
DGKS

**DRUŠTVO GRAĐEVINSKIH
KONSTRUKTERA SRBIJE**

14. KONGRES

NOVI SAD
24-26. SEPTEMBAR

2014.

14

K

O

N

G

R

E

S

2014

U SARADNJI SA:



**GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

**MINISTARSTVOM PROSVETE,
NAUKE I TEHNOLOŠKOG RAZVOJA
REPUBLIKE SRBIJE**



**INŽENJERSKOM KOMOROM
SRBIJE**

**ZBORNİK
RADOVA**



**CHINA ROAD AND BRIDGE
CORPORATION SERBIA BRANCH**

Izdavač: **Društvo građevinskih konstruktora Srbije**
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/1

Urednici: prof. dr **Miloš Lazović**
prof. dr **Boško Stevanović**

Tehnička
priprema: **Saška - Stoja Todorović**

Priprema za
štampanje: **Nebojša Ćosić**

Štampanje: **DC Grafički centar**

Tiraž: **150 primeraka**

Beograd, septembar 2014.

ORGANIZACIONI ODBOR

PREDSEDNIŠTVO DGKS

Prof. dr Miloš LAZOVIĆ, dipl.inž.grad., predsednik
Aleksandar BOJOVIĆ, dipl.inž.grad., potpredsednik
Prof. dr Boško STEVANOVIĆ, dipl.inž.grad., sekretar
Prof. dr Đorđe VUKSANOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Mihajlo ĐURĐEVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Dragoslav STOJIC, dipl.inž.grad.
Prof. dr Đorđe LAĐINOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Snežana MARINKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Aleksandar RISTOVSKI, dipl.inž.grad.
Doc. dr Bratislav STIPANIĆ, dipl.inž.grad.
Dr Zoran FLORIĆ, dipl.inž.grad.
Mr Slobodan GRKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Branko KNEŽEVIĆ, dipl.inž.grad.
Gojko GRBIĆ, dipl.inž.grad.
Goran VUKOBRATOVIĆ, dipl.inž.grad.
Đorđe PAVKOV, dipl.inž.grad.
Svetislav SIMOVIĆ, dipl.inž.grad.

ČLANOVI ORGANIZACIONOG ODBORA IZVAN PREDSEDNIŠTVA

Prof. dr Zlatko MARKOVIĆ, dipl.inž. grad.
Miroslav MIHAJLOVIĆ, dipl.inž.grad.
Aleksandar TRAJKOVIĆ, dipl.inž.grad.

NAUČNO-STRUČNI ODBOR

1. Prof. dr Radenko Pejović, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
2. Prof. dr Duško Lučić, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
3. Prof. dr Goran Markovski, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
4. Prof. dr Meri Cvetkovska, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
5. Prof. dr Tatjana Isaković, Univerzitet u Ljubljani Fakultet građevinarstva i geodezije, Ljubljana, Slovenija
6. Prof. dr Viktor Markelj, Ponting d.o.o., Maribor, Slovenija
7. Prof. dr Zlatko Šavor, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, Katedra za mostove, Zagreb, Hrvatska
8. Prof. dr Radu Bancila, University "POLYTEHNICA", Temišvar, Rumunija
9. Mr Predrag Popović, Čikago, SAD
10. Prof. dr Kostadin Topurov, Sofija, Bugarska
11. Prof. dr Dušan Najdanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
12. Prof. dr Miloš Lazović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
13. Prof. dr Đorđe Vuksanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
14. Prof. dr Dejan Bajić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
15. Prof. dr Đorđe Lađinović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
16. Prof. dr Dragoslav Stojčić, Arhitektonsko-građevinski fakultet, Niš, Srbija
17. Doc. dr Bratislav Stipanić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija

14. KONGRES JE ORGANIZOVAN U SARADNJI SA:

GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM UNIVERZITETA U
BEOGRADU

MINISTARSTVOM PROSVETE, NAUKE I TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA REPUBLIKE SRBIJE

INŽENJERSKOM KOMOROM SRBIJE, Beograd

DONATORI SIMPOZIJUMA:

DIJAMANTSKI

CHINA ROAD & BRIDGE CORPORATION, SERBIA BRANCH,
Belgrade

SREBRNI

SIKA d.o.o., Novi Sad

BRONZANI

"POTISJE KANJIŽA" AD, Kanjiža

Snežana Maraš-Dragojević¹

NUMERIČKA ANALIZA IZGRADNJE PLITKOG TUNELA U BEOGRADSKIM GLINOVITO-LAPOROVITIM SREDINAMA

Rezime:

Ubrzani urbani razvoj, poslednjih decenija, doveo je do sve većih zahteva za izgradnjom i proširenjem mreže podzemnog transporta u velikim prenaseljenim gradovima. Važan zadatak pri projektovanju tunela u urbanim područjima je da se adekvatno predvide sleganja površine terena. U radu je prikazan postupak 3D i 2D modeliranja izgradnje tunela primenom metode konačnih elemenata. Prikazani su neki rezultati proračuna sleganja površine terena usled izgradnje plitkog tunela u beogradskim glinovito-laporovitim sredinama. Ovaj problem je aktuelan s obzirom da se planira početak izgradnje metroa u Beogradu u skoroj budućnosti.

Ključne reči: tunel, tlo, metoda konačnih elemenata, 3D modeliranje, sleganje

NUMERICAL ANALYSIS OF SHALLOW TUNNELING IN BELGRADE MARLY-CLAYEY DEPOSITS

Summary:

The rapid urban development, in recent decades, has led to increasing demands for construction and expansion of the underground transport network in large overpopulated cities. An important task in the design of tunnels in urban areas is to adequately predict the ground surface subsidence. This paper presents the methods for 3D and 2D finite element modelling of tunnel construction. Also, the paper presents some results of analysis of the ground surface subsidence due to tunnelling in Belgrade marly clay. This is a current problem given that the start of the Belgrade metro construction is planned in the near future.

Key words: tunnel, soil, finite element analysis, 3D modeling, subsidence

¹ Dr, docent, dipl.inž.grad., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

1 UVOD

Veliki deo radova u oblasti tunelogradnje, poslednjih decenija, vezan je za izgradnju i proširenje mreže podzemnog transporta u velikim prenaseljenim gradovima. Može se očekivati da će, u bliskoj budućnosti, s obzirom na neophodnost smanjenja saobraćajnih gužvi i zagađenosti vazduha, tunelski projekti ove vrste imati sve veći značaj. U gradovima, tuneli se nalaze na maloj dubini ispod gusto naseljenih zona, u tlu ili mekoj steni, i njihova izgradnja može imati veoma nepovoljne efekte na postojeće objekte. Zbog toga je jedan od osnovnih zadataka pri projektovanju tunela u urbanim područjima da se predvide i kontrolišu sleganja površine terena. Međutim, taj zadatak nije nimalo jednostavan. Da bi se postigla adekvatna naponsko-deformacijska analiza tunela i procenila sleganja površine tunela, u metodama proračuna bi trebalo uzeti u obzir brojne faktore kao što su: 3D efekat izgradnje tunela, metod i detalje izvođenja, dubinu i prečnik tunela, inicijalno stanje napona kao i naponsko-deformacijsko ponašanje tla oko tunela. S obzirom na svu kompleksnost ovog problema, istraživanjima u ovoj oblasti bavili su se, a i danas se bave, naučnici širom sveta.

Pri projektovanju tunela postoje tri vrste pristupa: empirijske metode, analitička rešenja i numeričke metode. Empirijske i analitičke metode predstavljaju relativno jednostavne i korisne postupke proračuna, međutim, mogućnosti njihove primene su ograničene. S obzirom da je praktično nemoguće dobiti zatvorena matematička rešenja za izuzetno kompleksne probleme interakcije tunelske konstrukcije i okolne sredine, neophodna je primena savremenih numeričkih metoda.

Izgradnja tunela je 3D proces pa je za adekvatnu analizu naponsko-deformacijskih stanja u tunelskoj konstrukciji i okolnoj sredini, kao i sleganja površine terena, neophodno primeniti 3D numeričko modeliranje. Razvoj metode konačnih elemenata (MKE) omogućio je efikasnu trodimenzionalnu analizu, međutim, u praktičnoj primeni javljaju se dodatne teškoće, koje se pre svega odnose na znatno povećanje obima računskog posla, a time vremena i koštanja proračuna. S obzirom da je 3D MKE modeliranje izgradnje tunela izuzetno zahtevno, primena numeričkih metoda u inženjerskoj praksi još uvek je, u najvećoj meri, ograničena na 2D analize. Kada se proces izgradnje tunela razmatra primenom 2D modela, moraju se uvesti određene pretpostavke kojima se uzimaju u obzir 3D efekti izgradnje tunela, odnosno naponsko-deformacijske promene koje se dešavaju na radnom čelu tunela.

U ovom radu su prikazani postupci 3D i 2D modeliranja izgradnje tunela primenom metode konačnih elemenata. Dati su neki rezultati analize sleganja površine terena usled izgradnje tunela otvorenom čelom u glinovito-laporovitim sredinama područja Beograda. Ovaj problem je aktuelan s obzirom da se planira početak izgradnje metroa u Beogradu u skoroj budućnosti.

2 NUMERIČKO MODELIRANJE IZGRADNJE TUNELA

Pri projektovanju tunela, numeričko modeliranje treba da obezbedi da se što realnije reprezentuju procesi koji se odigravaju u tunelskoj konstrukciji i okolnoj sredini, kao složenom interaktivnom sistemu, u toku izgradnje tunela. U skladu sa tim, od izuzetnog je značaja da se sprovede adekvatna proračunska simulacija procesa izgradnje tunela, koji se po pravilu sastoji od sekvenci iskopa i podgrađivanja. Metoda konačnih elemenata je veoma pogodan i široko priznat numerički postupak za analize u oblasti geotehničkih radova zbog svoje opštosti i sposobnosti da obuhvati heterogenost sredine, nelinearno ponašanje tla, složenu geometriju problema, interakciju konstrukcije i tla, kao i metod izgradnje.

U toku građenja tunela dolazi do 3D stanja napona i deformacija na radnom čelu tunela. Pomeranja tla koja su se desila pre instaliranja obloge su od ključnog značaja. Zbog toga je neophodno, u analizama naponsko deformacijskih stanja u tunelskoj konstrukciji i okolnoj sredini, uzeti u obzir ova pomeranje, odnosno delimičnu relaksaciju napona na čelu tunela. Da bi se to postiglo neophodna je trodimenzionalna analiza kojom se simulira napredovanje radova i naponske promene i deformacije u okolini privremenog radnog čela.

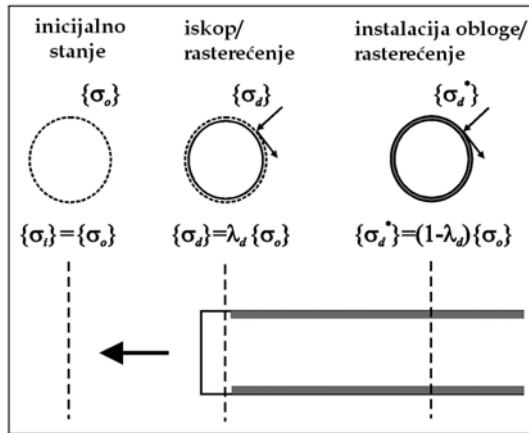
2.1 3D MODELIRANJE PRIMENOM MKE

Proces izgradnje tunela se obično simulira primenom tzv. *step-by-step* (korak-po-korak) postupka [1-3]. Početni korak je analiza inicijalnog ili *in-situ* stanja napona u tlu nakon čega sledi simulacija, korak-po-korak, sekvenci iskopa i podgrađivanja. Iskop se simulira tako što se na čelu tunela, na dužini jedne sekvence napredovanja, uklanjaju elementi unutar konture iskopa tunela. U sledećem koraku proračuna na toj deonici se aktiviraju elementi obloge i vrši iskop sledeće deonice. Proračunska simulacija napredovanja izgradnje tunela se nastavlja sve dok se ne postigne dovoljna dužina tunela da se iza čela tunela postigne stacionarno stanje (*steady-state*). Poslednjih godina, zahvaljujući napretku kompjuterske tehnologije, u literaturi se može naći sve veći broj radova u kojima je sprovedeno 3D modeliranje postupka izgradnje tunela, pri čemu su autori uglavnom primenjivali *step-by-step* postupak za simulaciju građenja tunela otvorenim čelom, klasičnim metodama (Nova austrijska tunelska metoda - NATM), kao i štitom sa otvorenim čelom [4-7]. Kada se vrši simulacija građenja tunela štitom sa zatvorenim čelom modeliranje može da obuhvati i detalje postupka izgradnje kao što su npr. potporni pritisak na čelu tunela, pritisak injektiranja i dr.

2.1 2D MODELIRANJE PRIMENOM MKE

S obzirom da je 3D numeričko modeliranje izgradnje tunela izuzetno zahtevno sa stanovišta kapaciteta i vremena rada računara, primena numeričkih metoda u inženjerskoj praksi je još uvek, u velikoj meri, ograničena na 2D modele. Kada se proces izgradnje tunela razmatra primenom 2D (ravno stanje deformacija) modela, moraju se uvesti određene pretpostavke kojima se uzima u obzir delimična relaksacija napona na čelu tunela, odnosno deformacije koje su se desile na čelu tunela pre formiranja obloge. U literaturi je do sada predloženo više metoda za simulaciju izgradnje tunela primenom 2D modela: Metoda redukcije napona (*Convergence – confinement method*) ili λ - metod [8], Metoda progresivnog omekšavanja (*Progressive softening method*) [9], Metoda kontrole parametra V_L - *volume loss* [10] i *Gap* metoda [11, 12].

Metoda koja se najviše koristi za 2D modeliranje izgradnje tunela je metoda redukcije napona (λ -metod) u kojoj se delimična relaksacija napona, koja se dešava na čelu tunela, uvodi u 2D model preko parametra λ koji predstavlja procenat rasterećenja inicijalnih napona pre instaliranja obloge (Slika 1). Proračun se sprovodi u tri koraka. Prvi korak predstavlja proračun inicijalnog stanja napona u tlu. U drugom koraku proračuna uklanjaju se elementi unutar konture iskopa i dopušta pomeranje konture iskopa, odnosno delimična relaksacija inicijalnih napona (u vrednosti $\lambda \cdot \sigma_0$, gde je σ_0 inicijalni napon u tlu). U trećem koraku, na tako deformisanu konturu iskopa, instaliraju se elementi obloge, i nanosi celokupan inicijalni napon, pa obloga prima opterećenje koje je jednako $\sigma^* = (1-\lambda)\sigma_0$. Faktor rasterećenja λ zavisi od geometrije tunela, inicijalnih napona, karakteristika tla i dužine nepodgrađene deonice na čelu tunela. U ovoj metodi vrednost parametra λ se mora usvojiti. Pokazalo se da metoda daje dobre rezultate, kada se usvoji adekvatna vrednost ovog parametra.



Slika 1 - Convergence – confinement ili λ - method (prema Pots&Zdravkovic[13])

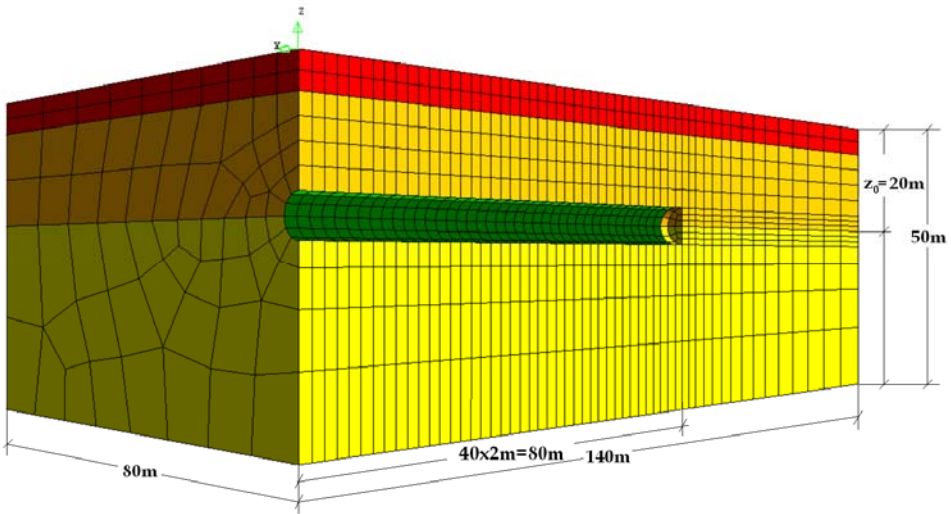
3 MKE ANALIZA IZGRADNJE TUNELA U BEOGRADSKIM GLINOVITO-LAPOROVITIM SREDINAMA

U ovom delu rada prikazana je numerička simulacija izgradnje tunela sa otvorenim čelom, kružnog preseka, u glinovito-laporovitim sredinama područja Beograda. Primenjeno je 3D MKE modeliranje izgradnje tunela primenom *step-by-step* postupka i 2D MKE modeliranje primenom λ -metode, čiji su principi izloženi u prethodnom delu rada. Proračuni su urađeni primenom programskog paketa DIANA Finite Element Analysis (TNO DIANA BV). Ovaj program omogućava trodimenzionalnu nelinearnu analizu, kao i modeliranje fazne izgradnje.

Na slici 2 prikazan je 3D model konačnih elemenata. Usvojeni profil terena karakterističan je za uže gradsko područje Beograda i sastoji se od sloja lesa debljine 5m, ispod koga je sloj degradirane, žuto-mrke laporovite gline debljine 15m koji leži na sloju sive neizmenjene laporovite gline i lapora. Analiziran je tunel kružnog preseka prečnika 6m sa betonskom oblogom debljine 0.35m (prema Studiji tehničko ekonomske podobnosti brzog javnog gradskog saobraćaja u Beogradu, faza 3: idejna inženjerska rešenja prve etape metroa, 1981). Osa tunela je na dubini $z_0=20$ m.

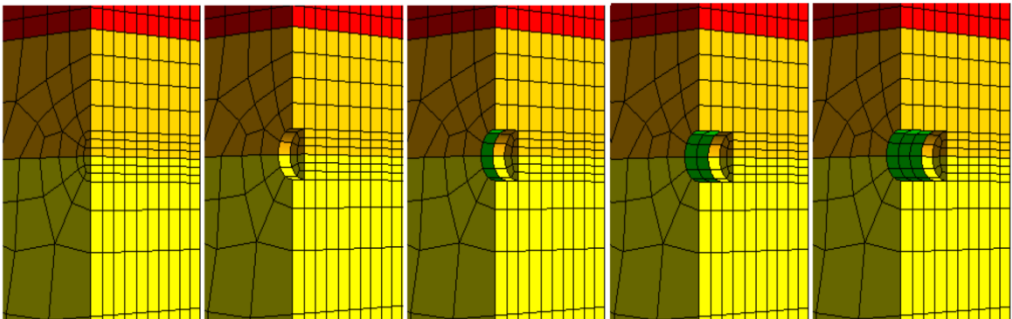
Usvojeni proračunski presek ima dimenzije 80x50x140m i sastoji se od ukupno 23967 čvorova i 5294 elementa. S obzirom da je vršena nelinearna analiza tla, proračuni su sprovedeni primenom elemenata "višeg reda" koji osim čvorova u uglovima imaju i čvorove na sredinama stranica. Tlo je modelirano elementom sa dvadeset čvorova, izoparametarskim brick elementom, a obloga je modelirana primenom četvorougaoanog izoparametarskog zakrivljenog shell elementa sa 8 čvorova [14]. Prilikom formiranja mreže konačnih elemenata uzeta je u obzir simetrija problema u odnosu na osu z. Granični uslovi obezbeđuju da su na bočnim granicama proračunske oblasti sprečena pomeranja u pravcu upravnom na odgovarajuću granicu, a na donjoj granici su sprečena pomeranja u svim pravcima. U čvorovima obloge u ravni simetrije usvojen je dodatni uslov da je sprečena rotacija oko podužne ose. Izgradnja tunela je simulirana u negativnom y-pravcu na dužini 80m, počev od

$y=0$, u 40 koraka sa dužinom iskopa (nepodgrađenom deonicom na čelu) od $d=2\text{m}$. Razmatran je slučaj iskopa sa vertikalnim radnim čelom, tj. pretpostavlja se da se iskop sprovodi u punom profilu.



Slika 2 Proračunski 3D model konačnih elemenata (40. korak proračuna)

Proračunski model konačnih elemenata ima takvu strukturu koja omogućava analizu u svim fazama izgradnje tunela. Na slici 3 prikazane su početne sekvence simulacije procesa izgradnje tunela.



Slika 3 Sekvence 3D simulacije procesa izgradnje tunela

U 2D analizi usvojena konfiguracija mreže je ista kao konfiguracija mreže 3D modela, u ravni upravnoj na osu tunela. Tlo je modelirano četvorougaoim izoparametarskim ravanskim elementom sa 8 čvorova, a obloga primenom zakrivljenog infinite shell elementa sa 3 čvora [14].

Analize u ovom radu su izvršene uz pretpostavku dreniranih uslova i elasto-plastičnog ponašanja tla sa Mohr-Coulomb-ovim uslovom loma. Razmatrana je situacija bez podzemne vode. Usvojeni parametri MC modela su dati u Tabeli 1. Dilatancija je zanemarena tako što je usvojeno da je ugao dilatancije svih slojeva nula. Inicijalni naponi u tlu su određeni primenom parametara ρ i K_0 datih u Tabeli 1.

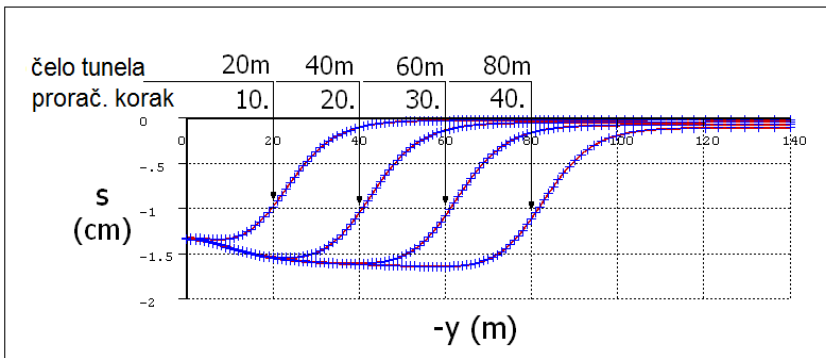
Tabela 1 - Usvojeni parametri tla

Sloj	ρ (g/cm ³)	E (MPa)	ν	c' (kPa)	ϕ' (°)	K_0
1. Les	1.85	10	0.4	18	23	0.65
2. Degradirane laporovite gline	2.0	15	0.3	20	20	0.85
3. Sive neizmenjene laporovite gline i lapori	2.0	60	0.3	60	25	0.58

Betonska obloga je debljine 0.35m i modelirana je uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja betona sa parametrima $\rho=2.5$ g/cm³, $E=15$ GPa i $\nu=0.15$.

3.1 REZULTATI PRORAČUNA SLEGANJA

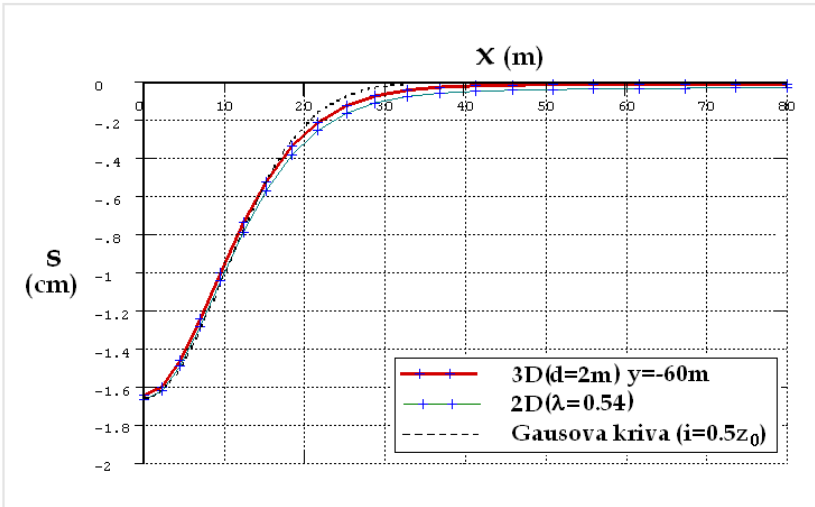
Na slici 4 prikazani su podužni profili sleganja površine terena (vertikalni presek kroz osu tunela) dobijeni u pojedinim koracima 3D proračuna. Kao što se vidi na slici, stacionarno stanje pomeranja (horizontalni deo podužnog profila) tzv. *steady-state* je postignuto na oko 20m iza čela tunela, pri simulaciji napredovanja tunela na dužini 80m (40 koraka po 2m), pri čemu se na početnom delu profila javljaju poremećaji koji su vezani za granične uslove na levoj granici modela [5].



Slika 4 Razvoj podužnog profila sleganja sa napredovanjem izgradnje tunela

Na slici 5 dat je uporedni prikaz poprečnog profila sleganja dobijenog 3D proračunom za presek $y=-60$ m - *steady-state* pomjeranja i profila dobijenog 2D proračunom primenom metode redukcije napona sa $\lambda=0.54$. Faktor redukcije napona λ je određen prema stacionarnim (*steady-state*) sleganjima koja su dobijena 3D proračunom.

Kao što se vidi sa slike, kada se usvoji odgovarajući koeficijent redukcije napona, 3D i 2D analize daju slične poprečne profile sleganja, što je u skladu sa zaključcima i drugih autora [5,6].



Slika 5 - Poprečni profili sleganja dobijeni 3D i 2D MKE analizom i empirijska Gausova kriva

3.1.1 Poređenje sa sleganjima određenim primenom empirijskih metoda

U radu je izvršeno poređenje poprečnih profila sleganja dobijenih primenom 3D i 2D MKE analiza sa empirijskom Gausovom krivom sleganja. Naime, Peck [15] je, na osnovu podataka merenja sleganja površine terena na većem broju tunela, ustanovio da se poprečni profil sleganja može, prilično dobro, predstaviti Gausovom funkcijom normalne raspodele. Iako primena ove krive nema teorijsko opravdanje, ona je široko prihvaćena u praksi i predstavlja poznatu i široko primenjivanu empirijsku metodu za procenu sleganja površine terena.

Vertikalna sleganja u poprečnom pravcu data su sledećim izrazom:

$$S_v(x) = S_{v\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

gde je:

- $S_{v\max}$ maksimalno sleganje koje se javlja iznad ose tunela,
- i parametar koji definiše širinu poprečnog profila sleganja i predstavlja horizontalno rastojanje od ose tunela do prevojne tačke profila

Sleganje tla usled izgradnje tunela se obično karakteriše parametrom koji predstavlja faktor gubitka zapremine tla V_L - *volume loss* ili *ground loss*. To je odnos zapremine tla koja se deformiše u tunelski otvor i teorijske zapremine tunelskog otvora. Kod tunela u glinovitom tlu (uz pretpostavku da nema promene zapremine tla) može se smatrati da je gubitak zapremine tla

na konturi iskopa jednak zapremini profila sleganja površine terena V_s , pa je faktor *volume loss* V_L (koji se izražava u procentima) za tunel prečnika D jednak:

$$V_L = \frac{V_s}{\frac{\pi D^2}{4}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{v\max}}{\frac{\pi D^2}{4}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Maksimalno sleganje površine terena preko parametra V_L dato je izrazom:

$$S_{v\max} = 0.313 \cdot V_L \cdot \frac{D^2}{i} \quad (3)$$

Parametar V_L zavisi od metode izgradnje tunela i vrste tla. U homogenom tlu, zavisno od opreme i iskustva ekipe koja radi na iskopu, realne vrednosti V_L su od 0.5% do 2%. Prema Mair & Taylor [16], Mair [17] tipične vrednosti V_L pri građenju tunela sa otvorenim čelom u mekom tlu su generalno u opsegu 1-3%, dok se znatno niže vrednosti (0.25 do 0.5%) dobijaju pri građenju tunela sa zatvorenim čelom, primenom savremenih mašina, kao što je EPB štit. Da bi se procenio parametar V_L od velikog značaja je iskustvo vezano za određenu tunelsku tehniku i geotehničke uslove, odnosno podaci osmatranja sleganja na izvedenim objektima. Zbog izuzetnog značaja ovog parametra za sleganja površine terena usled izgradnje tunela, bilo bi poželjno da se on specifikira u okviru ugovornih dokumenata za izgradnju tunela.

Širina poprečnog profila sleganja je definisana parametrom i . Za većinu praktičnih primena usvaja se da je $i=K \cdot z_0$ pri čemu se može usvojiti da je za glinovito tlo $K=0.5$. Mair & Taylor [16] su na osnovu velikog broja podataka sa tunela građenih u glinovitom i peskovitom tlu dobili vrednosti K od 0.4 do 0.6 sa srednjom vrednošću $K=0.5$ za glinovito tlo i vrednosti 0.25 do 0.45 sa srednjom vrednošću 0.35 za peskovito tlo.

Kao što se vidi sa slike 5 dobijeno je dobro sleganje proračunatih profila sleganja sa Gausovom krivom.

4 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Za adekvatnu analizu naponsko deformacijskih stanja u stenskoj masi i tunelskoj konstrukciji, od suštinskog značaja je razmatranje delimične relaksacije stenske mase, odnosno pomeranja površine iskopa na radnom čelu tunela, koje su se desile pre postavljanja obloge (veće vrednosti pomeranja dovode do manjih napona u oblozi). Prema tome, neophodna je pre svega trodimenzionalna analiza kojom se simulira napredovanje radova i naponske promene i deformacije u okolini privremenog radnog čela. S obzirom da je 3D numeričko modeliranje izgradnje tunela izuzetno zahtevno sa stanovišta kapaciteta i vremena rada računara, primena numeričkih metoda u inženjerskoj praksi je još uvek, u najvećoj meri, ograničena na 2D modele. Kada se proces izgradnje tunela razmatra primenom 2D modela, moraju se uvesti određene pretpostavke kojima se uzimaju u obzir 3D efekti izgradnje tunela. Metoda koja se najviše koristi za 2D modeliranje izgradnje tunela je metoda redukcije napona (λ -metod) u kojoj se delimična relaksacija napona, koja se dešava na čelu tunela, uvodi u 2D model preko parametra λ koji predstavlja procenat rasterećenja inicijalnih napona pre instaliranja obloge.

U ovom radu je sprovedeno MKE modeliranja izgradnje tunela otvorenim čelom u glinovito-laporovitim sredinama područja Beograda primenom 3D *step-by-step* postupka i 2D

metode redukcije napona. 3D simulacija izgradnje tunela je sprovedena na dužini 80m, u 40 proračunskih koraka sa napredovanjem (nepodgrađenom deonicom) $d=2m$. Dužina na kojoj se simulira izgradnja tunela mora biti dovoljna da se, na određenom rastojanju iza čela tunela, formira stacionarno stanje sleganja (*steady-state*) odnosno horizontalni deo podužnog profila sleganja. U ovom radu stacionarno stanje je postignuto na oko 20m iza čela tunela.

U 3D analizama, procenat rasterećenja napona u tlu na čelu tunela, pre postavljanja obloge, dobija se direktno i zavisi od geometrije, karakteristika sredine, kao i dužine nepodgrađene deonice na čelu tunela, dok se u 2D analizama on mora usvojiti. U ovom radu je izvršena kalibracija parametra λ na osnovu poređenja vrednosti sleganja dobijenih 2D analizama sa *steady-state* pomeranjima dobijenim 3D proračunom. Za razmatrani tunel dobijena je vrednost faktora rasterećenja napona $\lambda=0.54$ što je u okviru uobičajenog opsega vrednosti 0.5-0.7. Veće vrednosti faktora λ odgovaraju slabijem tlu jer su u takvom tlu deformacije koje se dešavaju na čelu tunela pre instaliranja obloge veće. Na osnovu rezultata proračuna dobijenih u ovom radu može se zaključiti da 3D i 2D analize daju slične poprečne profile sleganja kada se usvoji odgovarajući koeficijent redukcije napona, što je u skladu sa zaključcima drugih autora [5,6]. Takođe, dobijeno je dobro sleganje dobijenih poprečnih profila sleganja sa empirijskom Gausovom krivom.

LITERATURA

- [1] Katzenbach, R.; Breth, H.: *Nonlinear 3-D Analysis for NATM in Frankfurt Clay*. Proc. 10th ICSMFE, Stockholm, 315-318, 1981.
- [2] Wittke, W.: *Rock Mechanics: Theory and Applications with Case Histories*. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [3] Swoboda, G.; Mertz, W.; Schmid, A.: *Three-dimensional numerical models to simulate tunnel excavation*. Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Models in Geomechanics, Niagara Falls, 536-548, 1989.
- [4] Lee, G. T. K.; Ng, C. W. W.: *Three-dimensional analysis of ground settlements due to tunnelling: Role of K_0 and stiffness anisotropy*. Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Lyon, 617- 622, 2002.
- [5] Vermeer, P. A.; Bonnier, P. G.; Möller, S. C.: *On a smart use of 3D-FEM in tunnelling*. Proc. of the 8th Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics – NUMOG VIII, Rome, Balkema, Rotterdam, 361–366, 2002.
- [6] Franzius, J. N.; Potts, D. M.; Burland, J. B.: *The influence of soil anisotropy and K_0 on ground surface movements resulting from tunnel excavation*. Géotechnique, 55(3): 189-199, 2005.
- [7] Mašin, D.: *3D Modeling of an NATM Tunnel in High K_0 Clay Using Two Different Constitutive Models*. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering © ASCE, September 2009, 1325-1335, 2009.
- [8] Panet, M.; Guenot, A.: *Analysis of convergence behind the face of a tunnel*. Tunnelling 82. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 197-204, 1982.
- [9] Swoboda, G.: *Finite element analysis of the New Austrian Tunnelling Method (NATM)*. In Proc. 3rd Int. Conf. Num. Meth. Geomech, Aachen, Vol. 2: 581-586, 1979.

- [10] Addenbrooke, T. I.; Potts, D. M.; Puzrin, A. M.: *The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction*. Géotechnique, 47(3): 693-712, 1997.
- [11] Rowe, R. K.; Lo, K. Y.; Kack, G. J.: *A method of estimating surface settlement above tunnel constructed in soft ground*. Canadian Geotechnical Journal, 20: 11-22, 1983.
- [12] Lee, K. M.; Rowe, R. K.: *An analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay tunnel*. Canadian Geotechnical Journal, 28: 25-41, 1991
- [13] Pots D. M. and Zdravković L., 2001. *Finite element analysis in geotechnical engineering, Application*, Thomas Telford
- [14] DIANA *Finite Element Analysis, User's Manual release 9.4.3*, TNO DIANA BV, Delft, 2010.
- [15] Peck, R. B.: *Deep excavations and tunnelling in soft ground*. In Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, State of the art volume: 225-290, 1969.
- [16] Mair, R. J.; Taylor, R. N.: *Bored tunneling in urban environment*. Proc. 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Balkema, Rotterdam, 2353-2385, 1997.
- [17] Mair, R. J.: *Tunnelling and geotechnics: new horizons*. Géotechnique 58(9): 695-736, 2008.