

Primljen / Received: 13.7.2017.

Ispravljen / Corrected: 7.2.2018.

Prihvaćen / Accepted: 22.3.2018.

Dostupno online / Available online: 10.9.2018.

Ocjenjivanje metoda za predviđanje osne nosivosti utisnutih i zabijenih pilota u koherentnom tlu

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Mirjana Vukičević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
mirav@grf.bg.ac.rs



Miloš Marjanović, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
mimarjanovic@grf.bg.ac.rs



Veljko Pujević, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
vpujevic@grf.bg.ac.rs



Nikola Obradović, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
nobradovic@grf.bg.ac.rs

Prethodno priopćenje

Mirjana Vukičević, Miloš Marjanović, Veljko Pujević, Nikola Obradović

Ocjenjivanje metoda za predviđanje osne nosivosti utisnutih i zabijenih pilota u koherentnom tlu

U radu je prikazano ocjenjivanje metoda za predviđanje granične osne nosivosti pojedinačnih pilota na bazi rezultata statičkog penetracijskog pokusa (CPT), te ocjenjivanje statičkih metoda baziranih na analizi efektivnog i ukupnog naprezanja. Analizirano je sedamnaest utisnutih MEGA pilota i osam Franki pilota različitih dužina. Dobiveni rezultati pokazuju da je, među izravnim CPT metodama, za analizirane geotehničke uvjete i tipove pilota najbolja metoda koju predlažu Bustamante i Gianeselli (LCPC).

Ključne riječi:

utisnuti MEGA pilot, Franki pilot, osna nosivost pilota, ispitivanje statičkim opterećenjem

Preliminary report

Mirjana Vukičević, Miloš Marjanović, Veljko Pujević, Nikola Obradović

Evaluation of methods for predicting axial capacity of jacked-in and driven piles in cohesive soils

This paper presents the evaluation of methods for predicting the ultimate axial bearing capacity of single piles based on the cone penetration test (CPT) results, and the evaluation of static methods based on the effective and total stress analysis. Seventeen jacked-in MEGA piles and eight Franki piles of different lengths are considered. The results show that the Bustamante & Gianeselli (LCPC) method is the most appropriate for the studied geotechnical conditions and pile types.

Key words:

jacked-in MEGA pile, Franki pile, pile axial capacity, static load test

Vorherige Mitteilung

Mirjana Vukičević, Miloš Marjanović, Veljko Pujević, Nikola Obradović

Beurteilung der Methode zur Vorhersage der Tragfähigkeit der Achse der eingestanzten und eingerammten Pfeiler im kohärenten Boden

In der Abhandlung werden die Beurteilung der Methode zur Vorhersage der Grenztragfähigkeit der Achse einzelner Pfeiler aufgrund der Ergebnisse des statischen Penetrationsversuchs (CPT) sowie die Beurteilung der statischen Methoden basierend auf der Analyse der effektiven und gesamten Spannung dargelegt. Analysiert wurden siebzehn eingestanzte MEGA Pfeiler und acht Franki Pfeiler unterschiedlicher Länge. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die direkte CPT Methode die beste ist, die von Bustamante und Gianeselli (LCPC) vorgeschlagen wird, und dies ist auch die geeignetste Methode für die Analyse geotechnischer Bedingungen und Pfeilertypen.

Schlüsselwörter:

eingestanzter MEGA Pfeiler, Franki Pfeiler, Tragfähigkeit der Achse des Pfeilers, Untersuchung durch statische Belastung

1. Uvod

Temelji na pilotima najčešće se koriste kada je nosivost površinskih slojeva tla niska. U projektiranju temelja na pilotima, vrijednost osne nosivosti pilota izravno utječe na stabilnost i nosivost čitave građevine. Osa nosivost pilota definira se kao suma nosivosti stope pilota (Q_b) i nosivosti plašta pilota (Q_s).

U inženjerskoj se praksi za ocjenjivanje osne nosivosti pilota primjenjuju dvije skupine metoda. U prvu skupinu ulaze metode koje se zasnivaju na analizi ukupnog naprezanja (α -metoda) i efektivnog naprezanja (β -metoda). Kod ovih se metoda parametri posmične čvrstoće sitnozrnatog tla obično dobivaju pomoću laboratorijskih i terenskih ispitivanja, dok se parametri za krupnozrnata tla najčešće određuju na temelju rezultata penetracijskih ispitivanja na terenu. Druga skupina metoda izravno se temelji na rezultatima terenskih ispitivanja, a to su najčešće CPT (i CPTU), SPT i u novije vrijeme DMT. Osnovne prednosti CPT-a u odnosu na ostala terenska ispitivanja su: jednostavnost, brzina i troškovi provođenja, kontinuirano bilježenje podataka o sondiranju po dubini te mogućnost instaliranja dodatnih senzora. Najveći broj CPT metoda razvijen je u osamdesetim godinama prošlog stoljeća. One se temelje na hipotezi da je statički penetrometar zapravo mikropilot kojem se mjeri otpor na šiljku (q_c) i trenje po plaštu (f_s). Radi se o empirijskim metodama koje su formulirane uspoređivanjem rezultata dobivenih pokusom CPT s nosivostima pilota izmjeranima u različitim geotehničkim uvjetima i za različite vrste pilota. Kada se primjenjuju CPT metode, nije potrebno laboratorijsko ispitivanje niti uzorkovanje, pa se tako bitno smanjuje vrijeme potrebno za preliminarno ocjenjivanje nosivosti pilota. Također, kako nema faze uzimanja uzoraka tla, izbjegava se i utjecaj poremećenosti uzorka na točnost parametara posmične čvrstoće.

Prije odabira odgovarajuće metode za izračunavanje nosivosti, potrebno je brižljivo razmotriti koje su metode i vrste pilota prikladne za lokalne geotehničke uvjete. Mnogi su istraživači analizirali izravne metode, a naročito CPT metode. Ovdje se navode neki od njih: Briaud i Tucker [1] analizirali su prikladnost šest CPT metoda na temelju ispitivanja nosivosti 98 pilota. Sharp i dr. [2] analizirali su tri SPT i dvije CPT metode na bazi ispitivanja nosivosti 28 pilota. Eslami i Fellenius [3] kontrolirali su rezultate ocjenjivanja šest CPT (CPTU) metoda i za to su koristili 102 praktična primjera. Abu-Farsakh i Titi [4] analizirali su osam CPT metoda uspoređivanjem predviđenih nosivosti pilota s rezultatima ispitivanja 35 zabijenih lebdećih pilota. Kako bi se ocijenila prihvatljivost tih metoda te omogućilo njihovo daljnje poboljšanje, izuzetno je važno stalno ažurirati baze podataka unošenjem rezultata statičkih ispitivanja nosivosti i to za razne geotehničke uvjete i vrste pilota, što je i potaknulo autore da pristupe izradi ovog rada.

U radu se ocjenjuje primjenjivost deset postojećih metoda za predviđanje granične nosivosti 25 pilota, izvedenih uglavnom u sitnozrnatom tlu. Razmatraju se dvije vrste pilota: zabijeni Franki piloti i utisnuti MEGA piloti. Izmjerene vrijednosti nosivosti (Q_m) Franki pilota dobivene su na temelju statičkih ispitivanja

nosivosti, a konačna sila izmjerena tijekom utiskivanja pilota korištena je kao vrijednost granične nosivosti MEGA pilota (zato što je utiskivanje svakog pilota zapravo pokus nosivosti pilota). Odabrano je i analizirano osam izravnih CPT metoda: (Bustamante i Ganeselli (LCPC) [5], Schmertmann [6], De Ruiter i Beringen [7], Tumay i Fakhroo [8], Penpile [9], Philipponnat [10], Price i Wardle [11], Aoki i De Alencar [12]) te dvije statičke β -metode (kod kojih je nosivost na stopi izračunana prema Meyerhof-u [13] i Hansen-u [14]). Kako bi se analizirao utjecaj uvjeta dreniranja na rezultate predviđanja, statička α -metoda (metoda API) [15] dodatno je ocijenjena pomoću dva Franki pilota za koje su bili dostupni parametri o nedreniranoj posmičnoj čvrstoći.

Statistička analiza provedena je kako bi se ocijenile i rangirale spomenute metode. Izmjerene nosivosti pilota (Q_m) uspoređene su s procijenjenim vrijednostima (Q_p), te su izračunani koeficijenti Q_p/Q_m . Statističko ocjenjivanje provedeno je na bazi linija najbolje podudarnosti, aritmetičke sredine, standardne devijacije te lognormalne raspodjele koeficijenata Q_p/Q_m .

2. Metode za predviđanje nosivosti pilota

Granična osna nosivost pilota (Q) definira se kao suma nosivosti stope pilota (Q_b) i nosivosti plašta pilota (Q_s):

$$Q = Q_b + Q_s = q_b A_b + \sum_{i=1}^n q_{s,i} A_{s,i} \quad (1)$$

gdje je $q_{s,i}$ jedinično trenje na plaštu sloja tla i , a $A_{s,i}$ je površina plašta pilota u kontaktu sa slojem i , dok je n broj slojeva tla duž plašta pilota. Sažeti prikaz CPT metoda analiziranih u ovom radu iskazan je u tablici 1. U tablici 2. daje se kratak prikaz statičkih metoda.

3. Karakteristike analiziranih pilota i postupak pokusa za određivanje nosivosti

Prva skupina analiziranih pilota sastojala se od MEGA pilota, izrađenih u sklopu dva rekonstrukcijska projekta: rekonstrukcije Kemijskog fakulteta u Beogradu i rekonstrukcije crkve u Zemunu, u Srbiji [17-19]. MEGA pilot je predgotovljeni utisnuti pilot koji se sastoji od kratkih čeličnih ili betonskih elemenata. Ti piloti često služe kao zamjena za klasično podzidavanje u srednje čvrstom do mekom tlu. Pilot se "ispituje" mjerenjem sile utiskivanja tijekom njegove ugradnje i pritom se određuje granična vrijednost nosivosti. Odabrano je ukupno 17 pilota koji su se nalazili u neposrednoj blizini pokusa CPT. Pokusi CPT provedeni su već u u fazi projektiranja. Za projekt rekonstrukcije Fakulteta odabrani su piloti kvadratnog poprečnog presjeka (400 x 400 mm), a dužina tih pilota varirala je od 6,25 do 9,85 m. Za crkvu u Zemunu odabrani su desetometarski MEGA piloti kružnog poprečnog presjeka ($\emptyset 323$). Sile utiskivanja (Q_m) zabilježene na projektu Kemijskog fakulteta varirale su od 932 do 1765 kN, a sila zabilježena na projektu crkve iznosila je 770 kN.

Tablica 1. Sažeti prikaz izravnih CPT metoda korištenih za predviđanje granične nosivosti pilota

Metoda	q_b	q_s
Bustamante i Ganeselli (LCPC)	$q_b = k_{b1} q_{ca}$ q_{ca} – prosječni otpor na šiljku u zoni od 1,5D ispod vrha pilota do 1,5D iznad vrha pilota $k_{b1} = 0,15$ do 0,60 – faktor nosivosti ovisan o vrsti tla, vrsti pilota i vrijednosti otpora na šiljku q_c	$q_s = \frac{1}{\alpha_1} q_c \leq q_{s,max}$ $\alpha_1 = 30$ do 200 – koeficijent ovisan o vrsti tla, vrsti pilota i vrijednosti otpora na šiljku q_c $q_{s,max}$ – maksimalna vrijednost jediničnog trenja na plaštu ovisno o vrsti tla, vrsti pilota i vrijednosti otpora na šiljku q_c
Schmertmann	$q_b = C_1 q_{ca} \leq 15 \text{ MPa}$ q_{ca} – prosječan otpor na šiljku u zoni od 8D iznad vrha pilota do 0,7 D ili 4,0 D ispod vrha pilota $C_1 = 0,5$ -1,0 – koeficijent ovisan o OCR faktoru	$q_s = k_{f1} f_s \leq 120 \text{ kPa}$ $k_{f1} = 0,20$ -1,25 – koeficijent za glinu ovisan o materijalu pilota i trenju po plaštu
De Ruiter i Beringen	Za glinu: $q_b = N_c S_u \leq 15 \text{ MPa}$ $N_c = 9$, $S_u = q_c / N_k$ $N_k = 15$ -20* - faktor korelacije između otpora na šiljku q_c i nedrenirane posmične čvrstoće S_u Za pijesak: kao i u Schmertmann-ovoj metodi	Za glinu: $q_s = \alpha_2 S_u \leq 120 \text{ kPa}$ $\alpha_2 = 0,5$ -1,0 – koeficijent ovisan o OCR faktoru Za pijesak: $q_s = \min \left\{ \begin{matrix} f_s \\ q_c / 300 \\ 120 \text{ kPa} \end{matrix} \right\}$
Tumay i Fakhroo	Kao i u Schmertmann-ovoj metodi	$q_s = k_{f2} f_s \leq 72 \text{ kPa}$ $k_{f2} = 0,5 + 9,5e^{-90f_s}$ f_s u MPa
Penpile	$q_b = C_2 q_c \leq 15 \text{ MPa}$ $C_2 = 0,25$ za vrh pilota u glini $C_2 = 0,125$ za vrh pilota u pijesku	$q_s = \frac{f_s}{1,5 + 14,47f_s} \leq 120 \text{ kPa}$ q_s i f_s u MPa
Philipponnat	$q_b = C_3 q_c \leq 15 \text{ MPa}$ C_3 – koeficijent ovisan o vrsti tla (0,40 za pijesak; 0,45 za prah; 0,50 za glinu)	$q_s = q_c \frac{\alpha_3}{F_{s1}} \leq 120 \text{ kPa}$ $\alpha_3 = 0,30$ -1,25 – koeficijent ovisan o vrsti pilota (1,25 za zabijene pilote) $F_{s1} = 50$ -200 (50 za glinu)
Price i Wardle	$q_b = C_4 q_c \leq 15 \text{ MPa}$ C_4 – koeficijent ovisan o vrsti pilota (0,35 za zabijene pilote)	$q_s = \alpha_4 f_s \leq 120 \text{ kPa}$ α_4 – koeficijent ovisan o vrsti pilota (0,53 za zabijene pilote)
Aoki i De Alencar	$q_b = \frac{q_c}{F_b} \leq 15 \text{ MPa}$ $F_b = 1,75$ -3,50 – koeficijent ovisan o vrsti pilota	$q_s = q_c \frac{\alpha_5}{F_{s2}} \leq 120 \text{ kPa}$ $\alpha_5 = 1,4$ -6 % - koeficijent ovisan o vrsti tla $F_{s2} = 3,5$ -7 – koeficijent ovisan o vrsti pilota

Napomena: D – promjer pilota, q_c – otpor na šiljku, f_s – trenje po plaštu. Vrijednosti N_k koje se koriste u ovom radu nisu iskazane u prvobitno zadanim granicama. One variraju od 6 do 70 [16]. U ovom radu vrijednosti N_k variraju od 30 do 40.

Tablica 2. Sažeti prikaz statičkih metoda za predviđanje granične nosivosti pilota

Metoda	q_b	q_s
Nedrenirani uvjeti naprezanja (α -metoda)	$q_b = N_c S_u + \sigma_v$ $N_c = 9$	$q_s = \alpha_6 S_u$ $\alpha_6 = 1$ za $S_u \leq 25 \text{ kPa}$ $\alpha_6 = 0,5$ za $S_u \geq 70 \text{ kPa}$ (interpolacija za ostale vrijednosti S_u)
Drenirani uvjeti naprezanja (β -metoda)	$q_b = N_c^* c' + \eta \sigma_v' N_q^*$ Prema Hansen-u: $N_q^* = N_q d_q$ $N_c^* = N_c d_c$ $N_q = e^{\pi \tan \phi'} [\tan(45^\circ + \frac{\phi'}{2})]^2$ $N_c = (N_q - 1) \cot \phi'$ $d_q = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \arctan \frac{D_f}{B}$ $d_c = 1 + 0,4 \arctan \frac{D_f}{B}$ $\eta = 1,0$ N_c^* , N_q^* – faktori za jedinični otpor na vrhu izračunani prema Meyerhof-u $\eta = 1 - \sin \phi'$	$q_s = c' + (1 - \sin \phi') \sigma'_{vi,mean} \tan \phi'$ $\sigma'_{vi,mean}$ – prosječna vrijednost efektivnog vertikalnog naprezanja u sloju tla

D_f – dubina vrha pilota, B – promjer pilota na vrhu, S_u – nedrenirana posmična čvrstoća, σ_v / σ_v' – ukupno/efektivno vertikalno naprezanje na dubini vrha pilota

Druga skupina analiziranih pilota sastojala se od Franki pilota izvedenih na četiri lokacije u Srbiji. Franki pilot je zabijeni betonski pilot lijevan na mjestu gradnje s proširenom betonskom stopom i cilindričnim tijelom. Sedam probnih pilota izvedeno je u okviru sljedećih projekata vjetroelektrana u Srbiji: Košava, Malibunar i Alibunar [20-22], a jedan je pilot izveden za projekt trgovačkog centra Univerexport u Novom Sadu [23]. Promjer pilota iznosio je 520 mm, a dužina im je varirala od 14 do 16 m. Na svim je lokacijama Institut IMS proveo statička ispitivanja nosivosti pilota prema normi ASTM D1143 [24]. Balast se sastojao od betonskih blokova čija je maksimalna težina bila za 10 % veća od zadane sile. Sila se nanosila postupno, pri čemu je svaki prirast sile iznosio 10 % od zadane sile. Slijeganje je izmjereno s točnošću od 0,01 mm. Pri svakom koraku opterećenja, održavana je konstantna vrijednost opterećenja sve do konsolidacije, ali ne više od četiri sata. Maksimalno opterećenje svakog pilota bilo je za jedan i pol puta veće od projektiranog opterećenja. Kako bi se odredila granična nosivost pilota, hiperbolom je provedena aproksimacija krivulje odnosa pomaka i opterećenja na glavi pilota. Korištena je Chinova ekstrapolacija [25], a usvojeno je da granično opterećenje odgovara asimptotskoj vrijednosti hiperbole. Podaci o pilotima sažeto su prikazani u tablici 3.

Tablica 3. Karakteristike analiziranih pilota

Lokacija	Vrsta pilota	Promjer [mm]	Dužina [m]	Broj pilota
Beograd	MEGA	400 x 400	6,25-9,85	16
Zemun (Beograd)		Ø 323	10,0	1
Zagajica	Franki	Ø 520	16,0	2
Novi Sad			16,0	1
Alibunar			14,0	3
Malibunar			14,0-15,0	2

4. Profili tla

Za svaku su lokaciju profili tla definirani na bazi terenskih CPT ispitivanja [26] i laboratorijskih ispitivanja uzoraka iz bušotina. Odabrano je šest lokacija u Srbiji: Beograd (Kemijski fakultet), Zemun (crkva), Zagajica, Malibunar, Alibunar (projekti vjetroelektrana) i Novi Sad (trgovački centar Univerexport).

Tablica 4. Parametri tla

Lokacija	Tlo	Razina podzemne vode [m]	Dubina	Jedinična težina [kN/m ³]	USCS	Kohezija [kPa]	Kut trenja [°]	q _c [MPa]
Beograd	Prašinasta glina	6,5	0-2,5	19,0	CL	10	21	0,5-2,0
	Prašinasta glina / les		2,5-6,5	19,0		20	22	2,0-3,0
			6,5-9,5	21,0		26	25	3,0-9,0
	Teško gnječiva glina		9,5-11,5	21,0	CI/CH	30	27	2,0-14,5
	Teško gnječiva laporovita glina		11,5+	21,0	CH	45	20	5,5-17,0
Zemun	Nasuto tlo (prašinasta organska glina)	8,0	0-3,5	18,6	ML/OL	34	18	0,5-2,0
	Prašinasta glina / les		3,5-12	18,7	CL	25	22	1,0-5,0
	Krupnozrnati pijesak / sitnozrnati šljunak		12+	20,0	SU	0	34	5,0-15,0
Novi Sad	Pjeskoviti prah	4,0	0-10,5	17,5-18,7	MI/SM	3-9	20-28	1,5-4,6
	Srednjozrnati do sitnozrnati pijesak		10,5-14	17,5-18,6	SW	0-4	28-32	2,5-8,2
			14-18	18,6-19,9		0	31-32	6,1-11,9
Zagajica	Prašinasta glina	3,5	0-8	19,5-19,9	CL/CI	6-15 *c _u = 70	22-27	2,0
			8-11	20,3-20,8		5 *c _u = 60 - 70	27	4,0-12,0
			11+	20,0		6-8 *c _u = 70	22-27	2,0
Malibunar	Pjeskoviti prah / les	10,0	0-10	17,5	CL/ML	8	23	1,5
	Prašinasti pijesak		10-20	20,5	SM	0-10	26-30	3,0-10,0
Alibunar	Pjeskoviti prah / les	>40,0	0-11,5	17,0	CL/ML	0-10	26-29	1,0-4,5
	Pjeskoviti prah		11,5+	19,0	SM	0	28-35	4,0-13,0

Napomena: * Nedrenirana kohezija

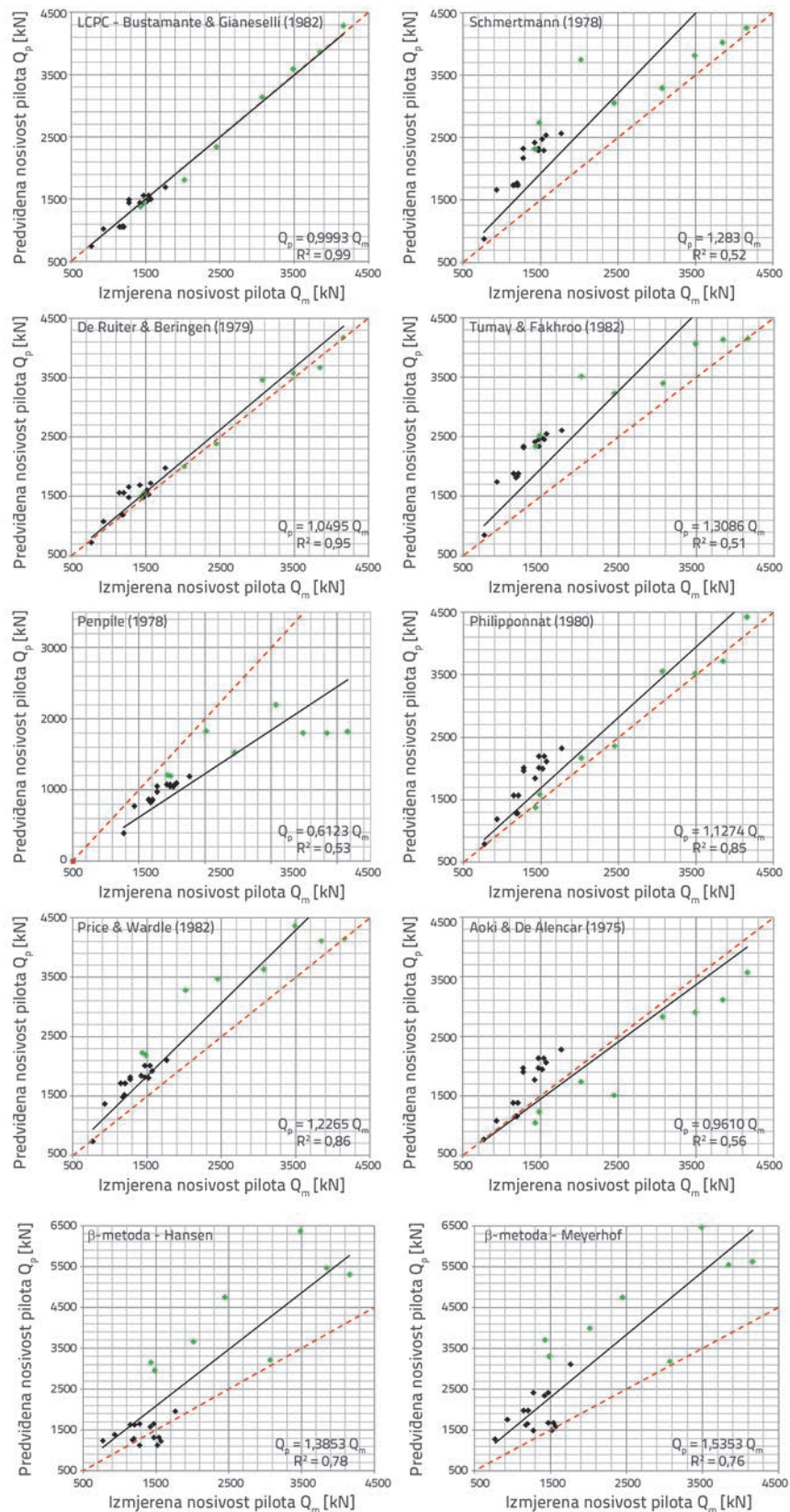
Svi geotehnički podaci preuzeti su iz dostupne projektne dokumentacije [17-23]. Na lokacijama u Novom Sadu, Alibunaru i Malibunaru, stopa pilota prolazila je kroz prašinski ili sitnozrnati pijesak. Kako više od dvije trećine pilota prolazi kroz sitnozrnato tlo, može se prihvatiti da su svi analizirani slučajevi prikladni za ovo istraživanje. Sažeti prikaz parametara tla iskazan je u tablici 4. za sve analizirane lokacije.

5. Statističke analize

Mnogi su autori primjenjivali različite statističke metode kako bi ocijenili točnost metoda za predviđanje nosivosti pilota [1, 3, 4, 27, 28]. Najilustrativniji parametar za provjeru točnosti metode je koeficijent Q_p/Q_m , koji teoretski može varirati od nule do neograničene gornje vrijednosti, s tim da optimalna vrijednost iznosi jedan. Vrijednosti niže od jedan označavaju podcijenjene vrijednosti nosivosti pilota, a više vrijednosti znače da je nosivost pilota precijenjena. Aritmetička sredina (μ) i standardna devijacija (σ) koeficijenta Q_p/Q_m osnovni su statistički parametri za ocjenjivanje metoda za predviđanje nosivosti. U idealnom slučaju vrijednost $\mu(Q_p/Q_m)$ iznosi jedan a vrijednost $\sigma(Q_p/Q_m)$ jednaka je nuli, što bi značilo da je metoda potpuno točna, ali to u stvarnosti nije slučaj. Distribucija koeficijenta Q_p/Q_m oko srednje vrijednosti uglavnom je nesimetrična. Stoga su Briaud i Tucker [1] sugerirali primjenu lognormalne distribucije za ocjenjivanje pouzdanosti tih metoda. Lognormalna distribucija definirana je funkcijom gustoće vjerojatnosti:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln}}{\sigma_{\ln}}\right)^2\right] \quad (2)$$

gdje je $x = Q_p/Q_m$ slučajna varijabla, μ_{\ln} je srednja vrijednost $\ln(Q_p/Q_m)$, a σ_{\ln} je standardna devijacija $\ln(Q_p/Q_m)$. Funkcija gustoće vjerojatnosti može se koristiti za predviđanje nosivosti pilota uz



Slika 1. Predviđene i izmjerene granične nosivosti pilota (Q_p/Q_m)

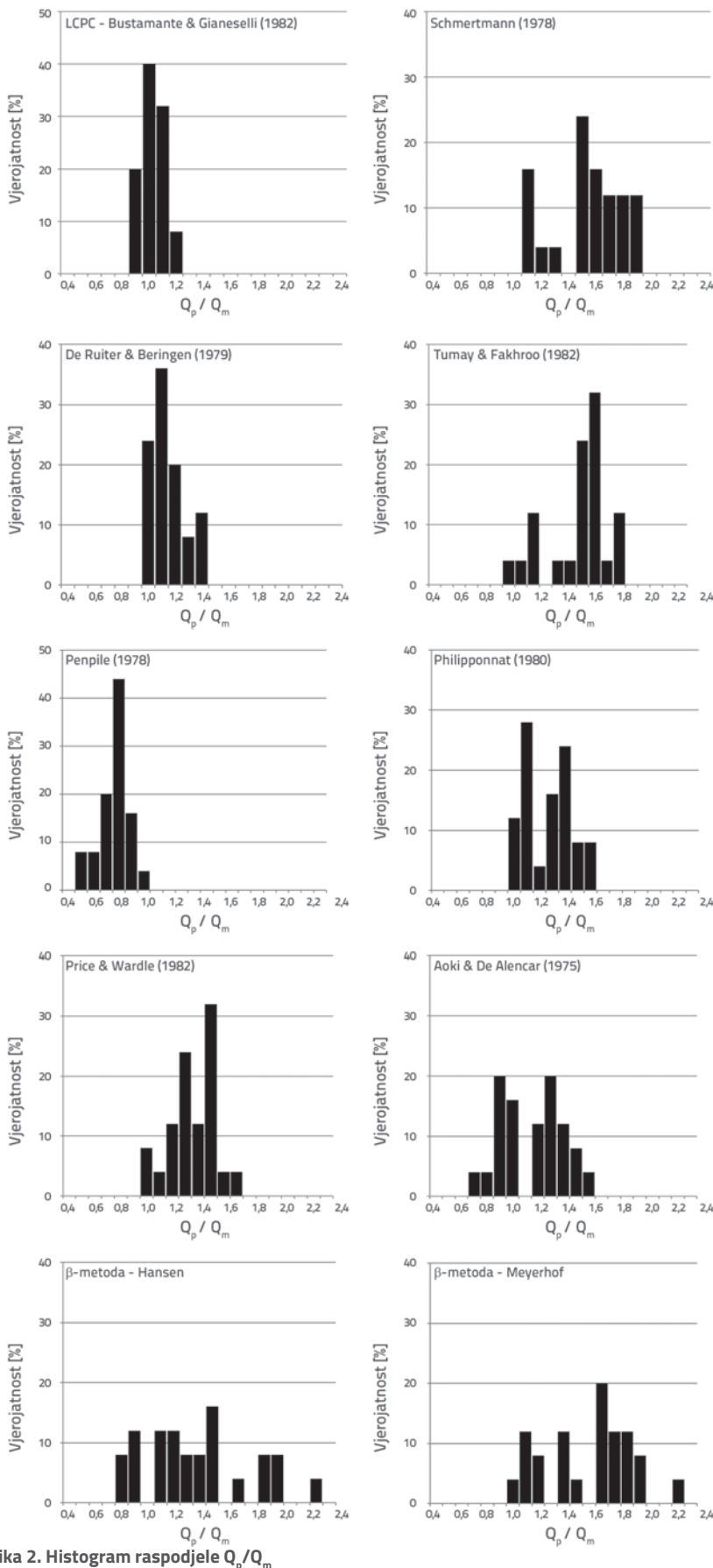
definiranje željene točnosti. Vjerojatnost predviđanja na razini željene točnosti izračunava se kao područje funkcije gustoće vjerojatnosti koje je unutar granica točnosti. Na primjer, vjerojatnost da će se nosivost predvidjeti s točnošću od 20 % predstavlja područje funkcije gustoće vjerojatnosti s graničnim vrijednostima $0.8 \leq Q_p/Q_m \leq 1.2$. Za potrebe ovog istraživanja usvojena je razina točnosti od 20 %, što je u skladu s prijedlozima drugih autora [4]. Da bi se ocijenila metoda za predviđanje nosivosti u ovom se radu primjenjuju tri kriterija:

- jednadžbe linija najbolje podudarnosti (linije trenda) izmjerenih i predviđenih nosivosti pilota (koeficijent Q_p/Q_m) s odgovarajućim koeficijentom determinacije R^2
- aritmetička sredina i standardna devijacija koeficijenta Q_p/Q_m
- vjerojatnost predviđanja za usvojenu razinu točnosti od 20 %, uz korištenje lognormalne distribucije Q_p/Q_m .

5.1. Rezultati statističke analize

Linije najbolje podudarnosti koeficijentata Q_p/Q_m prikazane su na slici 1. za sve analizirane metode. Odgovarajuće jednadžbe trendova, s koeficijentom determinacije (R^2) utemeljenim na regresijskoj analizi, iskazane su na svakom prikazu. Linija savršene usklađenosti ($Q_p/Q_m = 1$) prikazana je kao crtkana crvena linija. Rezultati za Franki pilote i MEGA pilote prikazani su kao zelene tj. crne točke. Histogrami i lognormalne raspodjele za Q_p/Q_m prikazani su na slikama 2. i 3. za analizirane metode. Vjerojatnosti predviđanja prikazane su na slici 4. za razne razine točnosti. Rezultati statističke analize sažeto su prikazani u tablici 5.

Iz podataka se vidi da je najveća podudarnost između izmjerenih i procijenjenih nosivosti pilota postignuta primjenom metode koju predlažu Bustamante i Ganeselli (LCPC). Ovaj se zaključak temelji na činjenici da se koeficijent Q_{fit}/Q_m nalazi u blizini vrijednosti jedan (0,9993), te da je postignut visok koeficijent determinacije ($R^2 = 0,99$). Ovom su metodom također postignute najviše vjerojatnosti predviđanja za različite razine točnosti.



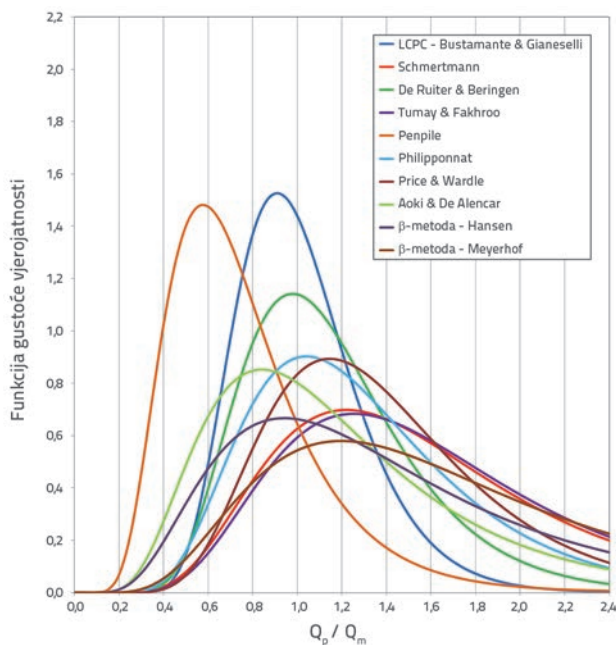
Slika 2. Histogram raspodjele Q_p/Q_m

Rezultati analize također pokazuju da drugo mjesto po kvaliteti zauzima metoda koju predlažu De Ruiter i Beringen. Tada je koeficijent Q_{fit}/Q_m također blizak vrijednosti jedan (1,0495), pri čemu je nosivost tek malo precijenjena. Koeficijent determinacije ($R^2 = 0,95$) niži je od koeficijenta koji je dobiven pomoću metode LCPC. Vjerojatnosti predviđanja relativno su visoke. Važno je napomenuti da su ti rezultati dobiveni primjenom korigirane vrijednosti faktora korelacije N_k , tj. da nisu korištene vrijednosti koje su iskazane u originalnom radu [16]. Detaljnije objašnjenje daje se u točki 6 ovog rada.

Metoda koju predlažu Aoki i De Alencar prilično je podudarna s metodom autora Bustamanta i Giancesellia (LCPC) u pogledu koeficijenta Q_{fit}/Q_m (0,9610), ali iskazuje nižu točnost ($R^2 = 0,56$) i vjerojatnost predviđanja ($P_{20\%} = 31,4\%$).

Kod Penpile metode, izmjerene vrijednosti su podcijenjene za otprilike 40 % ($Q_{fit}/Q_m = 0,6123$). Osim toga, kod te je metode nizak koeficijent determinacije ($R^2 = 0,53$), a to se odnosi i na vjerojatnosti predviđanja.

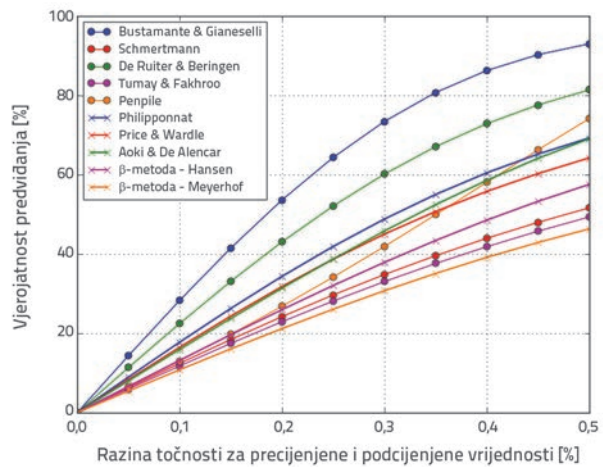
U ostalim izravnim CPT metodama, vrijednosti nosivosti pilota znatno su precijenjene (čak su za 31 % veće od izmjerenih vrijednosti), a koeficijenti determinacije znatno variraju (0,51-0,86). Kod metoda koje predlažu Philipponnat i Price te Wardle, vjerojatnosti predviđanja su bolje ($P_{20\%} \sim 32$ do 34 %) u usporedbi s metodama koje izlažu Schmertmann te Tumay i Fakhroo ($P_{20\%} \sim 23$ do 24 %). Kod metoda koje se zasnivaju na analizi efektivnog naprezanja (β) bilježe se vrijednosti koje su precijenjene za 39 do 54 %, s tim da koeficijent determinacije varira od 0,76 do 0,78, što je prihvatljivo.



Slika 3. Lognormalna raspodjela Q_p/Q_m za analizirane metode

Kako bi se analizirao utjecaj uvjeta dreniranja na rezultate predviđanja, dodatno je korištena i statička α -metoda (metoda API) [15] u svrhu izračunavanja nosivosti pilota za koje su

bili dostupni parametri o nedreniranoj posmičnoj čvrstoći tla (Zagajica). Odgovarajući rezultati prikazani su u tablici 6. Prosječni koeficijent Q_p/Q_m iznosi otprilike 1,05, što je vrlo blisko vrijednosti jedan.



Slika 4. Odnos točnosti i vjerojatnosti predviđanja za razne metode

Tablica 5. Rezultati statističke ocjene različitih metoda za predviđanje nosivosti

Metoda predviđanja	Linija najbolje podudarnosti		Aritmetička sredina / standardna devijacija		Vjerojatnost predviđanja ±20 % Točnost [%]
	Koeficijent Q_{fit}/Q_m	R^2	μ	σ	
Bustamante i Gianceselli (LCPC)	0,9993	0,99	0,984	0,077	53,6
Schmertmann	1,2830	0,52	1,487	0,254	24,2
De Ruiter i Beringen	1,0495	0,95	1,103	0,130	43,1
Tumay i Fakhroo	1,3086	0,51	1,525	0,251	23,0
Penpile	0,6123	0,53	0,702	0,116	26,8
Philipponnat	1,1274	0,85	1,228	0,188	34,4
Price i Wardle	1,2265	0,86	1,318	0,169	31,8
Aoki i De Alencar	0,9610	0,56	1,102	0,255	31,4
β -metoda (Meyerhof)	1,3853	0,78	1,325	0,398	26,0
β -metoda (Hansen)	1,5353	0,76	1,594	0,399	21,2

Tablica 6. Nosivost pilota predviđena α -metodom

Lokacija	Vrsta pilota	Q_m [kN]	Q_p [kN]	Q_p/Q_m
Zagajica	Franki $\varnothing 520$	1430	1515,07	1,059
		1482	1529,86	1,032

6. Rasprava

Faktori korelacije današnjih CPT metoda baždare se na temelju ograničenog broja podataka o ispitivanju opterećenja, a ti se podaci obično odnose na specifične lokalne geološke uvjete. Osim toga, podaci o CPT ispitivanjima koji se koriste u izvođenju faktora korelacije temelje se na rezultatima dobivenima pomoću mehaničkih penetrometara koji su manje pouzdani, i to zato što druge vrste penetrometara nisu bile dostupne u vrijeme razvoja metoda. Za većinu metoda odabir faktora korelacije nije precizno definiran, što još više povećava nepouzdanost tih metoda. Također, za većinu metoda karakteristično je nametanje ograničenja u vidu maksimalnog jediničnog otpora u stopi i plaštu pilota, što osporavaju autori mnogih novijih studija. Svi ti faktori utječu na predviđanje osne nosivosti pilota ovisno o tipu pilota i vrsti tla.

Prema rezultatima ovog istraživanja, metoda koju predlažu Bustamante i Ganeselli (LCPC) najprikladnija je za predviđanje nosivosti Franki pilota i MEGA pilota u analiziranim geotehničkim uvjetima. U usporedbi s drugim metodama, u ovoj se točnije definiraju faktori korelacije koji ovise o tipu pilota, vrsti tla i otporu na vrhu.

Druga po kvaliteti je metoda koju predlažu De Ruitter i Beringen. Ona se smatra prikladnom za primjenu u analiziranim geotehničkim uvjetima, ali samo ako se koriste korigirani faktori korelacije N_k . Nepouzdanost te metode prije svega proizlazi iz korelacije između otpora na vrhu i nedrenirane posmične čvrstoće. Rezultati drugih autora [16] pokazuju da koeficijent N_k varira mnogo više nego što to navode autori originalnog rada ($N_k = 15-20$). Ova se metoda uglavnom bazira na nedreniranoj čvrstoći i bliža je α -metodama nego izravnim CPT metodama. Metoda koju predlažu Aoki i De Alencar bliska je metodi Bustamante i Ganeselli (LCPC), ali se smatra nepouzdanom zbog značajnog rasapa rezultata. U Penpile metodi se podcjenjuje nosivost pilota, što je u skladu s rezultatima drugih autora [4, 29] koji su također ustanovili da je metoda konzervativna.

U ostalim izravnim CPT metodama nosivost pilota značajno se precjenjuje, pa tako nagibi linija trenda uglavnom variraju od 1,13 (Philipponnat) do 1,31 (Tumay i Fakhroo). Metode koje predlažu Schmertmann, Tumay i Fakhroo te Price i Wardle nisu idealne za analizirane geotehničke uvjete, i to najviše zato što se u njima precjenjuje vrijednost otpora plašta pilota.

Nosivost pilota precijenjena je u β -metodama (u Hansenovoj više nego u Meyerhofovoj) i to zato što se temelje na analizi efektivnih naprežanja. Potpuno drenirani uvjeti nisu ispunjeni u analiziranom slučaju. Velik rasap rezultata vjerojatno proizlazi iz netočnosti projektiranog geotehničkog profila usvojenog u geotehničkim izvještajima [17, 20-23].

Tek mali statistički uzorak bio je dostupan za ocjenjivanje α -metode, pa stoga pouzdana ocjena nije bila moguća. Međutim, rezultati upućuju na zaključak da je primjena α -metode opravdana u slučaju nedreniranih uvjeta, tj. kada se radi o zasićenom glinovitom tlu. Osim toga, autori na temelju vlastitog iskustva navode da postoji dobra usklađenost između

predviđanja nosivosti pilota na bazi LCPC metode (koja se pokazala najboljom) i α -metode, što je u skladu s prethodnim zaključkom.

Rezultati ovog istraživanja pokazuju da većina izravnih CPT metoda bolje predviđa nosivost Franki pilota nego nosivost MEGA pilota. Takvi se rezultati objašnjavaju tumačenjem izmjerene granične nosivosti MEGA pilota. Naime, zbog tehnologije izvođenja MEGA pilota, te zacrtane dinamike radova na projektu, 48 sati je zadano kao maksimalno dopušteno vrijeme između ugradnje pilota i mjerenja sile utiskivanja. Kako se profil tla uglavnom sastojao od meke gline, može se pretpostaviti da spomenuto vrijeme nije bilo dovoljno za okončanje postupka disipacije pornih tlakova generiranih tijekom instaliranja pilota. To je onemogućilo aktiviranje maksimalnog osnog otpora pilota, za koji se pretpostavlja da je barem 10-20 % veći od izmjerenih vrijednosti [29, 30]. Autori ovog rada odlučili su ipak da neće korigirati vrijednost izmjerene sile na bazi spomenutih faktora, imajući na umu da izmjerena sila utiskivanja predstavlja kratkoročnu (minimalnu) nosivost pilota.

7. Zaključak

U ovom je radu prikazano ocjenjivanje metoda za predviđanje granične nosivosti pojedinačnih pilota, uglavnom za koherentno tlo. Ocjenjivanje je provedeno na bazi rezultata statičkog penetracijskog pokusa (CPT) te na temelju statičkih metoda baziranih na analizi efektivnih i ukupnih naprežanja. U analizi je razmatrano sedamnaest utisnutih MEGA pilota i osam Franki pilota različite dužine.

Na temelju dobivenih rezultata mogu se izvesti sljedeći zaključci: Kod izravnih CPT metoda, osnovni faktori koji utječu na neslaganje između predviđenih i izmjerenih vrijednosti nosivosti pilota proizlaze iz nedorečenosti metoda CPT primijenjenih za predviđanje te iz neodgovarajućeg tumačenja rezultata ispitivanja nosivosti pilota.

Ustanovljeno je da je od svih izravnih CPT metoda koje su analizirane u ovom radu, za analiziranu vrstu tla i tipove pilota najprikladnija ona koju predlažu Bustamante i Ganeselli (LCPC) te se stoga može preporučiti za primjenu u svakodnevnoj inženjerskoj praksi. Druga po kvaliteti je metoda koju predlažu De Ruitter i Beringen. Ona se može smatrati prikladnom za primjenu u analiziranim geotehničkim uvjetima, ali pritom svakako treba uzeti u obzir odabir korigiranih faktora korelacije N_k . U Penpile metodi znatno se podcjenjuje vrijednost nosivosti pilota, pa se stoga ona smatra izrazito konzervativnom. U metodama koje predlažu Price i Wardle, Schmertmann te Tumay i Fakhroo znatno se precjenjuje vrijednost osne nosivosti pilota, pa stoga te metode nisu pogodne za analizirane geotehničke uvjete.

U β -metodama koje predlažu Meyerhof i Hansen precjenjuje se nosivost pilota i to zato što su bazirane na analizi efektivnih naprežanja, a to nije u skladu s nedreniranim uvjetima za zasićeno glineno tlo. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da je α -metoda prikladna za predviđanje nosivosti pilota u analiziranom tlu od zasićene gline.

LITERATURA

- [1] Briaud, J.L., Tucker, L.M.: Measured and predicted axial response of 98 piles, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114 (1988) 9, pp. 984-1001.
- [2] Sharp, M.R., McVay, M.C., Townsend, F.C., Basnett, C.R.: Evaluation of pile capacity from in situ tests, *Proceedings of the Symposium on Soil Properties-Evaluation from Centrifugal Models and Field Performance at ASCE National Convention, Nashville*, pp. 134-156, 1988.
- [3] Eslami, A., Fellenius, B.H.: Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories, *Canadian Geotechnical Journal*, 34 (1997) 6, pp. 886-904.
- [4] Abu-Farsakh, M.Y., Titi, H.H.: Assessment of direct cone penetration test methods for predicting the ultimate capacity of friction driven piles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (2004) 9, pp. 935-944.
- [5] Bustamante, M., Gianselli, L.: Pile Bearing Capacity Prediction by Means of Static Penetrometer CPT, *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam*, pp. 493-500, 1982.
- [6] Schmertmann, J.H.: Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design, Rep. No. FHWA-TS-78-209, Washington D.C., 1978.
- [7] De Ruiter, J., Beringen, F.L.: Pile foundations for large North Sea structures, *Marine Georesources i Geotechnology*, 3 (1979) 3, pp. 267-314.
- [8] Tumay, M.T., Fakhroo, M.: Friction pile capacity prediction in cohesive soils using electric quasi-static penetration tests, *Interim Research Rep. No. 1, Louisiana Department of Transportation and Development, Baton Rouge, Louisiana*, 1982.
- [9] Clisby, M.B., Scholtes, R.M., Corey, M.W., Cole, H.A., Teng, P., Webb, J.D.: An evaluation of pile bearing capacities, Volume I, Final Report, Mississippi State Highway Department, 1978.
- [10] Philipponnat, G.: Methode pratique de calcul d'un pieu isole a l'aide du penetrometre statique, *Rev. Fr. Geotech.*, 10, pp. 55-64, 1980.
- [11] Price, G., Wardle, I.F.: A comparison between cone penetration test results and the performance of small diameter instrumented piles in stiff clay, *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam*, pp. 775-780, 1982.
- [12] Aoki, N., de Alencar, D.V.: An approximate method to estimate the bearing capacity of piles, *Proc. 5th Pan-American Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires*, 1 (1975), pp. 367-376.
- [13] Meyerhof, G.G.: Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 102 (1976), pp. 195-228.
- [14] Bowles, J.E.: *Foundation analysis and design* (5th edition), McGraw-Hill, 1997.
- [15] American Petroleum Institute: *API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Off-shore Platforms*, API, Washington D.C., 1984.
- [16] Briaud, J.L.: *Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils*, John Wiley & Sons, 2013.
- [17] Report on the findings of the causes of settlements of the building of Faculty of Chemistry in Belgrade (In Serbian), *Kosovoprojekt, Belgrade*, 1974.
- [18] Main design of rehabilitation of the foundations of Faculty of Chemistry in Belgrade (In Serbian), University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 2008.
- [19] Main design of rehabilitation of St. Nicholas church structure in Zemun, University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 2010.
- [20] Report on geotechnical investigation with foundation conditions for wind turbine generators VG1-VG39, wind park "Košava", University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 2012.
- [21] Geotechnical report for the needs of the Main design of wind power plant "Malibunar" (In Serbian), Geopot, Belgrade, 2013.
- [22] Geotechnical report for the needs of the Main design of wind power plant "Alibunar" (In Serbian), Geopot, Belgrade, 2013.
- [23] Geotechnical report for the needs of design of the new distribution center with internal supporting roadways "Univerexport" in Novi Sad (In Serbian), GT Inženjering, Belgrade, 2015.
- [24] ASTM D1143: Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load, ASTM International, 2013.
- [25] Chin, F.K.: Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure, *Proceedings of the Second Southeast Asian Society of Soil Engineering, Singapore*, pp. 81-90, 1970.
- [26] Librić, L., Jurić-Kačunić, D., Kovačević, M.S.: Application of cone penetration test (CPT) results for soil classification, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 1, pp. 11-20.
- [27] Long, J.H., Wysockey, M.H.: Accuracy of methods for predicting axial capacity of deep foundations, *Proc. OTRC '99 Conf.: Analysis, Design, Construction, and Testing of Deep Foundations, GSP No. 88, Reston*, pp. 190-195, 1999.
- [28] Cai, G., Liu, S., Tong, L., Du, G.: Assessment of direct CPT and CPTU methods for predicting the ultimate bearing capacity of single piles, *Engineering Geology*, 104 (2009) 3, pp. 211-222.
- [29] Brown, R.P.: Predicting the ultimate axial resistance of single driven piles, PhD thesis, University of Texas, 2001.
- [30] Yu, F., Kou, H., Liu, J., Yang, Y.: Jacking installation of displacement piles: from empiricism toward scientism. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 12 (2012), pp. 1381-1390.