

3D ANALIZA INTERAKCIJE TUNELSKJE OBLOGE I STENSKE MASE – II. EFEKAT SIMULACIJE PROCESA IZGRADNJE I PARAMETARSKJE STUDIJE

3D ANALYSIS OF TUNNEL LINING – ROCK MASS INTERACTION – II. EFFECT OF CONSTRUCTION PROCESS SIMULATION AND PARAMETRIC STUDIES



UDK: 624.19.001.2
Stručni rad

Asistent mr Snežana MARAŠ-DRAGOJEVIĆ, dipl. inž. građ.

REZIME

Za adekvatnu analizu naponsko-deformacijskih stanja u tunelskoj oblozi i stenskoj masi kao složenom interaktivnom sistemu neophodna je primena 3D numeričkih modela. U prvom radu prikazano je 3D numeričko modeliranje izgradnje tunela metodom konačnih elemenata pri čemu su izloženi principi iterativnog postupka za simulaciju napredovanja čela tunela. U ovom drugom radu prikazani su rezultati uporednih analiza naponsko-deformacijskih stanja u tunelskoj oblozi i stenskoj masi proračunatih primenom navedenog postupka simulacije izgradnje tunela i primenom uobičajenih, uprošćenih postupaka proračuna u jednom koraku na 2D i 3D modelu konačnih elemenata. Prikazani su i rezultati sprovedenih parametarskih studija koje su imale za cilj ispitivanje uticaja modula elastičnosti stenske mase, visine nadsloja i dimenzija otvora na naponsko-deformacijska stanja u oblozi i stenskoj masi.

Ključne reči: tunel, stena, metod konačnih elemenata, trodimenzionalna analiza, simulacija procesa izgradnje.

SUMMARY

For correct evaluation of stresses and deformations in tunnel lining and rock mass, it is necessary to use 3D numerical models. 3D FEM numerical modeling of tunnel driving has been described in Part I along with a presentation of iterative procedure for simulating the advancement of tunnel face. In this Part II results of comparative analyses of stress-strain states at tunnel lining and ground obtained from iterative computation and simplified single step computation are presented. Results of parametric studies carried out to investigate the influence of the E -modulus of the rock mass, overburden height and tunnel diameter on the deformation and the stresses in the lining and ground are also presented.

Key words: tunnelling, rock, finite element method, three-dimensional analysis, simulation of the construction process.

1. UVOD

3D numeričko modeliranje neophodno je za razmatranje efekata na radnom čelu tunela kao i efekata sekvencijalne izgradnje tunela. Na radnom čelu tunela dolazi do delimične relaksacije stenske mase i ovo se uzima u obzir u iterativnom postupku simulacije napredovanja izgradnje tunela prikazanom u radu I u kome se obloga postavlja na već deformisanu površinu iskopa. Metodom konačnih elemenata (MKE) razvija se 3D numerički model na kome se sprovodi odgovarajuća naponsko-deformacijska analiza, odnosno analizira interakcija tunelske obloge i stenske mase. Podaci o fizičko-mehaničkim svojstvima stenske mase, neophodni za formiranje modela, određuju se merenjima *in situ* i laboratorijskim istraživanjima. Međutim, često nije moguće obezbediti pouzdane ulazne podatke pa je korisno u takvim situacijama sprovesti parametarske studije. MKE je veoma pogodna za sprovođenje parametarskih studija jer omogućava

obuhvatanje i variranje velikog broja parametara relevantnih za analizu.

Analiza interakcije obloge i stenske mase u ovom radu sprovedena je na primeru tunela kružnog preseka primenom iterativnog MKE postupka za simulaciju napredovanja izgradnje tunela čiji su principi izloženi u radu I. Izvršeno je upoređenje tako dobijenih rezultata sa rezultatima uobičajenih, uprošćenih postupaka proračuna u jednom koraku na 2D i 3D modelu konačnih elemenata. Sprovedene su parametarske studije sa variranjem parametara geometrije problema odnosno dimenzija otvora, materijalnih parametara za stensku masu i visine nadsloja. Obzirom da je glavni cilj istraživanja bio ispitivanje efekata sekvencijalne izgradnje na stanje napona i deformacija u zoni tunela, odnosno na interakciju obloge i stenske mase usvojen je jednostavan linearno elastičan model za stensku masu i beton. Može se očekivati da efekti 3D modeliranja koji su ovde ispitivani na linearno elastičnom modelu važe i za sofisticiranije konstitutivne modele. Rezultati ovih analiza značajni su i obzirom da se slučajevi u kojima se stenska masa u velikoj meri ponaša

Adresa autora: Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 11000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

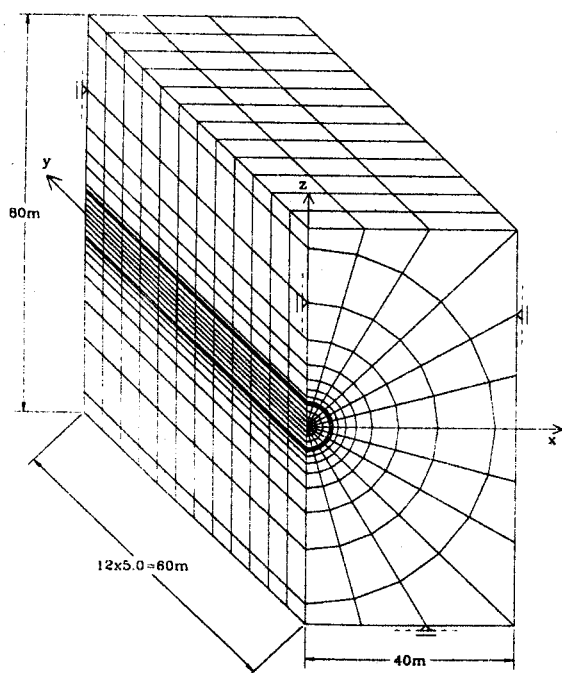
elastično često dešavaju. Elastična analiza adekvatna je u slučaju čvrste homogene stenske mase koja je umereno napregnuta u odnosu na njenu čvrstoću (za granicu linearno elastičnog ponašanja stenske mase može se usvojiti vrednost tangentskog napona od oko jedne polovine jednoaksijalne čvrstoće na pritisak obzirom da pri većim vrednostima napona počinju da se formiraju prsline odnosno počinju neelastične deformacije stenske mase, Goodman 1989). Osim toga, čak i kada se javljaju plastične deformacije, elastične deformacije su takođe prisutne i moraju biti uzete u račun, pa elastična analiza uvek predstavlja bazu elasto-plastičnih i elasto-viskoplastičnih istraživanja.

2. 3D NUMERIČKI MODEL

Razmatra se tunel kružnog preseka u izotropnoj, elastičnoj stenskoj masi. Sprovedena je serija 3D proračuna metodom konačnih elemenata sa ciljem ispitivanja uticaja modula elastičnosti stenske mase E , visine nadsloja, kao i dimenzija otvora na naponsko-deformacijska stanja u oblozi i stenskoj masi.

Na slici 1 prikazan je usvojeni proračunski 3D model konačnih elemenata. Zahvaljujući simetriji problema proračunski presek ima dimenzije prikazane na slici (40x80x60 m) i sastoji se od ukupno 1872 elementa i 2368 čvorova. U podužnom pravcu proračunski presek je podeljen na dvanaest odsečaka elemenata koji odgovaraju dužini jedne kampade iskopa $l = 5$ m. Konfiguracija mreže je ista za sve ravni čvorova upravne na osu tunela. Razmatra se slučaj iskopa sa vertikalnim radnim čelom, tj. pretpostavlja se da se iskop sprovodi u punom profilu.

Izbor veličine proračunskog preseka i njegova diskretizacija sprovedeni su u skladu sa preporukama



Slika 1. 3D mreža konačnih elemenata

datim u radu I. Mreža elemenata ima najveću gustinu u užoj zoni oko otvora u kojoj se očekuju najveće promene napona. Osim toga mreža elemenata ima takvu strukturu koja omogućava analizu u svim fazama izgradnje tunela. Svi elementi u početnoj fazi analize tzv. *in situ* stanja napona imaju mehaničke karakteristike stenske mase. Dodeljivanjem elementima unutar konture iskopa mehaničkih karakteristika vazduha ($\gamma_v, [D_v] \sim 0$) simulira se iskop. Elementi kojima se simulira obloga (naznačeni na slici šrafurom) preuzimaju mehaničke karakteristike betona.

Granični uslovi su da je na bočnim konturama proračunskog preseka sprečeno horizontalno i dozvoljeno vertikalno pomeranje, dok je na donjoj granici sprečeno vertikalno, a dozvoljeno horizontalno pomeranje. Na gornjoj granici proračunskog preseka zadaju se čvorne sile koje odgovaraju težini nadsloja stenske mase.

Za naponsko-deformacijske analize u domenu elastičnosti neophodno je definisanje modula elastičnosti E i Poisson-ovog koeficijenta ν . U ovom radu sprovedene su parametarske analize sa variranjem vrednosti modula elastičnosti stenske mase i to za $E_s = 5000, 10000$ i 15000 MPa. Poisson-ov koeficijent nije variran već je usvojena vrednost $\nu_s = 0.25$, kao prosečna za širi opseg čvrstih stenskih masa. Usvojena je vrednost zapreminske težine stenske mase $\gamma_s = 25$ kN/m³.

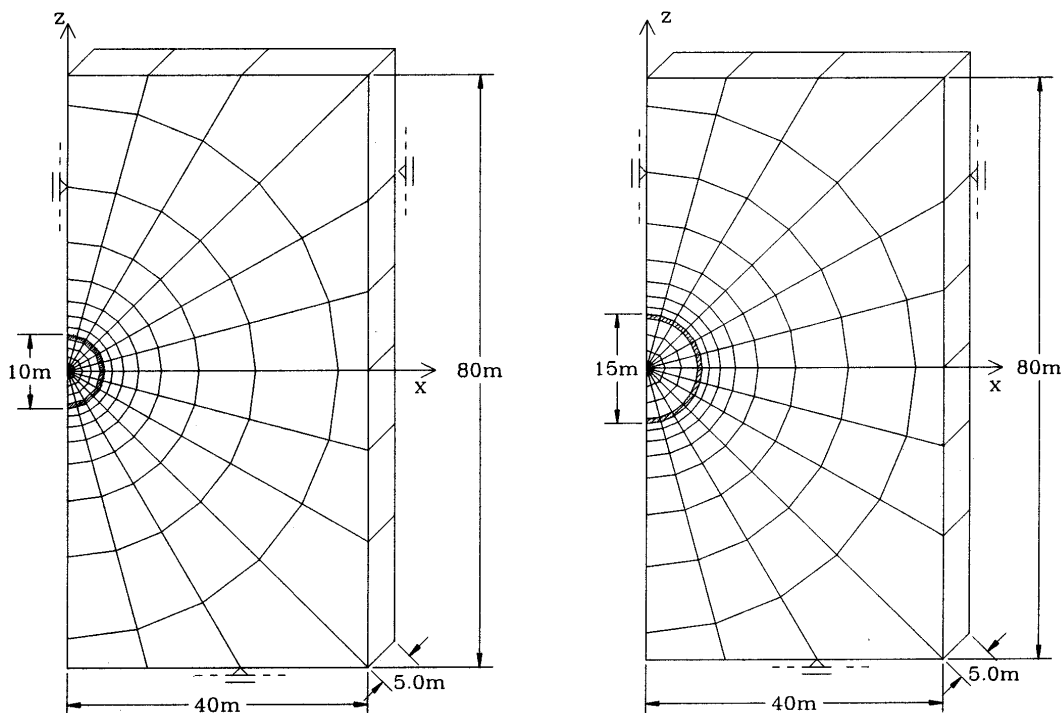
Za modul elastičnosti betona usvojeno je da je konstantan $E_b = 30000$ MPa. U analizama nije uzeta u razmatranje mogućnost porasta modula elastičnosti betona obloge sa povećanjem rastojanja od radnog čela. Usvojena je vrednost Poisson-ovog koeficijenta $\nu_b = 0.18$. Za zapreminsku težinu betona usvojena je vrednost od $\gamma_b = 25$ kN/m³.

Proračuni su sprovedeni za usvojenu visinu nadsloja od $H_0 = 160$ m ($p_v = 4$ MPa) i varijantno za visinu $H_0 = 320$ m ($p_v = 8$ MPa).

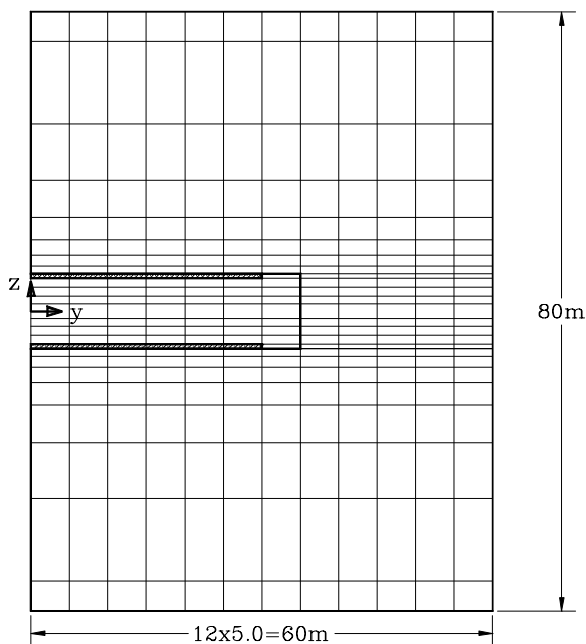
Što se tiče geometrije problema proračuni su sprovedeni za tunel kružnog preseka prečnika $D = 10$ m, i da bi se ispitaio uticaj veličine otvora na naponsko-deformacijska stanja u oblozi i stenskoj masi za tunel prečnika $D = 15$ m. Tunel je sa betonskom oblogom debljine 0.60 m, a radi komparacije sprovedeni su proračuni i za tunel bez obloge. Na slici 2 prikazana je konfiguracija mreže u ravni upravnoj na osu tunela, odnosno vertikalni odsečak elemenata za tunele prečnika $D = 10$ m i $D = 15$ m. Na slici 3 dat je prikaz mreže (za tunel prečnika $D = 10$ m) u podužnom pravcu u ravni simetrije.

2.1. Postupak proračuna

3D proračuni su sprovedeni primenom iterativnog postupka za simulaciju napredovanja izgradnje tunela čiji su principi izloženi u radu I. Radi upoređenja urađeni su i proračuni primenom uobičajenih, uprošćenih postupaka proračuna u jednom koraku na datom 3D modelu konačnih elemenata za tunel sa



Slika 2. Konfiguracija mreže (vertikalni odsečak) elemenata za tunel prečnika $D = 10\text{ m}$ i tunel prečnika $D = 15\text{ m}$



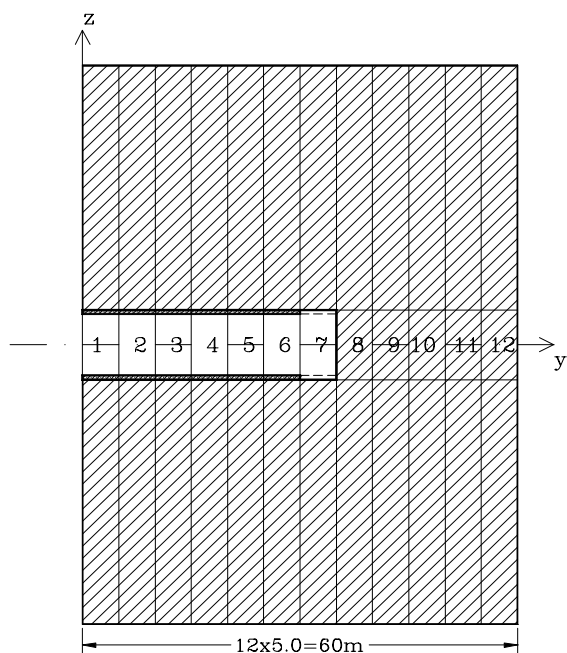
Slika 3. Izgled mreže u ravni simetrije (tunel prečnika $D = 10\text{ m}$)

oblogom i bez obloge kao i na 2D modelu (jedan odsečak elemenata). Proračuni su sprovedeni primenom programa SAP korišćenjem 3D Solid elemenata ("brick" element sa 8 čvorova baziran na izoparametarskoj formulaciji). Treba napomenuti da program SAP nije pogodan za 3D proračune tunela uz simulaciju procesa izgradnje obzirom da nema ugrađenu mogućnost analize sekvenci iskopa odnosno izgradnje (što je slučaj kod nekih specijalizovanih geotehničkih programa).

Proračuni primenom iterativnog postupka za simulaciju procesa izgradnje tunela sprovedeni su saglasno mogućnostima programa SAP. Pojedini iterativni koraci kojima se simuliraju sekvence iskopa praćeni su međukoracima u kojima se vrši proračun fiktivnog stanja napona odnosno fiktivnih čvornih sila pomoću kojih se obloga prilagođava deformacijama konture iskopa na nepodgrađenom delu na čelu tunela (koje su proračunate u prethodnom iterativnom koraku). S obzirom da program SAP ne raspolaže mogućnošću da rezultate proračuna jednog koraka automatski zada kao ulazne podatke za sledeći korak, priprema podataka za pojedine korake proračuna je prilično naporna i mora se vršiti ručno.

U skladu sa postupkom za simulaciju procesa izgradnje tunela koji je izložen u radu I prvi korak analize je proračun primarnog, odnosno *in situ* stanja napona i deformacija. Obzirom da je stenska masa opterećena samo sopstvenom težinom, primarno stanje napona i deformacija zavisi od visine nadsloja, težine stenske mase i elastičnih konstanti stenske mase. *In situ* stanje se simulira tako što se svim konačnim elementima koji formiraju proračunski presek dodeljuju zapreminska težina i mehaničke karakteristike stenske mase. Na gornjoj granici proračunskog preseka zadaje se opterećenje koje odgovara težini nadsloja stene preko ekvivalentnih čvornih sila.

Nakon proračuna *in situ* stanja napona i deformacija u sledećem koraku proračuna betonska podgrađna konstrukcija se postavlja u sistem koji je deformisan prema *in situ* stanju. Elementima kojima se simulira obloga (segmenti 1–6) dodeljuju se mehaničke karakteristike betona i određuje se fiktivno stanje na-



Slika 4. Proračunski presek

pona odnosno fiktivne čvorne sile sa kojima se ovi elementi prilagođavaju pomeranjima proračunatim pri analizi *in situ* stanja.

Zatim sledi analiza tzv. inicijalnog stanja u kome se simulira iskop do trenutnog radnog čela (slika 4). U čvorovima elemenata kojima se simulira postavljena obloga (segmenti 1–6) zadaju se prethodno proračunate ekvivalentne fiktivne sile. Iskop se simulira dodeljivanjem odgovarajućim elementima unutar konture iskopa (segmenti 1–6 i nepodgrađeni segment 7) zapreminske težine vazduha i krutosti približno jednake nuli. Rezultat ovog koraka proračuna su naponi i deformacije inicijalnog stanja. Zatim sledi proračun fiktivnih napona, odnosno odgovarajućih fiktivnih sila kojima se elementi obloge koja se postavlja na nepodgrađenom delu (segment 7) deformišu prema pomeranjima konture iskopa sračunatim pri analizi inicijalnog stanja.

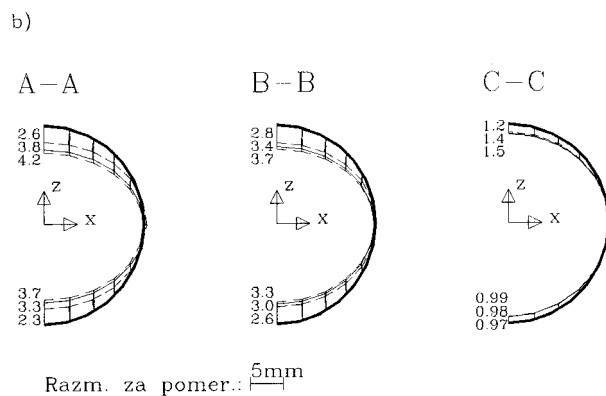
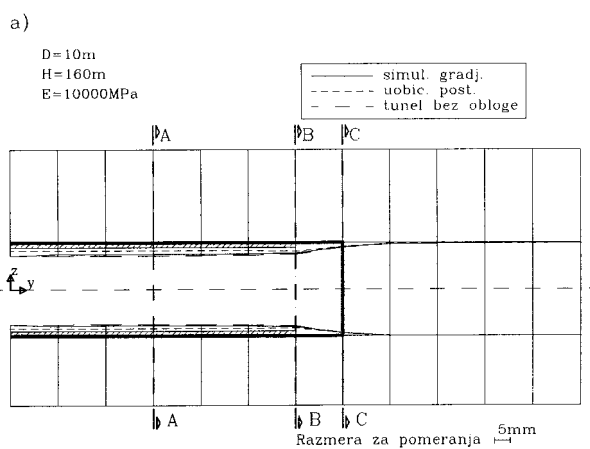
Nakon proračuna *in situ* i inicijalnog stanja sledi iterativni proračun u kome se proračunska oblast odnosno mreža konačnih elemenata pomera (napreduje) sa napredovanjem izgradnje tunela. U prvom iterativnom koraku proračunska oblast se pomera u odnosu na inicijalno stanje za dužinu jedne sekvence iskopa u pravcu napredovanja izgradnje tunela. Na taj način, fiktivne sile proračunate prema pomeranjima konture iskopa u inicijalnom stanju u segmentu 7 zadaju se u prvom iterativnom koraku u čvorovima elemenata obloge u segmentu 6. U drugom iterativnom koraku proračunska oblast se ponovo pomera za dužinu sekvence iskopa u pravcu probijanja tunela. Fiktivne sile kojima se inicijalno deformiše obloga u segmentu 6 određuju se iz pomeranja dobijenih u prvom iterativnom koraku za segment 7. Pomeranje proračunskog preseka, odnosno iterativni proračun se

nastavlja sve dok se proračunata pomeranja više ne menjaju u toku dva uzastopna iterativna koraka. Iterativni proračuni sprovedeni u ovom radu uglavnom su se završavali sa jedanaestim korakom iteracije. Stvarno stanje napona u odgovarajućim elementima obloge dobija se kao razlika stanja napona proračunatog u poslednjem iterativnom koraku i odgovarajućeg fiktivnog stanja napona za te elemente. Naponi u elementima kojima se simulira stenska masa proračunati u poslednjem iterativnom koraku odgovaraju stvarnim naponima. Pomeranja koja se mogu meriti dobijaju se kao razlika pomeranja sračunatih u poslednjem koraku proračuna i pomeranja određenih pri proračunu *in situ* stanja.

Rezultati sprovedenih komparativnih analiza i parametarskih studija prikazani su u narednom delu rada.

3. EFEKAT SIMULACIJE PROCESA IZGRADNJE

U cilju analize efekata simulacije sekvencijalne izgradnje na naponsko–deformacijska stanja u oblozi i stenskoj masi izvršena su poređenja rezultata iterativnog proračuna sa onima koji se dobijaju primenom uobičajenih, uprošćenih postupaka proračuna u jednom koraku na datom 3D modelu i na 2D modelu (jedan odsečak elemenata) za tunel sa oblogom i bez obloge. Razmatra se tunel prečnika $D = 10$ m sa visi-



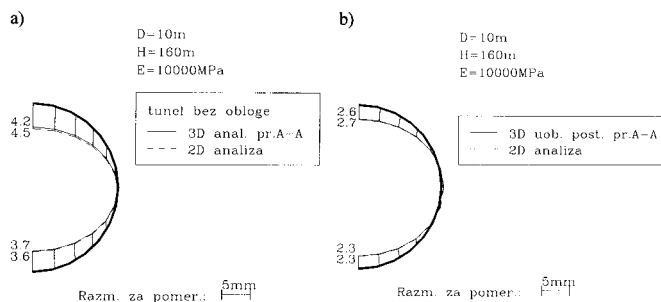
Slika 5. Pomeranja konture iskopa; a) u vertikalnoj ravni simetrije b) u presecima.

nom nadsloja $H_0 = 160$ m u stenskoj masi sa modulom elastičnosti $E = 10000$ MPa.

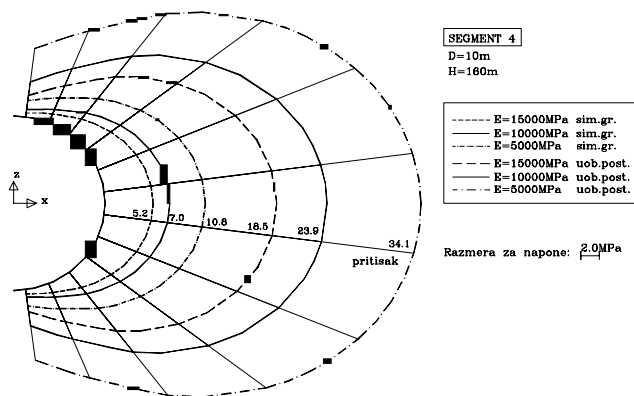
Na slici 5 prikazana su pomeranja konture iskopa tunela sračunata primenom iterativnog postupka za simulaciju procesa izgradnje tunela i uobičajenog, uprošćenog postupka u jednom koraku na datom 3D modelu konačnih elemenata kao i pomeranja za tunel bez obloge. Kao što se vidi, pomeranja konture iskopa sračunata primenom postupka za simulaciju procesa izgradnje tunela su znatno veća od pomeranja sračunatih primenom uobičajenog postupka proračuna i ne razlikuju se značajno od pomeranja sračunatih za tunel bez obloge. Razlog što uobičajeni postupci proračuna daju nerealno mala pomeranja je to što je obloga već prisutna kad počnu deformacije tunela, pa obloga sprečava deformacije koje su se u stvari desile pre postavljanja obloge. U primenjenom iterativnom postupku obloga se postavlja na već deformisan sistem dakle uzima se u obzir delimična relaksacija stenske mase na radnom čelu tunela. Evidentno je sa slike da se veliki procenat konačnih pomeranja dešava na nepodgrađenom delu na privremenom radnom čelu tunela, dakle pre formiranja obloge, pa je obloga koja se tu formira izložena samo delu primarnih napona. U skladu sa tim stvarni naponi u oblozi (kao što će se videti u nastavku rada) značajno su manji od onih koji se dobijaju uobičajenim postupcima proračuna u kojima je obloga izložena celokupnom primarnom naponu.

Na slici 6 dat je uporedni prikaz pomeranja konture tunela bez obloge i sa oblogom sračunatih na 2D modelu (jedan odsečak elemenata) i sračunatih primenom uobičajenog, uprošćenog postupka proračuna u jednom koraku na datom 3D modelu (presek A-A). Kao što se vidi dobijene vrednosti pomeranja su gotovo identične.

Analiza stanja napona u tunelskoj oblozi usmerena je na analizu tangenčnih napona obzirom da su oni kao najveći merodavni za njeno dimenzionisanje. Na slici 7 dat je uporedni prikaz tangenčnih napona u betonskoj oblozi tunela (u segmentu 4) sračunatih iterativnim postupkom za simulaciju procesa izgradnje tunela i uobičajenim, uprošćenim postupkom proračuna u jednom koraku na datom 3D modelu konačnih elemenata za različite vrednosti modula elastičnosti



Slika 6. Poređenje rezultata proračuna pomeranja na 2D modelu i u jednom koraku na 3D modelu; a) tunel bez obloge b) tunel sa oblogom.

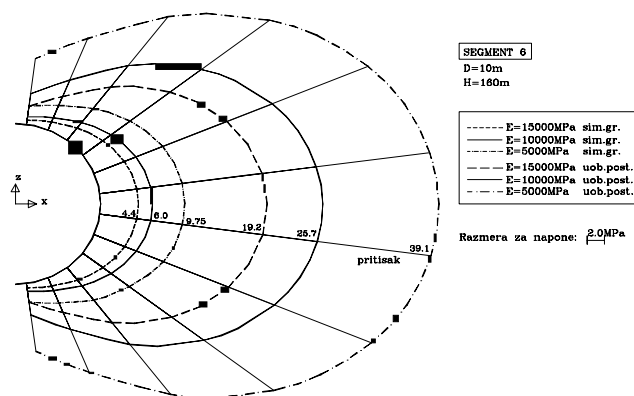


Slika 7. Tangentni naponi u oblozi tunela u segmentu 4

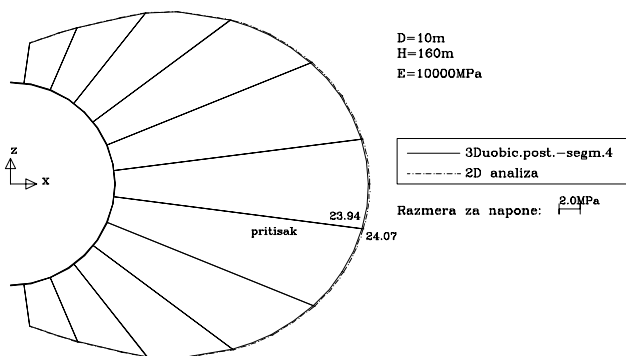
stenske mase. Kao što se vidi, naponi u oblozi dobijeni primenom iterativnog postupka za simulaciju procesa izgradnje tunela su značajno manji od onih dobijenih primenom uobičajenog, uprošćenog postupka proračuna. Razlog je, kao što je već naglašeno, to što se u iterativnom postupku uzima u obzir delimična relaksacija stenske mase na radnom čelu tunela.

Na slici 8 prikazani su tangenčni naponi u betonskoj oblozi u prvom prstenu uz radno čelo – segmentu 6. Može se uočiti da osim razlike u veličini napona u betonskoj oblozi dobijenih primenom iterativnog i uobičajenog, uprošćenog postupka proračuna postoji i razlika u raspodeli napona duž tunela. Tako se uprošćenim postupkom proračuna dobijaju maksimalne vrednosti napona u ovom prstenu (segment 6), dok se iterativnim postupkom proračuna, naprotiv dobijaju minimalne vrednosti napona u ovom prstenu. Što se tiče oblika dijagrama, maksimalne vrednosti tangenčnih napona javljaju se u bokovima tunela.

Zavisno od brzine građenja, čvrstoća i krutost obloge koje su pretpostavljeni u proračunima postižu se tek nakon određenog vremena pa obloga izbegava opterećenje do određenog stepena. Analize daju interesantan rezultat da je obloga izložena naponima zatezanja u podužnom pravcu u kaloti i invertu. Ovi naponi su takve veličine da bi mogli dovesti do pukotina zatezanja u oblozi (1.2 odnosno 1.8 MPa), a razlog za betonske obloge bez ovih pukotina je vero-



Slika 8. Tangentni naponi u oblozi tunela u segmentu 6

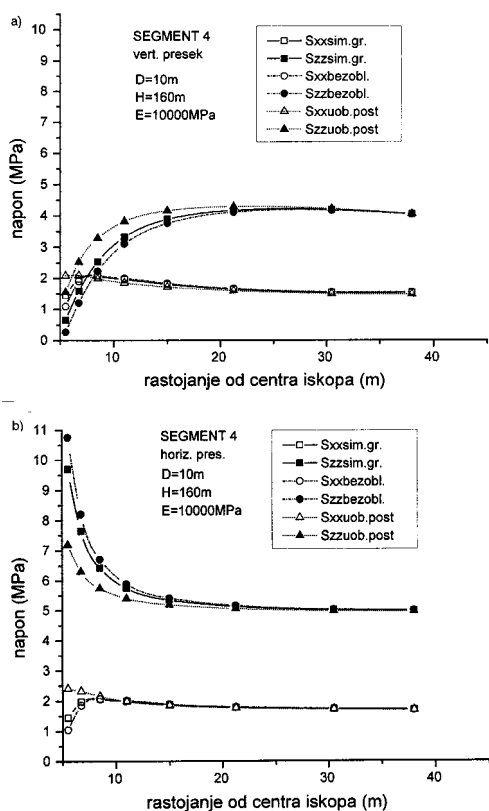


Slika 9. Uporedni dijagram tangenčnih napona u oblozi tunela dobijenih proračunom na 2D modelu i uobičajenim postupkom u jednom koraku na 3D modelu (segment 4)

vatno to što se izduženje betonskih elemenata dešava kada beton još uvek ima mali E-modul.

Na slici 9 dat je uporedni prikaz tangenčnih napona u oblozi dobijenih proračunom na 2D modelu i uprošćenim postupkom proračuna u jednom koraku na datom 3D modelu konačnih elemenata (u segmentu 4). Kao što se vidi dobijeni rezultati se neznatno razlikuju.

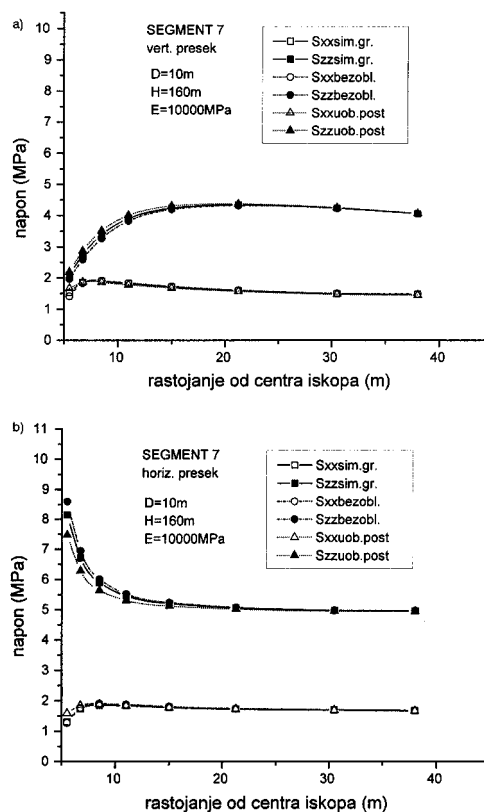
Stanje napona u stenskoj masi oko tunelskog otvora prikazano je preko niza dijagrama horizontalnih i vertikalnih normalnih napona S_{xx} i S_{zz} na vertikalnom preseku kroz teme tunela i horizontalnom preseku kroz bokove tunela.



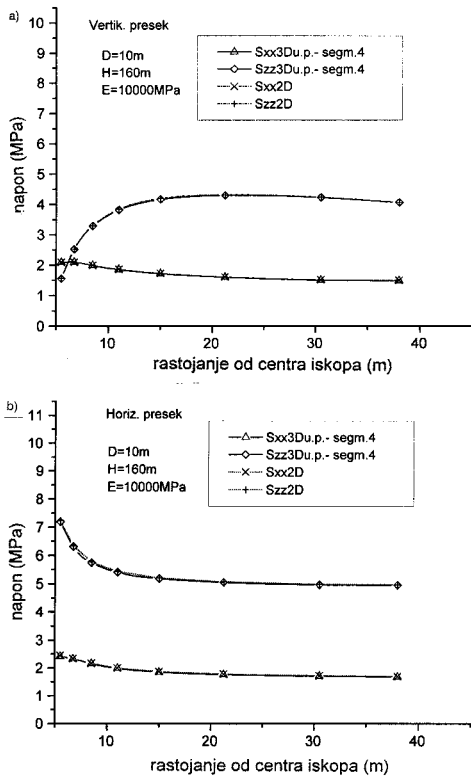
Slika 10. Vertikalni (S_{zz}) i horizontalni (S_{xx}) normalni naponi u segmentu 4; a) u elementima na vertikalnom preseku kroz teme b) u elementima na horizontalnom preseku kroz bokove.

Na slici 10 dat je uporedni prikaz napona u stenskoj masi u segmentu 4 sračunatih primenom iterativnog postupka za simulaciju procesa izgradnje tunela i primenom uobičajenog, uprošćenog postupka proračuna (proračun se sprovodi u jednom koraku na datom 3D modelu konačnih elemenata), kao i napona određenih za slučaj tunela bez obloge. Na slici 11 prikazani su ovi naponi u segmentu 7 (nepodgrađeni segment). Sa datih dijagrama se vidi da se primenom postupka za simulaciju izgradnje dobijaju vrednosti napona u stenskoj masi koje se nalaze, prema očekivanjima, između vrednosti dobijenih uobičajenim, uprošćenim postupkom proračuna i vrednosti dobijenih za tunnel bez obloge. Zanimljivo je da se vrednosti napona na konturi obloge, dok su tangenčni naponi na konturi u horizontalnom preseku podcenjeni. Naponske promene su najveće u neposrednoj blizini konture iskopa i već na rastojanju od oko jednog dijametra otvora ovi naponi teže početnom primarnom stanju napona.

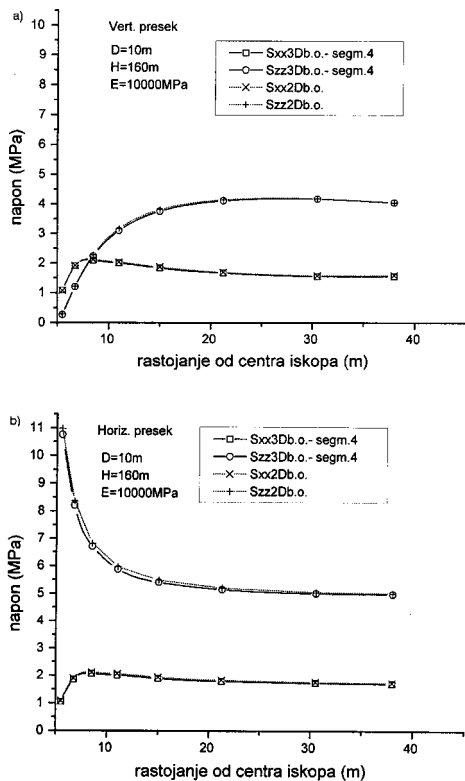
Na slikama 12 i 13 prikazani su naponi u stenskoj masi dobijeni 2D proračunom i uprošćenim proračunom u jednom koraku na 3D modelu konačnih elemenata za tunnel sa oblogom i bez obloge. Kao što se vidi dobijeni rezultati su gotovo identični.



Slika 11. Vertikalni (S_{zz}) i horizontalni (S_{xx}) normalni naponi u segmentu 7; a) u elementima na vertikalnom preseku kroz teme b) u elementima na horizontalnom preseku kroz bokove.



Slika 12. Uporedni dijagram vertikalnih (S_{zz}) i horizontalnih (S_{xx}) napona dobijenih proračunom na 2D modelu i uprošćenim postupkom u jednom koraku na 3D modelu (segment 4); a) na vertikalnom preseku kroz temu, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.



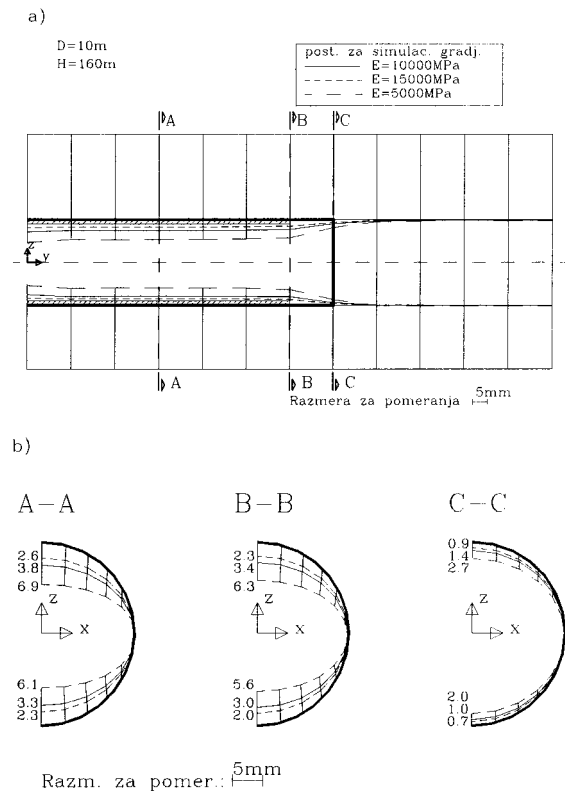
Slika 13. Uporedni dijagram vertikalnih (S_{zz}) i horizontalnih (S_{xx}) napona dobijenih proračunom na 2D i 3D modelu (segment 4) za tunel bez obloge; a) na vertikalnom preseku kroz temu, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.

4. PARAMETARSKJE STUDIJE

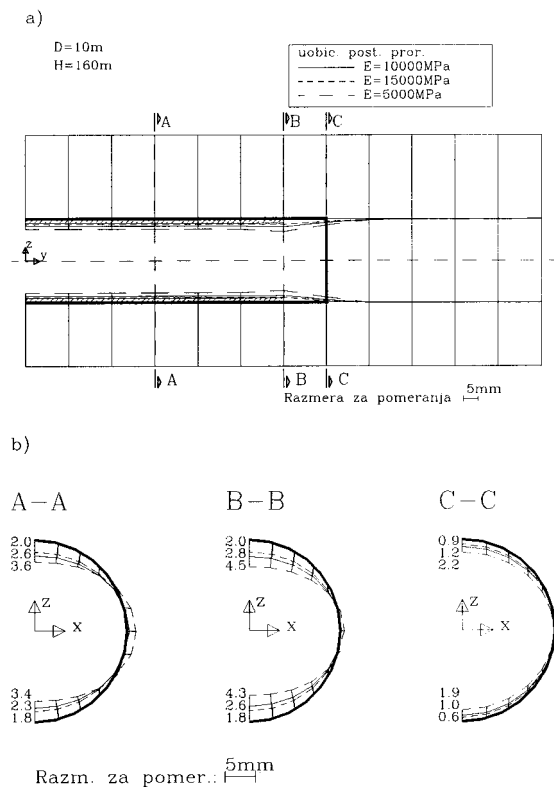
4.1. Uticaj modula elastičnosti stenske mase

Na slici 14 prikazana su pomeranja konture iskopa sračunata primenom iterativnog postupka simulacije napredovanja izgradnje za različite module elastičnosti stenske mase. Na slici 15 prikazana su pomeranja dobijena primenom uobičajenog, uprošćenog postupka proračuna u jednom koraku na datom 3D modelu konačnih elemenata, a na slici 16 pomeranja sračunata za tunel bez obloge. Tunel je prečnika $D = 10$ m, sa visinom nadsloja od $H_0 = 160$ m. Kao što se vidi iz datih dijagrama pomeranja konture iskopa u značajnoj meri zavise od modula elastičnosti odnosno deformabilnosti stenske mase. Isto važi i za napone u oblozi što se može videti sa dijagrama prikazanih na slikama 7 i 8.

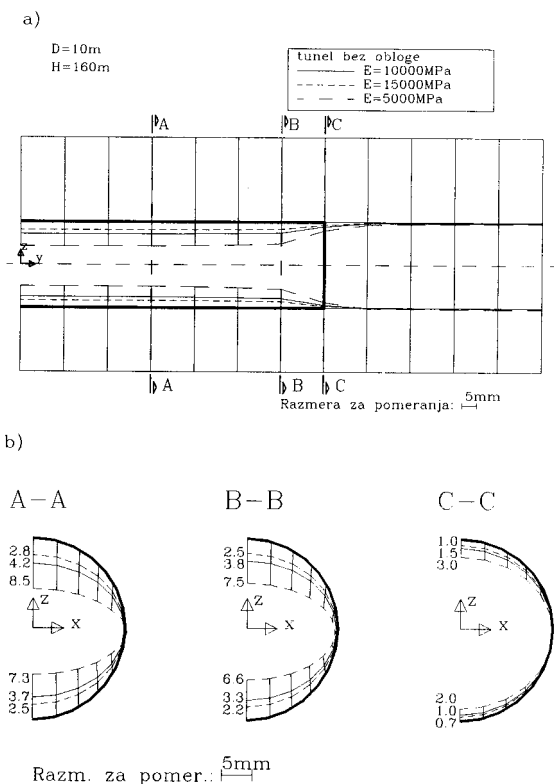
Na slikama 17 i 18 su prikazani naponi u stenskoj masi u segmentima 4 i 7 sračunati primenom metode za simulaciju procesa izgradnje za različite module elastičnosti stenske mase. Iz datih dijagrama se može zaključiti da naponi u stenskoj masi ne zavise značajno od E -modula. U slučaju tunela bez obloge za različite vrednosti E -modula dobijene su apsolutno identične vrednosti napona u stenskoj masi, što odgovara teorijskom rešenju za sekundarne napone oko kružnog otvora (Kirsch-ovo rešenje) u kome naponi u stenskoj masi nisu funkcija modula elastičnosti. Međutim, kao



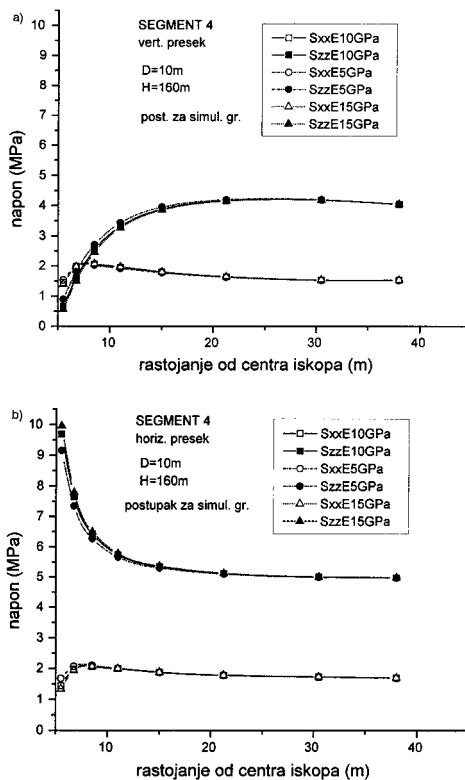
Slika 14. Pomeranja konture iskopa dobijena primenom postupka za simulaciju gradnje za različite E -module; a) u vertikalnoj ravni simetrije b) u presecima.



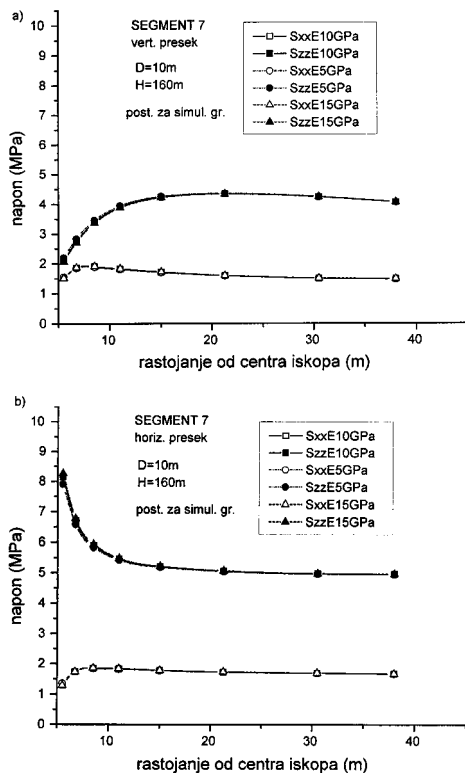
Slika 15. Pomeranja konture iskopa tunela dobijena primenom uobicajenog, uprošćenog postupka proračuna u jednom koraku za različite E module; a) u vertikalnoj ravni simetrije, b) u presecima.



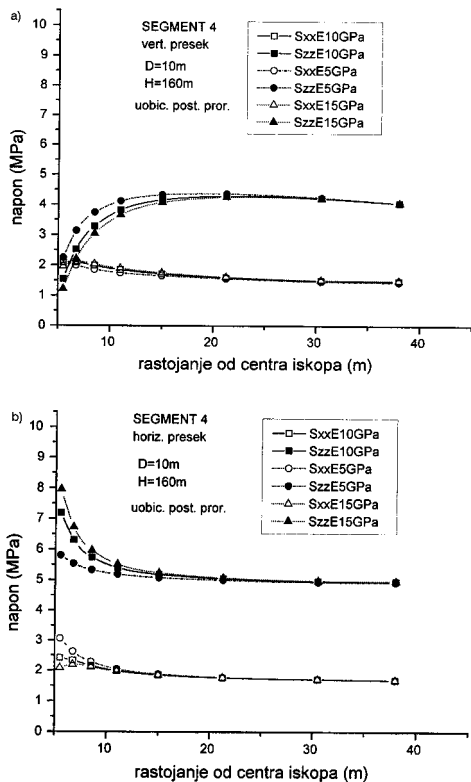
Slika 16. Pomeranja konture iskopa tunela bez obloge za različite E-module; a) u vertikalnoj ravni simetrije, b) u presecima.



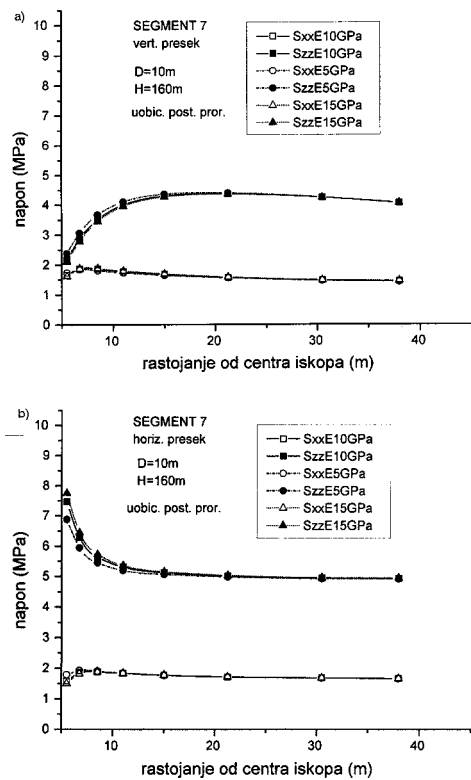
Slika 17. Dijagram vertikalnih (Szz) i horizontalnih (Sxx) normalnih napona u stenskoj masi u segmentu 4 dobijenih postupkom za simulaciju gradnje za različite E module; a) na vertikalnom preseku kroz teme, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.



Slika 18. Dijagram vertikalnih (Szz) i horizontalnih (Sxx) normalnih napona u stenskoj masi u segmentu 7 dobijenih postupkom za simulaciju gradnje za različite E module; a) na vertikalnom preseku kroz teme, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.



Slika 19. Dijagram vertikalnih (S_{zz}) i horizontalnih (S_{xx}) normalnih napona u stenskoj masi u segmentu 4 dobijenih uobičajenim postupkom proračuna za različite E module; a) na vertikalnom preseku kroz teme, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.



Slika 20. Dijagram vertikalnih (S_{zz}) i horizontalnih (S_{xx}) normalnih napona u stenskoj masi u segmentu 7 dobijenih uobičajenim postupkom proračuna za različite E module; a) na vertikalnom preseku kroz teme, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.

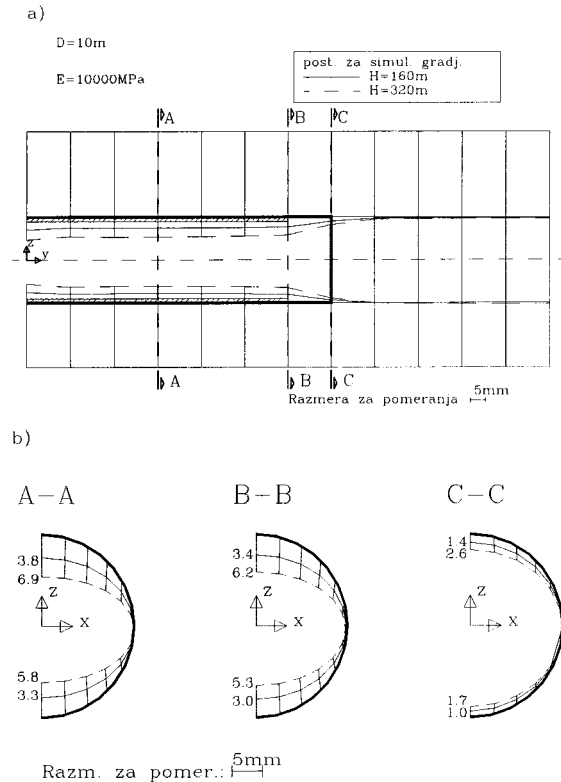
što se vidi sa slika 19 i 20 naponi u stenskoj masi sračunati za tunel sa oblogom primenom uobičajenog, uprošćenog postupka proračuna (u jednom koraku) zavise od modula elastičnosti stenske mase što se može objasniti time da se u ovom proračunu radi uz zane-marivanje činjenice da se značajan deo deformacija konture dešava kao slobodna deformacija pre postavljajnja podgradne betonske konstrukcije.

4.2. Uticaj visine nadsloja

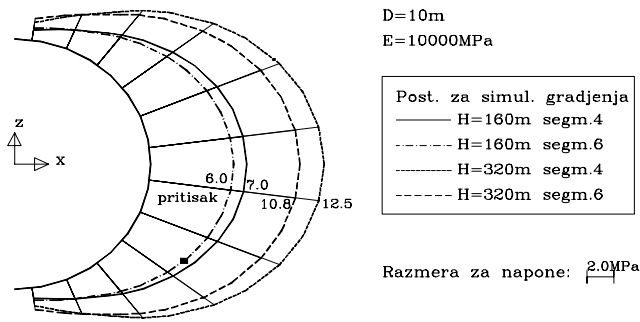
Na slici 21 dat je uporedni dijagram pomeranja konture iskopa sračunatih primenom postupka za simulaciju procesa izgradnje tunela za visinu nadsloja od $H_0 = 160$ m i $H_0 = 320$ m u stenskoj masi modula elastičnosti $E = 10000$ MPa. Kao što se vidi, većoj visini nadsloja odgovaraju i veća pomeranja konture iskopa.

Što se tiče napona u oblozi, osim od modula elastičnosti stenske mase, oni značajno zavise i od visine nadsloja stene. Na slici 22 dat je uporedni prikaz tangenitnih napona u oblozi u segmentima 4 i 6 dobijenih primenom postupka za simulaciju procesa izgradnje tunela za visine nadsloja od $H_0 = 160$ m i $H_0 = 320$ m. Kao što se i moglo očekivati većoj visini nadsloja odgovaraju veći naponi u podgradnoj betonskoj tunelskoj konstrukciji.

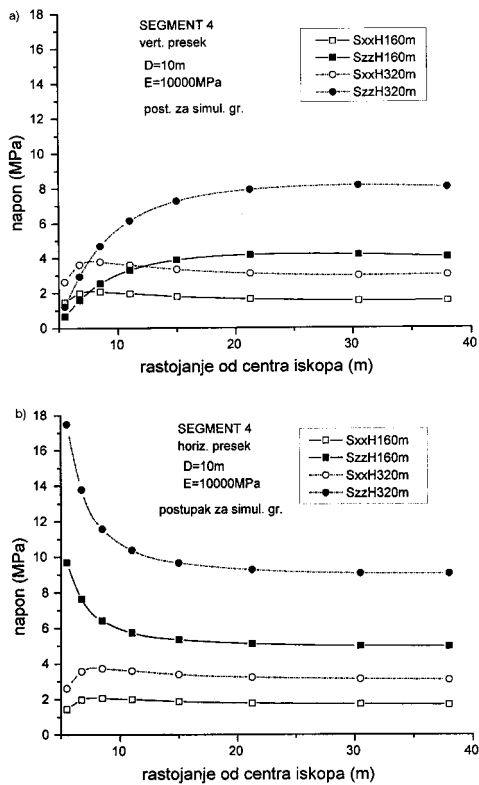
Naponi u stenskoj masi dominantno su funkcija visine nadsloja. To se jasno vidi sa dijagrama na slika-



Slika 21. Pomeranja konture iskopa tunela dobijena primenom postupka za simulaciju građenja za različite visine nadsloja; a) u vertikalnoj ravni simetriji, b) u presecima.



Slika 22. Uporedni dijagram tangenčnih napona u oblozi tunele dobijenih primenom postupka za simulaciju gradjenja za različite visine nadsloja

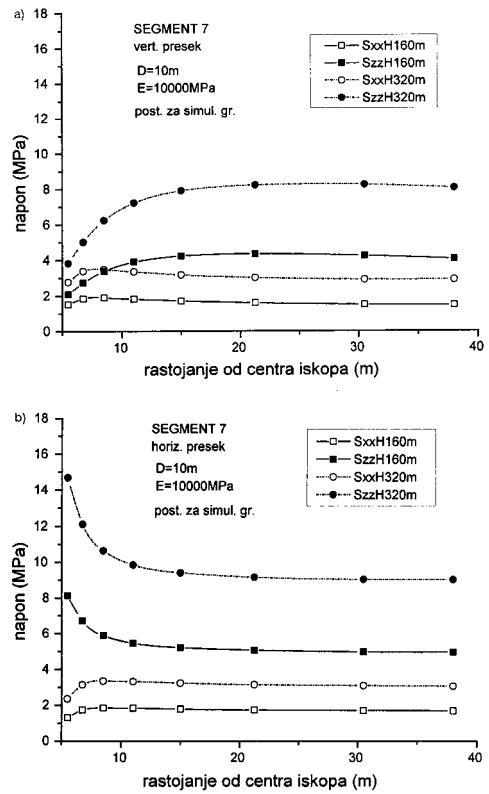


Slika 23. Uporedni dijagram vertikalnih (S_{zz}) i horizontalnih (S_{xx}) normalnih napona u stenskoj masi u segmentu 4 dobijenih postupkom za simulaciju gradjenja za različite visine nadsloja; a) na vertikalnom preseku kroz teme, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.

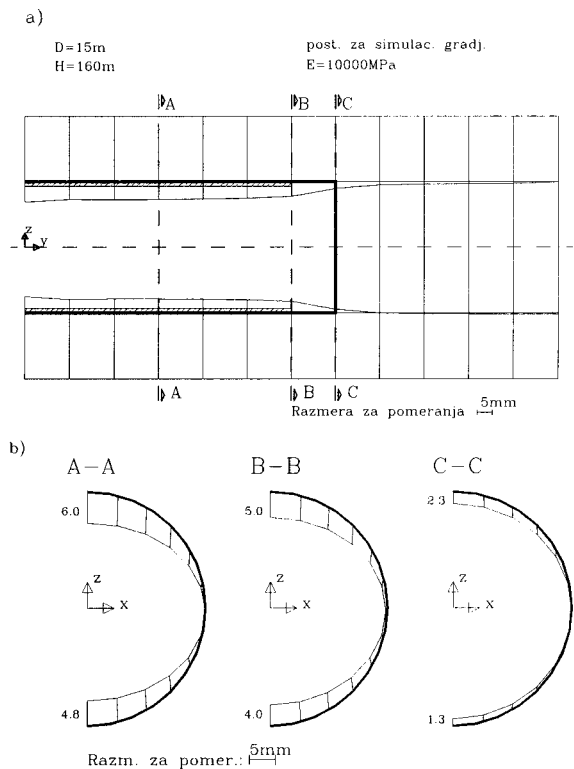
ma 23 i 24 na kojima su prikazani naponi u stenskoj masi u segmentima 4 i 7 dobijeni iterativnim postupkom simulacije izgradnje tunele za visine nadsloja od $H_0 = 160$ m i $H_0 = 320$ m. Većoj visini nadsloja odgovaraju veći naponi u stenskoj masi.

4.3. Uticaj dimenzija otvora

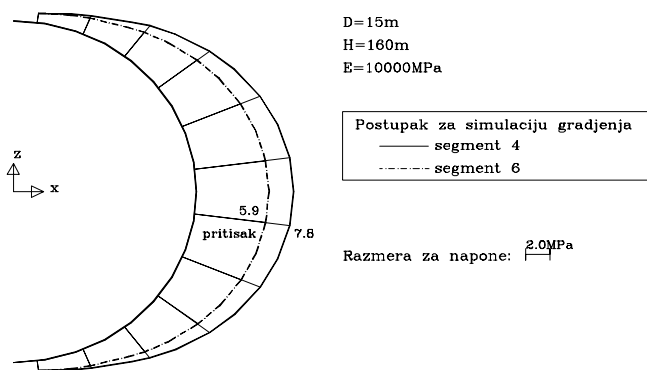
Na slici 25 prikazana su pomeranja konture iskopa za tunel prečnika $D = 15$ m u stenskoj masi modula elastičnosti $E = 10000$ MPa sračunata primenom iterativnog postupka za simulaciju gradjenja. Prema očekivanjima, dobijena pomeranja konture iskopa su veća od pomeranja sračunatih za tunel prečnika 10 m.



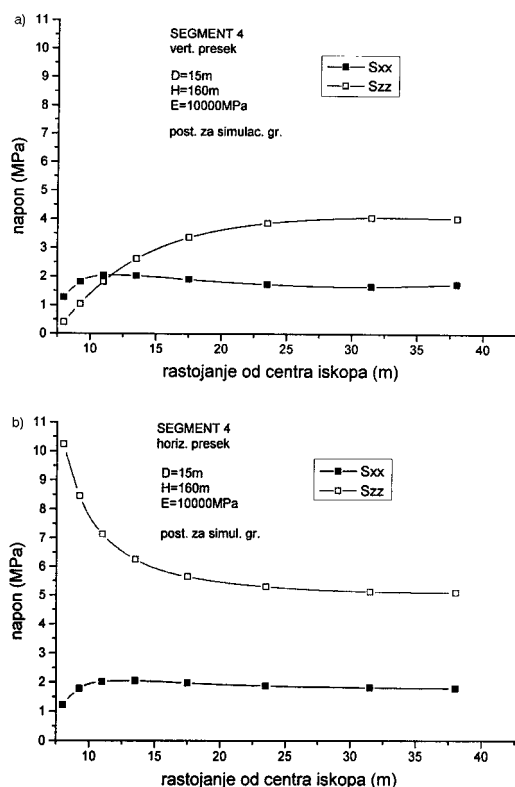
Slika 24. Uporedni dijagram vertikalnih (S_{zz}) i horizontalnih (S_{xx}) normalnih napona u stenskoj masi u segmentu 7 dobijenih postupkom za simulaciju gradjenja za različite visine nadsloja; a) na vertikalnom preseku kroz teme, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.



Slika 25. Pomeranja konture iskopa tunele $D = 15$ m, $E = 10000$ MPa dobijena primenom postupka za simulaciju gradjenja; a) u vertikalnoj ravni simetrije, b) u presecima.

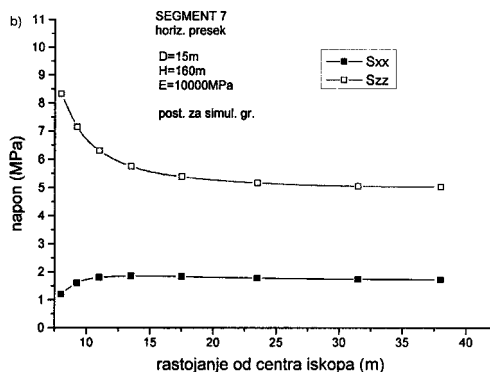
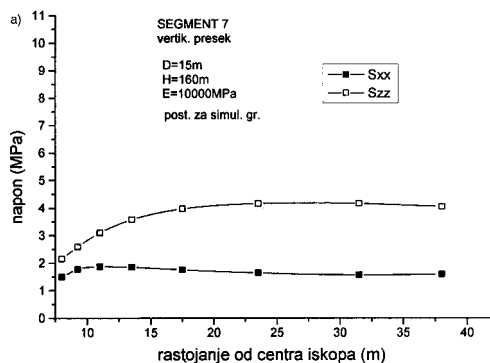


Slika 26. Tangentni naponi u oblozi tunela prečnika $D = 15$ m dobijeni primenom postupka za simulaciju gradjenja



Slika 27. Vertikalni (S_{zz}) i horizontalni (S_{xx}) normalni naponi u stenskoj masi u segmentu 4 dobijeni postupkom za simulaciju gradjenja za tunel prečnika $D = 15$ m; a) na vertikalnom preseku kroz teme, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.

Tangentni naponi u oblozi tunela, međutim, u manjoj meri zavise od prečnika tunela. Na slici 26 dat je dijagram tangentialnih napona u oblozi tunela prečnika $D = 15$ m (u segmentima 4 i 6) u stenskoj masi modula elastičnosti $E = 10000$ MPa i visinom nadsloja od $H_0 = 160$ m dobijenih iterativnim postupkom proračuna. Može se uočiti da su maksimalni naponi u oblozi nešto veći za veći prečnik tunela, odnosno upoređivanjem sa tunelom prečnika $D = 10$ m dobija se da je u segmentu 4 maksimalni tangentialni napon veći za 12%,



Slika 28. Vertikalni (S_{zz}) i horizontalni (S_{xx}) normalni naponi u stenskoj masi u segmentu 7 dobijeni postupkom za simulaciju gradjenja za tunel prečnika $D = 15$ m; a) na vertikalnom preseku kroz teme, b) na horizontalnom preseku kroz bokove.

dok su u segmentu 6 dobijeni maksimalni tangentialni naponi gotovo identični.

Na slikama 27 i 28 prikazani su naponi u stenskoj masi modula elastičnosti $E = 10000$ MPa, u segmentima 4 i 7, sračunati primenom postupka simulacije procesa izgradnje za tunel prečnika $D = 15$ m. Može se uočiti da naponi u stenskoj masi ne zavise značajno od prečnika tunela.

5. ZAKLJUČCI

U radu su prikazani rezultati serije proračuna metodom konačnih elemenata naponsko-deformacionih stanja u oblozi i stenskoj masi na osnovu kojih se mogu izvesti sledeći zaključci.

Značajan procenat konačnih pomeranja evidentan je već na nepodgrađenom delu na radnom čelu tunela. Dakle na radnom čelu tunela dolazi do delimične relaksacije napona i ovo se uzima u obzir u primenjenom iterativnom postupku u kome se obloga postavlja na već deformisanu površinu iskopa. U skladu sa tim pomeranja konture iskopa sračunata primenom iterativnog postupka za simulaciju procesa izgradnje tunela su znatno veća od pomeranja sračunatih primenom uobičajenih, uprošćenih postupaka proračuna u jednom koraku, dok su naponi u oblozi značajno manji. Razlog za podcenjene vrednosti pomeranja konture i precenjene vrednosti napona u

oblozi tunela u uobičajenim postupcima proračuna je to što je obloga već prisutna kad počnu deformacije tunela pa obloga preuzima deformacije koje su se u stvari desile pre postavljanja obloge. Poređenje rezultata proračuna u jednom koraku na datom 3D modelu konačnih elemenata i proračuna na 2D modelu (jedan odsečak elemenata) pokazuje da su dobijeni rezultati gotovo identični. Dok uobičajeni, uprošćeni postupci proračuna daju napone u oblozi koji su nerealno veliki ali su na strani sigurnosti, to nije slučaj sa naponima u stenskoj masi. Zanimarivanje relaksacije stenske mase u uobičajenim postupcima proračuna daje preceñjene vrednosti radijalnih, a podceñjene vrednosti tangentnih napona u stenskoj masi na konturi tunela u bokovima, odnosno daje niže vrednosti devijatora napona od realnih što je od značaja za ocenu pojava plastifikacije u stenskoj masi. Sprovedene 3D analize su pokazale i da je obloga tunela izložena naponima zatezanja u podužnom pravcu u kaloti i invertu čime se mogu objasniti neki slučajevi u praksi (npr. HE Bekhme, Iraq) gde su se javile pukotine zatezanja upravne na osu tunela. Na osnovu izloženog može se zaključiti da je za adekvatnu analizu naponsko–deformacijskih stanja u oblozi i stenskoj masi neophodna primena 3D numeričkih modela uz simulaciju napredovanja izgradnje tunela.

Sprovedene parametarske studije su pokazale da pomeranja konture iskopa i naponi u oblozi tunela u značajnoj meri zavise od modula elastičnosti stenske mase. Naponi u stenskoj masi, međutim, ne zavise značajno od E modula (što su pokazali proračuni sprovedeni primenom iterativnog postupka dok uobičajeni postupci proračuna pokazuju zavisnost napona u stenskoj masi od E modula) i dominantno su funkcija visine nadsloja. Visina nadsloja stene ima značajan uticaj i na stanje napona u oblozi i pomeranja konture iskopa tunela. Što se tiče dimenzija tunela, naponi u oblozi tunela i naponi u stenskoj masi ne zavise zna-

čajno od prečnika tunela, a pomeranja konture iskopa su veća kod tunela većeg prečnika.

Numeričke analize prikazane u ovom radu pokazale su da je moguće sprovesti simulaciju procesa izgradnje tunela standardnim, komercijalnim MKE softverom međutim to zahteva veliki utrošak ljudskog rada i vremena rada računara. S obzirom da su 3D analize još uvek suviše skupe i iziskuju značajan proračunski napor njihova primena u svakodnevnoj inženjerskoj praksi je u velikoj meri ograničena. Može se očekivati da će sa razvojem računarske tehnike i naročito specijalizovanih programskih paketa koji će biti na raspolaganju inženjerima, 3D analize tunela iz akademske preći u inženjersku praksu.

LITERATURA

- [1] Goodman, R.E.: Introduction to Rock Mechanics, John Wiley&Sons 2 (1989).
- [2] Hoek, E., Brown, E.T.: Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London (1980).
- [3] Kielbassa, S., Duddeck, H.: "Stress–Strain Fields at the Tunnelling Face – Three–dimensional Analysis for Two–dimensional Technical Approach", Rock Mechanics and Rock Engineering 24, 115–132 (1991).
- [4] Lama, R. and Vutukuri, V.S.: Handbook on Mechanical Properties of Rock, Vol. III, Trans Tech Publications, Clausthal (1978).
- [5] Maraš S.: "Analiza interakcije horizontalne tunelske konstrukcije i stenske mase", Magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd (1997).
- [6] Pande, G.N., Beer, G., Williams, J.R.: Numerical Methods in Rock Mechanics, John Wiley & Sons, Chichester (1990).
- [7] SAP90 – A Series of Computer Programs for the Finite Element Analysis of Structures, Structural Analysis Verification Manual, Computer & Structures Inc., Berkeley (1990).
- [8] Wittke, W.: Rock Mechanics – Theory and Applications with Case Histories, Springer–Verlag, Berlin (1990).