

ISKUSTVA U PRIMENI DINAMIČKOG PENETROMETRA „DPM30-20 Pagani“

Miroljub Samardaković

*Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, A. Medvedeva 14, Niš,
msam@EUnet.yu*

REZIME: U radu se sažeto opisuju dinamički penetrometar DPM30-20 na motorni pogon i domaća iskustva u njegovoj primeni. Obrada i prikaz rezultata ispitivanja i savremene korelacije sa rezultatima standardnog opita penetracije (SPT) i sa pokazateljima stanja, deformabilnosti i čvrstoće krupnozrnog i sitnozrnog tla vršeni su odgovarajućim programima autora. Pri geotehničkim istraživanjima i ispitivanjima za sanaciju i temeljenje nekoliko kapitalnih objekata, otpor penetracije locirao je granice litoloških sredina heterogenog terena detaljnije i tačnije nego uobičajeno bušenje jezgrovanjem, uz dovoljnu saglasnost korelisanih pokazatelja tla sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja.

KLJUČNE REČI: Dinamička penetracija tla, interpretacija rezultata, SPT korelacije

EXPERIENCES IN APPLICATION OF DYNAMIC PENETROMETER „DPM30-20 Pagani“

ABSTRACT: The paper presents a brief description of a power driven dynamic penetrometer DPM30-20 and experience gained in its application. Processing and presentation of investigation results and the contemporary correlation with the results of the standard penetration test (SPT), with the indicators of status, deformability and strength of coarse and fine grain soil were performed by the corresponding programs of the author. In the course of geotechnical research for the purposes of restoration and foundation design of several capital structures, the penetration resistance located the lithological boundaries of a heterogeneous terrain with more detail and more accurately than the usual rotational drilling, with a sufficient harmony of the correlated indicators of soil with the results of laboratory tests.

KEY WORDS: Dynamic penetration of soil, interpretation of results, SPT correlations

UVOD

U nemogućnosti da se istražnim bušenjem uzmu i u laboratoriji ispitaju ‘dovoljno malo poremećeni’ uzorci tla, pre svega krupnozrnog ili jako deformabilnog, u savremenoj geotehničkoj praksi se za procenu sastava, stanja (zbijenosti, konzistencije) i mehaničkih svojstava (deformabilnosti, parametara čvrstoće) tla primenjuju dubinska geomehanička ispitivanja. Najčešće su to standardni opit penetracije (SPT, dinamički, relevantan za tlo sa AC frakcijama srednjezrna prašina – sitnozrni šljunak), opit penetracije konusom (CPT, statički, u novije vreme i drugačiji, glina – sitnozrni šljunak) i opit dilatometrom (DMT, glina – pesak, poslednje decenije sve aktuelniji i sa sve većim brojem pokazatelja svojstava tla), opit presiometrom (PMT, glina – srednjezrni šljunak) i opit krilnom sondom (VST, glina – prašina).

Iz korelacija sa rezultatima ovih opita, dobijenih empirijski uz uvedene brojne uticajne faktore za krupnozrna i sitnozrna tla, procenjuju se vrednosti pokazatelja vrste, stanja i mehaničkih svojstava tla. Njihova interpretacija i validnost zavisi od poznavanja uslova za koje su korelacije kreirane i uslova na mernom mestu *in situ*. Zato ih treba umešno odabrati iz stalno narastajućeg broja formula, tabela i dijagrama, analiziranih i/ili prikazanih u starijoj i savremenoj literaturi, periodici i inostranoj regulativi (npr. [1]–[6], [9]–[12]), a njima se bavi i poseban tehnički komitet (TC16) Međunarodnog društva za Mehaniku tla i Geotehničko inženjerstvo (ISSMGE).

Opit SPT polako postaje zamenjen opitom CPT, jer se ovim uz otpor baze penetracionog tela meri i otpor bočnog trenja (blisko modelu temeljnog šipa), ali je kao najstariji i sa najviše merenih podataka u najširoj upotrebi. SPT rezultat otpora tla pri 30 cm pobijanja standardnog masivnog cilindra prečnika 5,1 cm iskazan je brojem udara (N) malja mase 63,5 kg koji treba slobodno da pada sa visine 76 cm (potencijalna energija $E_p = \text{masa} \times \text{visina}$). Pošto različiti uređaji za izdizanje SPT-malja smanjuju ovu potencijalnu energiju na 43-85 %, koliko se prenosi na cilindar u bušotini, izmereni rezultat (N) se za konkretne terenske uslove koriguje na broj udara (N_{60}) kakav bi se dobio uređajem *efikasnosti* 60 %, uz dodatne korekcije zavisne od vrste cilindra koji se pobija, prečnika bušotine i dužine nastavaka šipke u njoj, a zatim i od dejstva efektivnog vertikalnog napona u tlu na dubini mernog mesta (pogodan prikaz u [2]).

Iz tehno-ekonomskih razloga, u praksi se primenjuju i brojne varijante modifikovanog opita dinamičke penetracije, različitim opremama i postupcima, čiji se rezultati prevode na ekvivalentne rezultate SPT u cilju korišćenja pomenutih korelacija. Jedan od takvih je dinamički penetrometar *DPM30-20* proizvođača *Pagani* (Italija), koga od 2002. godine koristi Laboratorija za geotehniku Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu, uz primenu autorovih programa za obradu, prikaz i korelaciju rezultata penetracije.

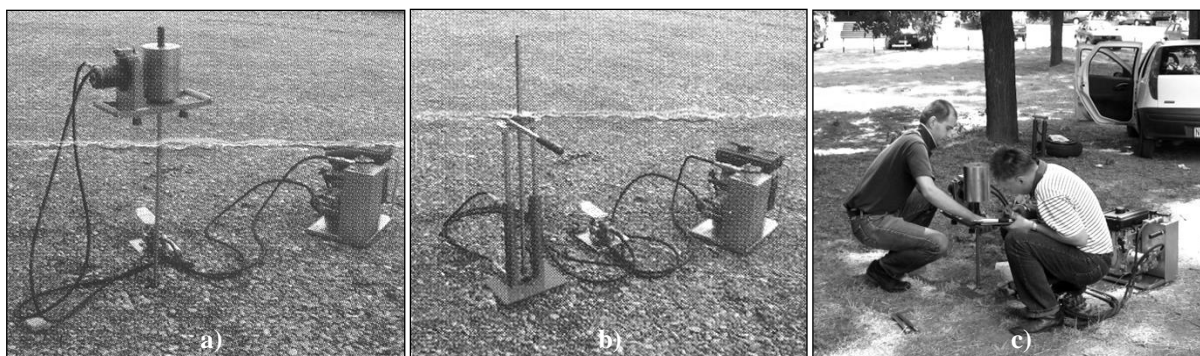
TEHNIČKI PODACI, RUKOVANJE I PREPORUČENI PRIKAZ REZULTATA

Penetrometar tipa *DPM30-20 Pagani* (Dynamic Medium Penetrometer) omogućava kontinualno merenje otpora tla pri dinamičkom penetracionom sondiranju terena do dubina 10 m, na svakih 10 cm, na osnovu koga je, teorijsko-empirijskim korelacionim vezama, moguće proceniti zbijenost ili konzistenciju i mehanička svojstva tla u slojevima terena.

Opremom se vrši kontinualno utiskivanje čeličnog *konusa* prečnika baze 35,7 mm (površina baze 10 cm²), u osovinskom preseku sa izvodnicama pod 60 °, u koji je slobodno uglavljena *šipka-nastavak* prečnika 20 mm i dužine 1 m, sa oznakama na svakih 10 cm. Preko ojačanja zašrafljenog na vrh šipke dva rukovaoca postavljaju *uređaj za pobijanje* sa hidrauličnom pumpom i metalnim *tegom-malj*em mase 30 kg, koga ekscentrično proširenje osovine pumpe (aktivirane nožnom pedalom, puštanjem ulja pod pritiskom proizvedenim radom benzinskog *motora* pored bušotine) izdiže 20 cm i spušta slobodnim padom, tako da se konus pobija frekvencom jedan udarac u sekundi. Pri tome mehanički *brojač* kontinualno prikazuje *ukupan broj udaraca* od početka penetracije, koji rukovalac čita za svakih 10 cm pobijanja i upisuje u zapisnik, odakle se kao rezultat ispitivanja dobija *broj udaraca* (N_{DPM}) za svakih 10 cm penetracije.

Na utisnuti nastavak šipke ušrafljuje se sledeći, pri čemu se uređaj sa tegom, povezan hidrauličkim crevima za motor, jednostavno uklanja i ponovo namešta. Na kraju opita nastavljena šipka se vadi pomoću hidrauličnog *izvlakača* oslonjenog na tlo, priključenog crevom na motor umesto uređaja sa tegom (Sl.1).

Utisnuti metalni konus, koji je širi od šipke da bi se pri pobijanju isključio najveći deo bočnog trenja, ostaje na dnu bušotine (proizvođač isporučuje 50 komada konusa).



Sl.1. DPM30-20 u položajima a) za penetraciju, b) za izvlačenje šipke i c) u toku opita
 Fig.1. DPM30-20 in position a) for penetration, b) with rod extractor and c) like testing

Rezultat penetracije prikazuje se na dijagramu N_{DPM} u funkciji dubine (slično kao dijagram N_{SPT} ali po dubini detaljnije), na kome područja ujednačenog otpora obično predstavljaju slojeve ujednačenih mehaničkih svojstava a najčešće i ujednačenog sastava tla. Zbog toga je poželjno da manji broj penetracionih opita bude u blizini istražnih bušotina kojima je utvrđen sastav terena, kako bi ostale penetracije poslužile uz proveru svojstava i za proveru građe (sastava i sklopa) terena.

Proizvođač je isporučio uputstvo za rukovanje i održavanje DPM30-20, kao i softver (*Win-Din*) za obradu i prikaz rezultata dijagramima N_{DPM} – sa izradom ekvivalentnih dijagrama N_{SPT} , dinamičkog otpora tla R_{pd} [kN/m^2] prema tzv. holandskoj formuli i raznim korelacijama sa pokazateljima tla – koji se po sadržaju i formi prikazanih rezultata, kao i isključivo italijanskog teksta, nije pokazao dovoljno pogodnim za domaću primenu.

U novijoj verziji Internet prezentacije, proizvođač Pagani navodi rezultate istraživanja prema kojima je (na dve lokacije, u krupnozrnom i sitnozrnom tlu, na različitim dubinama) izmerena prosečna efikasnost njegovog penetrometra za standardnu penetraciju 73 %, što je u granicama uobičajenog odstupanja od normirane efikasnosti 60 % za SPT, pa se slična efikasnost može očekivati i za sličnu konstrukciju DPM30-20 penetrometra istog proizvođača

DOMAĆA ISKUSTVA, PRIKAZ REZULTATA I KORELACIJE

Dinamički penetrometar *DPM30-20 Pagani* koristi Laboratorija za geotehniku GAF u Nišu od 2002. godine, uz primenu autorovih programa za obradu, prikaz i korelaciju rezultata penetracije.

Ovde prikazana iskustva stečena su, pre svega, terenskim dubinskim ispitivanjima za potrebe projekata (a) sanacije temelja bombardovanjem srušenih sfernih rezervoara za tečni naftni gas u Nišu [7] i (b) velikog tržnog centra u Kragujevcu [8]. Do dubina 8-9,5 m ispitivanja DPM penetracijom, teren objekata (a) sa prstenastim plitkim temeljima građe peskovite gline i zaglinjeni krupnozrni nanosi rečne terase a objekta (b) aluvijalni nanos od peskovite gline, muljevutih i/ili jako stišljivih slojeva pa različito zaglinjenih peskova i šljunkova na moćnoj podini od (pre)konsolidovane gline mlađeg neogena.

Na osnovu merenja otpora na svakih 10 cm penetracije kroz ovakve slojeve različitog sastava mogle su biti izvršene ocena *podobnosti za primenu* navedene opreme, provera *tačnosti lociranja litoloških granica* primenjenom tehnikom bušenja u bliskim istražnim bušotinama, procena *pokazatelja stanja i svojstava tla* dobijenih korelacijama sa rezultatima penetracije i provera njihove *saglasnosti sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja* navedenih vrsta tla, kako sledi.

Ocene korisnika su da je oprema penetrometra od kvalitetnih i dobro obrađenih materijala. Svi delovi (pouzdan motor, uređaj za pobijanje sa hidrauličkom pumpom i tegom, nastavci šipke sa konusom, hidraulički izvlačač šipke) se jednostavno (ra)sklapaju, ručno ili pomoću dva viljuškasta ključa, i ručno (klikom) povezuju hidrauličkim crevima bez mogućnosti greške – tako da u primeni sa dva rukovaoca (SI.1) nije uočena potreba za eventualnom izmenom dizajna, dimenzija ili kvaliteta delova. Sondiranje je vršeno bez problema i kroz šljunak sa krupnozrnim frakcijom. Prilikom skidanja uređaja za pobijanje i tega sa šipke koju treba nastaviti, treba imati u vidu da šipka može lako biti izvučena iz svog ležišta u konusu na manjim dubinama, što može okončati opit.

Do dubina 8-9,5 m u aluvijalnim terenima uobičajenog sastava (peskovita glina – peskoviti sljunak) stizalo se sa 800-1500 udaraca, što sa frekvencu udarac/minut traje 15-25 minuta, sa još oko 60 % vremena za nastavljanje šipke i ostale manipulacije, tako da opit prosečno traje 25-40 minuta.

Za obradu i pogodan prikaz rezultata penetracije primenjuje se autorov program u MS Excel, kojim se preko unetih ukupnih brojeva udaraca za svaku dubinu dobijaju dijagrami raspodele otpora $N_{DPM/10cm}$ i $N_{SPT/30cm} = 0,766N_{DPM/30cm}$ po dubini (SI.2). Primenjena korelacija izvodi se upoređenjem potencijalnih (računskih) energija utrošenih za 30 cm pobijanja opitima DPM i SPT, imajući u vidu dovoljno malu razliku efikasnosti DPM i normirane efikasnosti SPT opreme. U jače stišljivim/muljevitim i u krupnozrnim materijalima, kakvi su bili na jednoj od navedenih lokacija, promene otpora $N_{DPM/10cm}$ na dijagramu jasnije su ukazivale na proslojke i dubine litoloških granica nego uvid u 'jezgra' istražnih bušotina rađenih uobičajenim postupkom teškom motornom garniturom.

Za lamele/slojeve sa dovoljno ujednačenim vrednostima otpora penetracije program prikazuje njihove dubine i prosečne računске vrednosti $N = N_{SPT/30cm}$ (SI.2) koje se u drugoj tabeli programa koriguju na prosečno N_{60} i ukupno korigovano N_1 za koje se, savremenim korelacijama, dobijaju pokazatelji stanja i svojstava tla u lamelama (primer sa redosledom, oznakama i vrednostima na SI.3).

Korekcija prosečne vrednosti N na N_{60} vrši se prema opšteprihvaćenoj relaciji Skempton [10]

$$N_{60} = (E_m / 0,60) C_b C_s C_r N$$

detaljno prikazanoj npr. u [2], koja za najskromniju domaću tehnologiju SPT penetracije (ručno izdizanje tega, prečnik bušotine manji od 115 mm, standardni cilindar, šipka od nastavaka dužine 3-4 m, upotreba konusa umesto cilindra) daje vrednost $N_{60} = 0,52N$.

Ukupno korigovana vrednost N_1 za uslove *in situ* sa efektivnim vertikalnim normalnim naponom σ'_z dobija se prevođenjem na uslove sa normiranim naponom 100 kPa (kakvi su približno u tlu na dubini oko 5 m, iznad NPV), za šta je odabrana relacija [3]

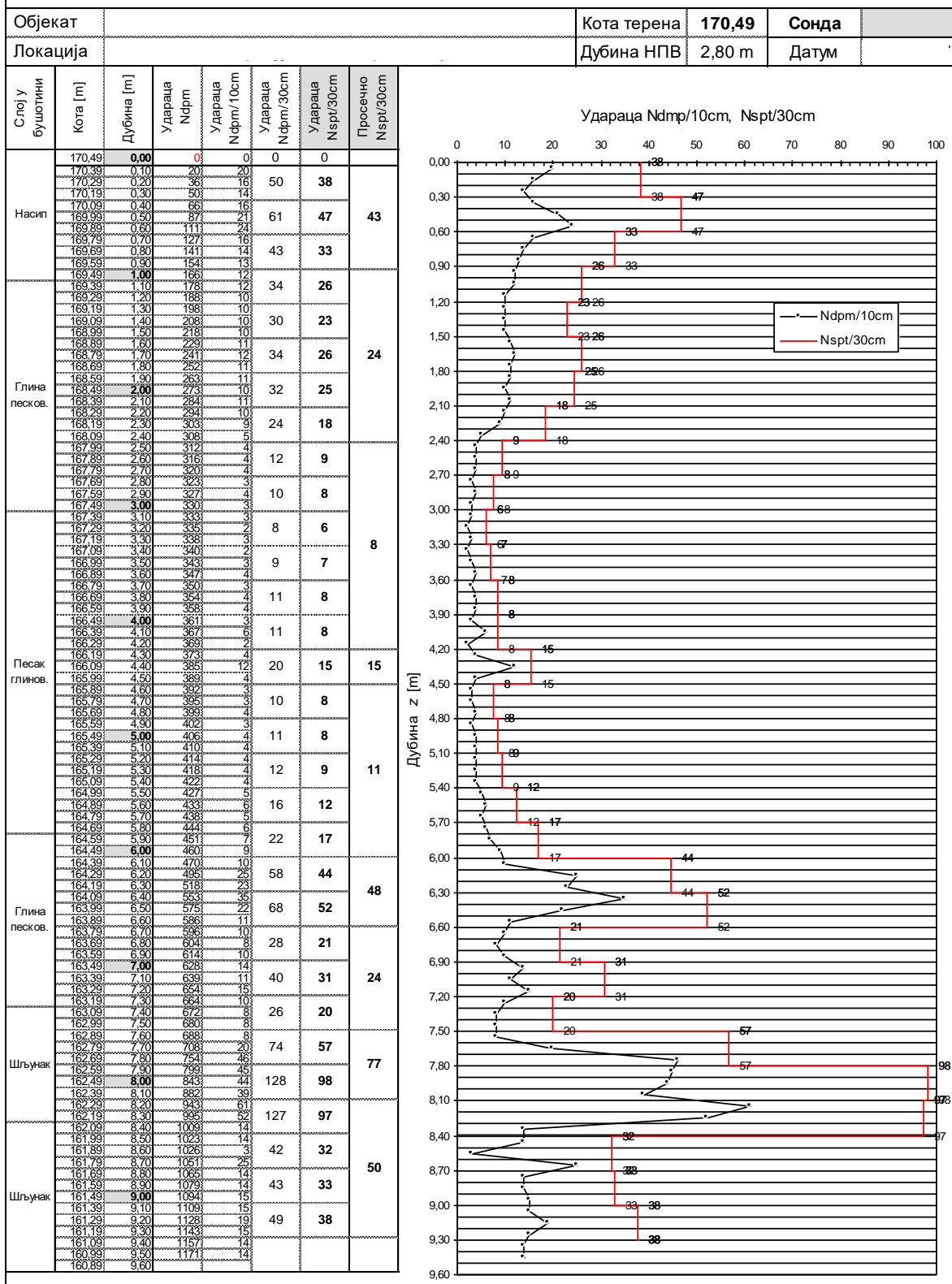
$$N_1 = N_{60} \sqrt{100 / \sigma'_z}$$

Pogodne korelacije N_1 sa pokazateljima stanja i mehaničkih svojstava tla na dubini penetracionog opita bilo je pogodno odabrati iz savremenih pregleda u široko korišćenoj stranjoj [2] i domaćoj [4] literaturi, pa detalji sa SI.3 ovde neće biti navođeni.

Iz empirijskih tabela, uobičajenih u inostranoj i domaćoj literaturi i regulativi, u kojima se zavisno od broja udara N_1 kvalitativno opisuju zbijenost krupnozrnog tla (iskazana preko indeksa gustine I_D) i stanje konzistencije sitnozrnog tla (iskazano indeksom konzistencije I_C), za prosečne vrednosti N_1 dobijene su i u programu primenjene i korelacije

$$\begin{aligned} I_D &= 0,1 + 0,02N_1 - 0,0001N_1^2 && \text{za krupnozrno tlo (uglavnom pesak)} \\ I_C &= 0,834 \log N_1 && \text{za sitnozrno tlo.} \end{aligned}$$

РЕЗУЛТАТИ СОНДИРАЊА ТЕРЕНА ДИНАМИЧКИМ ПЕНЕТРОМЕТРОМ DPM30-20 Pagani



Sl.2. Prikaz rezultata DPM30-20 penetracije i ekvivalentnih vrednosti N_{SPT}
Fig.2. DPM30-20 test results and equivalent N_{SPT} values

ZAKLJUČAK

Na osnovu navedenih i drugih iskustava u primeni dinamičkog penetrometra *DPM30-20 Pagani* može se zaključiti da je opisana kvalitetna oprema (Sl.1) pogodna za ekonomično i racionalno ispitivanje svih vrsta građevinskog tla u domaćim uslovima, kao korisna dopuna dubinskih istražnih radova.

Geomehaničkim programima *GeoData1* autora dobija se pogodan prikaz rezultata opita penetracije (Sl.2), koji se prevode u rezultate SPT i automatskom primenom savremenih korelacija daju pokazatelje stanja i mehaničkih svojstava krupnozrnog, mešovitog i sitnozrnog tla (Sl.3), dovoljno saglasne sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja.

REFERENCE

- [1] Cassan, M. (1988): *Less essais in situ en mecanique des sols*, Eyrolles, Paris.
- [2] Coduto, D.P. (2001): *Foundation Design – Principes and Practices*, Prentice-Hall, New Jersey, 115-124.
- [3] Liao, S.S.C., Whitman, R.V. (1985): Overburden Correction Factors for SPT in Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.112, No.3, ASCE, New York, 373-377.
- [4] Maksimović, M.M. (2005): *Mehanika tla*, Građevinska knjiga, Beograd.
- [5] McCarthy, D.F. (2002): *Essentials of Soil Mechanics and Foundations*, Prentice-Hall, New Jersey.
- [6] Prevost, J.H., Popescu, R. (1996): *Constitutive Relations for Soil Materials*, EJGE, Paper 1996-09.
- [7] Samardaković, M. i dr. (2006): *Ispitivanje tla i analiza stanja temelja bombardovanjem srušenih sfernih rezervoara NIS-TNG u Regionalnom centru Niš*, Institut GAF u Nišu, Niš, VI+59 strana.
- [8] Samardaković, M., Samardaković, S. i dr. (2007): *Geotehnički uslovi temeljenja objekta „Mercator centar“ u ul. Grada Sirena u Kragujevcu*, „Geoinženjering“ DOO, Niš, VIII+80 strana.
- [9] Sanglerat, G. (1982): *The Penetrometer and Soil Exploration*, Elsevier, Amsterdam.
- [10] Skempton, A.W. (1986): Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation, *Geotechnique*, Vol.36, No.3, London, 425-447.
- [11] Tomlinson, M.J. (2001): *Foundation Design and Construction*, Prentice-Hall, New Jersey.
- [12] USACE (1992): *Engineer Manual 1110-1-1905: Bearing Capacity of Soils*, US Army Corps of Engineers.

ПОКАЗАТЕЉИ СТАЊА И СВОЈСТАВА ТЛА НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ОПИТА СТАНДАРДНЕ ПЕНЕТРАЦИЈЕ (SPT) ДОБИЈЕНИХ КОРЕЛАЦИЈОМ СА РЕЗУЛТАТИМА ПЕНЕТРАЦИЈА DPM30-20 Pagani						
Сондажна бушотина поред истражне бушотине			Б6	Б6	Б6	Б6
Дубина слоја (за просечно $N_{spt}/30cm$)	z	m	0,90-2,40	2,40-4,20	4,50-6,00	8,10-9,50
Дубина НПВ	z_{NPV}	m	2,80	2,80	2,80	2,80
Ознака/назив слоја у бушотини			Глина п.	Песак гл.	Песак гл.	Шљунак
Врста тла (К крупнозрно, М мешовито, S ситнозрно)			S	M	M	K
Просечни ефективни напон у слоју	σ'_z	kPa	28	60	104	140
Пречник бушотине		mm	131/101	131/101	131/101	131/101
Дужина наставака		m	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00	3,00-4,00
Просечно удараца за 30 cm утискивања	N	1	24	8	11	36
Корекција због ефикасности тега	E_m	1	0,55	0,55	0,55	0,55
Корекција због пречника бушотине	C_b	1	1	1	1	1
Корекција због врсте цилиндра	C_c	1	1	1	1	1
Корекција због дужине наставака	C_r	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Корекција због конуса уместо цилиндра	C_{con}	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Кориговани број удараца	N_{60}	1	12	4	6	19
Укупно кориговани број удараца	N_1	1	23	5	6	16
За крупнозрно и мешовито (прашиновито и глиновито крупнозрно) тло						
Средњи пречник зрна	D_{50}	mm	0,05	0,10	0,15	2,50
Коеф. корелације са гранулацијом	C_p	1		35,0	39,4	69,9
Старост слоја	t	god.	100	300	300	500
Коеф. корелације са старошћу слоја	C_a	1		1,22	1,22	1,23
Коефицијент прекосолидације слоја	OCR	1	1	1	1	2
Коеф. корелације са прекосолидацијом	C_{OCR}	1		1,00	1,00	1,13
Индекс густине (Kulhawy, Maupе, 1990)	I_D	1		0,31	0,34	0,44
Индекс густине (емпиријска табела)	I_D	1		0,20	0,21	0,39
Коеф. корелације са прекосолидацијом	β_0	1		2500	2500	5000
Коеф. корелације са пенетрацијом	β_1	1		600	600	1200
Еквивалентни модул деформације	E	kPa		5.695	5.837	25.897
Ефективни угао унутрашњег трења	ϕ'	°		28,7	28,7	37,5
Мин. ефективни угао унутрашњег трења	ϕ'_{min}	°		28,6	28,7	31,7
За ситнозрно тло						
Индекс конзистенције	I_c	1	1,14			
Кохезија у недренаираним условима	c_u	kPa	140			

Sl.3. Prikaz pokazatelja tla dobijenih SPT korelacijama (*GeoData1*)
Fig.3. Soil properties from SPT correlations (*GeoData1*)