

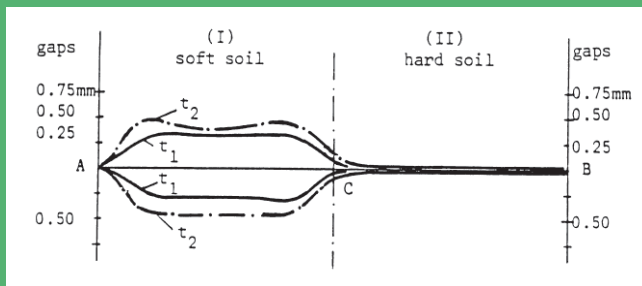


ZBORNIK RADOVA
MEĐUNARODNO NAUČNO-STRUČNOG SAVETOVANJA
PROCEEDINGS
INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

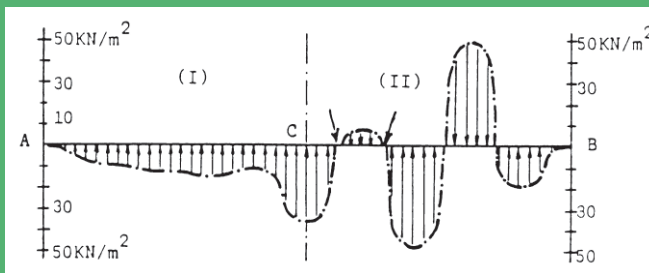
ZEMLJOTRESNO INŽENJERSTVO I
GEOTEHNIČKI ASPEKTI GRAĐEVINARSTVA

*EARTHQUAKE ENGINEERING AND
GEOTECHNICAL ASPECTS OF CIVIL ENGINEERING*

Editor: Prof. emeritus dr Radomir Folić



Gaps mean values along the pipeline at times $t_1 = 0.6$ sec and $t_2 = 2.1$ sec



Soil-pressure distribution mean values along the pipeline at the time $t_1 = 0.6$ sec

Vrnjačka Banja, 03. - 05. novembar 2021.

PRIMENA NUMERIČKIH METODA I EVROKODA 7 U PROJEKTOVANJU TUNELA

Snežana Maraš-Dragojević*

* *Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73,
snezamd@grf.bg.ac.rs*

REZIME

S obzirom da trenutno ne postoje evropski standardi za projektovanje tunela, u praksi se sve više koristi Evrokod 7, naročito za projektovanje plitkih tunela u tlu. Pri projektovanju tunela, da bi se adekvatno predvidelo ponašanja složenog interaktivnog sistema obloga-tlo, neophodna je primena naprednih numeričkih metoda. Numeričke metode se u praksi primarno koriste za analizu pomeranja usled izgradnje tunela, odnosno graničnih stanja upotrebljivosti. Međutim, rezultati numeričkih analiza se sve više koriste i za provere graničnih stanja loma u konstrukciji i terenu kod projektovanja tunela. U radu je dat pregled postupaka primene projektnih pristupa definisanih u Evrokodu 7 u projektovanju tunela primenom naprednih numeričkih metoda.

KLJUČNE REČI: projektovanje tunela, numerička analiza, Evrokod 7

ON THE USE OF NUMERICAL METHODS AND EUROCODE 7 IN DESIGN OF TUNNELS

ABSTRACT

Given that there are currently no European standards for tunnel design, Eurocode 7 is increasingly used in practice, especially for the design of shallow tunnels in soft ground. When designing tunnels, in order to adequately predict the behaviour of a complex interactive lining-ground system, it is necessary to apply advanced numerical methods. Numerical methods are used in practice primarily for the analysis of displacements induced by tunnelling, i.e. serviceability limit states. However, the results of numerical analyses are increasingly used for ultimate limit state design of tunnels. The paper gives an overview of the procedures for applying the design approaches defined in Eurocode 7 in tunnel design using advanced numerical methods.

KEY WORDS: tunnel design, numerical analysis, Eurocode 7

UVOD

Jedan od najkompleksnijih zadataka u oblasti geotehnike je projektovanje i izgradnja tunela, pogotovo kada se tuneli grade u složenim geotehničkim uslovima, u sredinama koje čine tlo ili meka stena. U gradovima, tuneli se nalaze na maloj dubini ispod gusto naseljenih zona i njihova izgradnja dovodi do sleganja koja mogu imati veoma nepovoljne efekte na postojeće objekte. Pri projektovanju tunela, da bi se adekvatno predvidelo ponašanja složenog interaktivnog sistema obloga-tlo/stena, neophodna je primena naprednih numeričkih metoda. Metoda konačnih elemenata (MKE) 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. Za adekvatnu analizu naponsko-deformacijskih stanja u tunelskoj konstrukciji i okolnoj sredini neophodna je primena 3D numeričkog modeliranja. Međutim, s obzirom da je 3D modeliranje izgradnje tunela proračunski veoma zahtevno, u rutinskoj geotehničkoj praksi još uvek se uobičajeno koriste 2D modeli. 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.

Opšte je prihvaćeno da se napredne numeričke metode, kao što je metoda konačnih elemenata, primenjuju za analize pomeranja usled izgradnje tunela. Osim toga, sve više se rezultati numeričkih analiza koriste kao osnova za projektovanje tunela, pri čemu se mora obezbediti usklađenost sa relevantnim standardima. Trenutno, na nivou Evrope ne postoje usaglašeni i usvojeni standardi za projektovanje tunela. Projektovanje tunela se vrši na osnovu nacionalnih smernica kao i delova postojećih evrokodova (Evropski standardi za projektovanje konstrukcija). Evrokod 7: Geotehničko projektovanje (EN 1997) podrazumeva projektovanje konstrukcija prema teoriji graničnih stanja, pri čemu se zahteva provera graničnih stanja nosivosti (*ultimate limit states - ULS*) i graničnih stanja upotrebljivosti (*serviceability limit states - SLS*). Kod projektovanja tunela od značaja je granično stanje loma ili prekomerne deformacije nekog elementa konstrukcije ili na delu terena (STR i GEO). Kada se verifikacija graničnih stanja vrši proračunima, prema Evrokodu 7, moguće je koristiti tri projektna pristupa koji se razlikuju po primeni parcijalnih koeficijenata sigurnosti. Postojeći Evrokod 7 ne sadrži jasna pravila koja se odnose na verifikaciju graničnih stanja primenom numeričkih metoda.

Iako Evrokod 7 nema delove eksplicitno posvećene projektovanju tunela, u nedostatku odgovarajućih standarda, on se sve više koristi u praksi, naročito za projektovanje plitkih tunela u mekom tlu. U Tehničkom izveštaju Evropske komisije (Athanasopoulos et al., 2019) naglašava se da postoji potreba za standardizacijom u oblasti projektovanja podzemnih konstrukcija, pri čemu bi novi standardi ili smernice morali biti razvijeni u skladu sa evrokodovima uzimajući u obzir i drugu generaciju evrokodova koja je trenutno u pripremi.

NUMERIČKO MODELIRANJE IZGRADNJE TUNELA

Za adekvatnu analizu naponsko deformacijskih stanja u tunelskoj konstrukciji i okolnoj sredini, od suštinskog značaja je razmatranje delimične relaksacije, odnosno deformacija površine iskopa na radnom čelu tunela koje su se desile pre postavljanja obloge. Da bi se to postiglo neophodna je trodimenzionalna analiza kojom se simulira napredovanje radova i naponske promene i deformacije u okolini privremenog radnog čela. U literaturi se može naći veći broj radova u kojima je sprovedeno 3D modeliranje izgradnje tunela (Franzius et al, 2005; Lee and Ng, 2002; Maraš-Dragojević, 2012; Mašin, 2009; Ng and Lee, 2005; Svoboda et al., 2010; Swoboda et al., 1989; Vermeer et al., 2002; Yazdchi et al., 2006), pri čemu su autori uglavnom primenjivali *step-by-step* postupak za simulaciju građenja tunela sa otvorenim čelom (NATM - Nova austrijska tunelska metoda ili štit sa otvorenim čelom). 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 deaktiviranjem elemenata unutar konture tunela na dužini jedne sekvence napredovanja na čelu tunela. U sledećem koraku proračuna, na toj deonici se aktiviraju elementi obloge i simulira iskop sledeće deonice. Dužina na kojoj se simulira izgradnja tunela mora biti dovoljna da se, na određenom rastojanju iza čela tunela, formira stacionarno stanje (*steady-state*). 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.

3D numeričko modeliranje omogućava da se 3D efekti izgradnje tunela (delimična relaksacija napona na čelu tunela) modeliraju eksplicitno. Međutim, s obzirom da je 3D numeričko modeliranje izgradnje tunela proračunski veoma zahtevno, primena numeričkih metoda u inženjerskoj praksi je još uvek uglavnom ograničena na 2D modele. Kada se proces izgradnje tunela razmatra primenom 2D modela (ravno stanje deformacija), mora se usvojiti barem jedna pretpostavka kojom se uzima u obzir delimična relaksacija napona na čelu tunela, odnosno deformacije koje su se desile na čelu tunela pre formiranja obloge. U literaturi su predložene različite metode koje uzimaju u obzir 3D efekte izgradnje tunela u okviru 2D analiza kao što su: Metoda redukcije napona (Panet and Guenot, 1982), Metoda progresivnog omekšavanja (Swoboda, 1979) ili Metoda kontrole parametra V_L - *volume loss* (Addenbrooke et al. 1997). Najčešće korišćena metoda za 2D modeliranje izgradnje tunela s otvorenim čelom je Metoda redukcije napona (λ -metoda) koja zapravo predstavlja primenu *Convergence-confinement* metode u MKE. Delimična relaksacija napona, koja se dešava na čelu tunela, uvodi se u 2D model preko parametra λ koji predstavlja procenat rasterećenja inicijalnih napona pre instaliranja obloge. Nakon analize inicijalnog geostatičkog stanja napona, simulira se iskop profila i dopušta delimična relaksacija napona i u sledećem koraku se instalira obloga, pri čemu obloga prima opterećenje $(1-\lambda) \cdot \sigma_0$, gde je σ_0 inicijalni napon u tlu. Može se vršiti razrada profila po fazama (kalota, oporci, podnožni svod). Faktor redukcije napona λ je kontrolni parametar koji se mora propisati. Parametar λ zavisi od brojnih faktora kao što su karakteristike tla, geometrija tunela, metoda izgradnje i dužina napredovanja radova. On se može kalibrisati na osnovu poređenja rezultata 2D i 3D analiza. U praksi, parametar λ se često procenjuje na bazi inženjerskog iskustva sa sličnim uslovima izgradnje tunela ili na osnovu podataka merenja. Raspoloživi podaci merenja se

obično odnose na sleganja površine terena, pa se numerički modeli najčešće kalibrišu tako da korektno predvide profil sleganja površine terena. Međutim, ako model adekvatno predviđa pomeranja terena to ne mora značiti da će i naponi u oblozi biti tačni (Jones, 2007) (korisno je da se sprovedu i merenja pritisaka na tunelskoj oblozi).

EVROKOD 7: GEOTEHNIČKO PROJEKTOVANJE

Važeći Evrokodovi (Evrokod 0 - Evrokod 9) nemaju delove koji su eksplicitno posvećeni projektovanju tunela. Druga generacija Evrokodova koja je trenutno u pripremi takođe ne uključuje tunele. Međutim, važeći standardi Evrokod 0 (Osnove projektovanja konstrukcija), Evrokod 2 (Projektovanje betonskih konstrukcija) i Evrokod 7 (Geotehničko projektovanje) trenutno se delimično koriste za projektovanje tunela.

Projektni zahtev standarda Evrokod 7: Geotehničko projektovanje (EN 1997-1) je da se za svaku geotehničku projektnu situaciju verifikuje da nije prekoračeno odgovarajuće granično stanje. Granična stanja se mogu javiti ili u terenu ili u konstrukciji, ili kao kombinovano granično stanje u konstrukciji i terenu. Postupci za verifikaciju graničnih stanja su: proračuni, primena propisanih mera, modelska ispitivanja i probna opterećenja, kao i opservaciona metoda. Moraju se razmotriti i kratkoročne i dugoročne projektne situacije. Standard omogućava da se granična stanja verifikuju proračunima primenom numeričkih metoda (kada se razmatra interakcija konstrukcije i tla pri graničnom stanju). Proveravaju se granična stanja nosivosti (*ultimate limit states* - ULS) i granična stanja upotrebljivosti (*serviceability limit states* - SLS). Granična stanja nosivosti su ona stanja pri kojima dolazi do loma na delu terena ili loma elemenata konstrukcije (odnose se na sigurnost objekta i ljudi). Granična stanja upotrebljivosti su ona stanja koja se odnose na ispunjenje zahteva u eksploataciji (odnose se na funkcionalnost objekta). Ti zahtevi su vezani za deformacije, pojavu prslina u betonu, vibracije.

Geotehnički proračuni se zasnivaju na dejstvima (zadata opterećenja ili zadata pomeranja), svojstvima materijala (tlo, stena i drugi materijali) i geometrijskim podacima, kao i na proračunskim modelima (analitički, semiempirijski, numerički). Nesigurnosti se uzimaju u obzir primenom parcijalnih koeficijenata sigurnosti. Kod razmatranja graničnog stanja loma ili prekomerne deformacije nekog elementa konstrukcije ili na delu terena (STR i GEO) mora se verifikovati da proračunske vrednosti uticaja (efekata) dejstava E_d nisu veće od proračunskih vrednosti nosivosti (otpora) R_d . Parcijalni koeficijenti se mogu primeniti na sama dejstva (F_{rep}) ili na njihove uticaje (E), kao i na svojstva terena (X) ili otpore (R) ili na obe ove veličine. Kada se parcijalni koeficijenti primene na karakteristične vrednosti izabranih parametara, dobijaju se proračunske vrednosti. Karakteristične vrednosti geotehničkih parametara su definisane kao oprezna procena vrednosti koja utiče na pojavu graničnog stanja. U Evrokodu 7 postoje tri projektna pristupa (*Design Approach* - DA) koji se razlikuju po kombinaciji setova parcijalnih faktora. U Tabeli 1 prikazani su parcijalni faktori za date projektne pristupe. U nacionalnim aneksima se definiše koji će se projektni pristupi primenjivati za proračune različitih geotehničkih konstrukcija i vrednosti parcijalnih koeficijenata (u Republici Srbiji se za različite geotehničke konstrukcije

primenjuje projektni pristup 2 ili 3). Međutim, primena projektnih pristupa za proračune tunela nije definisana.

Tabela 1. Projektni pristupi i parcijalni koeficijenti u Evrokodu 7
Table 1. Eurocode 7 design approaches and partial factors

| | | | | Projektni pristup 1 | | Projektni pristup 2 | Projektni pristup 3 |
|--------------------|---|------------|------------------|---------------------|-------|---------------------|---------------------|
| | | Oznaka | | DA1/1 | DA1/2 | DA2 | DA3 |
| Dejstvo/ uticaj | Trajno | Nepovoljno | γ_G | 1.35 | 1.0 | 1.35 | 1.0 (1.35) |
| | | Povoljno | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| dejstva | Povremeno | Nepovoljno | γ_Q | 1.5 | 1.3 | 1.5 | 1.3 (1.5) |
| | | Povoljno | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Parametar tla | Efektivni ugao smičuće otpornosti ($\tan\phi'$) | | $\gamma_{\phi'}$ | 1.0 | 1.25 | 1.0 | 1.25 |
| | Efektivna kohezija c' | | $\gamma_{c'}$ | 1.0 | 1.25 | 1.0 | 1.25 |
| | Nedrenirana smičuća čvrstoća c_u | | γ_{c_u} | 1.0 | 1.4 | 1.0 | 1.4 |
| | Jednoaksijalna čvrstoća q_u | | γ_{q_u} | 1.0 | 1.4 | 1.0 | 1.4 |
| | Jedinična težina γ | | γ_γ | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Otpor | Nosivost | | γ_R | 1.0 | 1.0 | 1.4 | 1.0 |
| | Klizanje | | | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.0 |

Kod razmatranja graničnih stanja upotrebljivosti u terenu ili u konstrukciji, mora se verifikovati da projektne vrednosti uticaja dejstava (E_d) nisu veće od granične proračunske vrednosti za relevantni kriterijum upotrebljivosti (C_d), kao što je granična vrednost deformacija, širina prslina, vibracije, itd. Evrokod 7 dozvoljava da se u projektnim situacijama kada se ne zahteva određivanje vrednosti deformacije, i kada postoji uporedivo iskustvo, primeni pojednostavljeni pristup po kome se verifikuje da je mobilisana čvrstoća terena dovoljno mala da se deformacije zadrže u granicama zahtevane upotrebljivosti. Parcijalni koeficijenti za granična stanja upotrebljivosti imaju vrednost 1.0.

Kada je predviđanje geotehničkog ponašanja otežano, što je često slučaj kod projektovanja i izgradnje tunela, Evrokod 7 predviđa mogućnost primene opservacione metode koja podrazumeva praćenje ponašanja i prilagođavanje projekta u toku izgradnje. Neophodno je da se pre početka izgradnje definišu prihvatljive granice ponašanja, plan praćenja i plan dodatnih mera koje se mogu primeniti ukoliko ponašanje nije u prihvatljivim granicama. Ova metoda se može primeniti ukoliko ima dovoljno vremena za uvođenje dodatnih mera kada monitoring pokaže da tunel nije stabilan ili da se javljaju neprihvatljivo velike deformacije. Ova metoda, u geotehničkoj praksi, ima mnogo značajniju ulogu kod izgradnje dubokih tunela i tunela u steni nego kod plitkih tunela u tlu. Kod tunela u mekoj sredini, problematično je koliko vremena je na raspolaganju da se odgovori na nestabilnost, pa se generalno smatra dobrom praksom da se kod ovih tunela u potpunosti definišu podgradne mere pre početka izgradnje i da se tokom izgradnje eventualno usvoje samo manje izmene.

PRIMENA EC7 U PROJEKTOVANJU TUNELA PRIMENOM MKE

Napredne numeričke metode, kao što je metoda konačnih elemenata, primenjuju se u geotehničkoj praksi za predviđanje pomeranja tunnelske konstrukcije i okolne sredine, pa samim tim i verifikaciju graničnih stanja upotrebljivosti (SLS). Međutim, numeričke metode se sve više koriste i za verifikaciju graničnih stanja naprezanja (ULS) u podzemnim konstrukcijama. Kod primene numeričkih metoda za verifikaciju graničnih stanja naprezanja, osnovno pitanje je kako primeniti parcijalne koeficijente. Više autora je istraživalo primenljivost evrokodova u projektovanju primenom numeričkih metoda (Bauduin et al, 2000; Bauduin et al, 2005; Brinkgreve and Post, 2015; Jones, 2007; Schweiger, 2010, Schweiger et al, 2010; Paternesi et al, 2017, Pots and Zdravkovic, 2012).

Kod razmatranja graničnog stanja loma elementa konstrukcije ili na delu terena (STR i GEO) može se primeniti projektni pristup kod koga se primenjuju parcijalni koeficijenti na materijalne parametre i neka dejstva (*Material factoring approach MFA*), kao što su DA1/2 i DA3 u Evrokodu 7 ili projektni pristup kod koga se koeficijenti primenjuju na dejstava ili uticaje dejstva i otpore (*Load and resistance factoring approach LRFA*), kao što su DA1/1 i DA2 u Evrokodu 7 (Bauduin et al, 2005). Primena numeričkih metoda u kombinaciji sa projektnim pristupom kod koga se primenjuju parcijalni koeficijenti na parametre čvrstoće tla (MFA), relativno je jednostavna i omogućava da se proverí granično stanje loma u terenu i odrede projektné vrednosti uticaja u konstrukciji. Veći izazov predstavlja primena numeričkih metoda u kombinaciji sa projektnim pristupom kod koga se koeficijenti primenjuju na dejstava ili dejstva i otpore (LRFA). Kod tunela (kao i kod potpornih konstrukcija) dejstva i otpori potiču iz istog izvora, a to je tlo. U numeričkim analizama, trajna dejstva (pritisci tla) nisu ulazni podaci već rezultat analiza. Evrokod 7, međutim, dozvoljava da se parcijalni koeficijenti umesto na dejstva primene na uticaje (efekte) dejstva, kao što su unutrašnje sile (sile i momenti savijanja) u konstrukciji, i ovo se često označava kao projektni pristup DA2*. Ovaj pristup omogućava relativno jednostavnu primenu numeričkih metoda jer se analiza vrši sa karakterističnim opterećenjima i karakterističnim vrednostima geotehničkih parametara, a na kraju analize se unutrašnje sile u konstrukciji, dobijene proračunom, množe relevantnim parcijalnim koeficijentom. U proračunima, ulazni podatak je povremeno nepovoljno opterećenje (koje je eksterno primenjeno dejstvo) pomnoženo modifikovanim koeficijentom $\gamma = \gamma_G / \gamma_Q = 1.5 / 1.35 = 1.11$ (za ovo opterećenje se ne može kvantifikovati direktno individualni doprinos uticajima dejstva). Na kraju numeričke analize, dobijene vrednosti uticaja dejstva u konstrukciji (unutrašnje sile i momenti savijanja) množe se koeficijentom $\gamma_G = 1.35$ (Brinkgreve and Post, 2015; Lees, 2019). Primena ovog pristupa omogućava da se proceni unutrašnja stabilnost konstrukcije.

Primena parcijalnih koeficijenata na materijalne parametre (MFA) se može sprovести u MKE proračunima na dva načina (Bauduin et al, 2000). Prvi način je primena proračunskih vrednosti parametara čvrstoće tla od početka numeričke analize kroz sve faze proračuna, pri čemu se proverava da nije došlo do loma, i dobijene vrednosti uticaja u elementima konstrukcije (sile i momenti savijanja) su proračunske vrednosti. Drugi način je da se proračuni sprovedu sa karakterističnim vrednostima parametara čvrstoće tla kroz sve faze

proračuna, i na taj način modelira realno stanje napona i deformacija i interakcija tlo-konstrukcija. Za svaku fazu za koju treba proveriti granično stanje naprezanja (ULS), vrednosti parametara čvrstoće tla se postepeno smanjuju od karakterističnih do proračunskih vrednosti, u posebnim proračunskim koracima. Na taj način, za svaku fazu izgradnje proverava se da nije došlo do loma u tlu kada parametri tla dostignu proračunsku vrednost. Dobijene vrednosti uticaja u elementima konstrukcije (momenti savijanja i sile) su proračunske vrednosti. Preporučuje se primena ovog postupka, naročito kada sekvence izgradnje i istorija opterećenja utiču na rezultate proračuna i kada interakcija tlo-konstrukcija ima značajnu ulogu (Bauduin et al, 2005). Postupak za projektni pristup kod koga se koeficijenti primenjuju na uticaje dejstava podrazumeva da se sve faze proračuna sprovedu sa karakterističnim vrednostima parametara čvrstoće tla i dejstava, a na kraju proračuna dobijene vrednosti uticaja u elementima konstrukcije (momenti savijanja i sile) pomnože koeficijentima da bi se dobile proračunske vrednosti. Ovaj postupak se može primeniti u slučaju linearnog ponašanja elemenata konstrukcije. Prikazani postupci podrazumevaju da se sve faze izgradnje simuliraju uz primenu karakterističnih vrednosti dejstava i parametara čvrstoće terena. Provera graničnog stanja za određenu fazu izgradnje vrši se počev od predhodno dobijenih karakterističnih napona i deformacija za tu fazu. Nakon provere graničnog stanja, proračuni opet počinju od karakterističnog polja napona i deformacija i simulira se sledeća faza izgradnje (Bauduin et al, 2005). Brinkgreve and Post (2015) su predložili da se prvo izvrše sve faze proračuna sa karakterističnim vrednostima ulaznih parametara (SLS proračun), a zatim sprovedu faze proračuna u skladu sa odgovarajućim projektnim pristupom (ULS proračun). Proračuni se mogu sprovesti primenom redukcije parametara čvrstoće tla ili povećanjem presečnih sila u konstrukciji. Ako se ULS proračun uspešno završi (bez loma), može se zaključiti da je projekat u skladu sa projektnom regulativom.

Kod primene 2D numeričkog modeliranja izgradnje tunela, deformacije tla i napone u oblozi kontroliše unapred usvojeni faktor redukcije (relaksacije) napona i redukcija čvrstoće tla (MFA) nema značajniji uticaj. Prema austrijskoj direktivi RVS 09.01.42 (Tunelske konstrukcije u mekom tlu ispod izgrađenih područja), za 2D MKE analize izgradnje tunela treba primeniti pristup DA2*. Treba imati u vidu da se primenom 3D simulacije izgradnje tunela relaksacija napona koja se dešava na nepodgrađenoj deonici na čelu tunela i stabilnost čela iskopa modelira eksplicitno. Pristup sa primenom koeficijenata na parametre tla je pogodan za proveru stabilnosti čela tunela (GEO). Jones (2007) je istraživao uticaj smanjenja čvrstoće tla na 3D modelu tunela (sa oblogom od prskanog betona) i zaključio da može biti neophodno primeniti i ovaj pristup (uz pristup sa primenom koeficijenata na uticaje u oblozi) za proveru graničnog stanja loma u tunelskoj oblozi.

Schweiger (2010), Schweiger et al. (2010) su istraživali primenljivost projektnih pristupa datih u EC7 za projektovanje plitkih tunela primenom MKE analiza. Sproveli su 2D modeliranje izgradnje NATM tunela, pri čemu su 3D efekte izgradnje tunela uzeli u obzir primenom faktora relaksacije napona koje su usvojili na osnovu iskustva na projektima u sličnim uslovima. Zaključili su da se u principu svi projektni pristupi mogu koristiti u kombinaciji sa numeričkim modeliranjem pod uslovom da se DA2 koristi u obliku DA2*, odnosno da se parcijalni koeficijenti primene na efekte dejstva. Paternesi et al. (2017) su

razmatrali plitki NATM tunel u tlu primenom 2D MKE modela uz faznu razradu profila. 3D efekte napredovanja čela tunela, simulirali su primenom faktora prerelaksacije (redukcije napona) za sve sekvence iskopa. Zaključili su da je najbolja strategija kod projektovanja plitkih tunela da se primene oba pristupa DA2* i DA3 (što je ekvivalentno DA1 pristupu) u cilju postizanja sigurnijeg projektovanja sa geotehničkog stanovišta i stanovišta konstrukcije. Takođe, razmatrali su i primenu nelinearnog modela za mlazni beton primarne obloge, s obzirom da primena linearno elastičnog modela može dovesti do neekonomičnog projektovanja. Provera obloge tunela obično se sprovodi pomoću dijagrama interakcije normalne sile i momenta savijanja (provera M-N), pri čemu unutrašnje sile u konstrukciji treba da padnu unutar dijagrama. Pokazano je da nelinearni model mlaznog betona može biti primenjen u kombinaciji sa projektним pristupom DA2*. Takođe, prema mišljenju autora, pristup DA3 u kombinaciji sa direktnom primenom (u numeričkom proračunu) parcijalnog faktora sigurnosti na čvrstoću mlaznog betona je u skladu sa pristupom MFA, kako je definisano u EC7.

Trenutno je u pripremi druga generacija Evrokoda 7 čiji Nacrt sadrži neka pravila koja se odnose na geotehničko projektovanje i verifikaciju graničnih stanja primenom naprednih numeričkih metoda, kao što je metoda konačnih elemenata (Lees, 2019). Pristup koji podrazumeva primenu koeficijenata na parametre materijala (MFA) preporučuje se za verifikaciju geotehničkih graničnih stanja loma. Preporučeni način primene ovih koeficijenata u numeričkim analizama je postepeno smanjenje čvrstoće tla na proračunske vrednosti tako da se odrede projektne (proračunske) vrednosti unutrašnjih sila u konstrukciji i izvrši provera geotehničkog loma. Smanjenje čvrstoće se može nastaviti i nakon toga u cilju identifikacije kritičnog oblika loma. Pristup sa primenom parcijalnih koeficijenata na uticaje (efekte) dejstva (EFA) obezbeđuje, u većini slučajeva, relativno konstantnu marginu sigurnosti za unutrašnje sile u konstrukciji, ali postoje neke situacije u kojima niža čvrstoća tla od očekivane ima značajan uticaj na unutrašnje sile i primenom EFA se ne bi osigurala odgovarajuća pouzdanost. Zbog toga je preporučeno da se provere sprovedu primenom oba projektna pristupa (MFA i EFA) i da se najnepovoljnije dobijene vrednosti unutrašnjih sila koriste u verifikaciji graničnog stanja loma u konstrukciji. Takođe, preporučeno je da se numeričke analize svih faza izgradnje sprovedu primenom karakterističnih vrednosti dejstava i parametara čvrstoće tla, a da se verifikacija graničnih stanja za kritične faze izgradnje sprovede u posebnim dodatnim proračunskim koracima.

ZAKLJUČAK

Evrokod 7 nema delove eksplicitno posvećene projektovanju tunela, međutim, u nedostatku odgovarajućih standarda, on se sve više koristi u praksi, naročito za projektovanje plitkih tunela u mekom tlu. Kod projektovanja tunela, za razmatranje kompleksne interakcije tlo-konstrukcija, neophodna je primena naprednih numeričkih metoda. Metoda konačnih elemenata se primarno koristi za naponsko-deformacione analize pri datim radnim uslovima opterećenja, što odgovara proveru graničnog stanja upotrebljivosti (SLS). Međutim, MKE se koristi u projektovanju tunela i za provere graničnih stanja loma (ULS) u terenu i konstrukciji. Decenijama se u geotehničkoj praksi za procenu globalnog geotehničkog faktora sigurnosti u MKE analizama primenjivao metod (ϕ -c) redukcije

čvrstoće. U Evrokodu 7 se zahteva primena parcijalnih faktora sigurnosti na dejstva, svojstva materijala i otpore (nosivosti) u skladu sa kombinacijama datim u različitim projektnim pristupima. U MKE analizama, spoljašnja opterećenja i svojstva materijala su ulazni podaci na koje se mogu jednostavno primeniti parcijalni koeficijenti, dok dejstava i otpori koji potiču od tla nisu unapred poznati što otežava primenu parcijalnih koeficijenata. Evrokod 7 dozvoljava da se parcijalni koeficijenti primene na uticaje (efekte) dejstva, kao što su presečne sile (sile i momenti savijanja) u elementima konstrukcije, koji su rezultat numeričke analize. Pristup sa primenom koeficijenata na parametre čvrstoće tla (MFA) je pogodan za proveru graničnih stanja loma u tlu, a pristup sa primenom koeficijenata na uticaje dejstva (EFA) za proveru graničnih stanja loma u konstrukciji. Međutim, zbog složenosti numeričkih analiza, jednostavno oslanjanje na parcijalne koeficijente bi moglo biti opasno, i zahteva se da se razmotri osetljivost provera graničnih stanja na brojne aspekte, kao što su: inicijalno stanje napona, faze izgradnje, uslovi dreniranja, diskretizacija geometrije, granični uslovi, usvojeni konstitutivni modeli za tlo i konstrukciju i dr.

Za adekvatnu primenu parcijalnih koeficijenata u kombinaciji sa numeričkim metodama neophodne su jasne smernice. Predloženi nacrt EN 1997-1 sadrži novi skup pravila za proveru graničnih stanja pomoću naprednih numeričkih metoda. Preporuka je da se za provere graničnih stanja primene dve kombinacije parcijalnih koeficijenata sigurnosti (MFA i EFA) kako bi se osigurala dovoljna pouzdanost u odnosu na granična stanja loma u tlu i elementima konstrukcije. Takođe, preporučuje se da se numeričke analize svih faza izgradnje sprovedu primenom karakterističnih vrednosti dejstava i parametara čvrstoće tla, a da se verifikacija graničnih stanja za kritične faze izgradnje sprovede u posebnim dodatnim proračunskim koracima.

S obzirom da trenutno ne postoje evropski standardi za projektovanje tunela, u praksi se primenjuju postojeći evrokodovi. Standardizacija projektovanja i doslednost u primeni parcijalnih koeficijenata u analizama tunela su od velikog značaja i neophodan je dalji razvoj standarda za projektovanje ovih konstrukcija.

LITERATURA:

- 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.
- Athanasopoulou, A., et al. Standardisation needs for the design of underground structures. European Commission - JRC Technical Reports. 2019.
- Bauduin, C., Simpson, B., De Vos, M.: Some considerations on the use of Finite Element Methods in Ultimate Limit State Design, Int Workshop on Limit State Design, LSD 2000, Melbourne. 2000.
- Bauduin, C., Bakker, K.J., Frank, R.: Use of Finite Element Methods in Geotechnical Ultimate Limit State Design. In: Proc XVI ICSMGE, Osaka. pp. 2775–2779. 2005.
- Brinkgreve, R.B.J., Post, M.: Geotechnical Ultimate Limit State Design Using Finite Elements. *Geotechnical Safety and Risk V*, IOS Press, 2015.
- 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.

- Jones, B.D.: Design of SCL tunnels in soft ground using Eurocodes. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling (EURO: TUN 2007), Vienna, Austria, 2007.
- Lee, G.T.K. and 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.
- Lees, A.S.: Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1997-1:202x Numerical methods. Proc. of the XVII ECSMGE-2019 Geotechnical Engineering foundation of the future, 2019.
- Maraš-Dragojević, S.: Analysis of ground settlement caused by tunnel construction, GRAĐEVINAR, 64 (7), 573-581, 2012.
- 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.
- Ng C.W.W. and Lee G.T.K.: Three-dimensional ground settlements and stress-transfer mechanisms due to open-face tunnelling. Canadian Geotechnical Journal, 42, 1015-1029, 2005.
- 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.
- Paternesi, A., Schweiger, H.F., Ruggeri, P., Fruzzetti, V.M.E., Scarpelli, G.: Comparisons of Eurocodes design approaches for numerical analysis of shallow tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology 62, 115–125, 2017.
- Potts, D.M., Zdravkovic, L.: Accounting for partial material factors in numerical analysis, Géotechnique 62(12), 1053-1065, 2012.
- Schweiger, H.F.: Numerical analysis of deep excavations and tunnels in accordance with EC7 design approaches. Proc. Int. Conference Geotechnical Challenges in Megacities (Moskau) Vol.1, 206–217, 2010.
- Schweiger, H.F., Marcher, T., Nasekhian, A.: Nonlinear FE-analysis of tunnel excavation – comparison of EC7 design approaches. Geomechanics and Tunnelling 3 (2010), No.1, pp. 61–67, 2010.
- SRPS EN 1997-1:2017 Evrokod 7: Geotehničko projektovanje - Deo 1: Opšta pravila. 2017.
- Svoboda, T., Mašin, D., Boháč, J.: Class A predictions of a NATM tunnel in stiff clay. Computers and Geotechnics 37, 817–825, 2010.
- Swoboda, G.: Finite element analysis of the New Austrian Tunnelling Method (NATM). In Proc. 3rd Int. Conf. Num. Meth. Geomech, vol. 2, Aachen, 581-586, 1979.
- 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, pp. 536-548, 1989.
- 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.
- Yazdchi M., Macklin S.R., Yeow H.C.: 3D modelling of sprayed-concrete-lined tunnels in clay. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 159, Issue GE4, 243–250, 2006.