



NUMERIČKA ANALIZA NAPREZANJA I DEFORMACIJA PODZEMNOG ISKOPA

prof. dr. sc. **Maja Prskalo**, dipl. ing. građ. inženjerica
Blanka Tomić, mag. građ. inženjerica
Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

Sažetak: U radu je na primjeru tunela prikazana zaštita podzemnog iskopa, a u programskom paketu "Geo 5 FEM" odrađena je analiza naprezanja i deformacija podzemnog iskopa s i bez usvojene zaštite. Usvojena zaštita je u vidu injektiranih štapnih sidara. Odgovarajući podgradni sustav određen je RMR geomehaničkom klasifikacijom. Analiza stabilnosti kosine na ulaznom portalu odrađena je u programu GeoStudio 2004/2007, Slope.

Cljučne riječi: RMR, Geo 5 FEM, ulazni portal, GeoStudio

NUMERICAL ANALYSIS OF STRESSES AND DEFORMATIONS OF AN UNDERGROUND EXCAVATION

Abstract: The paper presents protection of an underground excavation, in the case of tunnel, while the analysis of stresses and deformations of the underground excavation with and without the adopted protection is carried out in the software suite Geo 5 FEM. The adopted protection is in the form of grouted bar anchors. The appropriate support system is determined by the RMR geomechanical classification. Analysis of slope stability at the entrance portal is performed in the software GeoStudio 2004/2007, Slope.

Key words: RMR, Geo 5 FEM, entrance portal, GeoStudio



1. UVOD

Tunelima, kao primjeru podzemnog otkopa, nazivamo specifične objekte koje gradimo ispod površine terena, u cilju svladavanja nekih prepreka ili ostvarivanja prostora za različite namjene. Prema težini građenja tunele dijelimo u tri osnovne kategorije:

- Laki tuneli – grade se u vrstima stijena
- Srednje teški tuneli – grade se u mekim stijena
- Vrlo teški tuneli – grade se u zemljanim materijalima ili izuzetno lošim i degradiranim stijena.

Iskop podzemnih prostorija i tunela, kao i stabiliziranje neposredno iskopanog profila jedan je od najizazovnijih i najodgovornijih inženjerskih zadataka. Ovu drugu fazu, koja predstavlja osiguranje od zarušavanja i pretjerane promjene oblika profila nazivamo podgrađivanjem.

1.1. Metode građenja tunela

Pod metodom građenja tunela podrazumijeva se način iskopa poprečnog profila, te način osiguranja stabilnosti tunelskog otvora preko privremenih ili stalnih podgrada i obloga, u primarnom ili konačnom stadiju. Metode građenja tunela mogu se podijeliti u tri osnovne skupine:

- Klasične metode
- Suvremene metode
- Specijalne metode

Glavna razlika između klasičnih i suvremenih metoda je u tome koja se funkcija povjerava podgradi. Kod klasičnih metoda glavni konstruktivni element je drvo i ono ima samo privremenu ulogu, dok se kod suvremenih metoda podgradi daje trajna funkcija.

Glavni konstruktivni elementi kod suvremenih metoda su: štapna sidra, mlazni beton, mikroarmirani mlazni beton, čelična armatura u betonu, čelični lukovi i čelične platece.

1.1.1. Zaštita mlaznim betonom

Mlazni beton se primjenjuje kako bi se izbjeglo popuštanje okružujuće stijenske mase ali i kao nosivi element. Obloga mlaznog betona pokriva i zatvara pukotine u kamenu i sprječava otpadanje i pucanje. Dvije su osnovne tehnike ugradnje mlaznog betona:

- suhi postupak
- mokri postupak

Mlazni beton može se još armirati žičanom mrežom, može se tražiti dodavanje čeličnih ili kompozitnih vlakana.

1.1.2. Čelični lukovi

Funkcija čeličnih lukova je ograničena na ulogu armature, te na trenutnu potporu onih područja koja se nalaze direktno pored mjesta iskopa, gdje mlazni beton još nije nanesen ili gdje nije još razvijena dovoljno velika nosivost. Čelični lukovi se koriste u teškim geološkim uvjetima kada je potrebno postići veliku nosivost podgrade. Najčešće su u uporabi sljedeći tipovi čeličnih profila:

- U obliku slova H
- U obliku slova U
- Rešetkasti nosači



1.1.3. Stjenska sidra

Koristi se za kontrolu svih tipova nestabilnosti izuzev u ekstremno slabom i mekanom tlu. Stjenska sidra pojačavaju kvalitetu stijene povećavaju i posmičnu vrstou. Ojačanje stjenske mase sastoji se od četiri osnovna elementa:

- 1) Stjenska masa
- 2) Element sustava ojačanja
- 3) Unutarnja veza elementa ojačanja i stjenske mase – injekcijska smjesa
- 4) Vanjska veza elementa ojačanja i stjenske mase

Ovisno o tome prednapinje li se sidro ili ne tijekom ugradnje razlikuje se:

- aktivna (prednapeta).
- pasivna (neprednapeta – aktiviraju se pomacima stjenske mase).

Prema načinu prijenosa sile sa sidra na stjensku masu i obratno, razlikuju se:

- sidra s mehaničkim usidrenjem,
- injektirana sidra,
- sidra koja nose trenjem (frikcijska).

2. ODREĐIVANJE STABILIZACIJE PODZEMNOG ISKOPA PREMA RMR KLASIFIKACIJI

Određivanje podzemnog sustava provodi se na osnovi RMR-a za pretpostavljene geotehničke jedinice 1 i 2.

Geotehnička jedinica 1:

osnovna stjenska masa III/IV kategorije

RMR = 24 – 49

osnovna stjenska masa V kategorije

RMR = 19

Geotehnička jedinica 2:

osnovna stjenska masa V kategorije

RMR = 19

Preporuka za iskop i trajno podgrađivanje prema geomehaničkoj klasifikaciji:

Geotehnička jedinica 1 Osnovna stjenska masa III kategorije RMR = 41 - 60	
ISKOP	U dvije faze, napredovanje u svodu 1,5-3 m. Podgrađivanje započeti nakon svakog miniranja i dovršiti 10 m od zida.
PODGRADA	Sustavno sidrenje u svodu i zidovima, sidra dužine 4 m na razmaku 1,5-2 m. Mlazni beton debljine 5-10 cm u svodu i 3 cm na zidovima. Zidovi na mreža u svodu.



Geotehnička jedinica 1

Osnovna stijenska masa IV kategorije

RMR = 21 - 40

ISKOP	U dvije faze, napredovanje u svodu 1,0-1,5 m. Postavljanje podgrade istovremeno s iskopom.
PODGRADA	Sustavno sidrenje u svodu i zidovima, sidra dužine 4-5 m na razmaku 1,0-1,5 m. Mlazni beton debljine 10-15 cm u svodu i 10 cm na zidovima. elin na mreža u svodu i zidovima. Prema potrebi laki do srednji elin lukovi na razmaku 1,5 m.

Geotehnička jedinica 1 i 2

Osnovna stijenska masa V kategorije

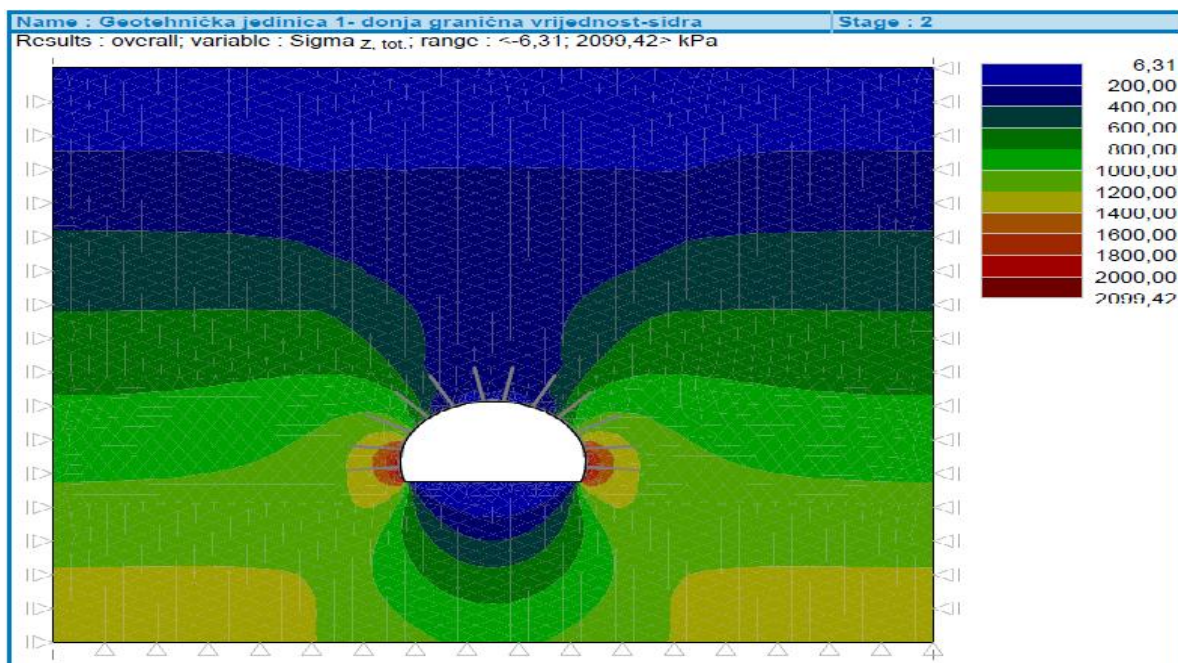
RMR < 21

ISKOP	Razrada profila, napredovanje u svodu 0,5-1,5 m. Postavljanje podgrade istovremeno s iskopom.
PODGRADA	Sustavno sidrenje u svodu i zidovima, sidra dužine 5-6 m na razmaku 1-1,5 m. Sidrenje podnožnog svoda. Mlazni beton debljine 15-20 cm u svodu i 15 cm na zidovima, te 5 cm na elu. Nanošenje mlaznog betona neposredno nakon iskopa. elin na mreža u svodu i zidovima. Srednji do teški elin lukovi na razmaku 0,75 m s elinim platicama.

3. NUMERIČKA ANALIZA NAPREZANJA I DEFORMACIJA OKO PODZEMNOG OTVORA

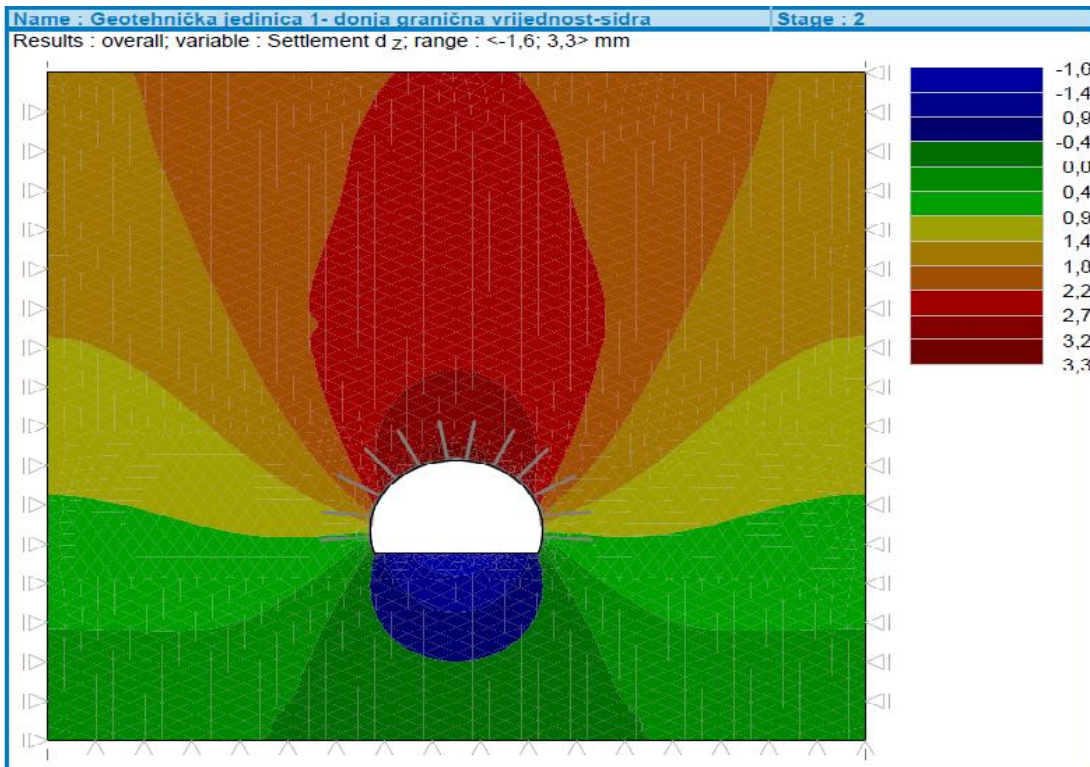
Numeričkim proračunom analiziran je iskop i podgradni sustav tunela za pojedine geotehničke jedinice u programskom paketu "Geo 5 FEM", model elastični modificirani. U nastavku je dan prikaz usvojene podgrade za geotehničku jedinicu 1.

- s usvojenim podgradnim sustavom





- prikaz pomaka



4. ELEMENTI PODGRADNOG SKLOPA PO TIPOVIMA

Podgradni sklop tip III:

-svod:

mlazni beton C 25/30 debljine 10 cm,
 eli na zavarena mreža Q 131, sustavno sidrenje adhezijskim štapnim sidrima,
 rebrasti elik Ø 25 mm, duljine 3.0 m, na razmaku 2 m.

-zidovi:

mlazni beton C 25/30 debljine 5 cm.

Podgradni sklop tip IV:

-svod:

mlazni beton C 25/30 debljine 15 cm,
 eli na zavarena mreža Q 131,
 sustavno sidrenje adhezijskim štapnim sidrima, rebrasti elik Ø 25 mm, duljine 4.0 m,
 na razmaku 1.7 m.

-zidovi:

mlazni beton C 25/30 debljine 10 cm,
 eli na zavarena mreža Q 131,
 sistematsko sidrenje adhezijskim štapnim sidrima, rebrasti elik Ø 25 mm, duljine 4.0
 m, na razmaku 2.0 m.



Podgradni sklop tip V:

-svod:

mlazni beton C 25/30 debljine 20 cm,
dvije rešetkaste mreže Q 221,
sustavno sidrenje adhezijskim štapićima, rebrasti elik Ø 25 mm, duljine 6.0 m,
na razmaku 1.4,
rešetkasti elik nosa i na razmaku 1,0 m.

-zidovi:

mlazni beton C 25/30 debljine 20 cm,
dvije rešetkaste mreže Q 221,
sustavno sidrenje adhezijskim štapićima, rebrasti elik Ø 25 mm, duljine 6.0 m,
na razmaku 1.4 m
rešetkasti elik nosa i na razmaku 1,0 m.

-podnožni svod:

mlazni beton C 25/30 debljine 20 cm,
dvije rešetkaste mreže Q 221.

5. PORTAL TUNELA

Portal je površinski ulaz, odnosno izlaz iz tunela, a njegova funkcija je zaštita prometnice od odrona, klizanja, leda, snijega i vode.

Postoji više vrsta zaštite portalnih pokosa:

- primjenom humusnog materijala i travnate vegetacije,
- primjenom busena,
- travnatim pokrivačem – hidrosjetva,
- primjenom prekrivača od netkanog tekstila s uložnim sjemenom trave,
- sadnjom grmlja i travnate vegetacije,
- primjenom pletera,
- pomoću košara (gabiona),
- oblaganjem kamenom (roliranje),
- primjenom mreža,
- mlaznim betonom,
- uvršćivanjem pojedinih blokova,
- geomrežama.

U nastavku je urađena analiza stabilnosti kosine ulaznog portala geometrijskih karakteristika:

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Pokrivač: } c = 5 \text{ kPa}, \varphi = 30^\circ, \gamma = 30 \text{ kN/m}^3$$

Trošna zona: GSI = 19

$$m_i = 10$$

Model: Shear/Normal

$$\gamma = 30 \text{ kN/m}^3$$

Supstrat: GSI = 85

$$m_i = 10$$

Model: Shear/Normal

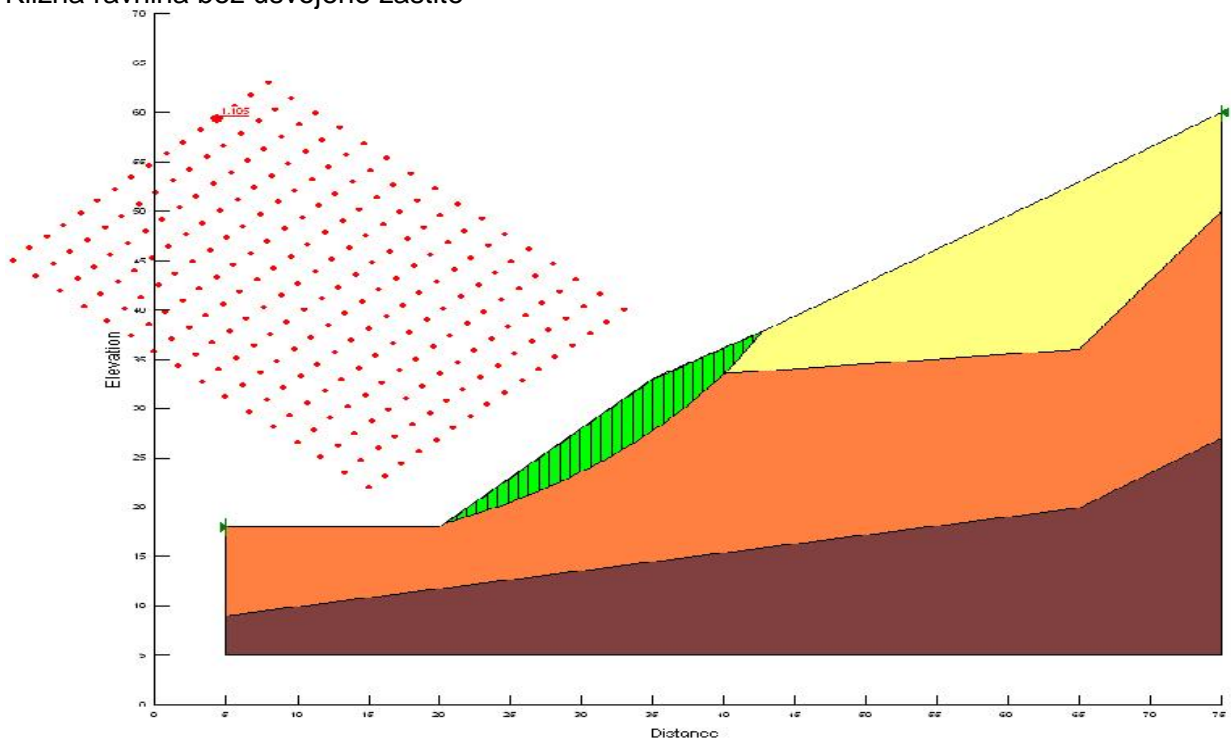


5.1. Zaštita kosine po EC 7

Minimalni koeficijent sigurnosti prema EC 7 iznosi 1,25, pa kosina bez usvojene zaštite nije stabilna, jer je $F_s = 1,105 < 1,25$. Za zaštitu kosine korištena su samobušnjača i IBO sidra.

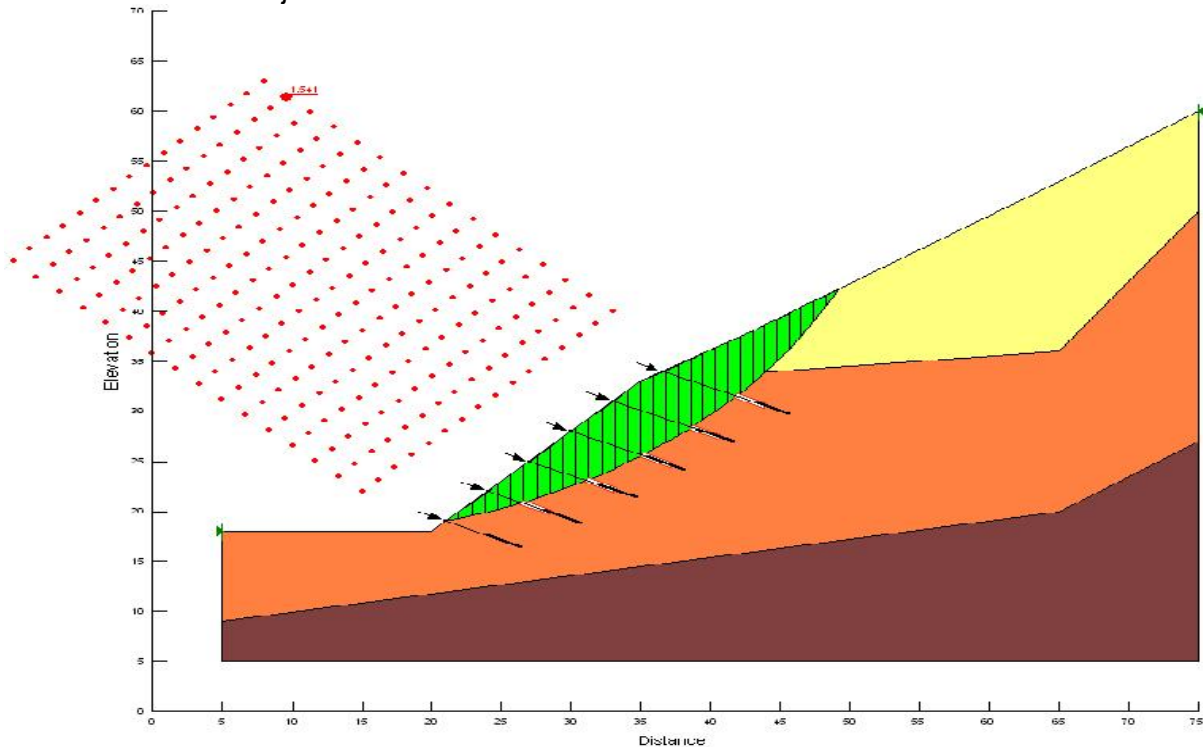
Postavljanjem odgovarajuće zaštite, sidra i mlazni beton, faktor sigurnosti se povećava i iznosi $F_s = 1,541 > 1,25$, pa je kosina stabilna na klizanje.

Klizna ravnina bez usvojene zaštite





Klizna ravnina s usvojenom zaštitom



6. ZAKLJUČAK

Izrada tunela spada u veoma složene inženjerske zadatke. Međutim, razvojem tehnologije, i u smislu tehnika izrade, mehanizacije i programskih paketa za proračun, došlo se do značajnog olakšanja u radu na iskupu tunelskog otvora i izradi primarnih i sekundarnih podgradnih sklopova. U ovom radu se spomenute tehnike podgrađivanja koje se najčešće koriste, ovisno o karakteristikama stijene u kojoj se vrše radovi. Urađen je proračun na konkretnom primjeru, sa zadanim karakteristikama stijene u kojoj se vrši iskop tunela, u programskom paketu Geo 5 FEM. Pored usvojenog podgradnog sklopa urađen je i proračun stabilnosti kosine na ulaznom portalu tunela. Proračun je rađen u programu GeoStudio GEO SLOPE, po zahtjevima Eurokoda 7. Prikazana je kritična klizna ravnina bez usvojene zaštite i vrijednost koeficijenta sigurnosti, te s usvojenom zaštitom. Usvojena su IBO samobuše i sidra, postavljene mreže, te izveden proces torketiranja.



LITERATURA

- [1] Mustapi , I., Gra enje, Gra enje cestovnih tunela s osvrtom na posebnosti pri izgradnji tunela Šubir na autocesti A1, (https://bib.irb.hr/datoteka/618029.Mustapic_Ivan_Gradjenje_cestovnih_tunela.pdf)
- [2] Linaric Z., Rizici u tehnologiji gra enja duga kih tunela u kršu, doktorska disertacija, Gra evinski fakultet Sveu ilišta u Zagrebu, Zagreb, 2000.
- [3] Grading - Portal gra evinarstva i gra evinske industrije, Izgradnja tunela, (<http://grading.ba/izgradnja-tunela.html>)
- [4] Portal za graditeljstvo, nekretnine i ure enje interijera|Gradimo.hr, Tehnologija gra enja hrvatskih tunela, (<http://www.gradimo.hr/clanak/tehnologija-gradnje-hrvatskih-tunela/24194>)
- [5] Vrkljan, I., Inženjerska mehanika stijena, Gra evinski fakultet Sveu ilišta u Rijeci, IGH d.d. Zagreb
- [6] Hudec, M., Koli , D., Hudec, S., TUNELI Iskop i primarna podgrada, HUBITG, Zagreb 2009., (http://hubitg.com/Tuneli_hr.pdf)
- [7] Smjernice za projektovanje, gra enje, održavanje i nadzor na putevima, Knjiga I: Projektovanje, Dio IV: Tuneli, Sarajevo/Banja Luka 2005.
- [8] Kolymbas, D., Tunnelling and Tunell Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling, Springer, 2005. (<http://books.google.ba/books?id=Sm3no2vMmiEC&pg=PA140&lpg=PA140&dq=sn+anchrs&source=bl&ots=PMj0NU6dmn&sig=C7k2ynRm3BelSjeDHTgjjk12zE&hl=hr&sa=X&ei=2Mk7VKmxBK-f7gb-uoDICA&sqi=2&ved=0CE0Q6AEwCQ#v=onepage&q&f=false>)
- [9] Geotehni ko inženjerstvo-Predavanje 12.-Oja anje stjenske mase štapnim sidrima (http://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_12_predavanje_Ojacanje_stjenske_mase_stapnim_sidrima_2014.pdf)
- [10] Geotehni ko inženjerstvo-Predavanje 2.-Stanje napreznaja i deformacija (http://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_2_predavanje_Stanje_napreznaja_i_deformacija.pdf)
- [11] Šaravanja, K., Mari , T., Šaravanja, D., Analiza rezultata ispitavanja tehni ko-gra evinskog kamena s podru ja Hercegovine i jugozapadne Bosne, IGH-Mostar, Elektroni ki zbornik radova Gra evinskog fakulteta, Mostar, 2013. (http://www.gfmo.ba/e-zbornik/e_zbornik_06_04.pdf)
- [12] Geotehni ko inženjerstvo-Predavanje 6.- vrsto a stienske mase (http://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_6.predavanje_Cvrstoca_stjenske_mase.pdf)
- [13] Geotehni ko inženjerstvo-Predavanje 5.-Klasifikacije stjenske mase (http://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_5.predavanje_Klasifikacije_stjenske_mase.pdf)
- [14] Miš evi , P., Uvod u inženjersku mehaniku stijena, Gra evinsko-arhitektonski fakultet u Splitu, IGH d.d. Zagreb, PC Split, 2004.