



MIKROARMIRANI MLAZNI BETON - PREDNOSTI PRIMJENE U TUNELOGRADNJI

*Stručni rad/Professional paper
Primljen/Received: 4. 10. 2018.
Prihvaćen/Accepted: 12. 11. 2018.*

prof. dr Mato Uljarević, dip.inž.građ

Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Bulevar vojvode Stepe
Stepanovica 77, redovni profesor

Davora Tomić, dip.inž.građ

Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Bulevar vojvode Stepe
Stepanovica 77, student drugog ciklusa studija

Sažetak: Poboljšavanjem fizičko-mehaničkih svojstava betona, dodatkom vlakana, osigurava se sve šira primjena takvog kompozita, u realnim projektima. Tehnološki razvoj opreme za ugradnju betona prskanjem, omogućio je upotrebu mikroarmiranog betona, u prvom redu u konstruktivnim sistemima osiguranja iskopa podzemnih konstrukcija. U radu će se prikazati rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava betonskih mješavina s čeličnim vlaknima. Specificirati će se prednosti primjene ovakvog kompozita u izradi obloga podzemnih konstrukcija. Prikazati će se preporuke za spravljanje i ugrađivanje mikroarmiranog betona tehnologijom prskanja, kao i pristup u dimenzioniranju tunelske obloge od mikroarmiranog betona.

Ključne riječi: vlakno, beton, fizičko-mehanička svojstva, tehnologija prskanja

FIBER REINFORCED SHOTCRETE - THE BENEFITS OF THE APPLICATION IN TUNNEL BUILDING

Abstract: Fibers enhance the physical and mechanical properties of concrete and bring wider application of such composite in real projects. The technological development of equipment for the installation of concrete by spraying enabled the use of micro-reinforced concrete, primarily in constructive systems for ensuring the excavation of underground structures. The paper will present the results of testing physical and mechanical properties of concrete mixtures with steel fibers. The advantages of using such a composite on lining of underground structures will be specified. Recommendations for making and installation of micro-reinforced concrete with spraying technology, as well as the approach to dimensioning the tunnel lining made of micro-reinforced concrete will be presented.

Key words: fiber, concrete, physical-mechanical properties, spraying technologies



1. UVOD

Mogućnost ugradnje mikroarmiranog betona tehnologijom prskanja, daje velike prednosti ovom materijalu u osiguranju iskopa u tunelogradnji. Dodatak vlakana betonskoj matrici u znatnoj mjeri poboljšava fizičko-mehanička svojstva iste, te kao kompozit pronalazi sve veću primjenu u elementima konstrukcija izvedenih klasičnom tehnologijom ugradnje betona. Osnovni sastav mikroarmiranog betona sličan je običnom betonu. Naime, osim dodataka vlakana mikroarmirani beton se pri sličnoj namjeni razlikuje od običnih betona po povećanoj količini cementa, manjoj učestalosti krupnog agregata i manjoj veličini maksimalnog zrna agregata. Skoro uvijek se primjenjuju i dodaci za poboljšanje obradljivosti svježeg betona, te dodaci za povećanje prionljivosti vlakana i malterske matrice.

1.1. Vrste vlakana i njihov doprinos svojstvima

Od prvih primjena do danas u upotrebi su prirodna organska, čelična, staklena (alkalno otporna), mineralna, karbonska, polipropilenska i razna druga sintetička vlakna. Dužine vlakana obično su od 5 do 75 milimetara. Vlakna se uobičajenom tehnologijom mogu uspješno pomiješati u betonskoj mješavini najviše do dva zapreminska postotka debljih vlakana, a ukoliko su vlakna tanja, onda najviše do nekoliko promila. Glavni doprinos mikroarmiranja je u poslijepukotinskom stanju, jer tada vlakna koja premoštavaju pukotine doprinose povećanju čvrstoće, deformacija i žilavosti kompozita. Utjecaj vlakana na poboljšanje svojstava mikroarmiranog betona započinje već u fazi stabilnog širenja pukotina (približno do 70% od statičke čvrstoće betona), a traje dalje u procesu nestabilnog širenja pukotina.

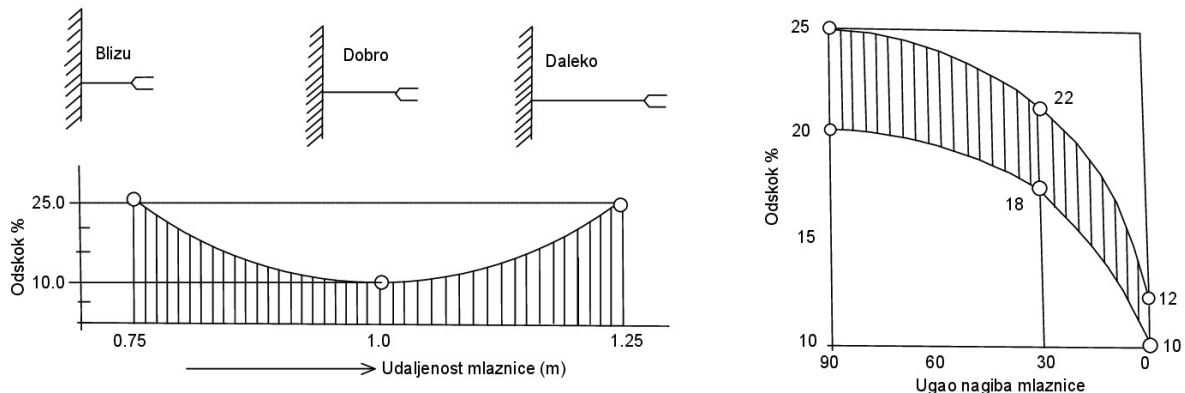
Sposobnost kompozita, da nakon pojave pukotine, a prije otkazivanja, izdrži velike deformacije često se mjeri indeksom žilavosti. Ocjena žilavosti zavisi od vrste i geometrije vlakana, količine vlakana, sastava betonske mješavine, veličine probnog tijela, konfiguracije i brzine opterećivanja, točnosti mjerenja deformacija, krutosti uređaja za ispitivanje u odnosu na krutost ispitivanog probnog tijela. Ne poboljšavaju se svojstva srazmjerno s povećanjem količine vlakana, već je potrebna određena optimalizacija svojstava betonske mješavine i vlakana. Mikroarmirani beton često se projektira zahtijevajući određenu čvrstoću na pritisak kao i vrstu i količinu vlakana. U nekim posebnim primjerima zahtijevani parametar je indeks žilavosti. Ispitivanje čvrstoća na pritisak mikroarmiranih betona ima smisla samo kao jednostavan test provjere ujednačenosti kvalitete očvrstlog betona. Međutim, za ocjenu doprinosa vlakana u betonu presudan je ukupan radni dijagram koji se dobije pri testiranju prizme na savijanje. Doprinos se onda procjenjuje usporedbom radnih dijagrama i izvedenih veličina kao što su indeksi žilavosti i drugi parametri.

2. MJEŠAVINE MIKROARMIRANOG BETONA

Posebnu je pažnju potrebno posvetiti mješavini mikroarmiranog betona. **Potrebno je istaći da je maksimalno zrno agregata u međusobnoj zavisnosti sa dužinom vlakna**, što utiče na obradivost klasično spravljenе mješavine. Maksimalno zrno agregata bi trebalo biti između trećine i polovine dužine vlakna. Potrebno je napomenuti da prisutnost veće količine sitnijih frakcija izaziva povećano skupljanje betona pri sušenju, dok povećana količina krupnije frakcije uzrokuje veći odskok. Mikroarmirani mlazni beton ugrađuje se istom opremom kao i običan prskani beton, mokrim ili suhim postupkom. Međutim, redovito je problem ravnomjerne dozaže vlakana u nanesej mješavini. Problem se stvara sa povećanjem količine vlakana, kao i povećavanjem faktora oblika vlakana. U takvim situacijama dešava se gomilanje vlakana i sitnijih frakcija mješavine stvarajući „ježeve“, a što znatno otežava proces ugradnje i umanjuje kvalitet projektovane mješavine.



Iz tih razloga neophodno je dozažu vlakana izvoditi na samoj mlaznici, bez obzira koja je tehnologija ugradnje primjenjena. Na slici 1, šematski je prikazano nekoliko preporuka kojih bi se trebalo pridržavati pri ugrađivanju mlaznog betona.



Slika 1. Odskok materijala u funkciji udaljenosti i nagiba mlaznice

Ideja da se vlakna, neorganskog ili organskog porijekla, dodaju u svježu matricu betona, nastala je u želji da se na relativno jednostavan način poboljšaju neka njegova inženjerska svojstva: žilavost, otpornost na zamor, udarna čvrstoća, čvrstoća pri savijanju i drugo. Ne poboljšavaju se svojstva srazmjerno povećanju količine vlakana, već je potrebna određena optimalizacija svojstava betonske mješavine i vlakana. Tokom miješanja mora se spriječiti segregacija i grudvanje vlakana, a ti procesi su zavisni o brojnim faktorima. Jedan od najvažnijih je faktor oblika vlakana. Ukoliko je faktor oblika vlakna (odnos dužine i dijametra vlakna) veći od 100, povećavaju se poteškoće kod miješanja, ali je doprinos takvih vlakana svojstvima mikroarmiranih betona povoljniji. Ostali faktori koji utiču na miješanje i obradljivost mikroarmiranih betona su: zapreminski postotak vlakana, geometrija vlakana, veličina najvećeg zrna agregata, ukupni sastav agregata, vodocementni faktor, konzistencija, postupak miješanja. Ako se jednom formiraju grudve vlakana, u daljem procesu miješanja vlakna je veoma teško razdvojiti. Izbor debljine vlakana takođe je uslovljen maksimalno mogućim brojem vlakana pri kojem ne dolazi do nakupljanja u „ježeve“. Izraz za izračunavanje maksimalne mase vlakana koja se mogu pomiješati u beton s maksimalnim zrnom agregata od 16 mm, dobijen je eksperimentalno i glasi:

$$M = 0,74 \times \rho \times \frac{d}{l} \dots \dots \dots (1),$$

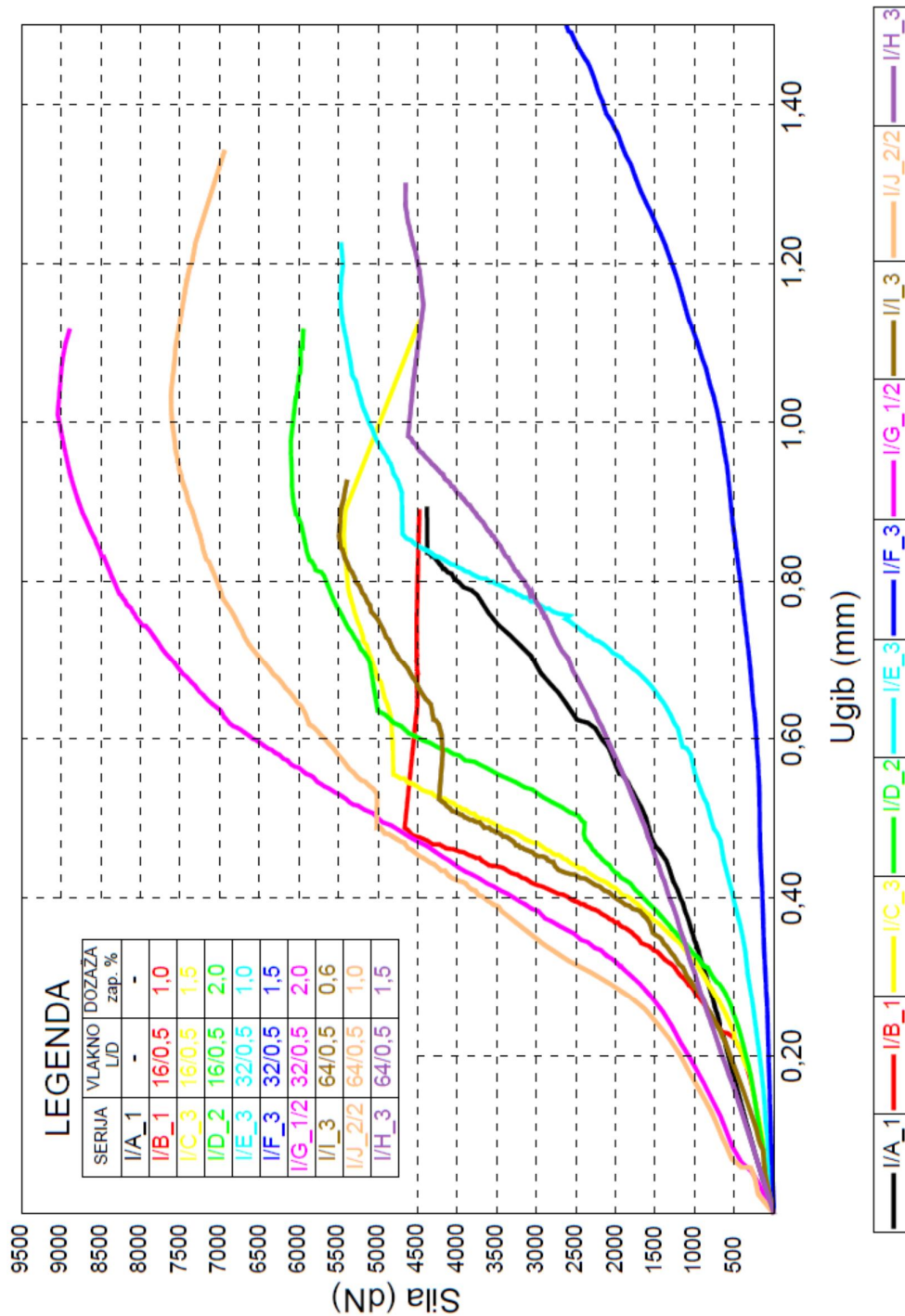
gdje je M masa vlakana u kg/m³ betona, ρ je gustina vlakana u kg/m³, a d/l je recipročna vrijednost faktora oblika.



2.1. Sastavi mješavina u zavisnosti od dužine i dozaže vlakana

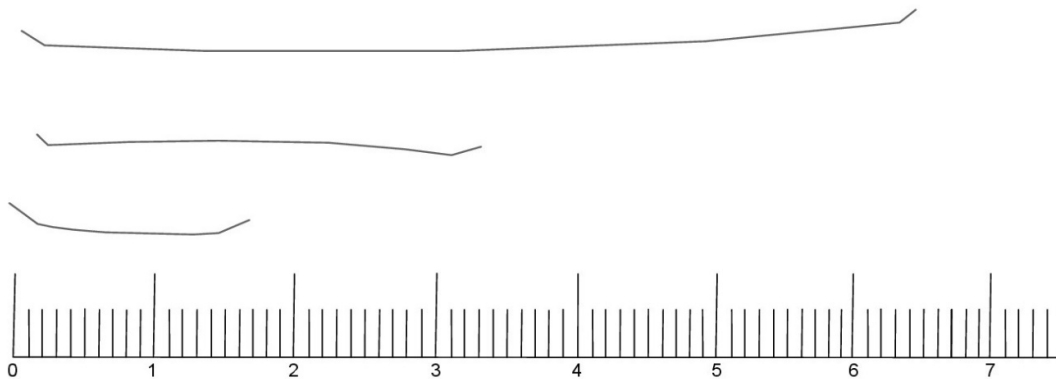
Tabela 1- Sastavi za m3 mješavine sa utvrđenim čvrstoćama nakon 28 dana

SERIJA	VLAKNA			KAMENI AGREGAT			CEMENT	DODACI (kg)		ČVRSTOĆA (Mpa)			Modul elastičnosti (GPa)	
	L (mm)	D (mm)	Masa (mm)	0-4 (mm)	4-8 (mm)	8-16 (mm)		kg	Super-plastifikator P	Mikro silika	Pritisak	Zatezanje		Smicanje
I/A	-	-	-	957	192	766	400	6	-	59.03	3.97	4.22	9.08	38.30
I/B	16	0.5	80	943	188	755	400	6	-	65.04	4.98	5.14	14.18	41.06
I/C	16	0.5	120	923	184	738	400	6	-	68.10	5.75	5.87	15.14	41.25
I/D	16	0.5	160	903	180	722	400	6	-	71.71	6.24	7.46	14.03	45.24
I/E	32	0.5	80	943	188	755	400	6	-	69.48	5.17	6.42	14.50	41.06
I/F	32	0.5	120	923	184	738	400	6	-	71.82	6.08	8.00	15.97	41.16
I/G	32	0.5	160	903	180	722	400	6	-	67.78	7.87	8.81	18.40	40.17
I/H	64	0.5	48	945	189	756	400	6	-	65.59	5.61	5.13	13.54	39.43
I/I	64	0.5	80	943	188	755	400	6	-	60.59	5.14	5.97	16.09	36.02
I/J	64	0.5	120	923	184	738	400	6	-	59.36	5.07	8.38	15.44	33.15
II/A	-	-	-	1010	367.5	459.5	378	-	42	27.90	3.20	-	-	-
II/B	32	0.5	40	976.5	355	443.5	378	-	42	26.20	4.80	6.25	-	-
II/C	32	0.5	60	1017	357	462	378	-	42	31.00	5.20	16.67	-	-
II/D	32	0.5	80	973	353.5	442.5	378	-	42	32.30	5.40	31.25	-	-



Slika 2. Radni dijagram pri savijanju MA betona karakterističnih serija u zavisnosti od dužine i dozaže vlakana

Za spravljanje mješavina mikroarmiranog betona korištena su vlakna, prikazana na slici 3. Vlakna su promjera 0,5 mm, a različitih dužina (16 mm, 32 mm i 64 mm).



Slika 3- Primijenjena čelična vlakna u mješavinama

Karakteristike primijenjenih čeličnih vlakana su:

- najveća zatezna čvrstoća: $R_m=841$ MPa
- granica elastičnosti: $R_e=805$ MPa
- prekidna deformacija: $\Delta=0,4\%$
- modul elastičnosti: $E=2,025 \cdot 10^5$ Mpa

U tabeli 1 dati su sastavi mješavina mikroarmiranog betona za klasični način ugrađivanja (serije I/A –I/J) i za ugrađivanje prskanjem (serije II/A-II/D). U istoj tabeli prikazane su čvrstoće mikroarmiranog betona nakon 28 dana, to čvrstoće na: pritisak, zatezanje (cijepanjem, savijanjem), smicanje, kao i statički modul elastičnosti. Iz tabele je vidljivo da su sve čvrstoće mikroarmiranog betona povećane u odnosu na matricu betona bez vlakana. Na slici 2 prikazani su radni dijagrami pri savijanju mikroarmiranih betona serije I/A do I/J. Mikroarmirani betoni ne gube nosivost pri pojavi prvih pukotina u matrici betona pod opterećenjem. Zavisno od pravilnog sastava mješavine, povećavajući opterećenje nastala pukotina će se progresivno širiti, ili će u slučaju većeg prisustva vlakana koja premoštavaju pukotinu dovesti do formiranja novih pukotina. Ovaj proces će na kraju, uz znatno povećanje opterećenja, dovesti do povezivanja pukotina sa najmanjom otpornosti kroz presjek elementa. Nekada, nakon pojave prve pukotine, ne povećava se napon, ali se znatno povećava deformacija, na račun deformacije vlakana koja premoštavaju pukotinu ili njihovog izvlačenja iz betonske matrice. U oba slučaja radi se o značajnom povećanju žilavosti mikroarmiranog betona u odnosu na klasičan beton (bez vlakana). Navedeno svojstvo je od velike važnosti upravo pri izvođenju primarne obloge u tunelskim iskopima. Ugradnjom mikroarmiranog betona prskanjem, vlakna se uglavnom raspoređuju u ravni okomitoj na smjer prskanja. Mogućnost da se u tunelskim radovima prskanjem ugradi beton poboljšanih fizičko-mehaničkih svojstava, doprinijelo je racionalizaciji tunelskih obloga, a time i smanjenju ukupnog koštanja izgradnje tunela. U mlaznom betonu primarnih tunelskih obloga, vlakna su gotovo u potpunosti zamijenila čelične armaturne mreže.

2.2. Prednosti mikroarmiranog betona u odnosu na beton armiran mrežama i proračun potrebne obloge

U odnosu na prskani beton armiran mrežama, mikroarmirani prskani beton ima sljedeće prednosti:



- manji utrošak rada i brže napredovanje radova,
- manji utrošak materijala, jer se bolje slijedi konfiguracija iskopa, što nije slučaj kod klasično armiranog prskanog betona, gdje mreža ne dolazi uvijek u zatežuću zonu,
- vlakna povećavaju homogenost, zatežuću i posmičnu čvrstoću betonskog kompozita,
- vlakna smanjuju pojavu mikropukotina,
- mikroarmirani prskani beton je otporniji na abraziju, koroziju i udare,
- sigurniji su uslovi rada, izbjegava se montaža mreža i ankera upravo u zoni tunela gdje se nisu završila deformisanja
- prednost je u organizaciji radova u ograničenom prostoru.

Proračun potrebne obloge od mikroarmiranog betona moguće je uraditi primjenjujući inverzni postupak, primjene reaktivnog opterećenja podgrade u analizi graničnih stanja. Naime, teško je odrediti granični uticaj stijenske mase na podgradu, ali je zato moguće, s obzirom na poznavanje karakteristika materijala i geometrije podgrade definirati pritisak kojim podgrada djeluje na stijenu. Treba kontrolirati da li uz dozvoljenu (graničnu) reakciju podgrade i stijena zadovoljava kriterije loma. Tako bi se dokazala moguća granična ravnoteža sistema podgrada-stijena s potrebnim faktorom sigurnosti za podgradu i zadovoljenje kriterija sloma stijene. Na ovaj način bi se, u takvim uvjetima, direktno primijenio uticaj graničnog stanja podgrade na stijenu. Opterećenje stijene graničnom interakcijom podgrade i stijene na rubu otvora može se odrediti, i kao ulazni podatak se koristi u analizi stanja napona i deformacija stijene oko tunelskog otvora. Poređenjem dobivenih naprezanja uz otvor iskopa sa kriterijumima sloma dobiva se mjera sigurnosti sistema sijena-podgrada.

3. ZAKLJUČAK

Mikroarmirani prskani beton, s obzirom na fizičko-mehanička svojstva i tehnologiju izrade, sve više postaje osnovni element podgradnih sistema podzemnih iskopa, označen kao primarna obloga. Poboljšana žilavost i čvrstoća pri savijanju mikroarmiranog betona osiguravaju oblozi značajnu nosivost i nakon raspucavanja, a odvajanju prskanog betona od stijene moraju prethoditi velike deformacije. Ovako ponašanje naročito je primjereno u tunelima i rudnicima, gdje su moguće velike naknadne deformacije stijena. Vlakna se prilikom nanošenja u mlazu orijentiraju (većinom) u ravnini okomitoj na smjer mlaznice (2D raspodjela), što poboljšava nosivost obloge pri savijanju. Za poznate fizičko mehanička svojstva mikroarmiranog betona, postupkom „inverznosti opterećenja“, moguće je, zadovoljavajući kriterije sloma stijenske mase, definirati debljinu obloge. Za postizanje zahtijevanih fizičko-mehaničkih svojstava mikroarmiranih betona neophodno je optimizirati sastav takve mješavine. Ovo se naročito odnosi na količinu vlakana i granulometrijski sastav agregata .



LITERATURA :

1. ACI Committee 544 , Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, 1996.
2. ACI Committee 544-5R, Report on Physical Properties and Durability of Fiber-reinforced Concrete, 2010.
3. Carranza Torres C., Diederichs M.S. , "Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets," *Tunneling and Underground Space Technology*, pp. 506-532, 2009 .
4. Hoek E. , Brown E.T. , Underground excavations in rock, London: Instn Min. Metall , 1980.
5. Uljarević M. , "Svojstva mikroarmiranog betona sa primjenom u tunelskim oblogama," in *INDIS 97 i CiB W-63*, Novi Sad, 1997.
6. Muravljev M., Uljarević M., Mikroarmirani betoni. Specijalni betoni i malteri, svojstva, tehnologija, primjena.- Monografija, Beograd, 1999.
7. Uljarević M., "Svojstva mikroarmiranog betona armiranog metalnim vlaknima," in *JDGK 10. kongres*, Vrnjačka Banja, 1998.
8. Uljarević M., "Žilavost mikroarmiranog betona pri savijanju," in *JDIM*, Vrnjačka Banja, 2002.
9. Uljarević M., "Kritički pristup izboru kriterijuma loma stijenske mase u funkciji racionalne izrade objekata," in *XIV Simpozijum iz Inženjerske geologije i geotehnike DGEITS*, Beograd, 2012.
10. Uljarević M. , Beton ojačan betonskim vlaknima, Monografija, Banja Luka: Arhitektonsko - građevinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci , 2013.
11. Uljarević M. , "Mikroarmirani beton u tunelogradnji," *Savez građevinski inženjera Srbije, građevinski kalendar* , pp. 40-90, 2015.
12. Vlachopoulos N., Diederich M. S. , "Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis," *Rock Mech. & Rock Eng.* , pp. 131-146, 2009.
13. Hudek M. , "Primjena principa graničnih stanja u tunelogradnji," *Građevinar*, vol. 52, pp. 443-450.
14. Brady B.G.H., Brown E.T., Rock mechanics for underground mining, 1985: London: Allen and Unwin.
15. Carranza-Torres C., Fairhurst C., "The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36 (6), pp. 777-809, 2000.
16. Carranza Torres C. , "Elasto-plastic solution of tunnel problems using generalized form of the Hoek-Brown failure criterion," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41 (3), pp. 480-481, 2004.

