razdoblja od 28 dana zadovoljavaju potrebne minimalne vrijednosti čvrstoće pri savijanju (4,50 N/mm²) prema Tehničkim specifikacijama betonskih cestovnih kolnika TCK.

4.1.4. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri cijepanju

Na slici 13. prikazana je promjena razine čvrstoće pri cijepanju kod kontrolnih uzoraka te uzoraka s udjelom BFS-a.

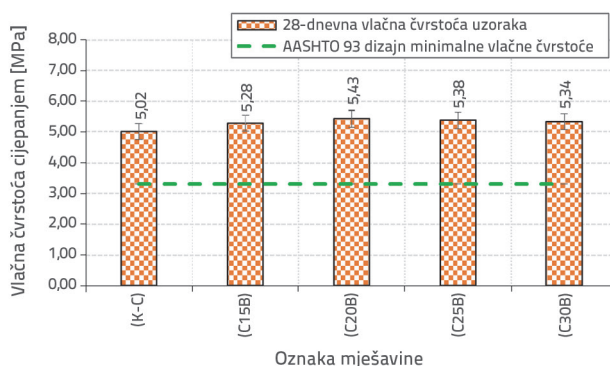


Slika 13. Grafikon koji prikazuje razinu čvrstoće pri cijepanju kod kontrolnih uzoraka i uzoraka s udjelom BFS-a nakon 7, 28 i 90 dana

Kao što se može vidjeti na slici 13., došlo je do povećanja razine čvrstoće u uzorcima betona do (C20B) nakon sedam dana te do smanjenja u uzorcima (C25B) i (C30B), nakon što je ta vrijednost

uspoređena s kontrolnim uzorcima. Utvrđeno je to da se razina čvrstoće betona pri cijepanju povećala kod uzoraka koji su bili njegovani 28 i 90 dana u usporedbi s kontrolnim uzorcima, a maksimalna se razina čvrstoća pojavila kod uzorka (C20B). To se povećanje u razini čvrstoće pri cijepanju nakon 28 dana pojavilo pri udjelima od 5,18, 8,17, 7,17 i 6,37 % u usporedbi s kontrolnim uzorcima. U prethodnim istraživanjima, kada se koristio CEM I 42,5 R tip cementa, utvrđeno je da se čvrstoća pri cijepanju zgre povećala za 1,26 % u slučaju kada se nakon 28 dana razina čvrstoće pri cijepanju smanjila za 30 %, a dodan je BFS [35]. Međutim, nakon 90 dana razine čvrstoće pri cijepanju kod uzoraka povećale su se za 3,13, 6,26, 4,60 i 3,50 % u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Imajući u vidu ta povećanja uočeno je da se čvrstoća pri cijepanju kod uzoraka nastavila povećavati s produljenjem vremena njego vanja.

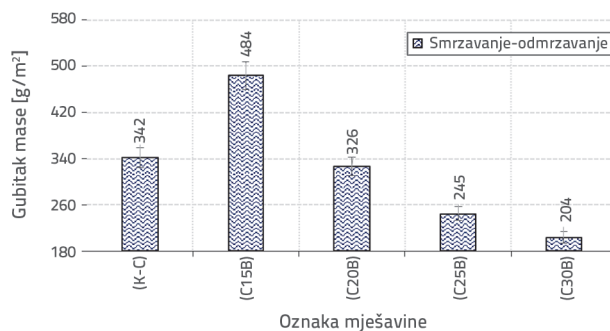
Prema Tehničkim specifikacijama betonskih cestovnih kolnika TCK [27], nakon 28 dana razina čvrstoće pri cijepanju kod uzoraka trebala bi biti veća od 3,30 N/mm². U sklopu istraživanja uspoređene su razine čvrstoće pri cijepanju kod uzoraka nakon 28 dana, a rezultati su prikazani na slici 14.



Slika 14. Kriteriji projektiranja čvrstoće pri cijepanju kod uzoraka nakon 28 dana.

4.1.5. Rezultati ispitivanja otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Na slici 15. prikazani su gubitci mase koji su dobiveni kao rezultat eksperimenta provedenog na kockastim uzorcima (150 mm).



Slika 15. Rezultati ispitivanja otpornosti uzoraka na smrzavanje i odmrzavanje

Na slici 15. prikazano je da je zadovoljen uvjet da gubitak mase koji je rezultat 28 ciklusa bude manji od $0,50 \text{ kg/m}^2$, što je u skladu s Tehničkim specifikacijama betonskih cestovnih kolnika TCK. Ipak, uočeno je da se najveći gubitak mase među uzorcima pojavio u uzorcima s 15-postotnim udjelom BFS-a (C15B). Nakon tog omjera, a u usporedbi s kontrolnim uzorkom (K-C), gubitci mase kod uzorka (C20B) smanjili su se za 4,68 %, kod uzorka (C25B) za 28,36 % te kod uzorka (C30B) za 40,35 % pa se zato povećala razina otpornosti na smrzavanje. Smatra se da je to rezultat toga što je razina unutarnjega naprezanja u betonu, koja je posljedica smrzavanja, niža zbog toga što su uzorci s udjelom BFS-a porozniji. Ipak, u prethodnim istraživanjima utvrđeno je da je najveći gubitak mase postignut kod 10-postotnog udjela BFS-a, a nakon te vrijednosti pojavio se znatan porast razine čvrstoće (smanjenje gubitka mase u usporedbi s kontrolnim uzorcima) [36].

4.2. Rezultati projektiranja

4.2.1. Rezultati projektiranja debljine betonskoga kolnika

Betonski kolnik autoceste projektiran je prema projektnim smjernicama metode AASHTO 1993 koje se temelje na

čvrstoćama betonskih uzoraka s BFS-om nakon 28 dana, i to u udjelu od 0, 15, 20, 25 i 30 %. U izračunima debljine betonskoga cestovnog kolnika uzeto je u obzir sedam različitih prometnih situacija i vrlo slabo tlo (plastična glina). Pri odabiru prometnoga opterećenja u obzir je uzeto standardno ponavljanje opterećenja osovine 1×10^6 te je ono uzeto kao slab opseg prometa, gdje je godišnji prosjek svakodnevnoga jakog opsega prometa (AADHVT) manji od 500, odnosno $W_{8,2}$ manji je od $3,1 \times 10^6$. Što se tiče jakog opsega prometa, u razmatranje su uzeta ponavljanja standardnoga osovinskog opterećenja od 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 i 400×10^6 , gdje je vrijednost AADHVT veća od 500. U tablici 12. dan je pregled uobičajenih parametara koji se koriste u izračunima.

U tablici 13. prikazani su minimalni zahtjevi čvrstoće pri projektiranju betonskoga kolnika [27].

U tablici 14. prikazane su vrijednosti S'_c i E_c koje bi se trebale koristiti pri projektiranju betonskoga kolnika uzoraka koji su proizvedeni za tla vrlo slabe nosivosti (plastična glina).

U tlima vrlo slabe nosivosti ($k = 150 \text{ pci}$) određene su debljine kolnika (1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 i 400×10^6) za različita kretanja objekta, i to izračunom uz pomoć jednadžbe 2. Grafikon varijacije debljina kolnika izloženog prometu prikazan je na slici 16.

Tablica 12. Uobičajeni parametri koji se koriste u projektiranju betonskoga kolnika

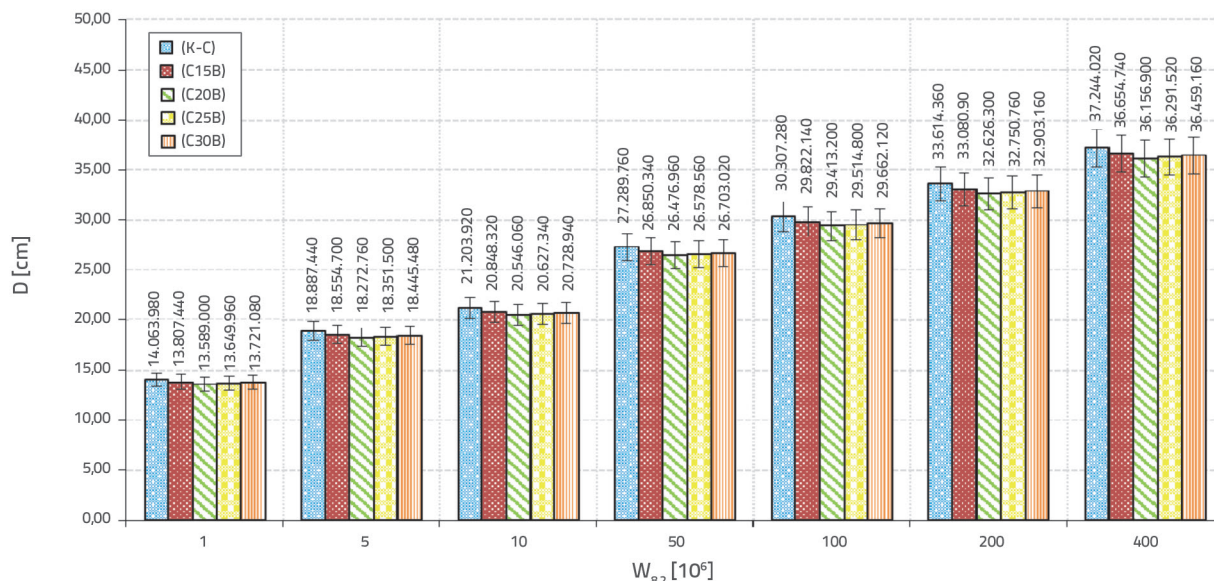
Parametri	Odabrana vrijednost
Ekvivalentna ponavljanja opterećenja osovine koja iznosi 8,2 tone, $W_{8,2}$	1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 i 400×10^6
Koeficijent prijenosa opterećenja, J	2,70
Koeficijent drenaže, C_d	1
Standardna pogreška predviđanja prometa i predviđanja izvedbe, S_0	0,35
U slučaju 95 % R_E standardna normalna devijacija, ZR	-1,645
Gubitak uporabivosti, ΔPSI (psi), $\Delta PSI = P_0 - P_t$	2

Tablica 13. Minimalne karakteristične vrijednosti tlačne čvrstoće, čvrstoće pri savijanju, čvrstoće pri cijepanju u projektiranju betona koji se koristi za cestovne kolnike

Karakteristična tlačna čvrstoća kocke, f_{ck} [N/mm ²]	Čvrstoća pri savijanju, f_{cbt} [N/mm ²]	Čvrstoća pri cijepanju, f_{sk} [N/mm ²]
Min. C 30/37	Min. 4,50	Min. 3,30

Tablica 14. Vrijednosti S'_c i E_c betonskih uzoraka

Oznaka mješavine	Karakteristična tlačna čvrstoća kocke (28 dana) [MPa]	Čvrstoća pri cijepanju, (28 dana) [MPa]	S'_c - Čvrstoća pri cijepanju, (28 dana) [MPa]	E_c ($E_c = 6750 \cdot S'_c$) [MPa]
(K-C)	49,24	5,02	5,97	40.297,50
(C15B)	54,15	5,28	6,17	41.647,50
(C20B)	56,28	5,43	6,35	42.862,50
(C25B)	52,14	5,38	6,30	42.525,00
(C30B)	51,30	5,34	6,24	42.120,00



Slika 16. Grafikon promjene W_{8,2} – D kod uzoraka u tlima vrlo slabe nosivosti

Na slici 16. prikazano je da se debljina cestovnog kolnika (D) uzoraka s udjelom BFS-a smanjila u usporedbi s kontrolnim uzorkom u tlima slabe nosivosti. To se smanjenje za kretanja objekta 1 × 10⁶, 5 × 10⁶, 10 × 10⁶, 50 × 10⁶, 100 × 10⁶, 200 × 10⁶ i 400 × 10⁶ računa na sljedeći način:

- 1,82 %, 1,76 %, 1,68 %, 1,61 %, 1,60 %, 1,59 % i 1,58 % u (C15B) uzorku
- 3,38 %, 3,25 %, 3,10 %, 2,98 %, 2,95 %, 2,94 % i 2,92 % u (C20B) uzorku
- 2,94 %, 2,84 %, 2,72 %, 2,61 %, 2,61 %, 2,57 % i 2,56 % u (C25B) uzorku

- 2,44 %, 2,34 %, 2,24 %, 2,15 %, 2,13 %, 2,12 % i 2,11 % u (C30B) uzorku.

4.2.2. Rezultati analize troškova

Kao osnova za analizu troškova debljine cestovnog betonskog kolnika kontrolnih uzoraka te uzoraka s udjelom BFS-a uzete su cijene iz provincije Tekirdağ iz travnja 2022. U analizu troškova nije uključen debeli temelj od plentimiksa (PMT) ispod zgre, a koji se preporuča po metodi AASHTO, jer je bio primijenjen na svim uzorcima. U tablici 15. prikazane su jedinične cijene u sklopu analize troškova.

Tablica 15. Jedinične cijene za analizu troškova

Materijali	Jedinica	Jedinična cijena [\$]
Cement (3,80 g/cm ³)	\$ /Tona	102,50
Mineralni dodatak (2,90 g/cm ³)		38,89
Voda		1,15
Agregat 0 – 5 mm (2,77 g/cm ³)		32,45
Agregat 5 – 11 mm (2,79 g/cm ³)		28,50
Agregat 11 – 22 mm (2,80 g/cm ³)		30,40
Kemijski aditiv (1,08 g/cm ³) (nova generacija superplastifikatora)		1100

Tablica 16. Jedinična cijena kontrolnoga uzorka i uzorka s udjelom BFS-a

Oznaka uzorka	Vezivo [kg/m ³]		Agregat [kg/m ³]			Voda [kg/m ³]	Super plastifikator [kg/m ³]	Ukupni trošak [\$]	Trošak 1 m ² i debljine 1 cm [\$]
	Cement	BFS	0 – 5 [mm]	5 – 11 [mm]	11 – 22 [mm]				
(K-C)	450,00	0,00	410	709	746	180	6	109,12	1,09
(C15B)	382,50	67,50	409	707	744			104,68	1,05
(C20B)	360,00	90,00	409	707	744			103,25	1,03
(C25B)	337,50	112,50	409	706	743			101,76	1,02
(C30B)	315,00	135,00	409	706	743			100,32	1,00

Jedinične cijene za kontrolne uzorke i za uzorke kojima je dodan BFS izračunane su uz pomoć tablice 15., a prikazane u tablici 16.

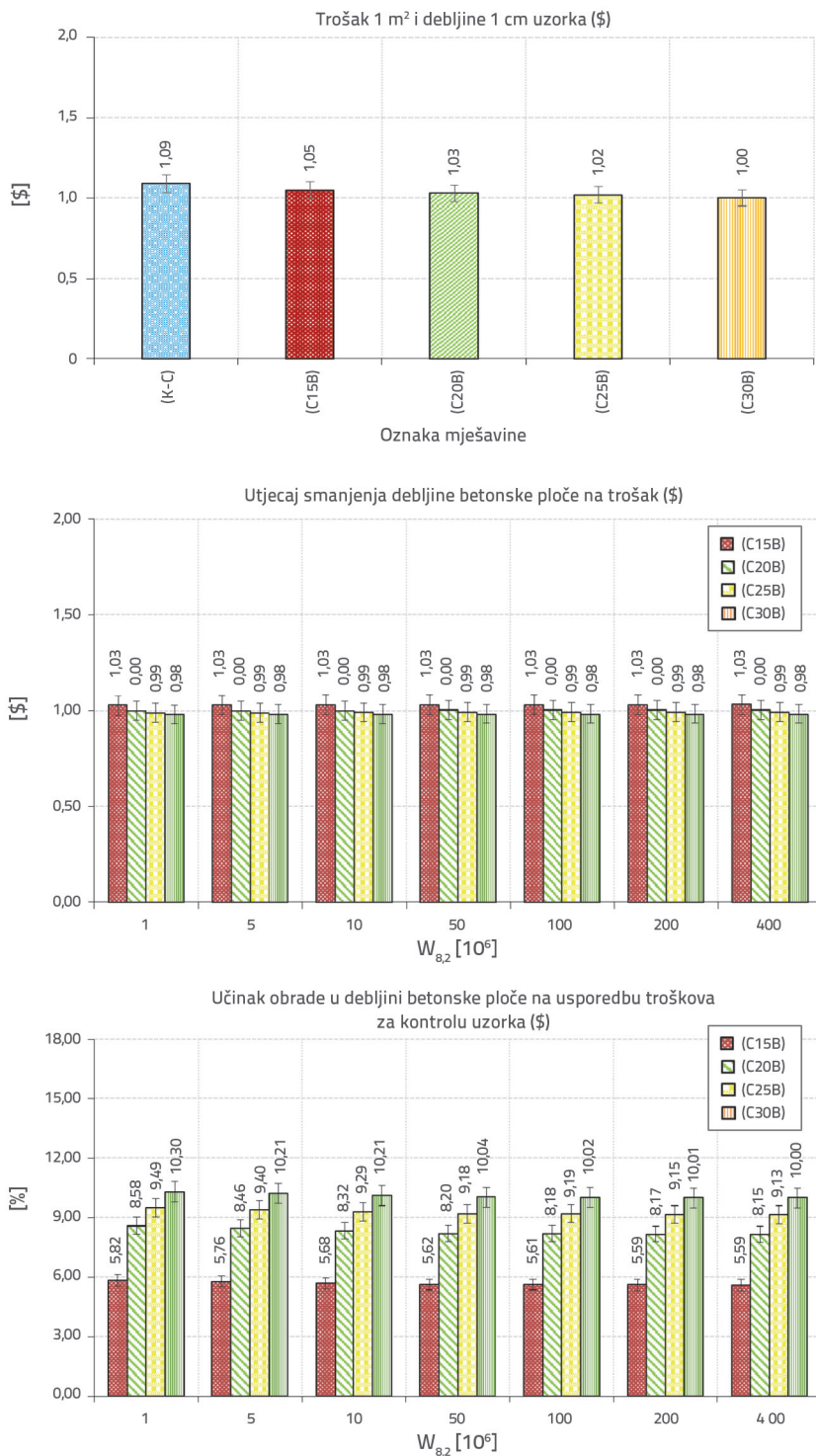
Na slici 17. prikazana je analiza troškova uzoraka u sklopu ovoga istraživanja. Prikazano je smanjenje troškova za barem 5,59 %

odnosno najviše za 10,30 % kada je u pitanju debljina kolničkoga sloja za različita kretanja objekta (1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 , 50×10^6 , 100×10^6 , 200×10^6 i 400×10^6) u slučaju da se umjesto kontrolnih uzoraka u projektiranju debljine betonskog kolnika koristi beton ojačan BFS-om za 15, 20, 25 i 30 %.

5. Zaključak

U ovome su istraživanju ispitana mehanička svojstva betonskih kolnika pripremljenih tako što je cement zamijenjen BFS-om u različitim omjerima u svojstvu veziva te utjecaji BFS-a na debljinu betonskoga kolnika. Osim toga istraženi su troškovi u slučaju da se cesta gradila na tlima slabe nosivosti. Rezultati istraživanja su sljedeći:

- Zamjenom cementa BFS-om u udjelu od 0, 15, 20, 25 i 30 % po težini dobiven je obradiviji i protočniji beton u usporedbi s kontrolnom mješavinom.
- Zamjenom sa BFS tlačna se čvrstoća uzoraka nakon sedam dana njegovanja smanjila, dok se tlačna čvrstoća uzoraka povećala nakon 28 i 90 dana njegovanja. U usporedbi s kontrolnim uzorkom najveće povećanje od 14,30 % pojavilo se u uzorku s 20-postotnim udjelom BFS-a (C20B) nakon 28 dana njegovanja odnosno od 15,90 % u uzorku nakon 90 dana njegovanja. Uočeno je to da se pri tome udjelu tlačna čvrstoća nastavila povećavati s produljenjem vremena njegovanja.
- Rezultati čvrstoće pri savijanju pokazuju da se razina čvrstoća pri savijanju kod uzoraka s udjelom BFS-a povećala nakon sedam, 28 i 90 dana u usporedbi s kontrolnim uzorcima. Najveća povećanja pojavila su se kada je udio BFS-a iznosio 20 % (C20B), i to od 6,42 % na uzorcima nakon 28 dana odnosno od 9,03 % na uzorcima nakon 90 dana. Utvrđeno je da vrijeme njegovanja ima znatnu ulogu u čvrstoći uzoraka s aditivom pri savijanju.
- Prema rezultatima čvrstoće pri cijepanju, povećanje razine čvrstoće do udjela od 20 % BFS-a (C20B) smanjilo se u usporedbi s kontrolnim uzorcima nakon sedam dana. Međutim, iako je postojalo povećanje u uzorcima nakon 28 i 90 dana njegovanja, najveće vrijednosti čvrstoće dobivene



Slika 17. Analiza troškova kontrolnoga uzorka i uzorka s udjelom BFS-a

- su pri udjelu BFS-a (C20B) od 20 %, i to od 8,17 % odnosno 6,26 %. Prema tim rezultatima, a s produljenjem vremena njegovanja, čvrstoća uzoraka s aditivom smanjila se pri cijepanju nakon 28 dana.
- Rezultati ispitivanja otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja pokazali su da se u usporedbi s kontrolnim uzorkom najveći gubitak čvrstoće (povećanje težine) pojavio u betonskim uzorcima s 15-postotnim udjelom BFS-a. Uočeno je i znatno smanjenje u gubicima mase u betonskim uzorcima s 20-postotnim, 25-postotnim i 30-postotnim udjelom BFS-a u usporedbi s kontrolnim uzorcima. U tome smislu smatra se da se svojstvo otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje povećava s povećanjem udjela BFS-a, počevši s udjelom od 15 %. To je rezultat toga što BFS smanjuje unutarnja naprezanja u betonu izloženome smrzavanju.
 - Kao rezultat izračuna utvrđeno je da se debljina uzoraka betonskoga kolnika ojačanog BFS-om koji se treba izgraditi na tlima slabe nosivosti (plastična glina), a koji je izložen različitim prometnim opterećenjima, smanjila za 1,58 – 3,38 % odnosno za 5,59 – 10,30 % u smislu troškova.

- Prema istraživanju, uzimajući u obzir 20-postotni udio BFS-a (C20B), pri kojemu je razina čvrstoće betona kojemu je dodan BFS najveća i koji u tome udjelu zamjenjuje cement, smanjit će se trošak cementa koji će se koristiti, baš kao i emisije ugljika. Također, bit će uklonjena fizička šteta za okoliš koju izaziva BFS, a gospodarstvo će imati dodanu vrijednost.

Kao rezultat istraživanja određene su potrebne razine tlačne čvrstoće, čvrstoće savijanjem i čvrstoće cijepanjem za projektiranje betonskoga kolnika, a debljine sloja čvrstoga cestovnog kolnika i troškovi izgradnje smanjeni su upotrebom BFS-a umjesto cementa na tlima vrlo slabih nosivosti koja su izložena različitim opterećenjima prometa.

Zahvala

Ovo istraživanje potpomogla je Koordinacijska jedinica Znanstveno-istraživačkih projekata (SRP) Sveučilišta Inonu u sklopu projekta br. IU-BAP FDK-2022-2837.

LITERATURA

- [1] Gáspár, L., Bencze, Z.: Increasing the life expectancy of road pavements, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 6, pp. 515-522, <https://doi.org/10.14256/JCE.2644.2019>
- [2] Shafigh, P., Hashemi, M., Nam, B.H., Asadi, I.: Laboratory comparison of roller-compacted concrete and ordinary vibrated concrete for pavement structures, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 2, pp. 127-137, <https://doi.org/10.14256/JCE.2572.2018>
- [3] Pradena, M., Houben, L.: Influence of early-age concrete behaviour on concrete pavements performance, GRAĐEVINAR, 69 (2017) 9, pp. 875-883, <https://doi.org/10.14256/JCE.1931.2016>
- [4] Lin, S.K., Wu, C.H.: Improvement of bond strength and durability of recycled aggregate concrete incorporating high volume blast furnace slag, Materials, 14 (2021) 13, pp. 3708, <https://doi.org/10.3390/ma14133708>
- [5] Boran, H., Günaydin, O., Güçlüer, K.: Investigation of engineering properties of blast furnace slag additive mortars, MANAS Journal of Engineering, 8 (2020) 2, pp. 138-143, <https://doi.org/10.51354/mjen.795891>
- [6] Kavitha, S.M., Venkatesan, G., Avudaiappan, S., Flores, E.S.: Mechanical and flexural performance of self-compacting concrete with natural fiber, Revista De La Construcción, 19 (2020) 2, pp. 370-380, <https://doi.org/10.7764/rdlc.19.2.370>
- [7] Highways Concrete Road Pavement Project Guidelines, (2019), Türkiye.
- [8] Pradena, M., Houben, L., Cesar, A.: Experimental evaluation of load transfer efficiency of non-dowelled concrete pavements, GRAĐEVINAR, 74 (2022) 3, pp. 179-187, <https://doi.org/10.14256/JCE.2844.2019>
- [9] Wu, F., Li, H., Yang, K.: Effects of mechanical activation on physical and chemical characteristics of coal-gasification slag, Coatings, 11 (2021), pp. 902 <https://doi.org/10.3390/coatings11080902>
- [10] Fernandez, L., Malhotra, V.M.: Mechanical properties, abrasion resistance and chloride permeability of concrete incorporating granulated Blast-Furnace Slag (BFS), Cement, Concrete and Aggregates, 12 (1990) 2, pp. 87-100, <https://doi.org/10.1520/CCA10276J>
- [11] Öner, A., Akyüz, S.: An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete, Cement and Concrete Composites, 29 (2007) 6, pp. 505-514. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.01.001>
- [12] Al-Baijat, H., Sarireh, M.: The use of fine blast furnace slag in improvement of properties of concrete, Open Journal of Civil Engineering, 9 (2019) 2, pp. 95-105, <https://doi.org/10.4236/ojce.2019.92007>
- [13] Menéndez, G., Bonavetti, V., Frassar, E.: Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag, Cement and Concrete Composites, 25 (2003) 1, pp. 61-67, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00056-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00056-7)
- [14] Rodrigues, A.L.M.V., Mendes, Á.Á.F., Gomes, V., Battagin, A.F., Saade, M.R.M., Da Silva, M.G.: Environmental and mechanical evaluation of blended cements with high mineral admixture content. Structural Materials, 9 (2022), pp. 1-11, <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.880986>
- [15] Yeau, K.Y., Kim, E.K.: An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulated blast furnace slag, Cement and Concrete Research, 35 (2005) 7, pp. 1391-1399, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.010>
- [16] Lee, H.S., Wang, X.Y., Zhang, L.N., Koh, K.T.: Analysis of the optimum usage of slag for the compressive strength of concrete. Materials, 8 (2015) 3, pp. 1213-1229, <https://doi.org/10.3390/ma8031213>
- [17] Shariq, M., Prasad, J., Masood, A.: Effect of GGBFS on time dependent compressive strength of concrete. Construction and Building Materials, 24 (2010) 8, pp. 1469-1478, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.007>

- [18] Jin-Young, L., Jin-Seok, C., Tian-Feng, Y., Young-Soo, Y., Denis, M.: Comparing properties of concrete containing electric arc furnace slag and granulated blast furnace slag, *Materials*, 12 (2019) 9, pp. 1-11, <https://doi.org/10.3390/ma12091371>
- [19] TS EN 197-1.: Cement-Part 1: General cements-composition, properties and conformity criteria, Turkish Standards Institute, 2012.
- [20] TS EN 933-1.: Experiments for geometric properties of aggregates Part 1: Determination of particle size distribution-sieving method. Turkish Standards Institute, 2012.
- [21] TS EN 1097-6.: Experiments for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption rate. Turkish Standards Institute, 2002.
- [22] TS EN 1097-2.: Experiments for mechanical and physical properties of aggregates Part 2: Methods for determination of fragmentation resistance. Turkish Standards Institute, 2000.
- [23] TS EN 1367-4.: Tests for thermal properties of aggregates - Part 4: Determination of drying shrinkage, Turkish Standards Institute, 2009.
- [24] CAN/CSA-A23.2-25A-14.: Test Method for Detection of Alkali-Silica Reactive Aggregate by Accelerated Expansion of Mortar Bars, Canadian Standards Association, 2014.
- [25] TS 781 ISO 758.: Density determination at -20°C for liquid chemical products used in industry, 1998.
- [26] TS EN 12350-2.: Concrete - Fresh concrete tests - Part 2: Slump test, 2019.
- [27] TCK Concrete Road Pavements Technical Specification.: Turkey, 2019.
- [28] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures: American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993.
- [29] Humad, A.M., Kothari, A., Provis, J.L., Cwirzen, A.: The effect of blast furnace slag ratio on setting, strength, and shrinkage of alkali-activated pastes and concretes. *Materials*, 6 (2019) 9, pp. 1-10, <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00009>
- [30] Aghaeipour, A., Madhkhan, M.: Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability, *Construction and Building Materials*, 141 (2017), pp. 533-541, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.019>
- [31] Huynh, T.P., Ho, L.S., Ho, Q.V.: Experimental investigation on the performance of concrete incorporating fine dune sand and ground granulated blast-furnace slag, *Construction and Building Materials*, 347 (2022), pp. 128512, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128512>
- [32] Elsayed, M., Tayeh, B.A., Aisheh, I.A., El-Nasser, N.A., Elmaaty, M.A.: Shear strength of eco-friendly self-compacting concrete beams containing ground granulated blast furnace slag and fly ash as cement replacement, *Case Studies in Construction Materials*, 17 (2022), pp. e01354, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01354>
- [33] Dabhekar, K.R., Nagarnaik, P.B., Pawade, P.Y.: Relationship between compressive strength and UPV for concrete with partial replacement of GGBFS, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8 (2017) 5, pp. 582-592, <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=8&Issue=5>
- [34] Yang, J.M., Yoo, D.Y., Kim, Y.C., Yoon, Y.S.: Mechanical properties of steam cured high-strength steel fiber-reinforced concrete with high-volume Blast Furnace Slag, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11 (2017), pp. 391-401, <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0200-0>
- [35] Ahmad, J., Martínez-García, R., Szlag, M., Prado-Gil, J., Marzouki, R., Alqurashi, M., Hussein, E. E.: Effects of steel fibers (SF) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) on recycled aggregate concrete, *Materials*, 14 (2021) 24, pp. 7497, <https://doi.org/10.3390/ma14247497>
- [36] Reiterman, P., Holčapek, O., Zobal, O., Keppert, M.: Freeze-thaw resistance of cement screed with various supplementary cementitious materials, *Reviews on Advanced Materials Science*, 58 (2019), pp. 66-74, <https://doi.org/10.1515/rams-2019-0006>