

NUMERIČKA ANALIZA UTICAJA PRIMENE MLAZNOG BETONA I SIDARA NA FAKTOR ČVRSTOĆE U STENSKOJ MASI OKO TUNELSKOG ISKOPA

Ljiljana Tadić¹

UDK:

Rezime: U radu se analizira uticaj primene primarne podgrade od mlaznog betona i sidara na povećanje faktora sloma stenske mase oko tunelskog otvora. Numeričko modeliranje tunelskog iskopa je sprovedeno primenom program Phase², koji se bazira na Metodi konačnih elemenata, a koji, u zavisnosti od karakteristika stenske mase i analiza koje se sprovode, pruža, između ostalog, i mogućnost izbora odgovarajućeg kriterijuma loma (Hoek-Brown-ov, Mohr Coulomb-ov, Drucker Prager-ov i Cam-Clay). Numeričke analize sprovedene u ovom radu, pokazale su da primena mlaznog betona i sidara doprinosi povećanju koeficijenta sigurnosti od loma, a time i redukciji poluprečnika plastifikovane zone u stenskoj masi oko tunelskog otvora. Ova činjenica je nezanemarljiva, naročito kada je u pitanju stabilizacija stenske mase slabijeg kvaliteta, jer se na taj način omogućava kontrolisano deformisanje stenske mase.

Gljučne reči: tunel, numerička analiza, primarna podgrada, faktor čvrstoće

1. UVOD

Iskopom pozemnog otvora u stenskoj masi dolazi do promene postojećeg naponskog stanja, odnosno do koncentracije napona oko konture otvora, pri čemu nastaje novo naponsko stanje, tzv. sekundarno stanje napona. Pokretanje stenskog masiva prema podzemnom otvoru sprečava se primenom primarne podgrade (mlazni beton, čelična sidra, armaturne mreže, čelični i rešetkasti lukovi), kao nosive konstrukcije. U slučajevima nedovoljne nosivosti primarne podgrade nastaju velike defromacije, koje mogu dovesti do kolapsa sistema. Stoga je, u cilju postizanja stabilnosti, veoma važno primeniti adekvatan sistem podgrađivanja i tehniku iskopa.

Predviđanje odziva stenske mase na iskop tunelskog otvora predstavlja veoma složen inženjerski problem, u prvom redu zbog složenosti karakteristika i ponašanja stenske mase. Ova problematika je naročito složena kada su u pitanju anizotropne, heterogene i diskontinuirane sredine, jer postojanje diskontinuiteta i njihova orijentacija značajno utiču na raspodelu i intenzitet napona.

¹ mr Ljiljana Tadić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel. 554-300, e-mail: tadic@gf.uns.ac.rs

Danas je ove probleme moguće rešavati putem eksperimentalnih ispitivanja i istraživanja „in situ“ (poznavanje geoloških, geotehničkih i hidrogeoloških parametara i napona), ili analizom na numeričkim modelima. Primena računara nam omogućava uspešno rešavanje sve složenijih problema. To se naročito odnosi na numeričke metode, čiji napredak nam je omogućio razvoj postupaka kojima se, i pored uvođenja mnoštva pretpostavki, na realan način može modelirati ponašanje stenske mase.

Veliki broj merenja deformacija oko tunelskih otvora, kako kod nas tako i u svetu, pokazao je znatne priraste napona i deformacija za vreme eksploatacije, ne samo u primarnoj podgradi već i u sekundarnoj oblozi.

Naime, dugotrajne deformacije stenske mase su relativno česta pojava u podzemnim građevinama, uglavnom onim koje se izvode u mekim stenskim masama izloženim značajnim geološkim naprezanjima, (Weng i dr. 2010., Barla 2004., Chern i dr. 1995., Chang 1994.). Dugotrajno deformisanje je proces konitnuiranog deformisanja stenske mase oko podzemnog otvora zbog preraspodele napona nakon iskopa. Tako nastale dugotrajne deformacije su kompleksan rezultat puzanja intaktne stene², puzanja mnoštva diskontinuiteta i zakasnelog razvoja novih pukotina.[7] Ako se ugradnja primarne podgrade odlaže, deformisanje stenske mase će se brže odvijati, a time i sam proces preraspodele napona oko podzemnog otvora. Međutim, ako se deformisanje stenske mase spreči (npr. trenutnim podgrađivanjem) proces preraspodele napona će trajati duže, a samim tim i proces deformisanja primarne podgrade.

Dakle, u tunelogradnji postoji potreba za što boljim poznavanjem ponašanja stenske mase nakon iskopa tunelskog otvora, a to je moguće postići jedino sprovođenjem analiza sekundarnog stanja napona i deformacija u fazi projektovanja. Tim analizama se dobijaju saznanja o mogućim deformacijama stenske mase u toku izvođenja iskopa, na osnovu kojih je moguće, između ostalog, proceniti i doprinos podgrade u ukupnom stanju stabilnosti tunelskog iskopa.

Treba napomenuti da je prilikom modeliranja kontinuuma, potrebno usvojiti i odgovarajuće konstitutivne odnose koji važe za stensku masu. Najčešće se koristi linearna elastičnost, ali se mogu primenjivati i konstitutivne jednačine za nelinearnu elastičnost. Ukoliko se akcenat stavlja na progresivni lom stenske mase, potrebno je primenjivati elastoplastične modele, jer se na taj način može opisati odziv nakon postizanja granične čvrstoće. [5] [6]

2. NUMERIČKI MODEL I ULAZNI PARAMETRI ZA ANALIZU

Metodom konačnih elemenata moguće je obuhvatiti složenu geometriju kontinuuma, graničnih uslova i pratiti promene naprezanja i deformacija koje se javljaju prilikom različitih faza opterećenja ili iskopa.

² Intaktna stena (intact rock) je materijal stenske mase koji ne sadrži guste strukturne diskontinuitete. Ona je jedan od osnovnih elemenata stenske mase koji nekada delimično a nekada u potpunosti kontrolise njeno ponašanje – Hoek E., Rock Engineering (a course)

U svrhu predmetne analize korišćen je program konačnih elemenata Phase²³. Phase² je dvodimenzionalni program za analizu stabilnosti i deformacija geotehničkih konstrukcija. Osnovne faze rada su:

- Analiza problema (gustina mreže, tip elemenata).
- Izbor odgovarajućeg konstitutivnog modela.
- Određivanje geomehaničkih karakteristika za odabrani konstitutivni model (na osnovu laboratorijskih ispitivanja uzoraka i inženjersko-geoloških podataka).
- Određivanje graničnih uslova i opterećenja.
- Izvođenje analize.

Prvi korak u simuliranju tunelskog iskopa je diskretizacija kontinuuma, tj. formiranje proračunskog modela sa određenim brojem konačnih elemenata.

Za ovu analizu je najpre formirana mreža konačnih elemenata sa kružnim središnjim delom (Slika 1a) iz kojeg se materijal naknadno „iskopava“, kako bi se simulirala izgradnja tunela (iskop se simulira tako što se elementima koji se nalaze unutar konture tunelskog otvora dodeljuje zapreminska težina vazduha) (Slika 1b). Za formiranje mreže konačnih elemenata u Phase-u je dovoljno zadati granice modela (veličina posmatranog područja je usvojena tako da bude jednaka četvorostrukoj vrednosti prečnika tunela), tip mreže, tip elementa, faktor gradijenta, broj čvorova (na konturi iskopa i na granicama proračunskog modela), nakon čega program sam generiše odgovarajuću mrežu konačnih elemenata. S obzirom da se najveće promene napona i pomeranja očekuju u užoj zoni oko tunelskog otvora, mreža konačnih elemenata ima najveću gustinu upravo u toj zoni. Prema spoljnoj konturi proračunskog modela usvojen je konstantan korak povećanja dimenzija konačnih elemenata, zbog sve manjih gradijenata napona i deformacija. Na ovaj način se ponašanje modela približava ponašanju neprekidne sredine (kontinuum). Na horizontalnim i vertikalnim granicama modela sprečena su horizontalna i vertikalna pomeranja.

U skladu sa postupkom za simulaciju procesa izgradnje tunela, prva faza analize je proračun primarnog naponskog stanja („in situ“) koje postoji u neporemećenoj stenskoj masi. Ovo stanje je simulirano tako što su svim konačnim elementima koji čine proračunski presek dodeljeni zapreminska težina i mehaničke karakteristike stenske mase. S obzirom da je stenska masa opterećena samo sopstvenom težinom (za opterećenje je uzeta težina nadsloja- Body Load), ovo stanje napona i deformacija zavisi od visine nadsloja, težine stenske mase i elastičnih konstanti stenske mase. Analze su vršene za razne vrednosti modula elastičnosti stenske mase (od 900MPa do 4650MPa). Osim modula elastičnosti stenske mase, tokom analize, u proračunima su varirani i gustina mreže konačnih elemenata, debljina mlaznog betona i elastičnost sidara.

Prilikom proračuna primenjen je Hoek-Brown-ov kriterijum loma [8]. Hoek-Brown-ovi parametri čvrstoće stenske mase, koji su bili potrebni za ovu analizu, dobijeni su korišćenjem programa RocLab, koji se bazira upravo na Hoek-Brown-ovom kriterijumu loma (Hoek, Carranza-Torres, Corcum, 2002.).

³ Rocscience-Rockengineering group, Toronto

Pored Hoek-Brownovog kriterijuma loma, proračuni su vršeni i za Mohr-Coulomb-ov i Generalisani Hoek-Brown-ov kriterijum loma, ali su, zbog ograničenja u obimu rada, tabelarno (Tabela 2) prikazani rezultati samo jednog od izvršenih proračuna.

Kada su u pitanju mehaničke karakteristike stenske mase, treba napomenuti, da je uvek potrebno u obzir uzeti moguća odstupanja od prosečnih vrednosti. „In situ“ merenjima na probnim deonicama treba proveriti pretpostavke proračuna i koristiti ih za poboljšanje numeričkog modela.

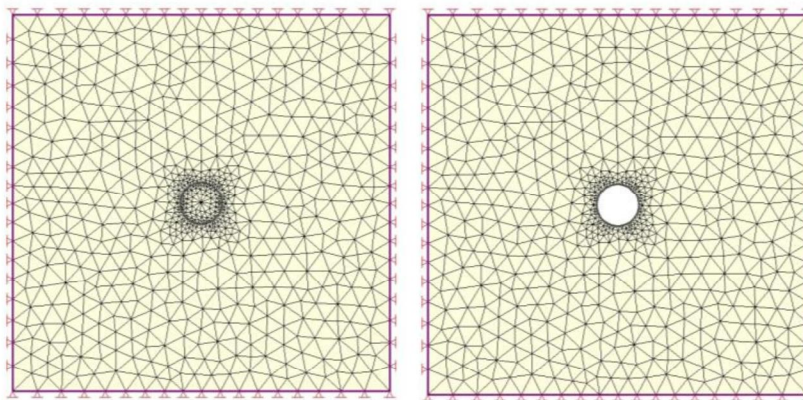
Materijalni parametri elemenata primarne podgrade (mlazni beton i sidra) su usvojeni u realnom opsegu za ove materijale (Tabela 1).

Tabela 1: Karakteristike stenske mase i konstruktivnih elemenata primarne podgrade

	E[MPa]	γ [MN/m ³]	m_b	ν	GSI	ponašanje
Stena	1120	0,027	0,43	0,3	50	plastično
		d [cm]				
Mlazni beton	3000	20	-	0,25		plastično
		D[mm]	L[m]	Plane spacing [m]*	Out-of-plane Spacing [m]**	Pre-tensioning force [MN]
Sidra	200000	25	5	1,96	1,0	0
*Rastojanje sidara u ravni upravnoj na uzdužnu osu tunela						
**Rastojanje sidara u pravcu ose tunela						

Numeričko modeliranje je izvršeno u nekoliko faza:

- faza 0 definiše primarno stanje napona (slika 1a),
- faza 1 definiše iskop tunela (sekundarno naponsko stanje) bez primene primarne podgrade (slika 1b),
- faza 2 – zaštita iskopa, tj. modeliranje primarne podgrade (slike 2a, 2b i 2c).

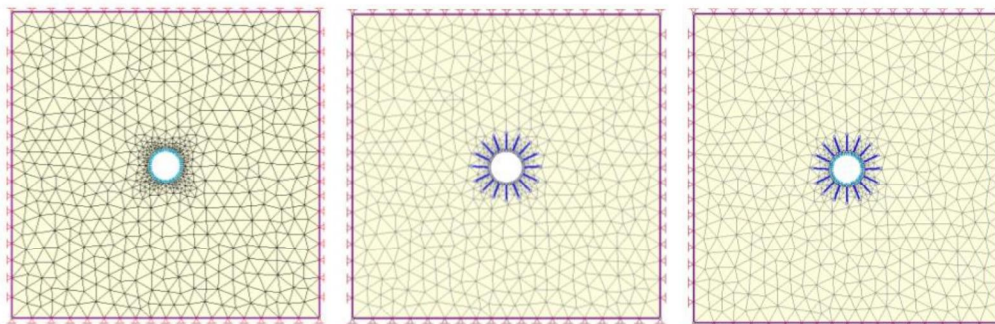


Slika 1: Usvojeni proračunski 2D model tla za proračun a) „in situ” napona, b) sekundarnih napona

Geometrija numeričkog modela je prikazana na slikama 1 i 2.

Da bi se proračunom obuhvatila i nosivost čela iskopa, koju na drugi način nije moguće obuhvatiti u ravanskoj analizi, analizirana su dva slučaja:

- I slučaj - podgrada se nanosi na nedeformisanu konturu iskopa,
- II slučaj - podgrada se nanosi na deformisanu konturu iskopa (dozvoljena relaksacija u ovim analizama je 30%).

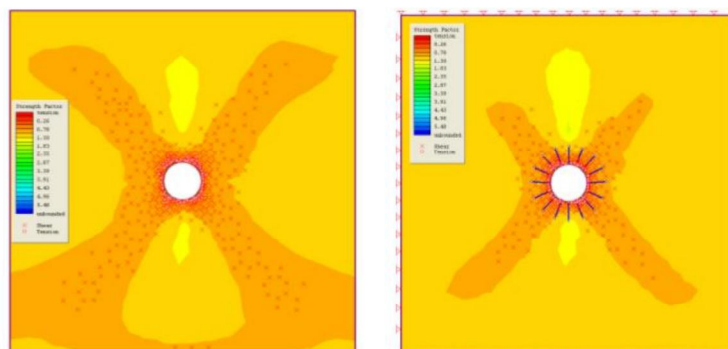


Slika2: Usvojeni proračunski 2D model za proračun sa podgradom a) mlazni beton, b) sidra, c) mlazni beton i sidra

3. REZULTATI NUMERIČKOG MODELIRANJA I NJIHOVA ANALIZA

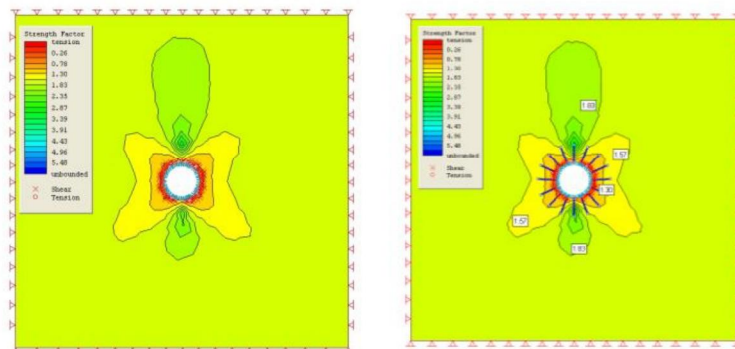
Prva serija proračuna je izvršena za tunelski otvor bez podgrade, dok su ostale vršene za podgrađen tunelski otvor (mlazni beton, sidra, mlazni beton i sidra).

Stabilnost tunelskog iskopa je procenjena proračunom kontura faktora čvrstoće (SF), čiji rezultati su prikazani na slikama 3 i 4. Ono što se na ovim slikama (dijagramima) može uočiti je nepostojanje zona sa faktorom čvrstoće manjim od jedan, što ne znači da je iskop stabilan. Naime, upoređivanjem ovih dijagrama sa dijagramima koji su dobijeni proračunima u kojima je pretpostavljeno elastično ponašanje stenske mase, može se videti da su zone u kojima je $SF \approx 1$ u plastičnoj analizi skoro identične zonama sa $SF < 1$ kod elastičnih analiza.

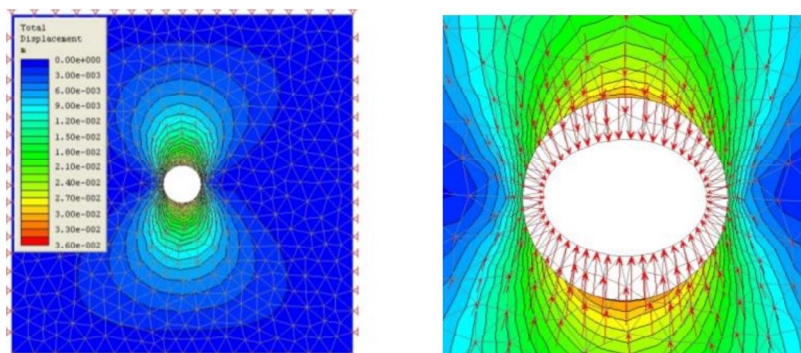


Slika 3: Izolinije faktora čvrstoće i slomljeni konačni elementi u slučaju a) nepodgrađenog tunelskog otvora, b) podgrađivanja sidrima

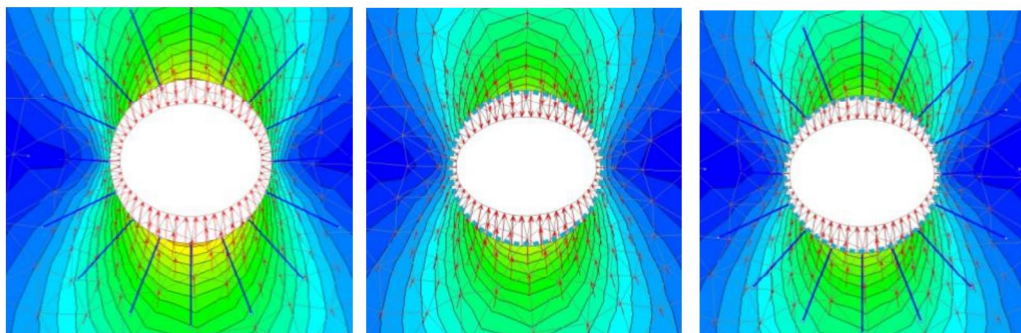
U slučajevima kada se stenska masa ponaša plastično (što je i pretpostavljeno u ovim proračunima), faktor čvrstoće ne može ni biti manji od jedan (kada se slom desi faktor čvrstoće je jednak jedan). Ovaj faktor može biti manji od jedan samo u elastičnim analizama kao hipotetička mera preopterećenja stenske mase.



Slika 4: Izolinije faktora čvrstoće i slomljeni konačni elementi u slučaju podrađivanja a) mlaznim betonom, b) mlaznim betonom i sidrima



Slika 5: Vektori totalnih pomeranja, izolinije pomeranja i deformisana mreža konačnih elemenata nepodgrađenog tunelskog iskopa



Slika 6: Vektori totalnih pomeranja, izolinije pomeranja i deformisana mreža konačnih elemenata podgrađenog tunelskog iskopa: a) sidra, b) mlazni beton i c) sidra i mlazni beton

Tabela 2: Tabelarni prikaz rezultata proračuna (sa i bez primarne podgrade) za stensku masu sa $E=1120\text{MPa}$ (plastična analiza)

	max pomeranje [m]	Broj slomljenih elemenata		
		stene	sidara	mlaznog betona
Nepodgrađen	0,032	234	-	-
Podgrađen-sidra	0,0291	191	77	-
Podgrađen-mlazni beton	0,0245	120	-	0
Podgrađen mlazni beton i sidra	0,0211	91	44	0

Na dijagramu prikazanom na slici 3a se vidi da se oko tunelskog otvora formirala velika plastifikovana zona (zone u kojima je $SF \approx 1$) - veličina plastifikovane zone je dosta veća u odnosu na prečnik tunelskog otvora. U takvim slučajevima dolazi do razaranja stenske mase, što za posledicu ima pomeranje konture iskopa, pa čak i njegovo urušavanje.

Shodno navedenom, pretpostavlja se da će stenska masa koja se nalazi unutar konture sa faktorom čvrstoće približno jednakim jedinici, biti nestabilna, pa ju je iz tog razloga potrebno osigurati primarnom podgradom. U Tabeli 2 su prikazani rezultati analize za tunelski iskop sa i bez primarne podgrade.

Zone plastifikacije (zone slomljenih konačnih elemenata) su na dijagramima (Slike 3 i 4) obeležene kružićima na mestima na kojima je slom posledica napona zatezanja, a krstićem tamo gde je slom posledica smičućih napona.

Upoređivanjem rezultata proračuna, odnosno dijagrama prikazanih na slikama 3a i 3b, vidi se da se primenom sidara neznatno smanjuje veličina plastifikovane zone. Međutim, ako se pored sidara primeni i mlazni beton, postže se mnogo bolji efekat (Slika 4b). Na ovaj način ne samo da se značajno umanjuje broj slomljenih konačnih elemenata stenske mase (sa 234 smanjen je na 91), već se znatno umanjila i vrednost max pomeranja (Slike 5 i 6).

4. ZAKLJUČCI

Za analizu stabilnosti tunelskog iskopa, naročito u posebnim geološkim usovima, moraju se primeniti modeli koji na najrealniji mogući način odražavaju stvarne uslove na terenu. Za celovitu analizu poželjno je koristiti analizu koja simulira sve faze iskopa i ugradnje podgradnog sistema.

Ugradnjom sidara je moguće postići poboljšanje geotehničkih parametara stenske mase, ali znatno bolji efekti se postižu u stenskim masama koje pokazuju elastična svojstva, nego u onim sa plastičnim svojstvima.

Podgrađivanjem tunelskog otvora isključivo sidrima neznatno se smanjuju broj slomljenih konačnih elemenata stenske mase i pomeranja čvorova na konturi tunelskog otvora.

Značajnije smanjenje broja slomljenih elemenata stenske mase i maksimalnih pomeranja, postiže se ako elemente podgradne konstrukcije čine mlazni beton i sidra. Osim toga, sa povećavanjem debljine mlaznog betona smanjuje se broj slomljenih konačnih elemenata stenske mase, ali i broj slomljenih elemenata mlaznog betona⁴.

Povećanje elastičnosti sidara ne utiče značajno na smanjenje veličine plastifikovane zone, ali dovodi do smanjenja broja slomljenih elemenata sidara.

Rezultati proračuna u koje je uključena i relaksacija konture iskopa (dopušteno je izvesno pomeranje konture iskopa pre ugradnje primarne podgrade), pokazali su da se broj slomljenih konačnih elemenata stenske mase, u tom slučaju, povećava, dok se broj slomljenih elemenata mlaznog betona i sidara osetnije redukuje.

Preporuke u smislu poboljšanja proračuna odnose se na usavršavanje numeričkog modela (modeliranje anizotropije i heterogenosti, što zahteva poznavanje većeg broja geotehničkih karakteristika) kako bi se kompleksnim konstitutivnim modelom stenskog masiva što bolje opisalo stvarno „in situ“ stanje tokom višefaznih iskopa. Ali, na žalost, i pored modernih sredstava za sprovođenje istražnih radova, veoma je teško, a ponekad i nemoguće, odrediti sve važnije podatke o svojstvima i stanju stenske mase od kojih zavisi stabilnost primarne podgrade. Stoga se u numeričko modeliranje interakcije stenskog masiva i podgrade mora uvesti mnoštvo pretpostavki. Ali i pored uvođenja mnoštva pretpostavki u proračun, numeričke simulacije u određenim situacijama mogu smanjiti tzv. geotehnički rizik, čime se, između ostalog, povećava i sigurnost izvođenja radova.

LITERATURA

- [1] M. Hudec, D. Kolić, S. Hudec: *Tunels–Excavation and primary support*, Hubitg, Zagreb, **2009**.
- [2] Ćorić, S.: *Geostatički proračuni*. Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Časopis Izgradnja, Saveza građevinskih inženjera i tehničara Srbije i Saveza arhitekata Srbije, Beograd, **2006**.
- [3] Безпалый, В. И.; Бялер, И. Я.; Карсницкий Н. Г., Сапрыкин, Л. Д.: *Сборный железобетон в подземном строительстве: Литературы пв строительстве и архитектуре УССР*, Киев, **1961**.
- [4] Dimitrijević D. D.: *Tuneli (projektovanje i građenje)*, Naučna knjiga, Beograd, **1955**.
- [5] Evert Hoek, Carlos Carranza-Torres, Brent Corkum, *Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition*, Toronto, **2002**.
- [6] Hoek E.: *Strength of jointed rock masses*, 23.rd. Rankine Lecture. *Geotechnique* 33, 187-223, **1983**.
- [7] Arapov I.: *Numeričko modeliranje u podzemnoj gradnji*, GF Zagreb, **2011**.
- [8] Hoek E., Brown E. T.: *Practical estimates of rock mass strength*. *Geomechanics Abstracts*, **1997**.
- [9] Lj. Tadić: *Naponsko-deformacijska analiza montažnih obloga sabračajnih tunela*, Magistarski rad, Subotica, **2008**.

⁴ U ovom radu nisu prikazani rezultati ovih proračuna, već su oni samo analizirani.

NUMMERICAL ANALYS EFFECT APPLICATION OF PRIMARY SUPPORT⁵ TO INCREASE THE STRENGTH FACTOR OF ROCK MASS AROUND THE TUNNEL

Summary: *This paper were analysed effect application of primary support- shotcrete and anchors, to increase the strength factor of rock mass around the tunnel opening. Numerical modeling of tunnel excavation was done using the program Phase2, which based on the finite element method, and which depending on the characteristics of rock mass and the analysis undertaken, provides, among other things, the possibility of selecting an appropriate fracture criterion (Hoek-Brown, Mohr Coulomb, Drucker Prager i Cam-Clay).*

Numerical analysis of this paper were made, showed that the application of shotcrete and anchors contributes to increase the strength factor, and therefore the reduction in radius plasticized zone in rock mass around the tunnel opening. This fact is non-negligible, especially when it comes to stabilization of the rock masses of poorer quality, because in thi sway allows the controlled deformation of rock masses.

Keywords: *tunnel, numerical modelling, analys, rock support, strength factor*

⁵ shotcrete and anchors