

RAZVOJ PROGRAMSKOG SISTEMA *GeoData1*: GEOMEHANIČKI POKAZATELJI SVOJSTAVA TLA

Miroljub Samardaković

Rezime: Opisan je originalan programski sistem za obradu i prikazivanje geomehaničkih pokazatelja svojstava tla, određenih terenskim i laboratorijskim opitima, za pomoć geotehničkim specialistima u izboru računskog modela tla. Analizirani su moguća uloga, potencijali i pravci daljeg razvoja sistema.

Ključne reči - ekspertni sistemi; mehanika tla; terenska istraživanja; laboratorijska ispitivanja.

Resyme - A knowledge-based (expert) system is described which can be used to assist with the interpretation of geomechanical data determined by site and laboratory tests. It can help a geotechnical specialist to create a model of the ground conditions. The role and potential of the system are discussed.

Keywords - knowledge-based systems; soil mechanics; site investigation; laboratory tests.

1 UVOD

Zadaci u građevinarstvu ne rešavaju se samo proračunima već i na osnovu ideja, koncepata, zaključivanja i akumuliranja iskustva, što se ne može iskazati numerički. Stručnjaci ističu da je građevinska geotehnika područje građevinarstva u kome su najizraženiji zahtevi za ovakvim kreativnim inženjerskim pristupom, zasnovanim na širokom teorijskom i stručnom znanju. Time je, u skladu sa savremenim tehničko-informacionim mogućnostima, istaknuta i potreba za razvojem i primenom ekspertnih sistema u geotehnici, koji i nastaju poslednjih godina.

Ekspertni sistem čine kompjuterski programi koji sadrže specifična saznanja (teorijske i empirijske činjenice i/ili postupke za dolaženje do nekih saznanja) i koriste izdvojene postupke zaključivanja za manipulaciju tim saznanjima u cilju rešavanja realnog zadatka.

Za razliku od konvencionalnih programa, koji deluju kroz numeričke procese a saznanja i kontrole su integrisani (proceduralno programiranje), ekspertni sistemi su orijentisani ka simboličkim procesima a baza saznanja je

odvojena od programiranja (deklarativno programiranje), čime su omogućene izmene i dopune baze bez bitnog uticaja na program.

U opštem slučaju, ekspertni sistem (u poslednje vreme zvan *knowledge-based* sistem) čine tri osnovne komponente:

- a) *baza znanja*, koja sadrži informacije iz domena rada sistema (definicije, činjenice, pravila sa datim rešenjima ili za traženje rešenja),
- b) *kontekst* (smešten u *radnu memoriju*), koji sadrži sve informacije o zadatku koji treba da bude rešen, informacije koje definišu parametre zadatka, kao i tekuće informacije na svakom stupnju procesa rešavanja zadatka,
- c) *mehanizam zaključivanja*, koji kontroliše proces zaključivanja koristeći *bazu znanja* za izmenu i proširenje *konteksta* u cilju rešenja zadatka.

Uz dodatne komponente (interfejs, help) korišćenje baze znanja i celog sistema može biti znatno olakšano.

Pregled i ocene većeg broja geotehničkih ekspertnih sistema u okviru kojih je urađeno više disertacija, razvijenih u poslednjoj deceniji, daju

npr. Moula, Toll, Vaptismas(1995). Oni ističu da ekspertni sistemi prevazilaze ograničenja konvencionalnog programiranja ali da u geotehničkom inženjerstvu još uvek nisu razvijeni do nivoa pogodnog za distribuciju radi praktične upotrebe.

Kompatibilni sistemi *GeoData1* (određivanje i prikaz geomehaničkih *pokazatelja svojstava tla* u slojevima terena) i *GeoData2* (*proračuni i ocena ponašanja tla* kao dela građevinskog objekta) razvijani su od strane autora njihovog pregleda u ovoj svesci, u periodu od 1990. Njihove *baze znanja* i *mehanizmi zaključivanja* usklađeni su sa savremenim naučnim saznanjima, stručnom praksom i jugoslovenskom tehničkom regulativom (popravljenom i dopunjenom na osnovu inostranih regulativa) u ovim oblastima. *Kontekst* sistema *GeoData1* je razvijen tako da se u programe unose samo zadate i *neposredno* izmerene veličine (na terenu ili u laboratoriji), iz čega automatski slede rezultati u vidu tabela i dijagrama sa očitanim karakterističnim veličinama, statistička obrada i ocene rezultata i dr.

Nedavni prikaz sličnog sistema grupe zapaženih stranih autora (Toll,1995) pokazuje da on ima nešto širi ali vrlo sličan koncept i prikaz rezultata kao sistem *GeoData1*, kojim su obuhvaćena uobičajena terenska istraživanja i ispitivanja, sva konvencionalna laboratorijska ispitivanja tla, kao i numerički i grafički prikaz pokazatelja svojstava tla u slojevima i terena u celini.

GeoData1 i *2* se razvijaju na PC-računaru, u Windows operativnom sistemu, koristeći računske i grafičke mogućnosti paketa *Excel* (Microsoft) uz pomoć jezika *Visual Basic*. U toku nekoliko godina, verzije ovih sistema su uspešno primenjene u geotehničkim elaboratima, ekspertizama i studijama za nekoliko desetina objekata i usavršavaju se u skladu sa novim saznanjima.

2 BAZA ZNANJA SISTEMA

Napred definisanu *bazu znanja* u sistemu *GeoData1* čine tri komponente: (a) *baza opštih znanja* sa informacijama o tipičnim opsezima geotehničkih parametara za klasifikacije u pogledu sastava, stanja i podobnosti tla za određene

namene, (b) *baza znanja o opitima*, terenskim i laboratorijskim, i njihovoj pogodnosti za određene vrste i namene tla, i (c) *baza parametara korelacije* ili teorijskih veza između pokazatelja dobijenih opitima.

3 ODREĐIVANJE POKAZATELJA

Određivanje i ocena geomehaničkih pokazatelja svojstava tla u slojevima terena vrše se automatskom obradom veličina neposredno zadatih i izmerenih geomehaničkim opitima, i to:

terenska ispitivanja

- za procenu mehaničkih svojstava*
 - opit standardne penetracije (SPT)
- za kontrolu zbijenosti*
 - opit kružnom pločom

laboratorijska ispitivanja

- pokazatelji fizičkih svojstava*
 - vlažnost
 - gustine u prirodnom i suvom stanju
 - gustina zrna i specifična težina
 - koeficijent poroznosti
- klasifikacioni pokazatelji i klasifikacija tla*
 - granulometrijski sastav
 - granice i stanje konsistencije
 - jedinstvena (AC) klasifikacija
- pokazatelji mehaničkih svojstava*
 - deformabilnost
 - stišljivost i konsolidacija u edometru
 - pri triaksijalnoj kompresiji
 - čvrstoća i parametri čvrstoće
 - pri direktnom smicanju
 - pri triaksijalnoj kompresiji
- pokazatelji uslova zbijanja ili zbijenosti*
 - pri min i max poroznosti nekoherentnog tla
 - po Proctor-u
 - CBR.

U napred definisani *kontekst* sistema *GeoData1* unose se zadate i veličine neposredno izmerene jednim opitom ili grupom opita, kao i oficijelni podaci o mernom mestu ili ispitanoj uzorku. Kod pojedinih opita i pokazatelja, zbog mnoštva ulaznih, tekućih i izlaznih podataka (mogućih i potrebnih) trebalo je izvršiti *racionalan izbor podataka i formu prikaza* u skladu sa potrebama

sistema *GeoData2* i/ili drugih korisnika. To je nametnulo potrebu detaljnog i kritičkog uporednog proučavanja domaće i inostrane geotehničke regulative (grupe standarda JUS, DIN, BS, ASTM i drugih) i odgovarajuće literature o ispitivanjima, konvencionalnim (Bowles, 1978, Vickers, 1978, Liu, Evett, 1984, Head, 1984, 1988) i savremenim (Yong, Townsend, 1986, Donaghe, Chaney, Silver, 1988, Cassan, 1988).

Na osnovu svih saznanja odabrani su sadržaji i forme prikazivanja rezultata opita pojedinačno, koji bi mogli biti uzeti u razmatranje pri nedavno nastavljenom postupku izmena i dopuna geomehaničkih standarda grupe JUS U.B1.

Važnije napomene i prikaz nekih rešenja daju se u nastavku ovog članka.

Opit standardne penetracije (SPT)

Izmerenu vrednost otpora (N) program koriguje zbog primene konusa, zbog uticaja dubine mernog mesta i podzemne vode, primenom savremenih korelacija određuje indeks gustine, efektivan ugao unutrašnjeg trenja i, zavisno od vrste i stanja (zbijenosti) tla, područja ekvivalentnih veličina otpora pri statičkoj penetraciji, modula stišljivosti u edometru i ekvivalentnih modula elastičnosti za uslove sa dreniranjem i (u zasićenoj glini) bez dreniranja.

Opit kružnom pločom i kontrola zbijenosti

Za primenjeni tip opita, zadati kriterijum zbijenosti i izmerena pomeranja program određuje i ocenjuje veličine sleganja (položaj krive) i modula stišljivosti i, po potrebi, crta dijagram sleganja. Ponavljanjem za druga merna mesta na sloju dobija se tabela sa svim podacima o mernim mestima, izmerenim i zahtevanim veličinama i, ugrađenom statističkom obradom, procena ostvarene vrednosti u sloju (kao populaciji). Odgovarajućim povezivanjem dobija se jedinstven pregled za objekat sa više ispitanih slojeva.

Pokazatelji fizičkih svojstava

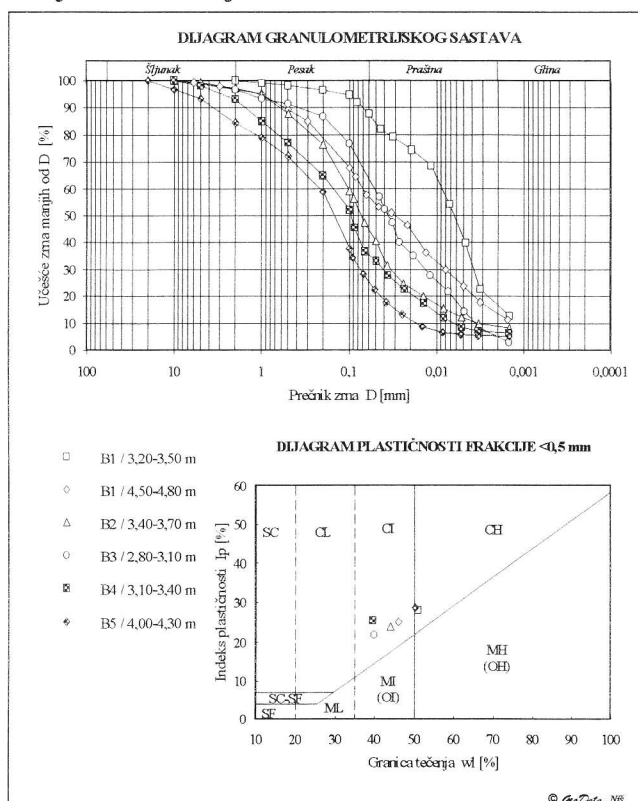
Unošenjem izmerenih veličina za urađene opite na pojedinim uzorcima iz jednog sloja tla dobija se jedinstvena tabela sa napred navedenim pokazateljima za sve uzorke i statističko očekivanje vrednosti u sloju u celini.

Granulometrijski sastav

Za veličine izmerene metodom prosejavanja i/ili areometrisanja, unete u jedinstven program sa ugrađenim svim korekcijama (zbog temperature i dr.), dobija se *dijagram granulometrijskog sastava* (Sl.1) sa automatski određenim i tabelarno prikazanim veličinama potrebnim za klasifikaciju tla (širinom najvećeg zrna, učešćem osnovnih frakcija, veličinama karakterističnih prečnika, koeficijenti-ma neravnomernosti zrna i zakrivljenosti krive). Zbog preglednosti, na dijagramu se prikazuje do 6 krivih a postoje i verzije sa graničnim krivama zone podobnog sastava za određene namene tla.

Granice i stanje konsistencije

Za unete veličine koje se mere u toku opita za određivanje granica tečenja i plastičnosti, i za prirodnu vlažnost tla, program crta *dijagram plastičnosti* (Sl.1) sa markerima koji prikazuju ispitane probe frakcije $D < 0,5$ mm, kao i tabelu sa veličinama granica konsistencije i indeksima plastičnosti i konsistencije, potrebnih za klasifikaciju u pogledu plastičnosti (sastava) i stanja konsistencije tla.



Sl.1 - Klasifikacioni pokazatelji

Jedinstvena (AC) klasifikacija tla

Na osnovu ugrađene *baze znanja* sa kriterijumima za kvantitativnu klasifikaciju i *konteksta* sa napred određenim pokazateljima granulometrijskog sastava i plastičnosti, kao i ugrađenog *mehanizma zaključivanja*, program u tabeli koja ovde nije prikazana vrši automatsku klasifikaciju ispitanih uzoraka, dajući im AC-naziv i simbol, kao i naziv stanja konsistencije ako je tlo sitnozrno. U tabeli sa klasifikacijom vrši se i statistička obrada svih pokazatelja i daje očekivanje za sloj u celini.

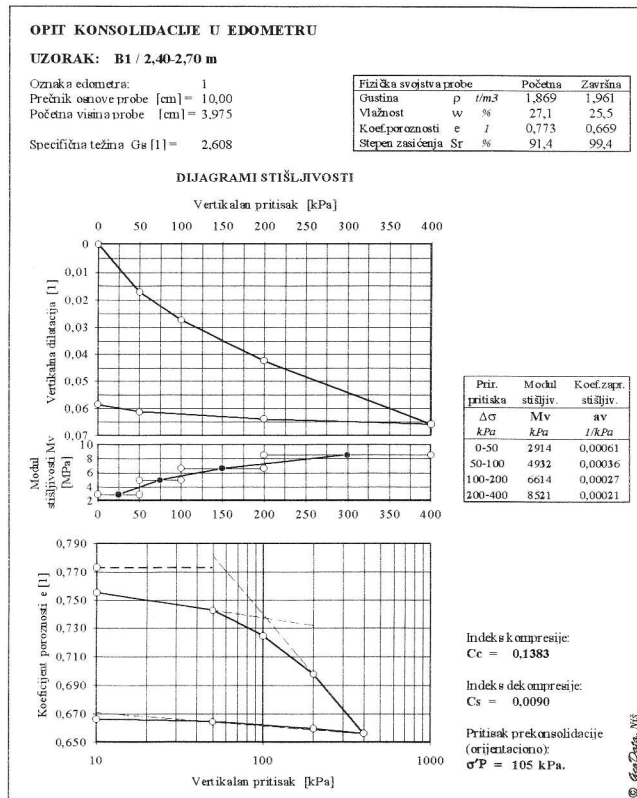
Za primer sa Sl.1, poslednja dva uzorka klasifikovana su kao široko i dobro građurani zaglinjeni peskovi (SC), sa vezivom ($D < 0,5$ mm) od srednje- do visoko-plastične gline (CI/CH), dok su ostali uzorci klasifikovani jednako kao vezivo na Sl.1.

Deformabilnost tla

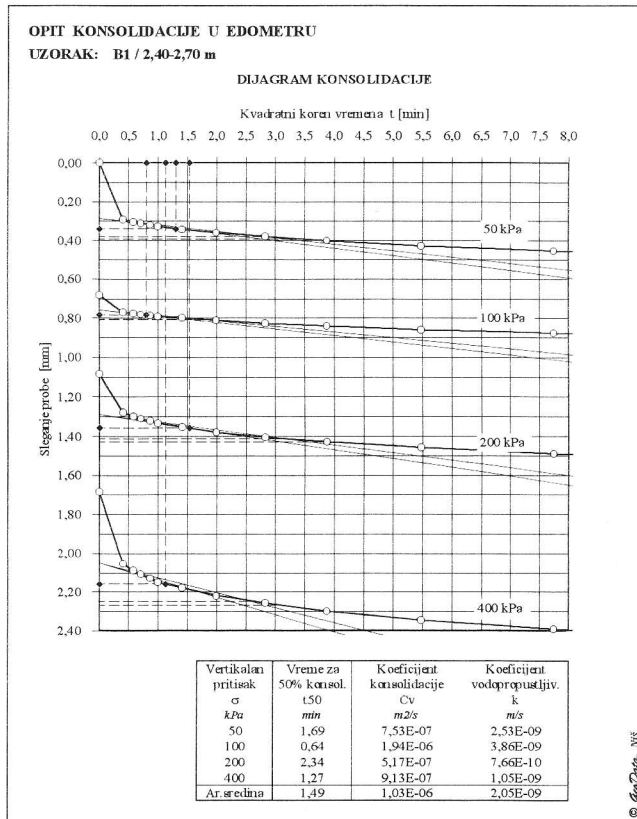
Sistem sadrži programe za obradu, analizu i prikaz rezultata ispitivanja stišljivosti i konsolidacije u uslovima sa sprečenim bočnim deformisanjem (u edometru) i delimično sprečenim bočnim deformisanjem (konstantnim radijalnim pritiskom u ćeliji traksijalnog aparata).

Za unete veličine sleganja probe u edometru za standardne intervale vremena, uz početnu i krajnju masu, geometriju i G_s probe, automatski se dobijaju *pokazatelji stišljivosti* (Sl.2) u vidu dijagrama veze vertikalnih napona i dilatacija tj. koeficijenta poroznosti, dijagrama modula deformacije-stišljivosti (M_v , a_v), njima određenih vrednosti indeksa kompresije (C_c) i dekompresije (C_s), kao i pritiska prekonsolidacije. Za iste unete podatke prikazuju se i *pokazatelji konsolidacije* odnosno vremenski tok sleganja dijagramima ($\Delta h, \sqrt{t}$) sa vrednostima koeficijenta konsolidacije (c_v) i njemu ekvivalentnog koeficijenta vodopropustljivosti pri datoj vlažnosti tla, za svaki stupanj vertikalnog opterećenja (Sl.3). Program sam nalazi tačke na pravolinijskom delu dijagrama i (metodom Taylor-a) vreme za 90 a zatim 50 % konsolidacije i njemu odgovarajuće vrednosti.

Pokazatelji deformabilnosti pri triaksijalnoj kompresiji (ekvivalentni moduli elastičnosti tla za željene priraštaje devijatora) određuju se sa dijagrama deformacija do loma, prema Sl.5.



Sl.2 - Pokazatelji stišljivosti u edometru

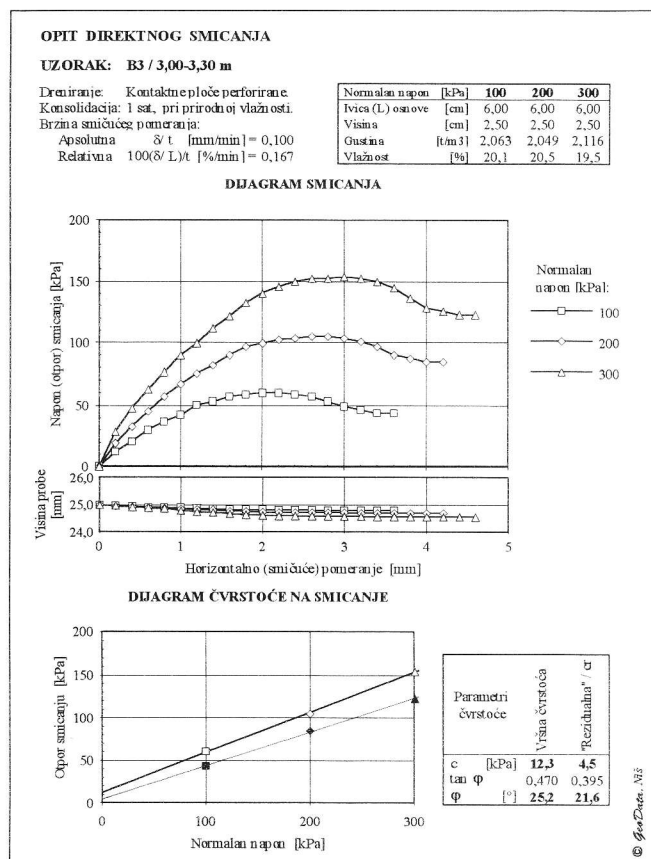


Sl.3 - Pokazatelji konsolidacije u edometru

Čvrstoća i parametri čvrstoće tla

Programi sistema automatski obrađuju i prikazuju rezultate opita direktnog smicanja i loma triaksijalnom kompresijom, za konvencionalne kombinacije uslova konsolidacije probe i uslova dreniranja u fazi loma.

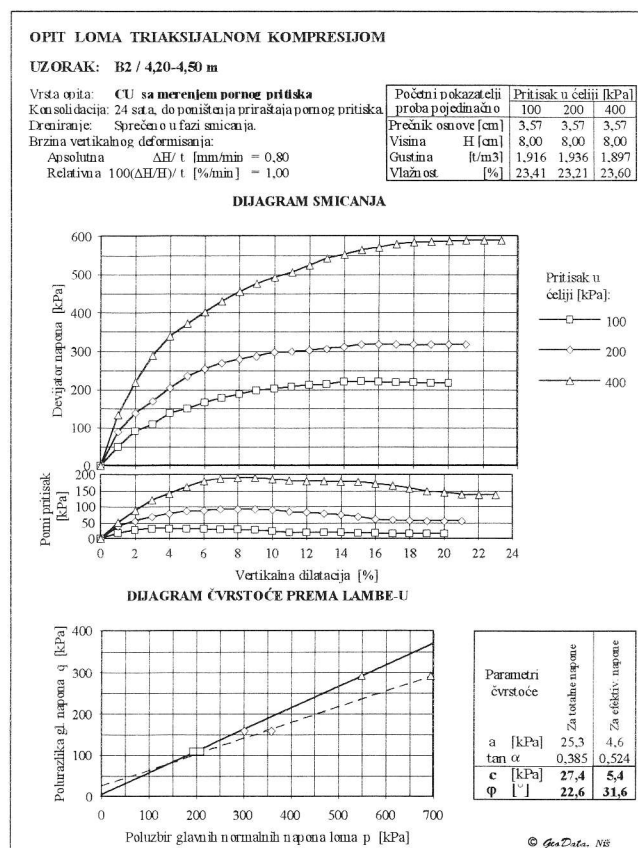
Za opit direktnog smicanja, preko unetih pomeranja očitanih sa komparatera program prikazuje dijagrame smicanja i Coulomb-ove prave za vršnu i krajnju čvrstoću (Sl.4), sa parametrima čvrstoće (c, ϕ) za takve uslove.



Sl.4 - Pokazatelji čvrstoće pri direktnom smicanju

Za opite triaksijalne kompresije do loma, bez dreniranja (U,CU), po unošenju brzine vertikalnog pomeranja i očitanih veličina deformacije dinamometra i pornog pritiska za odabrane intervale vremena program iscrtava dijagrame promene napona (devijatorskog i pornog) u zavisnosti od vertikalne dilatacije, kao i dijagram čvrstoće prema Lambe-u, sa vrednostima parametara (c, ϕ) vršne i krajnje čvrstoće za totalne i efektivne napone (Sl.5). Po želji, program kreira i vrednosti koeficijenata pornih pritisaka (B

na početku konsolidacije, dijagram A i veličinu A_f pri lomu, prema Skempton-u), kao i ekvivalentne elastične konstante (E, ν) za željenu promenu devijatora pri primenjenim uslovima konsolidacije i dreniranja (Sl.5).



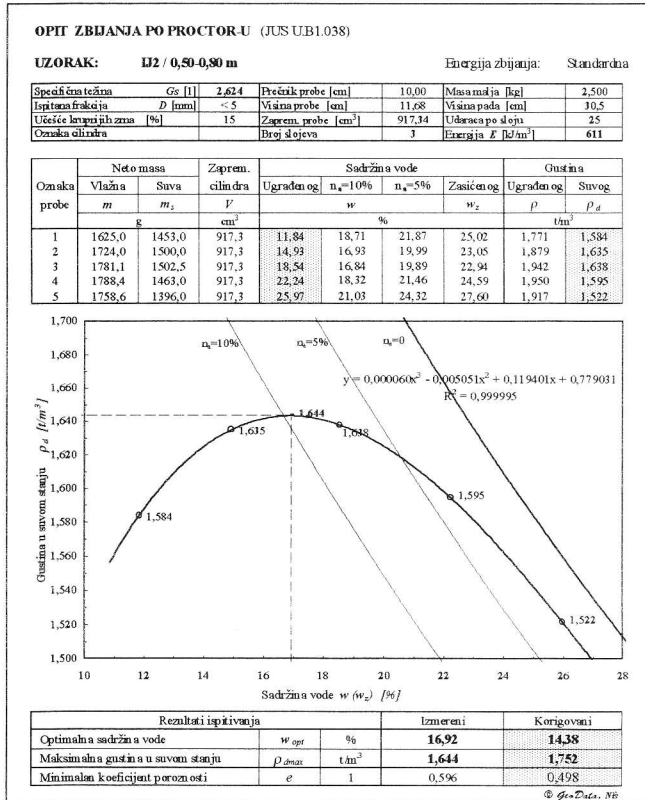
Sl.5 - Pokazatelji čvrstoće pri triaksijalnoj kompresiji

Za unete fizičke veličine, izmerene na probama, prikazuju se i početne i krajnje vrednosti pokazatelja fizičkih svojstava proba (ρ, ρ_d, w, G_s, e).

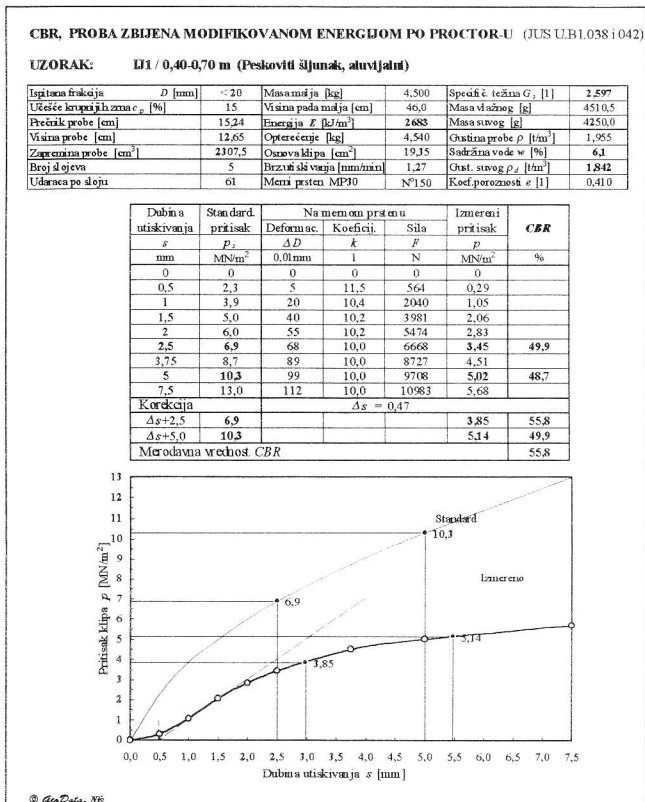
Za opit sa dreniranjem (D), umesto veza (u, ϵ) i (A, ϵ) uz dijagram ($\sigma_1 - \sigma_3, \epsilon$) prikazuju se dijagrami ($\Delta V/V, \epsilon$) i (e, ϵ).

Opit zbijanja po Proctor-u

Na osnovu G_s , izmerenih masa zbijenih proba i/ili masa delova uzetih za određivanje vlažnosti, program daje rezultate kao na Sl.6. Proctor-ova kriva za standardnu ili modifikovanu energiju predstavljena je jednačinom (polinom četvrtog reda), sa traženim koordinatama maksimuma i odgovarajućim koeficijentom poroznosti. Uz krivu zasićenja prikazuju se i krive za stanja sa 5 i 10 % vazduha. Za učešće zrna iznad 5 mm rezultati se automatski koriguju prema USBR tj. DIN(1981).



Sl.6 - Pokazatelji uslova zbijanja po Proctor-u



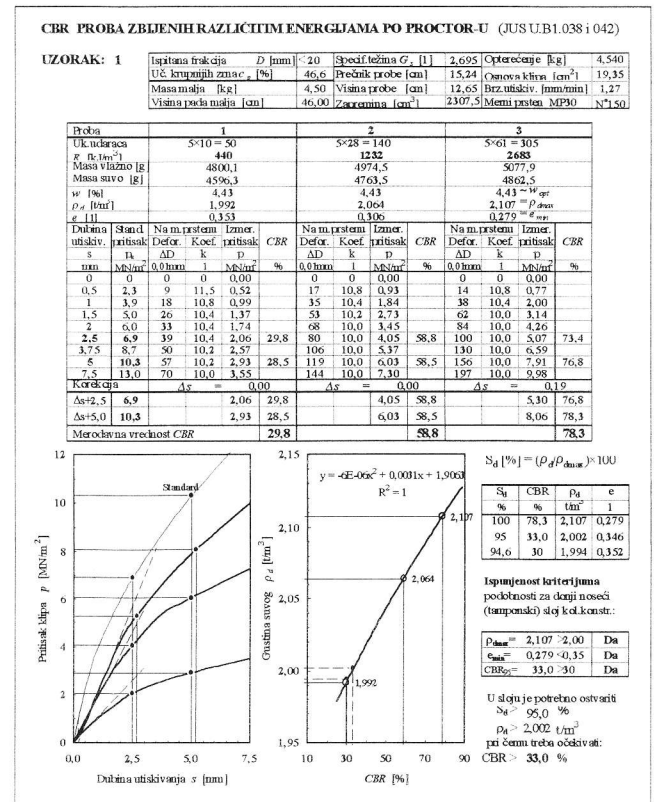
Sl.7 - CBR probe zbijenog šljunka

Kalifornijski indeks nosivosti (CBR)

CBR je pokazatelj na kome se zasniva standardan postupak za dimenzionisanje savremenih kolovoznih konstrukcija, koji se neopravdano retko određuje, obično sa manjim ili većim greškama u pripremi proba i interpretaciji rezultata, čemu doprinose neprecizni i pogrešni delovi standarda JUS(1969,1970).

Za laboratorijski opit na probi zbijenoj standardnom ili modifikovanom energijom po Proctor-u, u program se unose izmerene deformacije dinamometra i dobijaju rezultati sa korekcijom za slučaj da kriva utiskivanja ima prevojnu tačku, kao na Sl.7. U softver je ugrađena nelinearna veza deformacije i sile dinamometra.

Iz iskustva Laboartorijske za geotehniku Instituta Građevinskog fakulteta u Nišu, standardni zahtev minimalne nosivosti (za šljunak CBR = 30 tj. 40 % a za tucanik CBR = 80 %) pri stepenu zbijenosti 95 % modifikovanom energijom po Proctor-u ima puno opravdanje pri ocenjivanju podobnosti agregata za ugrađivanje u noseći sloj kolovozne konstrukcije, jer je čest slučaj da materijal ispuni sve druge kriterijume kvaliteta osim ovoga.



Sl.8 - CBR sa ocenom podobnosti šljunka za 'tampon'

Provera podobnosti u pogledu tog kriterijuma vrši se zbijanjem bar tri probe različitom energijom i određivanjem CBR na njima, uz interpretaciju i upoređenje sa zadatim kriterijumima. Za tako ispitane probe unose se čitanja komparatera na dinamometru a odgovarajući program sistema prikazuje (Sl.8) dijagrame utiskivanja kao na Sl.7, zavisnost CBR od gustine u suvom stanju (ρ_d) (grafički i analitički) i CBR za gustinu pri 95 % najveće zbijenosti. Uz to, dobija se ocena ispunjenosti standardno zadatih kriterijuma podobnosti u pogledu CBR, gustine i poroznosti agregata za takvu zbijenost, i, u koliko taj kriterijum nije zadovoljen, potrebna zbijenost veću od 95 % pri kojoj će biti ostvarena zahtevana minimalna vrednost CBR.

4 IZBOR I PRIKAZ GEOMEHANIČKIH POKAZATELJA SVOJSTAVA TLA

Geomehanički pokazatelji svojstava tla, određeni terenskim ili laboratorijskim ispitivanjima, prikazuju se *pojedinačno* i *grupno*.

Pojedinačno su prikazani uz rezultate odgovarajućih opita na ispitanim probama iz uzoraka tla, sa ostalim podacima koji treba da karakterišu stanje materijala i naponsko-deformacijske uslove u toku opita, kako je prikazano u prethodnom poglavlju.

Grupno se prikazuju geomehanički pokazatelji svojstava tla u pojedinim slojevima terena numerički-tabelarno, uz statističku obradu statističkih uzoraka ako ih čini više od 5 veličina istog pokazatelja i očekivanim vrednostima u sloju (populaciji).

Sistem ima mogućnost *grafičkog prikaza istražnih bušotina* ili istražnih jama preko unetih dubina i naziva slojeva, dubina PPV i NPV i mesta uzetih uzoraka, kao i prikaza superpozicionog, geotehničkog *preseka terena* (prognoznog profila) za više bušotina, s tim što se povezivanje slojeva vrši ručnim unosom jer bi automatsko 'prepoznavanje' i povezivanje slojeva iz susednih bušotina (čime bi bila omogućena i automatska izrada blok-dijagrama) u ovoj fazi razvoja sistema bio suviše složen a nesiguran proces.

Sistem sadrži grupu malih programa za *ocenu podobnosti tla* za ugrađivanje u donji stroj i nevezane noseće slojeve savremenih kolovoznih konstrukcija, sa *bazom znanja* koja sadrži izbor kriterijuma za ocenu podobnosti i *mehanizmom zaključivanja* na osnovu upoređenja kriterijuma i u *kontekst* unetih veličina pokazatelja dobijenih opitima.

O izboru, obradi, prikazivanju i oceni *pokazatelja zbijenosti tla* (npr. u slojevima konstrukcije saobraćajnica ili temeljnog tla) napomene su date u prethodnom poglavlju.

5 ZAKLJUČAK

Razvoj ekspertnog sistema za određivanje i prikaz geomehaničkih pokazatelja svojstava građevinskog tla *GeoData1* ostvarivan je poslednjih godina u okviru Laboratorije za geotehniku Instituta GF u Nišu, nezavisno od saznanja o putevima i rezultatima sličnih napora u drugim (inostranim) centrima. Nedavno objavljeni rezultati (Moula, Toll, Vaptismas, 1995 i Toll, 1995) u velikoj su saglasnosti sa konceptom i razvojem ovog sistema, koji i na sadašnjem nivou ima široku primenu u geomehaničkoj praksi koju, slobodno se može oceniti, u ovom domenu bitno unapređuje.

Za razliku od klasičnog načina obrade i prikaza rezultata geomehaničkih ispitivanja, sistem isključuje subjektivan uticaj na rezultate ispitivanja jer se u programe unose samo neposredno merene veličine i znatno olakšava istraživanje pojedinih uticaja na rezultate ispitivanja.

U fazi razvoja jugoslovenskih geomehaničkih standarda, koja je u toku, ovakav sistem može biti jedan od modela za izbor vrste podataka, načina njihove obrade i prikazivanja za pojedine opite.

Za razliku od pojedinačnih inostranih programa, čija je primena za naše uslove lako moguća uz manje adaptacije, primena inostranog ekspertnog sistema je bitno otežana, pre svega zbog značajnih razlika u *bazi znanja* zasnovanoj na drugačijim standardima i kriterijumima, jako otežanih a potrebnih intervencija u zaštićenim programima i njihovim vezama, kao i zbog značajne cene sistema.

Zbog toga dalji razvoj sistema *GeoData1* ima + puno opravdanje. Pošto se baza znanja dograđuje i uvećava, kao i hardverske i softverske mogućnosti, ovaj posao ne može biti okončan i treba ga planirati u etapama, pre svega u domenu međusobnog komuniciranja programa sistema.

LITERATURA

- Bowles, J.E. (1978): *Engineering properties of soils and their measurement*, McGraw-Hill, New York.
- Cassan, M. (1988): *Les essais in situ en mecanique des sols*, 1, Eyrolles, Paris.
- *** (1981): *DIN-Taschenbuch 113*, Proctorversuch, DIN 18127, Beuth Bauverlag, Berlin, 172.
- Donaghe, R.T., Chaney, R.C., Silver, M.L. (1988): *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM, Philadelphia.
- Head, K.H. (1988): *Manual of soil laboratory testing*, 2, Pentech Press, London.
- Liu, C., Evett, J.B. (1984): *Soil properties - testing, measurement and evaluation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Moula, M., Toll, D.G., Vaptismas, N. (1995): Knowledge-based systems in geotechnical engineering, *Geotechnique*, 45, No.2, ICE, London, 209-221.
- *** (1969): *Određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti*, JUS U.B1.042, JZS, Beograd.
- *** (1970): *Određivanje optimalnog sadržaja vode*, JUS U.B1.038, JZS, Beograd.
- Toll, D.G. (1995): The role of a knowledge-based system in interpreting geotechnical information, *Geotechnique*, 45, No.3, ICE, London, 525-531.
- Vickers, B. (1978): *Laboratory work in civil engineering, Soil mechanics*, Granada Publishing, London.