

Primljen / Received: 6.10.2022.

Ispravljen / Corrected: 5.3.2023.

Prihvaćen / Accepted: 19.4.2023.

Dostupno online / Available online: 10.8.2023.

Analiza betona ojačanog vlaknima za betonske kolnike na slabo nosivom tlu

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 Ince**, 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 Ince

Analiza betona ojačanog vlaknima za betonske kolnike na slabo nosivom tlu

U ovom su radu analizirani učinci primjene čeličnih vlakana u betonu na debljinu i trošak gradnje betonskog kolnika. Ispitana su fizikalna i mehanička svojstva uzoraka betona ojačanog vlaknima. Rezultati ispitivanja su pokazali da se povećanjem udjela čeličnih vlakana smanjuje obradljivost i tlačna čvrstoća uzoraka, ali se povećava njihova čvrstoća na savijanje i vlačna čvrstoća cijepanjem. Osim toga, prema proračunima metode AASHTO 1993, s povećanjem udjela čeličnih vlakana u betonu, debljina betonskog kolnika smanjuje se od 4,35 % do 18,66 %, a trošak gradnje kolnika povećava se za 56,50 % do 74,07 %.

Ključne riječi:

betonski kolnik, čelična vlakna, AASHTO metoda, mehaničke karakteristike, analiza troška

Research Paper

Tacettin Geçkil, Mehmet Mahmut Tanyıldızı, Ceren Beyza Ince

Analysis of fibre reinforced concrete for road pavements on very weak soils

In this paper, the effects of steel fibre usage on concrete pavement thickness and cost were investigated. Prepared fibrous concrete specimens were subjected to physical and mechanical tests. From the experiments, it was determined that as the steel fibre ratio increased, the workability and compressive strength of the specimens decreased, but the flexural and splitting tensile strengths increased. In addition, according to calculations made using the AASHTO 1993 design method, the concrete pavement thickness decreased in the range of 4.35 to 18.66 % with an increase in steel fibre, but the pavement cost increased by 56.50 to 74.07 %.

Key words:

concrete road pavement, steel fibre, AASHTO method, mechanical properties, cost analysis

1. Uvod

Zahvaljujući brzom napretku tehnologije betona posljednjih godina, istraživači su ispitivali učinke aditiva koji se dodaju betonu za postizanje visokih čvrstoća betona, kao i različitih zamjenskih materijala na fizikalna i mehanička svojstva betona. Na temelju takvih istraživanja, umjetni pucolani poput letećeg pepela, silicijeve prašine, zgure iz visoke peći i čeličnih vlakana postali su uobičajena zamjena ili dodatak betonu u betonskim kolnicima [1, 2]. Umjetno korišteni pucolani pridonose očuvanju prirodnih resursa i okoliša te smanjuju troškove betona [3, 4]. Leteći pepeo je mineralni otpad iz termoelektrana s pucolanskim svojstvima. Čestice letećeg pepela općenito se preferiraju kao dodatak betonu zbog svog sfernog oblika, kao i činjenice da poboljšavaju obradljivost betona, smanjuju razlijevanje svježeg betona te smanjuju toplinu hidratacije betona [5]. Silicijska prašina je industrijski otpadni materijal koji sadrži velike količine silicija, obično u obliku staklastih i glatkih čestica sfernog oblika. Čestice silicijske prašine ispunjavaju praznine u smjesi, smanjuju broj kristala Ca(OH)_2 i povećavaju čvrstoću cementa i betona. Zgura iz visokih peći je otpadni proizvod koji se generira tijekom proizvodnje željeza; također ima vezivna svojstva jer sadrži visok udio kalcijevog oksida. Taj otpadni materijal povećava tlačnu čvrstoću i obradljivost svježeg betona te smanjuje efekt tzv. "znojenja betona" [6, 7]. Čelična vlakna u betonu značajno poboljšavaju čvrstoću na savijanje, žilavost, sposobnosti apsorpcije energije i trajnost betona te sprječavaju nastanak pukotina. Čelična vlakna čine beton trajnijim te usporavaju širenje pukotina u betonu jer naprezanja koja nastaju na krajevima pukotina prenose na sebe i na okolne čvrste površine, sprječavajući gubitak čvrstoće koji bi pukotine uzrokovale u betonu [8, 9]. Količina vlakana koja se koristi u mješavini i vitkost vlakana također imaju značajan utjecaj na čvrstoću na savijanje, energiju loma i žilavost betona ojačanog čeličnim vlaknima. Varijacije postotka čeličnih vlakana u betonu ovise o geometrijskom obliku vlakana i prijanjanju vlakana i betonske matrice. Zato se čelična vlakna proizvode i primjenjuju u različitim geometrijskim oblicima.

Rezultati istraživanja u kojima je ispitan utjecaj veličine vlakana pokazala su to da kratka vlakna povećavaju tlačnu čvrstoću betona odgađajući formiranje prve pukotine u betonu, a duga vlakna značajno povećavaju tlačnu čvrstoću cijepanjem jer prenose opterećenje i povećavaju žilavost betona [10]. Zahvaljujući tim prednostima, beton ojačan vlaknima ima širi raspon primjena za razliku od konvencionalnog betona [11]. Beton ojačan vlaknima se sve više primjenjuje u gradnji tunela, kolnicima s prskanim betonom, na aerodromskim pistama i autocestama, industrijskim i hidrotehničkim građevinama zbog visoke abrazivne i vlačne čvrstoće, stabilizacije nagiba i izgradnje potpornih zidova, potresno otpornih konstrukcija te popravka i ojačanja nosivih elemenata zgrada i inženjerskih građevina [12]. Kolnici od betona ojačanog vlaknima imaju visoku otpornost na zamor materijala i udarno opterećenje, te zadovoljavajuću čvrstoću na kontinuirano opterećenje kotača vozila. Stoga

čelična vlakna čine lomljive betonske konstrukcije fleksibilnijima i trajnijima jer djeluju kao mostovi između mikropukotina i prenose naprezanje preko velike površine. Kao rezultat toga, raspodjela naprezanja u betonu se mijenja, a kapacitet prenošenja opterećenja značajno se povećava [13-15].

U provedenim istraživanjima betona ojačanog čeličnim vlaknima utvrđeno je to da vlakna imaju učinak od otprilike $\pm 25\%$ na tlačnu čvrstoću betona; međutim, vlakna više utječu na čvrstoću na savijanje nego na tlačnu i vlačnu čvrstoću. Konačna čvrstoća na savijanje betona ojačanog vlaknima je do 50% veća od čvrstoće na savijanje konvencionalnog betona, kao i tlačna čvrstoća [16-18]. Rezultati su pokazali da vlakna nemaju značajan utjecaj na tlačnu čvrstoću betona te smanjuju tlačnu čvrstoću za $5,10\%$ do $9,59\%$, a povećavaju čvrstoću na savijanje betona do $21,15\%$ [19, 20]. Nadalje, vrlo malo istraživanja pokazalo je da beton ojačan čeličnim vlaknima ($0,5\%$) smanjuje debljinu betonske površine do $20,50\%$, ovisno o prometnom opterećenju prometa, koeficijentu pouzdanosti i nosivosti tla [21].

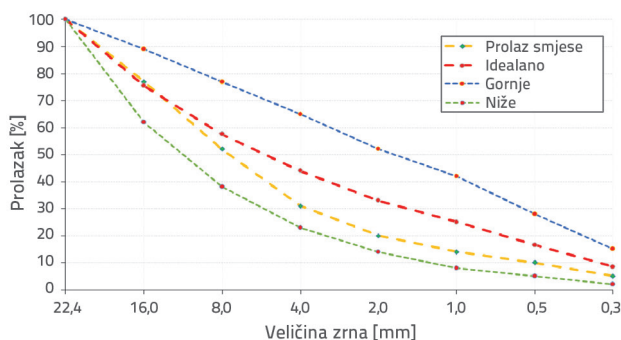
Većina postojećih istraživanja koja koriste čelična vlakna imaju za cilj poboljšanje svojstava čvrstoće betona. Međutim, u njima se ne primjenjuje multidisciplinarni pristup ili se zanemaruje upotrebu betona ojačanog čeličnim vlaknima za betonske kolnike. Zbog toga, potencijalna primjena betona ojačanog čeličnim vlaknima za izgradnju betonskih kolnika za različiti promet i vrste tla te učinak debljine takve vrste betona na trošak izgradnje betonskog kolnika do danas nisu temeljito razmatrani. U ovom istraživanju, za razliku od ograničenog broja prethodnih istraživanja, ispitana je mogućnost primjene betona s različitim omjerima čeličnih vlakana na vrlo slabim tlama poput plastične gline, za različita prometna opterećenja. U tu svrhu, uzorci vlaknastog betona podvrgnuti su nizu ispitivanja, uključujući ispitivanja obradljivosti, tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje, vlačne čvrstoće cijepanjem te otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje u različitim uvjetima njegovanja betonskih uzoraka. Također, primjenom metode projektiranja AASHTO 1993, određene su debljine betonskog ojačanog čeličnim vlaknima, te su provedene analize troškova za svaku debljinu betonskog kolnika.

2. Materijali i metode

2.1. Materijali

U ovom se istraživanju betonska mješavina sastojala od drobljenog pijeska, drobljenog kamena, portland cementa, vode za miješanje, čeličnih vlakana i superplastifikatora. U svim mješavinama korišteni su drobljeni pijesak, veličine čestica $0-5\text{ mm}$ (specifična težina $2,77\text{ kg/m}^3$), drobljeni kamen-I veličine čestica $5-11\text{ mm}$ (specifična težina $2,79\text{ kg/m}^3$) i drobljeni kamen-II veličine čestica $11-22\text{ mm}$ (specifična težina $2,80\text{ kg/m}^3$) u omjerima od 22% , 38% i 40% . Distribucija veličina čestica u mješavini prema standardnim granicama TS EN 933-1 [22] prikazana je na slici 1. U mješavinama je korišten portland cement (CEM I 42.5R) sa specifičnom težinom od $3,08\text{ g/cm}^3$,

specifičnom površinom od 3.720,00 cm²/g, udjelom SiO₂ od 19,41 % i tlačne čvrstoće nakon 7 dana njegovanja od 57,40 %. Za vodu za miješanje morta korištena je voda iz vodovoda iz Tekirdağ/Çorlu regije. Čelična vlakna duljine 60 mm, promjera 0,90 mm i omjera dužine i promjera (L/d) 65 s kukastim krajevima korištena su u proizvodnji betona (slika 2.). Vlačna čvrstoća čeličnih vlakana gustoće 7,85 g/cm³ iznosila je 1150 N/mm² prema normi TS EN 14889-1 [23].



Slika 1. Distribucija veličine čestica u agregatnoj mješavini

Kao kemijski dodatak, korišten je 1,34 % superplastifikator sa specifičnom težinom od 1,11 g/cm³ kako bi se povećala obradljivost svježeg betona, koji je postao tvrdi dodatkom čeličnih vlakana i osigurao idealna svojstva.



Slika 2. Čelična vlakna korištena u betonu

2.2. Priprema betonskih mješavina

Omjer vode i cementa je bio 0,40 u svim mješavinama, bez obzira sadrže li sadrže čelična vlakna ili ne, i taj omjer je bio konstantan. Varijacije postotka čeličnih vlakna u betonu iznosile su od 0 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,25 % i 1,50 %, a pripremljeno je pet serija mješavina s četiri različita omjera volumena čeličnih vlakana i betona bez vlakana. Svaki proizvedeni uzorak kontrolnog betona i betona ojačanog čeličnim ima posebnu oznaku prikazanu u nastavku, a sastavi materijala u mješavinama dani su u tablici 1.

- (K-C): kontrolni uzorci betona koji ne sadrže čelična vlakna
- (0,75SF+C): uzorci betona koji sadrže 0,75 % čeličnih vlakana
- (1SF+C): uzorci betona koji sadrže 1 % čeličnih vlakana
- (1,25SF+C): uzorci betona koji sadrže 1,25 % čeličnih vlakana
- (1,50SF+C): uzorci betona koji sadrže 1,50 % čeličnih vlakana.

Postupak miješanja započeo je suhim miješanjem cementa, pijeska i drobljenog kamena prema omjerima miješanja navedenima u tablici 1., nakon čega je dodano pola od ukupne količine superplastifikatora i vode. Preostale količine superplastifikatora i vode dodavane su postepeno kontroliranim načinom kako bi se osigurala homogenost smjese. Nakon što je beton postao tekući, čelična vlakna su dodana mješavini u zadnjoj fazi, a miješanje je nastavljeno sve dok nisu bila homogeno raspoređena. Miješanje je završeno nakon 15 minuta. Slika 3. prikazuje sliku svježije mješavine betona ojačanog čeličnim vlaknima.

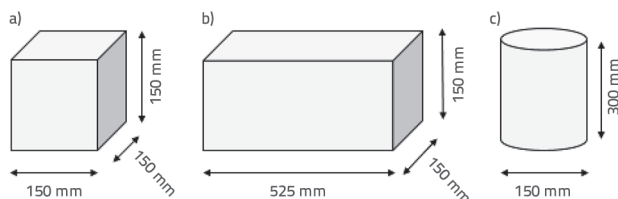


Slika 3. Svježja mješavina betona ojačanog čeličnim vlaknima

Tablica 1. Udjeli materijala u mješavinama

Oznaka mješavine	Cement [kg/m ³]	Agregat [kg/m ³]			Čelična vlakna [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Superplastifikatori [kg/m ³]	Voda/vezivo [%]
		0-5 [mm]	5-11 [mm]	11-22 [mm]				
(K-C)	450	410	709	746	0	180	6,00	0,40
(0,75SF+C)		406	701	738	58,88			
(1SF+C)		404	698	735	78,50			
(1,25SF+C)		403	695	732	98,13			
(1,50SF+C)		401	693	729	117,75			

Proizvedeni uzorci betona izliveni su u kalupe različitih veličina, ovisno o vrsti ispitivanja (slika 4.). Nakon otprilike 24 sata, uzorci su izvađeni iz kalupa i njegovani u bazenu s vodom pri temperaturi od $23 \pm 2^\circ\text{C}$ tijekom 7, 28 i 90 dana. Na kraju postupka njegovanja uzoraka, svi uzorci su preneseni u laboratorijsko okruženje i dovedeni u stanje zasićene suhe površine (engl. *saturated surface dry - SSD*). Ispitivanja očvrslog betona izvedena su na SSD uzorcima.



Slika 4. Veličine i dimenzije uzoraka

2.3. Metode

2.3.1. Eksperimentalne metode

Obrađljivost i svojstva betona u tekućem stanju

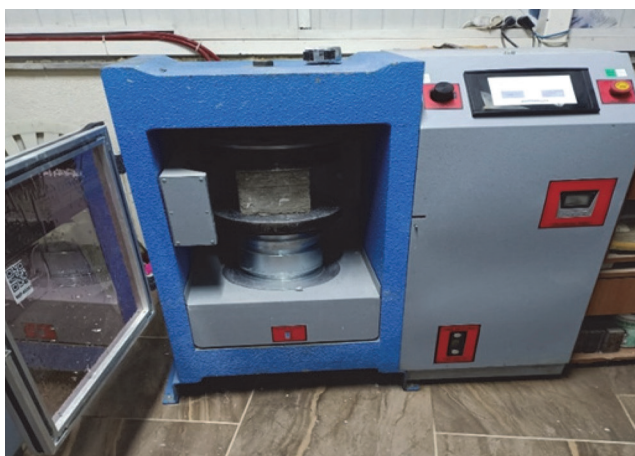
Uzorci betonskih mješavina podvrgnuti su ispitivanju slijeganja prema normi TS EN 12350-2 [24] kako bi se odredila konzistencija i obrađljivost svježeg betona. Eksperiment je proveden mjerenjem količine rasutog svježeg betona postavljenog u stožac nakon što je stožac podignut u okomitom smjeru pod utjecajem vlastite težine (slika 5.).



Slika 5. Ispitivanje slijeganja svježeg betona

Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća betona je sposobnost betona da se odupre utjecaju aksijalnog tlačnog opterećenja prije loma. Provedeno je ispitivanje kako bi se odredilo opterećenje koje može podnijeti jedinica površine uzorka. Tlačna čvrstoća betonskih uzoraka određena je odabirom brzine opterećenja u rasponu od 0,2–1,0 MPa·s (N/mm²·s), prema normi TS EN 12390-4 [25]. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona prikazano je na slici 6.



Slika 6. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Tlačne čvrstoće betonskih uzoraka izračunavaju se pomoću izraza (1).

$$f_c = F/A_c \quad (1)$$

gdje je:

f_c - tlačna čvrstoća [MPa]

F - najveće opterećenje postignuto u trenutku loma [N]

A_c - površina poprečnog presjeka uzorka pod tlačnim opterećenjem [mm²].

Ispitivanje čvrstoće na savijanje

Čvrstoća na savijanje je mjera vlačne čvrstoće vanjskih vlakana materijala. Određuje se primjenom opterećenja na cilindrične ili prizmatične uzorke sve do loma materijala, pomoću mehanizama kojim se primjenjuju opterećenja u tri ili četiri točke. Ispitivanje čvrstoće na savijanje izvedeno je pri brzini opterećenja od 0,04–0,06 MPa/s (N/mm²·s) u skladu s normom TS EN 12390-5 [26]. Ispitivanje je prikazano na slici 7.

Čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka izračunane su pomoću izraza (2),

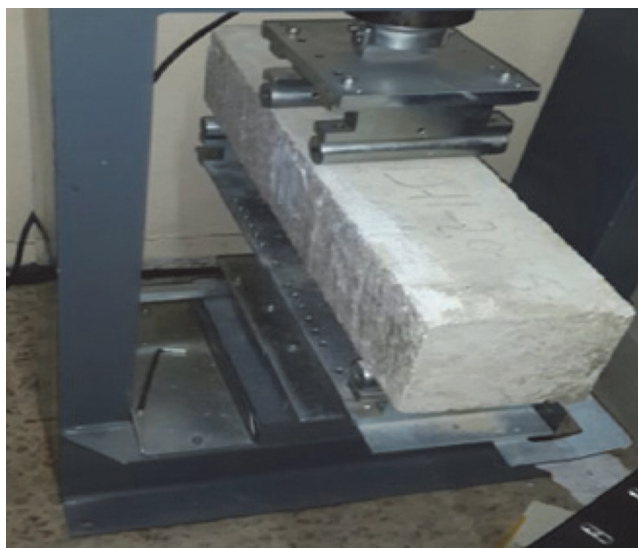
$$\sigma = P \times L / (b \times h^2) \quad (2)$$

gdje je:

σ - čvrstoća na savijanje [MPa]

P - maksimalno opterećenje [N]

- L - udaljenost između dva nosača [mm]
- b - širina uzorka [mm]
- h - visina uzorka [mm].



Slika 7. Ispitivanje čvrstoće na savijanje

2.3.1.4. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Vlačna čvrstoća cijepanjem ključna je za analizu konstrukcije i pukotina. Ona je važna za sprječavanje pukotina u masivnim građevinama, spremnicima za vodu, nuklearnim elektranama, zračnim lukama, prednapetom betonu i prometnicama. Prema normi TS EN 12390-6 [27], opterećeni je uzorak postavljen u ispitni uređaj, kao što je prikazano na slici 8. Vlačne čvrstoće formirane su okomito na tlačna naprezanja duž linearnog opterećenja primijenjenog na uzorak. Betonski uzorak je skraćivan na mjestu primjene opterećenja i produljen duž vodoravne osi u središnjem dijelu. Opterećenje uzorka je nastavljeno sve do loma paralelno s pravcem opterećenja, kada je izmjerena njegova vrijednost [19].



Slika 8. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Vlačna čvrstoća cijepanjem betonskih uzoraka izračunana je pomoću izraza (3):

$$\sigma = 2 \times P_c / (\pi \times L \times d) \tag{3}$$

gdje je:

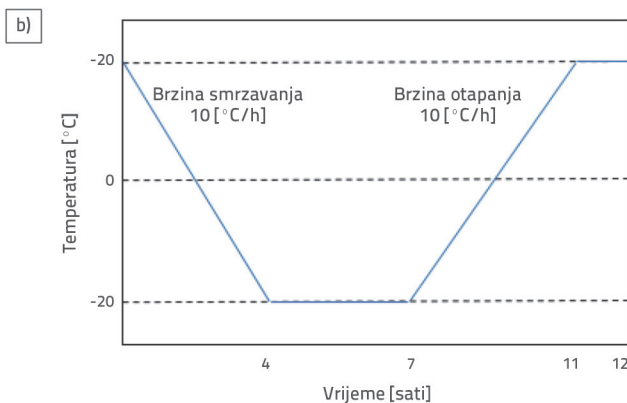
- σ - vlačna čvrstoća cijepanjem [MPa]
- P_c - opterećenje do sloma [N]
- L - udaljenost između kontaktne linije uzorka i dijela opterećenja [mm]
- d - veličina poprečnog presjeka uzorka [mm]

Ispitivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje

Ispitivanje je provedeno kako bi se odredila svojstva betona pod utjecajem okolišnih uvjeta kojima će biti izložen tijekom svoje uporabljivosti. Uzorci su ispitani na otpornost na smrzavanje i odmrzavanje prema normi TSE CEN/TS 12390-9 [28]. Smrzavanje i odmrzavanje provodilo se u uređaju prikazanome na slici 9.



Slika 9. a) Uređaj za smrzavanje i odmrzavanje; b) vrijeme ciklusa



Tablica 2. Vrijednosti parametara odabranih u metodi projektiranja AASHTO 1993 [29, 30]

Simbol	Jedinica	Opis	Objašnjenje
$W_{8,2}$	-	Ukupan broj ponavljanja prijelaza standardnog jednoosovinskog opterećenja (8,2 t)	$1 \cdot 10^5, 10 \cdot 10^5, 100 \cdot 10^5, 200 \cdot 10^5$
R	-	Inženjerski učinak koji približava projekt cilju	Preporučene (R) vrijednosti za projektiranje u Turskoj očekuju se da budu 95 % za državne ceste i autoceste, te 85 % za županijske ceste, U ovom istraživanju je uzet $R=95\%$.
Z_R	-	Standardna normalna devijacija	U izračunima provedenima u ovom istraživanju, za autoceste i državne ceste, vrijednost R bila je 95 %, a vrijednost Z_R bila je -1,645, ovisno o odabranom R vrijednosti.
S_o	-	Kombinirana standardna pogreška prognoze prometa i svojstava ceste,	U ovom istraživanju, za krute kolnike, preporučuje se uzeti ukupnu standardnu devijaciju (S_o) kao 0,35, U skladu s tim preporukama, u ovom istraživanju je također odabrano $S_o = 0,35$.
d	(inč) (0,0254 m)	Debljina kolnika (u inčima) (1 in = 0,0254 m)	-
ΔPSI	-	Razlika između početnog (p_o) i konačnog indeksa vozne sposobnosti kolnika (p_t)	Prema AASHTO 1993 metodi, vrijednost (p_o) iznosi 4,5 za krute kolnike, U izračunima provedenim u ovom istraživanju, odabrane su vrijednosti $p_o = 4,5$ i $p_t = 2,5$.
S'_c	(psi) (6,8950 · 10 ³ Pa)	Vrijednost čvrstoće na savijanje betona	Vrijednost čvrstoće na savijanje dobivena je kao rezultat ispitivanja čvrstoće na savijanje u četiri točke.
J	-	Koeficijent prijenosa opterećenja	Koeficijenti prijenosa opterećenja prema uvjetima projektiranja dani su u AASHTO 1993 vodiču za projektiranje, U ovom istraživanju, za sve izračune korištena je vrijednost $J=2,7$.
C_d	-	Koeficijent odvodnje	U skladu s AASHTO 1993 smjernicama za projektiranje, vrijednost C_d je uzeta kao 1 u izračunima.
E_c	(psi) (6,8950 · 10 ³ Pa)	Modul elastičnosti betona	AASHTO preporučuje izračunavanje modula elastičnosti koristeći jednadžbu $E_c = 6750 \times S'_c$.
k	(pci) (27679,9 kg/m ³)	Modul reakcije tla	Vrijednost 'k' može varirati ovisno o nosivosti, gustoći, udjelu vlage i vrsti tla. Često korištene vrijednosti za 'k' su u rasponu od $150 \leq k \leq 550$. U skladu s AASHTO 1993 smjernicama za projektiranje, vrijednost 'k' je uzeta kao 150 u izračunima.

Otpornost uzoraka na smrzavanje i odmrzavanje određuje se vaganjem, tj. određivanjem gubitka mase uzoraka nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na -20°C tijekom 4 sata, te na $+20^\circ\text{C}$ tijekom 4 sata. Važu se čestice koje su se odvojile od uzorka, a zatim se izračunava njihov broj po m^2 površine uzorka koristeći izraz (4) kako bi se izmjerila količina rasute mase.

$$m_n = (\sum \mu_s / A) \times 10^6 \quad (4)$$

gdje je:

m_n - gubitak mase [g/m^2]

μ_s - broj oštećenih uzoraka u ciklusu [g]

A - površina [m^2]

2.3.2. Metode projektiranja

Pri projektiranju kolnika uzimaju se u obzir mnogi parametri, kao što su prometno opterećenje, nosivost tla, svojstva korištenih materijala, regionalni klimatski uvjeti, uporabni vijek ceste i

vozna sposobnost. Budući da se metoda AASHTO 1993 već godinama primjenjuje za projektiranje krutih i fleksibilnih kolnika na turskim autocestama, u ovom istraživanju provedeni su izračuni temeljeni na AASHTO 1993 metodi za projektiranje krutih kolnika.

U tom kontekstu, izraz prema AASHTO 1993 za projektiranje betonskog kolnika, koji se dobiva uzimajući u obzir učinak ponavljanja standardnog ekvivalentnog opterećenja jednostruke osovine od 8,2 t ($W_{8,2}$) na kolnik, dana je u jednadžbi (5). Debljina betonskog kolnika (d) izračunava se pomoću jednadžbe 5 [29].

$$\begin{aligned} \log_{10} W_{8,2} = & Z_R \cdot S_o + 7.35 \cdot \log_{10}(d+1) - 0.06 \\ & + [\log_{10}[\Delta PSI / (4.5 - 1.5)]] / [1 + (1.624 \cdot 10^7) / (d+1)^{8.46}] \\ & + (4.22 - 0.32 \cdot p_t) \cdot \log_{10} [(S'_c \cdot C_d \cdot (d^{0.75} - 1.132)) \\ & / (215.63 \cdot J \cdot d^{0.75} \cdot (18.42 / (E_c / k^{0.25})))] \end{aligned} \quad (5)$$

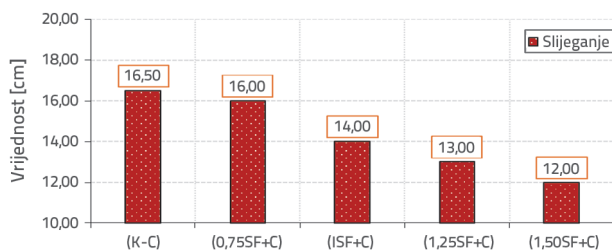
Značenja parametara navedenih u izrazu (5) i vrijednosti odabrane u ovom istraživanju prema AASHTO 1993 kriterijima za projektiranje navedeni su u tablici 2.

3. Rezultati

3.1. Eksperimentalni rezultati

3.1.1. Ispitivanje slijeganja

Konzistencija i svojstva obradivosti svježih betonskih mješavina određena su ispitivanjem slijeganja prema normi TS EN 12350-2 [24], a vrijednosti slijeganja uzoraka prikazane su na slici 10. Slika 10. pokazuje da vrijednost slijeganja opada s povećanjem udjela čeličnih vlakana u betonskim mješavinama, odnosno, da se obradivost mješavine smanjuje. Utvrđeno je da obradivost betona ojačanog vlaknima opada s povećanjem udjela vlakana, posebno u mješavinama s 0,75 % čeličnih vlakana, a stupanj slijeganja je u klasi S3, u mješavini s 1,50 % čeličnih vlakana. Rezultati ovog istraživanja su usklađeni s rezultatima iz literature [31], budući da je u literaturi, u istraživanjima koje koriste različite omjere čeličnih vlakana, zaključeno da se obradivost betonskih mješavina smanjuje kada je udio čeličnih vlakana veći od 0,8 % [32, 33].



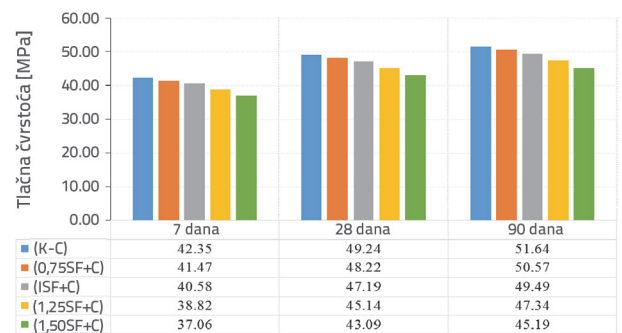
Slika 10. Utjecaj čeličnih vlakana na slijeganje svježeg betona

3.1.2. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Kontrolne betonske mješavine i mješavine betona s dodatkom vlakana su izliveno u kalupe dimenzija 150 × 150 × 150 mm i njegovane u laboratoriju tijekom 24 sata. Nakon toga, očvrslili uzorci su izvađeni iz kalupa i njegovani u bazenu na temperaturi od 23 ± 2 °C tijekom 7, 28 i 90 dana. Svi uzorci su potom izvađeni iz bazena i prebačeni u stanje zasićene suhe površine (SSD) u laboratorijskom okruženju. Uzorci su ispitani pomoću preše kapaciteta 300 t s brzinom opterećenja od 0,50 MPa/s. Za svaku mješavinu izrađena su po tri uzorka. Rezultati tlačne čvrstoće uzoraka, zajedno s udjelom dodatka čeličnih vlakana i vremenom njegovanja uzoraka, prikazani su na slici 11.

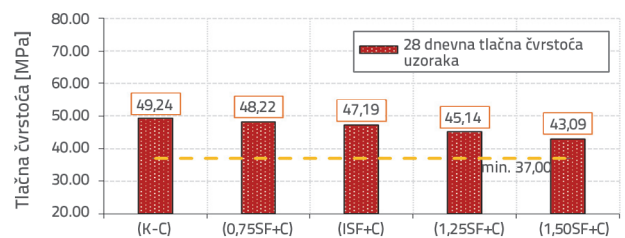
Iz dijagrama na slici 11. vidljivo je da su tlačne čvrstoće betonskih uzoraka s vlaknima niže od tlačnih čvrstoća kontrolnih uzoraka za sva razdoblja njege uzoraka, a ovisno o udjelu čeličnih vlakana. Postotak smanjenja tlačne čvrstoće iznosio je 2,07 %, 4,16 %, 8,33 % i 12,49 % za uzorke koji su njegovani 28 dana. Smanjenje tlačnih čvrstoća može se pripisati činjenici da čelična vlakna imaju veću specifičnu težinu od agregata. Slično tome, Soroushian i Bayasi [34] naveli su da vlakna s visokim omjerom vitkosti negativno utječu na

obradivost betona. U literaturi se navodi da upotreba čeličnih vlakana s tri različita omjera vitkosti (L/d) kao što su 80, 65 i 55 u proizvodnji betona, kao i čelična vlakna s kukastim krajevima s različitim omjerima vitkosti, smanjuju tlačnu čvrstoću betona. Međutim, istaknuto je i da vlakna značajno povećavaju tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje, te da u betonu s 1,5 % čeličnih vlakana, tlačna čvrstoća betona varira do ± 25 % u usporedbi s betonom bez dodatka vlakana [35-41].



Slika 11. Tlačna čvrstoća uzoraka kontrolnog betona i betona ojačanog čeličnim vlaknima

Budući da se prema tehničkim specifikacijama TCK-a za betonske kolnike preporučuje odabir minimalne klase betona C30/37 MPa, tlačna čvrstoća uzoraka nakon 28 dana njege uspoređena je s tom vrijednosti, a rezultati su prikazani na slici 12.



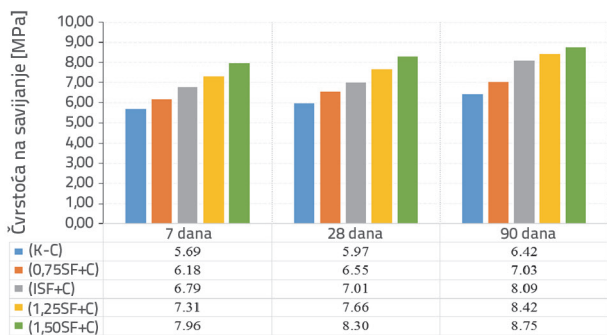
Slika 12. Kriterij projektiranja tlačne čvrstoće uzoraka

Iz dijagrama na slici 12. vidljivo je da su svi uzorci zadovoljili minimalni zahtjev za karakterističnu tlačnu čvrstoću (C 30/37) prema TCK specifikacijama.

3.1.3. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje

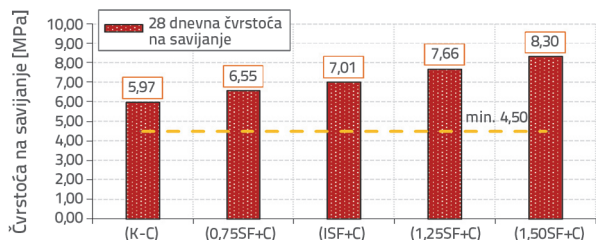
Pripremljeni uzorci betonskih greda dimenzija 150 × 150 × 525 mm podvrgnuti su ispitivanju čvrstoće na savijanje u četiri točke nakon 7, 28 i 90 dana njege uzoraka. Ispitivanje je provedeno u preši kapaciteta 20 t pri brzini opterećenja od 0,05 MPa/s. Rezultati čvrstoća na savijanje kontrolnih uzoraka betona i uzoraka betona ojačanog čeličnim vlaknima prikazani su na slici 13. Iz dijagrama na slici 13. vidljivo je da su vrijednosti čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka s dodatkom čeličnih vlakana veće od vrijednosti čvrstoće na savijanje kontrolnih uzoraka

betona. Razmatrajući 28-dnevno razdoblje očvršćavanja betona, primijećeno je da je to povećanje čvrstoće na savijanje zabilježeno u većim postotnim iznosima, od 9,77 %, 17,48 %, 28,37 % i 39,10 % u odnosu na kontrolni uzorak betona. Razlog za tim povećanjem jest ponašanje uzoraka pod utjecajem savijanja koje je najvažnija karakteristika betona ojačanog čeličnim vlaknima. U prethodnim istraživanjima uočeno je da dodatak čeličnih vlakana betonu povećava njegovu čvrstoću na savijanje za 31,75 % [42].



Slika 13. Čvrstoće na savijanje kontrolnih uzoraka betona i uzoraka betona ojačanog čeličnim vlaknima

Prema tehničkim specifikacijama TCK-a za betonske kolnike [43], 28-dnevna čvrstoća na savijanje betona mora biti veća od 4,50 N/mm². U ovom istraživanju, čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka starosti 28 dana uspoređene su s navedenim kriterijem, a rezultati su prikazani na slici 14.

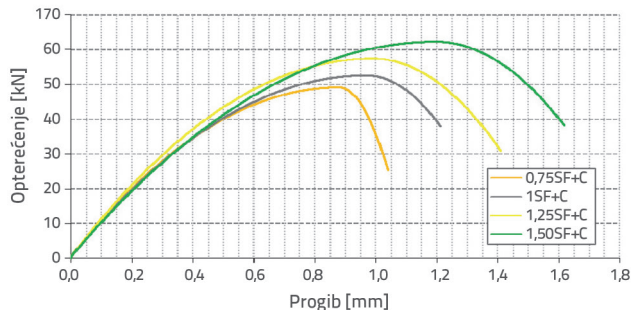


Slika 14. Dijagram s kriterijem projektiranja čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka

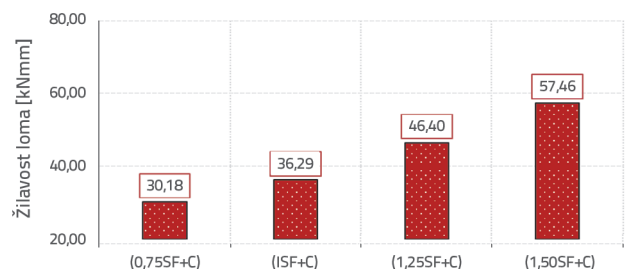
Iz rezultata na slici 14. vidljivo je da 28-dnevna čvrstoća na savijanje svih uzoraka betona ojačanog vlaknima zadovoljava minimalni zahtjev za karakterističnu čvrstoću na savijanje (4,50 N/mm²) prema TCK tehničkim specifikacijama.

Krivulje opterećenja-progib i rezultati ispitivanja savojne žilavosti

Krivulje koje prikazuju opterećenje i progib dobivene su ispitivanjem čvrstoće na savijanje uzoraka ojačanih čeličnim vlaknima u četiri točke, a izrađene su pomoću podataka dobivenih prilikom snimanja fotoaparatom tijekom ispitivanja (slika 15.). Vrijednosti žilavosti dobivene izračunavanjem površina ispod tih krivulja prikazane su na slici 16.



Slika 15. Krivulje opterećenje-progib za betonske uzorke ojačane čeličnim vlaknima



Slika 16. Lomna žilavost uzoraka

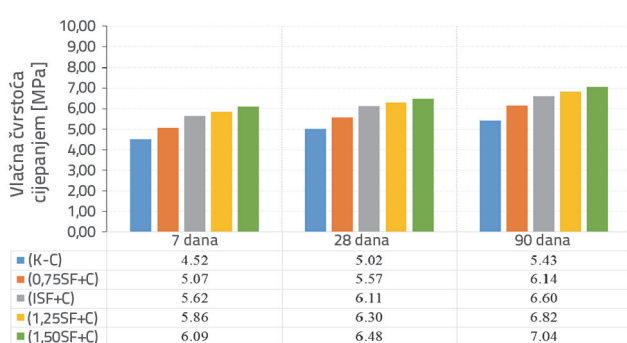
Dodavanje čeličnih vlakana betonu povećalo je žilavosti uslijed loma kod svih uzoraka. Najveće vrijednosti žilavosti uslijed loma zabilježene su kod uzoraka koji sadrže 1,50 % čeličnih vlakana. To je zato što su vlakna povećala otpornost betona zbog njihove visoke vlačne čvrstoće i prijanjanja između njih i matrice. Najveće vrijednosti žilavosti imaju uzorci 1,50SF+C (57,46 kN·mm). Najmanje vrijednosti žilavosti su zabilježene kod uzoraka 0,75SF+C s vrijednošću od 30,18 kNmm. Povećanje udjela čeličnih vlakana od 0,75 % na 1,50 % povećalo je žilavost (apsorpciju energije) betona za 90,38%. Utvrđeno je da povećanje omjera čeličnih vlakana u mješavinama povećava vrijednosti žilavosti i time poboljšava mehanička svojstva betona. Osim toga, istraživanja su pokazala da povećanje udjela vlakana od 0,03 % na 0,90 % u mješavini povećava žilavost za 100 % [42].

3.1.4. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

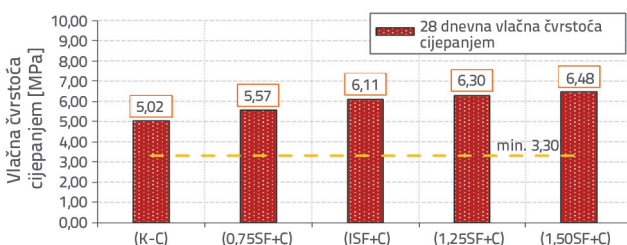
Kako bi se odredila vlačna čvrstoća cijepanjem kontrolnih uzoraka i uzoraka betona ojačanog čeličnim vlaknima nakon 7, 28 i 90 dana njege, ispitana su po tri cilindrična uzorka dimenzija Ø150x300 mm. Ispitivanje je provedeno pri brzini opterećenja od 1,6 kN/s, u preši kapaciteta 300 t. Rezultati vlačne čvrstoće cijepanjem uzoraka s različitim udjelima čeličnih vlakana prikazani su u dijagramu na slici 17.

Kao što se može vidjeti na slici 17., zabilježeno je značajno povećanje vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem betonskih uzoraka s dodatkom čeličnih vlakana u usporedbi s kontrolnim uzorcima betona. To povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem nakon 28 dana dogodilo se u postotnim iznosima od 10,96 %, 21,71 %, 25,50 % i 29,08 % u odnosu na kontrolni beton. Smatra

se da je razlog tomu što dugačka vlakna imaju veće prijanjanje na cementnu matricu i učinkovitije prenose nastala naprezanja u betonu u odnosu na kraća vlakna. U literaturi je zabilježeno da je vlačna čvrstoća cijepanjem uzoraka betona ojačanog čeličnim vlaknima povećana do 35 % u odnosu na kontrolni uzorak betona, pri čemu to povećanje varira s povećanjem udjela čeličnih vlakana u betonu [14, 44].



Slika 17. Rezultati vlačne čvrstoće cijepanjem kontrolnih uzoraka i uzoraka s dodatkom čeličnih vlakana



Slika 18. Dijagram s projektnim kriterijem za vlačnu čvrstoću cijepanjem

Prema tehničkim specifikacijama TCK-a, vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem uzoraka betonskih kolnika nakon 28 dana uspoređene su s minimalnom vrijednošću od 3,30 N/mm²,

a rezultati su prikazani na slici 18. Iz rezultata prikazanih na slici 18. vidljivo je da vlačna čvrstoća cijepanjem uzoraka nakon 28 dana njege zadovoljava minimalnu karakterističnu vlačnu čvrstoću cijepanjem (3,30 N/mm²) koju zahtijevaju tehničke specifikacije TCK-a.

3.1.5. Rezultati ispitivanja otpornosti na smrzavanje-odmrzavanje

Ispitivanje otpornosti na smrzavanje-odmrzavanje provedeno je kako bi se odredila otpornost betona ojačanog čeličnim vlaknima na cikluse smrzavanja-odmrzavanja tijekom uporabljivosti betonskog kolnika. Otpornost na smrzavanje-odmrzavanje kontrolnih uzoraka i uzoraka betona ojačanog čeličnim vlaknima ispitana je na temelju metode kapilarne sukcije otopine za odmrzavanje i smrzavanje-odmrzavanje (CDF), prema normi TSE CEN/TS 12390-9 [28]. U tablici 3., koja je određena prema tehničkim specifikacijama TCK-a [43] u Turskoj, kategorija otpornosti na smrzavanje-odmrzavanje uzeta je kao FT2, ovisno o klimatskim uvjetima regije u kojoj je provedeno istraživanje. Prije ispitivanja, nakon što je svježi beton izliven u kalupe, kalupi su zaštićeni od isušivanja pri temperaturi od 20 ± 2 °C tijekom jednog dana. Nakon 24 ± 2 sata, uzorci su izvađeni iz kalupa i prebačeni u bazen za njegovanje uzoraka, napunjen vodom iz slavine pri temperaturi od 20 ± 2 °C. Uzorci su izvađeni iz bazena sedmog dana i njegovani u prostoriji pri temperaturi od 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti od 65 ± 5 % tijekom 21 dan, sve do početka ispitivanja. Uzorci koji su njegovani 28 dana impregnirani su testnom tekućinom (97 % vode iz slavine i 3 % NaCl po masi) kapilarno tijekom 7 dana, a eksperiment je započeo kada su uzorci bili starosti 35 dana. Nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, što uključuje smrzavanje tijekom 4 sata na -20 °C i odmrzavanje tijekom 4 sata na +20 °C, procijenjeno je oštećenje uzoraka mjerenjem gubitka mase. Vrijednosti gubitka mase uzoraka izračunane su pomoću izraza (4), a rezultati su

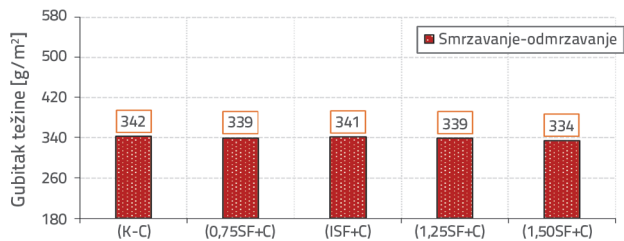
Tablica 3. Kategorije otpornosti na smrzavanje-odmrzavanje

Kategorija	Gubitak mase (28 dana)
FT0 (Mjesta bez smrzavanja i odmrzavanja)	-
FT1 (Mjesta sa smrzavanjem i odmrzavanjem)	Prosjek < 1,0 kg/m ² Pojedinačna vrijednost < 1,5 kg/m ²
FT2 (Mjesta sa smrzavanjem i odmrzavanjem, gdje se koriste sredstva za odmrzavanje)	Prosjek < 0,5 kg/m ²

Tablica 4. Rezultati ispitivanja uzoraka na smrzavanje-odmrzavanje

Oznaka mješavine	Gubitak mase [g/m ²]	Smanjenje gubitka mase u usporedbi s kontrolnim uzorkom [%]
	28 ciklusa smrzavanja-odmrzavanja	
(K-C)	342	-
(0.75SF+C)	339	0,88
(1SF+C)	341	0,29
(1.25SF+C)	339	0,89
(1.50SF+C)	334	2,34

navedeni u tablici 4. Promjene u gubitku mase prikazane su u dijagramu na slici 19.



Slika 19. Gubitak mase uslijed smrzavanja i odmrzavanja uzoraka

Tablica 4. pokazuje da su, prema specifikaciji [43], zadovoljeni zahtjevi da svi uzorci imaju gubitak mase manji od 0,50 kg/m² nakon 28 ciklusa. Najveći gubitak mase među uzorcima zabilježen je u uzorku betona koji sadrži 1,50 % čeličnih vlakana (1,50SF+C). Uspoređujući ih s kontrolnim uzorcima, primijećeno je da je gubitak mase iznosio redom 0,88 %, 0,29 %, 0,88 % i 2,34 %, a povećana je otpornost betona na smrzavanje. Smatra se kako je razlog tome manje unutarnje naprezanje koje se javlja u betonu uslijed smrzavanja zbog veće čvrstoće veze kod uzoraka ojačanih čeličnim vlaknima. U prethodnim istraživanjima zaključeno je kako betonski uzorci s čeličnim vlaknima nemaju pozitivan učinak na tlačnu čvrstoću dok se, na temelju rezultata ispitivanja otpornosti na smrzavanje [45], gubitak mase uzoraka smanjuje kako se udio čeličnih vlakana u betonu povećava.

3.2. Rezultati projektiranja

3.2.1. Rezultati projektiranja debljine betonskog kolnika primjenom AASHTO metode

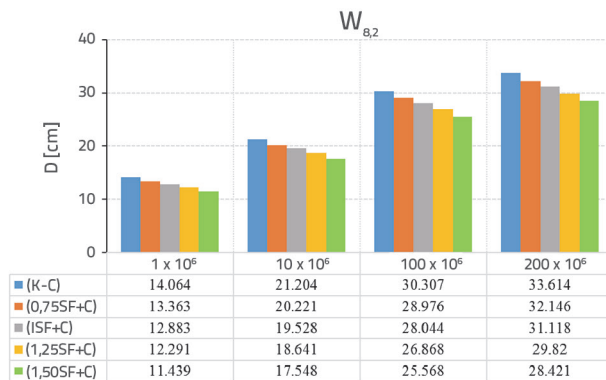
Projektiranje betonskog kolnika na autocesti provedeno je prema AASHTO smjernicama iz 1993. godine, uzimajući u obzir uzorke betona ojačane čeličnim vlaknima, a varijacija postotka

vlakana u betonu iznosila je 0 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,25 % i 1,50 %. U proračunu je uzeto u obzir prometno opterećenje za četiri različita projekta kolničkih konstrukcija na tlu vrlo niske nosivosti (plastična glina).

Priklom odabira prometnog opterećenja, za srednje prometno opterećenje odabran je broj prijelaza 1×10^6 standardne osovine gdje je prosječni godišnji dnevni broj teških teretnih vozila (PGDP TTV) manji od 500, odnosno $W_{8,2}$ manji od $3,1 \times 10^6$. Za teško prometno opterećenje korišten je broj prelazaka standardne osovine 10×10^6 , 100×10^6 i 200×10^6 , s vrijednostima PGDP TTV većim od 500.

U skladu s Tehničkim specifikacijama za betonske ceste TCK, minimalni zahtjevi čvrstoće koji se primjenjuju pri projektiranju betonskih kolnika navedeni su u tablici 5. [43].

Vrijednosti S'_c i E_c korištene u projektiranju kontrolnih uzoraka betona i uzoraka betona ojačanog vlaknima navedene su u tablici 6. U tlima vrlo slabe nosivosti ($k = 150$ pci), debljine kolnika za različita prometna opterećenja određene su pomoću izraza (5), a rezultati su prikazani u dijagramu na slici 20.



Slika 20. Debljine betonskog kolnika

iz rezultata na slici 20. vidljivo je da su za tla vrlo slabe nosivosti, debljine betonskog kolnika ojačanog čeličnim vlaknima manje

Tablica 5. Minimalne vrijednosti čvrstoće za projektiranje betonskih kolnika [43]

Karakteristična tlačna čvrstoća kocke, f_{ck} [N/mm ²]	Čvrstoća na savijanje, f_{cbt} [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća cijepanjem f_{sk} [N/mm ²]	Gubitak mase uslijed ciklusa smrzavanja-odmrzavanja (nakon 28 dana) [kg/m ²]
Min. C 30/37	Min. 4,50	Min. 3,30	0,50

Tablica 6. S'_c i E_c vrijednosti kontrolnih uzoraka i uzoraka ojačanih čeličnim vlaknima

Oznaka mješavine	Karakteristična tlačna čvrstoća kocke (28 dana) [MPa]	Vlačna čvrstoća cijepanjem (28 day) [MPa]	Čvrstoća na savijanje (28 day) [MPa]	S'_c (psi)	E_c (psi)
(K-C)	49,24	5,02	5,97	865,44	5,841,719,70
(0,75SF+C)	48,22	5,57	6,55	950,00	6,412,479,31
(1SF+C)	47,19	6,11	7,01	1,016,71	6,862,821,37
(1,25SF+C)	45,14	6,30	7,66	1,110,99	7,499,174,28
(1,50SF+C)	43,09	6,48	8,30	1,203,81	8,125,737,14

Tablica 7. Jedinične cijene za analizu troškova

Materijali	Jedinica	Jedinična cijena [\$]
Cement (3,80 g/cm ³)	\$/t	129,40
Voda		1,06
0-5 mm agregat (2,77 g/cm ³)		31,45
5-11 mm agregat (2,79 g/cm ³)		27,40
11-22 mm agregat (2,80 g/cm ³)		28,80
Kemijski aditiv (1,08 g/cm ³) (nova generacija superplastifikatora)		1,100,00
Čelična vlakna (7,85 g/cm ³)		850,00

Tablica 8. Jedinične cijene betonskog kolnika s ojačanjem i bez ojačanja čeličnim vlaknima

Oznaka mješavine	Cement [kg/m ³]	Agregat [kg/m ³]			Čelična vlakna [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Superplastifikator [kg/m ³]	Ukupni trošak [\$]	Cijena po 1 m ² , debljine sloja 1 cm [\$]
		0-5 [mm]	5-11 [mm]	11-22 [mm]					
(K-C)	450	410	709	746	0	180	6,00	118,83	1,19
(0,75SF+C)		406	701	738	58,88			196,13	1,96
(1SF+C)		404	698	735	78,50			212,49	2,12
(1,25SF+C)		403	695	732	98,13			228,88	2,29
(1,50SF+C)		401	693	729	117,75			245,26	2,45

u odnosu na debljinu kolnika bez vlakana. Smanjenje debljina prema analiziranim prometnim opterećenjima 1 x 10⁶, 10 x 10⁶, 100 x 10⁶ i 200 x 10⁶, iznosi:

- za uzorak (0.75SF+C): 4,98 %, 4,64 %, 4,39 %, i 4,37 %;
- za uzorak (1SF+C): 8,40 %, 7,91 %, 7,47 %, i 7,43 %;
- za uzorak (1.25SF+C): 12,61 %, 12,09 %, 11,35 %, i 11,29 %;
- za uzorak (1.50SF+C): 18,66 %, 17,24 %, 15,64 %, i 15,45 %.

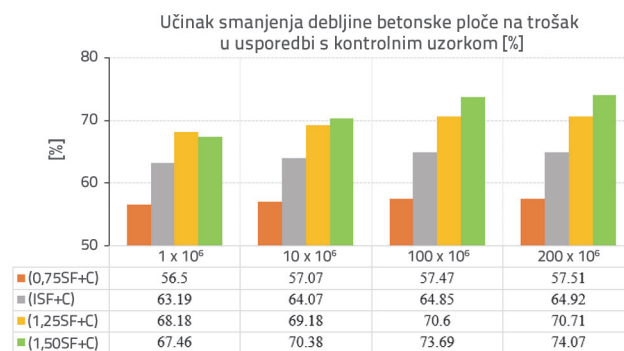
Utvrđeno je da izračunani rezultati tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje i vlačne čvrstoće cijepanjem zadovoljavaju kriterije projektiranja betonskog kolnika, a čelična vlakna dodana betonu povećavaju čvrstoću betona na savijanje u usporedbi s čvrstoćom kontrolnog betona, što rezultira smanjenjem debljine betonskog kolnika. U malom broju radova u literaturi utvrđeno je da dodatak 0,5 % čeličnih vlakana betonu smanjuje debljinu betonskog kolnika za 20,50 %, ovisno o promjenjivim kriterijima kao što su projektirano prometno opterećenje i nosivost tla [21].

3.2.2. Analiza troškova

Budući da se cijene troškova gradnje stalno mijenjaju na globalnoj razini, kao valuta u izračunu troškova debljina betonskog kolnika s čeličnim vlaknima i bez njih upotrijebljen je američki dolar. Nevezani nosivi sloj debljine 20 cm (NNS) koju preporučuje AASHTO ispod betonskog kolnika, projektiran je ispod svih betonskih kolnika u istoj debljini te stoga, nije uključen u analizu troškova. Jedinične cijene upotrijebljene u analizi troškova navedene su u tablici 7. U analizi troškova uzet je u obzir samo učinak čeličnih vlakana na cijenu betonskog kolnika, a troškovi i utjecaj građevinskih aktivnosti na okoliš nisu uzeti u obzir.

Jedinične cijene kontrolnih uzoraka betona i uzoraka betona ojačanog čeličnim vlaknima izračunane su pomoću tablice 7. i navedene su u tablici 8.

Troškovi betonskog kolnika sa i bez ojačanja čeličnim vlaknima u okviru ovog istraživanja prikazani su u grafikonu na slici 21.



Slika 21. Analiza troškova za betonski kolnik s čeličnim vlaknima i bez njih

Kao što je prikazano rezultatima na slici 21., ako se u proračunu debljine betonskog kolnika umjesto kontrolnih uzoraka bez ojačanja koristi beton ojačan čeličnim vlaknima, troškovi gradnje povećavaju se za 56,50 do 74,07 %, ovisno o debljini sloja kolnika za različita prometna opterećenja. U prethodnim istraživanjima utvrđeno je da dodatak čeličnih vlakana betonu u količini od 0,25 % do 1,00 % po volumenu povećava jedinični trošak betona za 60,10 do 139,80 % [21]. U drugom istraživanju uočeno je da je uporabljivost betona ojačanog čeličnim vlaknima 6,5 puta dulja od uporabljivosti betona bez vlakana. Međutim, s obzirom na isti

uporabni vijek, utvrđeno je da čak i kada se debljina betonskog kolnika smanji za oko 50 % dodatkom čeličnih vlakana, njegova cijena raste za 41 % [46]. Budući da su ceste s betonskim kolnicima često izložene nepovoljnim okolišnim uvjetima, smatra se da će dodavanje čeličnih vlakana betonu dugoročno biti isplativije jer vlakna povećavaju otpornost i žilavost betona i sprječavaju pojavu pukotina; imaju značajan učinak na čvrstoću na savijanje, energiju loma i žilavost; povećavaju otpornost na habanje ovisno o udjelu vlakana u betonu; te povećavaju trajnost betonskog kolnika.

4. Zaključak

U ovom istraživanju ispitani su učinci različitih udjela čeličnih vlakana u betonskim kolnicima izgrađenim na tlima vrlo slabe nosivosti (plastična glina), učinci na debljinu kolnika i troškove njihove izgradnje, a zaključeno je sljedeće:

- Primijećeno je da se vrijednost slijevanja betonskih mješavina smanjivala, što upozorava na to da je beton postajao manje obradiv kada se udio čeličnih vlakana u betonskim mješavinama povećavao.
- Ovisno o udjelu čeličnih vlakana, vrijednosti tlačne čvrstoće betonskih uzoraka u usporedbi s kontrolnim uzorcima su se smanjivale. Smanjenje tlačne čvrstoće iznosilo je redom 2,07 %, 4,16 %, 8,33 % i 12,49 % za uzorke ojačane čeličnim vlaknima s udjelima od 0,75 %, 1,00 %, 1,25 % i 1,50 %. Ti rezultati proizlaze iz činjenice što čelična vlakana imaju veću specifičnu težinu od agregata korištenih u ovom istraživanju.
- Vrijednosti čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka bile su veće od vrijednosti čvrstoće na savijanje uzoraka kontrolnog betona. Promatrajući period od 28 dana njegovanja betona, utvrđeno je da su povećanja čvrstoće na savijanje bila znatna i iznosila su redom 9,77 %, 17,48 %, 28,37 % i 39,10 % za uzorke s udjelima čeličnih vlakana od 0,75 %, 1,00 %, 1,25 % i 1,50 %. To se može objasniti činjenicom da su čelična vlakna

sprječavala i odgađala početak pucanja betona i razvoj pukotina povezujući pukotine u matrici.

- Vrijednosti tlačne čvrstoće cijepanjem uzoraka betona ojačanog čeličnim vlaknima bile su veće u odnosu na uzorke kontrolnog betona. Porasti tlačne čvrstoće cijepanjem nakon 28 dana iznosili su 10,96 %, 21,71 %, 25,50 % i 29,08 % za uzorke s udjelom čeličnih vlakana od 0,75 %, 1,00 %, 1,25 % i 1,50 % u usporedbi s kontrolnim betonom. Smatra se da dugačka vlakna imaju jaču vezu s cementnom matricom u usporedbi s kratkim vlaknima te da prenose tlačna naprezanja formirana u betonu učinkovitije od kraćih vlakana.
- Izračuni su pokazali da se debljina betonskog kolnika ojačanog čeličnim vlaknima, koji se gradi na tlima vrlo slabe nosivosti (plastična glina), smanjuje u prosjeku za 4,37 do 18,66 % pri različitim prometnim opterećenjima (1×10^6 , 10×10^6 , 100×10^6 i 200×10^6), ali se zato troškovi izgradnje povećavaju od 56,50 do 74,07 %.

Iz svega navedenog primijećeno je da su fizički i mehanički zahtjevi za projektiranje betonskih kolnika ispunjeni kada se na tlima vrlo slabe nosivosti primjenjuje beton ojačan čeličnim vlaknima. Osim toga, debljine slojeva krutih kolnika se smanjuju, ali se troškovi izgradnje povećavaju. Međutim, uzimajući u obzir pozitivan učinak čeličnih vlakana na svojstva betona i činjenicu da su betonske kolničke konstrukcije često izložene nepovoljnim okolišnim uvjetima tijekom svoje dugotrajne uporabljivosti, smatra se da povećanje troškova izgradnje neće imati negativan utjecaj, odnosno da će povećanje troškova biti opravdano.

Zahvala

Podršku ovom istraživanju pružila je Jedinica za koordinaciju znanstvenih istraživačkih projekata Sveučilišta Inonu (*Inonu University Scientific Research Projects Coordination Unit*) u okviru projekta broj IU-BAP FDK-2022-2837.

LITERATURA

- [1] Abut, Y., Yildirim, S.T., Ozturk, O., Ozyurt, N.: A comparative study on the performance of RCC for pavements casted in laboratory and field, *International Journal of Pavement Engineering*, 23 (2020) 6, pp. 1777–1790, doi: 10.1080/10298436.2020.1823391
- [2] Kazemi, M.T., Golsorkhtabar, H., Beygi, M.H.A., Gholamitabar, M.: Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods, *Construction and Building Materials*, 142 (2017), pp. 482–489, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.089
- [3] Paiva, H., Velosa, A., Cachim, P., Ferreira, V.M.: Effect of pozzolans with different physical and chemical characteristics on concrete properties, *Materiales De Construccion*, 66 (2016) 322, doi: 10.3989/mc.2016.01815
- [4] 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, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2572.2018>
- [5] Setina, J., Gabrene, A., Juhevic, I.: Effect of pozzolanic additives on structure and chemical durability of concrete, *Procedia Engineering*, 57 (2013), pp. 1005–1012, doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.127
- [6] Hassan, A.A.A., Lachemi, M., Hossain, K.M.A.: Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete, *Cement and Concrete Composites*, 34 (2012) 6, pp. 801–807, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013

- [7] Alhozaimy, A.M., Soroushian, P., Mirza F.: Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials, *Cement and Concrete Composites*, 18 (1996) 2, pp. 85–92, doi: 10.1016/0958-9465(95)00003-8
- [8] Song, P.S., Hwang, S.: Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 9, pp. 669–673, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027
- [9] Naghibdehi, M.G., Naghipour, M., Rabiee, M.: Behaviour of functionally graded reinforced concrete beams under cyclic loading, *GRAĐEVINAR*, 67 (2015) 5, pp. 427–439, doi: 10.14256/JCE.1098.2014
- [10] Li, Z., Zhu, H., Zhen, X., Wen, C., Chen, G.: Effects of steel fiber on the flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with BFRP rebars under repeated loading, *Composite Structures*, 270 (2021), pp. 114072, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114072
- [11] Sirijaroonchai, K., El-Tawil, S., Parra-Montesinos, G.: Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading, *Cement & Concrete Composites*, 32 (2010) 1, pp. 62–72, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.003
- [12] Lee, J.H.: Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete, *Composite Structures*, 168 (2017) pp. 216–225, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.01.052
- [13] Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., Swamy, R.N.: Swamy, Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties, *Composites Part B: Engineering*, 41 (2010) 1, pp. 17–24, doi: 10.1016/j.compositesb.2009.09.002
- [14] Holschemacher, K., Mueller, T., Ribakov, Y.: Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete, *Materials and Design*, 31 (2010) 5, pp. 2604–2615, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.025
- [15] Abbass, A., Abid, S., Özakça, M.: Experimental investigation on the effect of steel fibers on the flexural behavior and ductility of high-strength concrete hollow beams, *Advances in Civil Engineering*, (2019), pp. 13, doi: 10.1155/2019/8390345
- [16] Kang, M.C., Yoo, D., Gupta, R.: Machine learning-based prediction for compressive and flexural strengths of steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 266 (2021), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121117
- [17] Han, J., Zhao, M., Chen, J., Lan, X.: Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 209 (2019), pp. 577–591, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.086
- [18] Xu, B.W., Shi, H.S.: Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 12, pp. 3468–3474, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.017
- [19] Choi, Y., Yuan, R.L.: Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 5, pp. 1587–1591, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.09.010
- [20] Lin, W.T., Wu, Y.C., Cheng, A., Chao, S.J., Hsu, H.M.: Engineering properties and correlation analysis of fiber cementitious materials, *Materials*, 7 (2014) 11, pp. 7423–7435, doi: 10.3390/ma7117423
- [21] Ozturk, O., Ozyurt, N.: Sustainability and cost-effectiveness of steel and polypropylene fiber reinforced concrete pavement mixtures, *Journal of Cleaner Production*, 363 (2022) 1, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132582
- [22] TS EN 933-1.: Experiments for geometric properties of aggregates Part 1: Determination of particle size distribution-sieving method. Turkish Standards Institute, 2012.
- [23] TS EN 14889-1: Fibers - for use in concrete - Part 1: Steel fibers - Definitions, properties and suitability, Turkish Standards Institute, 2006.
- [24] TS EN 12350-2.: Concrete - Fresh concrete tests - Part 2: Slump test, Turkish Standards Institute, 2019.
- [25] TS EN 12390-4: Concrete - Tests of hardened concrete - Part 4: Compressive strength - Specification of test machines, Turkish Standards Institute, 2019.
- [26] TS EN 12390-5: Concrete - Hardened concrete tests - Part 5: Determination of flexural strength of test specimens, Turkish Standards Institute, 2021.
- [27] TS EN 12390-6: Concrete - Hardened concrete tests - Part 6: Determination of splitting tensile strength of test specimens, Turkish Standards Institute, 2010.
- [28] TSE CEN/TS 12390-9: Concrete - Tests of hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance-Surface incrustation (superficial wear), 2012.
- [29] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures: American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993.
- [30] TCK Concrete Road Pavements Project Guide.: Turkey, 2019.
- [31] Frančić Smrkić, M., Damjanović, D., Baričević, A.: Application of recycled steel fibres in concrete elements subjected to fatigue loading, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 10, pp. 893–905, doi: 10.14256/JCE.2059.2017
- [32] Holschemacher, K., Mueller, T., Ribakov, Y.: Effect of steel fibers on mechanical properties of high strength concrete, *Materials & Design*, 31 (2010) 5, pp. 2604–2615, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.025
- [33] Mahdi, A., Falah, M.W., Hafedh, A.A., Khafaji, Z.A.: Evaluation the influence of steel-fiber on the concrete characteristics, *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10 (2022) 3, pp. 368–379, doi: 10.21533/pen.v10i3.3111
- [34] Soroushian, P., Bayasi, Z.: Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 88 (1991) 2, pp. 129–134.
- [35] Jhatial, A.A., Sohu, S., Bhatti, N.K., Lakhari, M.T., Oad, R.: Effect of steel fibres on the compressive and flexural strength of concrete, *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 5 (2018) 10, pp. 16–21, doi: 10.21833/ijaas.2018.10.003
- [36] Sharaky, I.A., Eldin, H.K.S., Shehata, M.M., Mohamed, H.A.: Flexural Response of RC beams cast with normal and steel fibre concrete internally reinforced with various types of FRP bars, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 12, pp. 1117–1130, doi: 10.14256/JCE.3009.2020
- [37] Dudek, D., Kadela, M., Malek, M.: Effect Steel Fibre Content on the Load-Carrying Capacity of Fibre-Reinforced Concrete Expansion Anchor, *Materials (Basel)*, 14 (2021) 24, doi: 10.3390/ma14247757
- [38] Yazıcı, S., Inan, G., Tabak, V.: Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Construction Building Material*, 21 (2007), pp. 1250–1253. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025
- [39] Mansur, M.A., Chin, M.S., Wee, T.H.: Stress-strain relationship of high strength fiber concrete in compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11 (1999) 1, pp. 21–29, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(21)

- [40] Nili, M., Afroughsabet, V.: Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 37 (2010) 8, pp. 879–886, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.03.004
- [41] Nyström, U., Gylltoft, K.: Comparative numerical studies of projectile impacts on plain and steel-fibre reinforced concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 38 (2011) 2, pp. 95–105, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.003
- [42] Jang, S.J., Yun, H.D.: Combined effects of steel fiber and coarse aggregate size on the compressive and flexural toughness of high-strength concrete, *Composite Structures*, 185 (2017) pp. 203–211, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.11.009
- [43] TCK Concrete Road Pavements Technical Specification.: Turkey, 2019.
- [44] Blagojević, P., Blagojević, N., Kukaras, D., Živković, D., Šutanovac, A.: Mechanical flexural properties of concrete with melt-extract stainless steel fibres. *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 12, pp. 1155–1164, doi: :10.14256/JCE.2992.2020
- [45] Zhang, Q., Xu, W., Sun, Y., Ji, Y.: Investigation on Mechanical and Microstructure Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2022), pp. 1-18, doi: 10.1155/2022/3681132
- [46] Kamel, M.A.: Quantification of Benefits of Steel Fiber Reinforcement for Rigid Pavement, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 4 (2016) 6, pp. 189-198, doi: 10.12691/ajcea-4-6-1