



**SAVEZ GRAĐEVINSKIH
INŽENJERA SRBIJE**
ASSOCIATION OF CIVIL ENGINEERS
OF SERBIA

GEOTEHNIČKI ASPEKTI GRAĐEVINARSTVA

ZBORNIK RADOVA
OSMOG NAUČNO-STRUČNOG MEĐUNARODNOG SAVETOVANJA

*EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE
GEOTECHNICS IN CIVIL ENGINEERING
CONFERENCE PROCEEDINGS*

Editor: Prof. emeritus dr Radomir Folić



Vrnjačka Banja, 13. - 15. novembar 2019.

ПРОРАЧУН СЛЕГАЊА АКСИЈАЛНО ПРИТИСНУТИХ ШИПОВА У СЛОЈЕВИТОЈ ЕЛАСТИЧНОЈ СРЕДИНИ

Слободан Самардаковић, Мирољуб Самардаковић

"GeoSol" ДОО за грађевинску геотехнику, Ниш, geosolnis@yahoo.com

РЕЗИМЕ

За примену у пракси сажето су приказана решења Poulos,Davis(1980) и Randolph, Wroth(1978), у форми (1) и (4-6) чијим се увођењем табеларне прорачуне добијају и приказују *GeoData2* дијаграми према овим решењима за директно димензионисање шипова у погледу жељеног оптерећења и слегања у слојевитој еластичној средини.

КЉУЧНЕ РЕЧИ: СРТ, слегање шипова, слојевити еластични медијум.

DISPLACEMENT OF AXIAL COMPRESSED PILES IN LAYERED ELASTIC MEDIUM

ABSTRACT

For practical application, solutions of Poulos,Davis(1980) and Randolph,Wroth(1978) are summarized, in the form (1) and (4-6), whose introduction in tabular calculations provides and displays *GeoData2* diagrams according to these solutions for direct pile dimensioning in terms of desired load and settlement in a layered elastic medium.

KEYWORDS: CPT, pile settlement, layered elastic medium.

УВОД

Због чињенице да се тло уз шип у току његовог извођења поремећује и да такво, са својствима различитим од оних одређених геотехничким истраживањима, утиче на понашање шипа, према савременој регулативи (ЕС7 – EN 1997-1:2004) готово сви прихватљиви поступци за пројектовање шипова морају непосредно или посредно бити засновани на емпиријским резултатима статичких пробних оптерећења шипова. Ти пројектни поступци су: (а) непосредно испитивање пробних шипова, (б) емпиријске или аналитичке прорачунске методе чија је ваљаност потврђена статичким пробним оптерећењима у упоредивим ситуацијама и (в) резултати динамичких ударних опита чија је ваљаност потврђена статичким пробним оптерећењима у упоредивим ситуацијама (Ivšić, T. i dr., 2006) – што домаће извођаче и пројектанте упућује на већи обим пробних оптерећења и систематизацију расположивих података како би се створили услови за препознавање упоредивих ситуација за пројектовање или

калибрисање прорачунских метода и постигла одговарајућа верификација поступака, као у богатијим срединама, у складу са европским EC7.

Тако нпр. и DIN 1054(2005) налаже одређивање носивости бушених шипова на емпиријским везама оптерећења и слегања врха шипа, према чему се носивост (тла поред) омотача шипа пречника D задаје за слегање $s/D < 0,02$ (највише 3 cm) а носивост (тла испод) базе шипа (и укупна носивост шипа као збир две вредности) задаје се за граничну вредност слегања при слому тла, која у складу са EC7 износи 10% пречника шипа тј. базе шипа, уколико пре тога слом није јасно видљив са криве пробног оптерећења. Таква носивост бушених шипова рачуна се на основу задатих специфичних отпора испод базе при слегањима $s/D = 0,02; 0,03$ и $0,10$ и око шипа, у зависности од СРТ отпора (q_c) за 'некохерентна' тла и недрениране чврстоће (c_u) за 'кохерентна' тла.

У подручјима са недовољно бројним резултатима пробних оптерећења и/или недовољно упоредивим ситуацијама (као напред), за праксу и даље остаје мноштво теоријско-емпиријских или емпиријских решења из обимне светске литературе, укључујући и савремене софтвере са нумеричким решењима – којима се шипови конвенционално димензионишу у погледу носивости тла и/или очекиваног слегања шипа, у домаћој пракси (пре)често без нужне савремене интерпретације резултата теренских и лабораторијских испитивања и довољних увида у услове за које решења могу да важе.

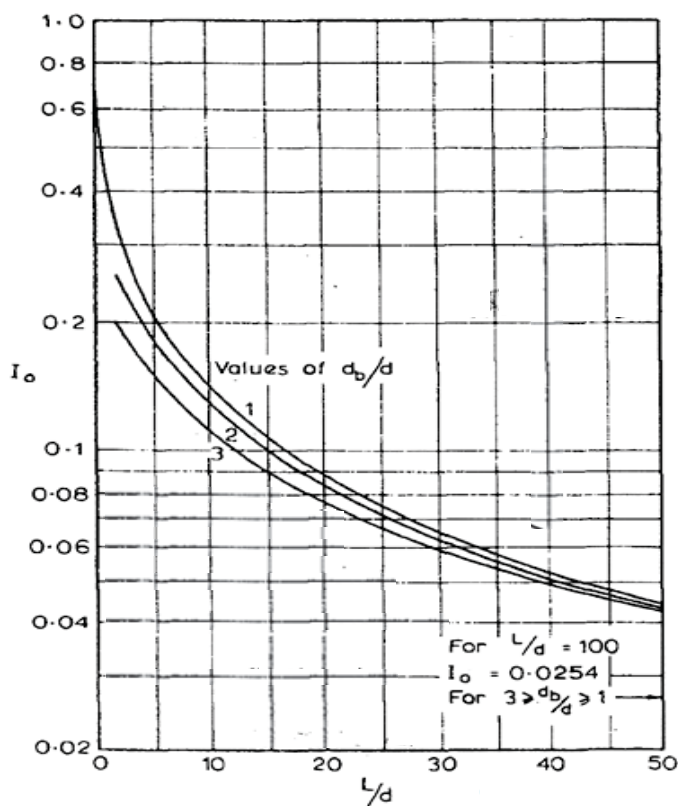
За повезивање носивости и слегања, најгрубља претпоставка за прорачун слегања шипа је да је оно једнако слегању еквивалентне квадратне 'стопе' на препорученој дубини која зависи од грађе терена, под оптерећењем једнаком оптерећењу шипа. Она је у пракси превазиђена савременим анализама преноса оптерећења са шипа на тло уз омотач и базу шипа, из чега су произашла актуелна (а) решења са систематизованим дијаграмима преноса оптерећења кроз основне типове тла и (б) решења за тло као еластични континуум, са применом FEM или BEM или, као довољно поуздана и данас у пракси актуелна, поједностављена теоријска решења за хомогену еластичну средину – применом дијаграма Poulos,Davis(1980) и аналитичког решења Randolph,Wroth (1978) у освеженим варијантама (Mayne,Niazi,2009; Viggiani et al.,2012). Та решења теорије еластичности овде се приказују сажето, за праксу, са примерима примене за слојевиту еластичну средину у оквиру пакета GeoData2 (Самардаковић и др.,2019) – док се и за домаће геотехничке услове не конституишу довољно поуздана емпиријска решења према EC7.

РЕШЕЊЕ POULOS,DAVIS(1980)

Према и сада актуелном решењу бројно цитираних аутора (Poulos,Davis,1980), слегање (s) врха *лебдећег* шипа познате дужине (L) у тлу, пречника врата (d) и базе (d_b) и модула еластичности (E_p), осно оптерећеног компресионом силом (V), у тлу као хомогеној еластичној средини са Поасоновим коефицијентом (ν_s) и модулом еластичности (E_s), може се са довољно тачности срачунати као

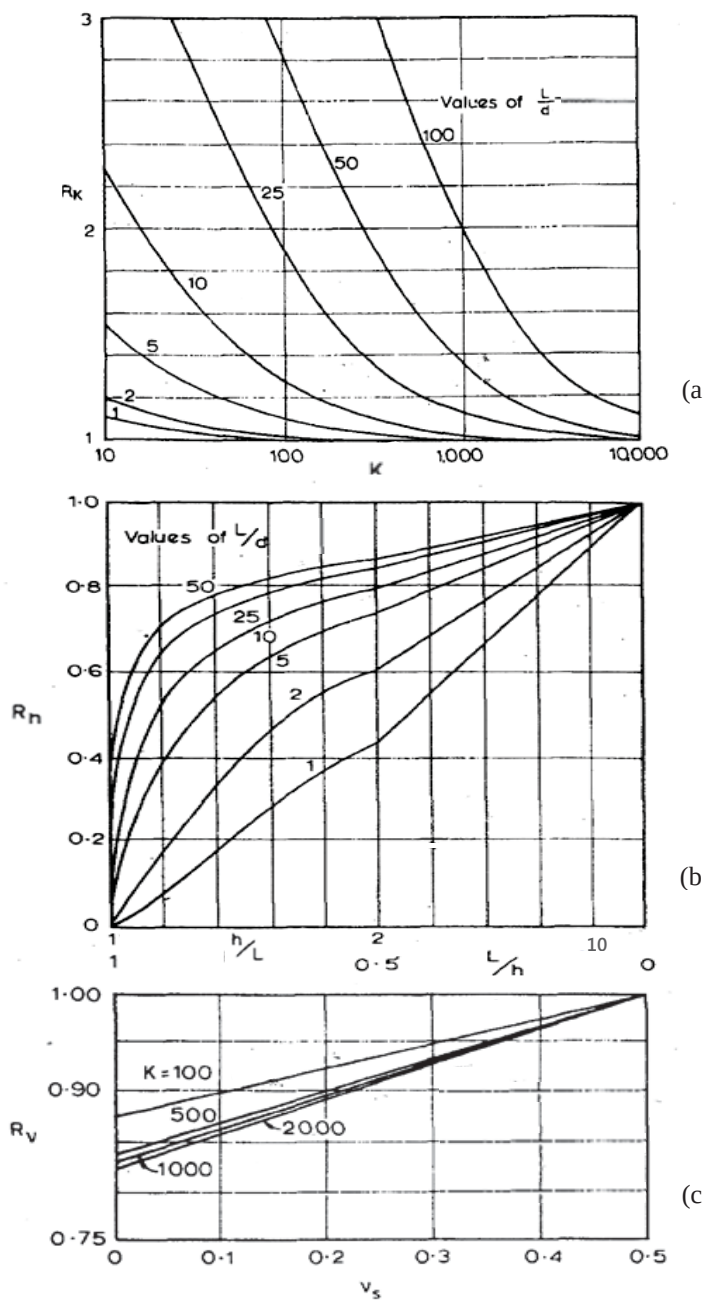
$$s = [V/(E_s d)]I \quad I = I_o R_K R_h R_v \quad (1)$$

где су: I_o коеф. слегања крутог шипа у тлу као полупростору са $\nu_s=0,5$ (Слика 1)
 R_K коеф. корекције због реалне крутости шипа $K = E_p/E_s$ (Слика 2a)
 R_h коеф. редукције због чвршће подине (са E_b) на дубини $h > L$ (Слика 2b)
 R_v коеф. редукције због деформабилности тла са $\nu_s < 0,5$ (Слика 2c)



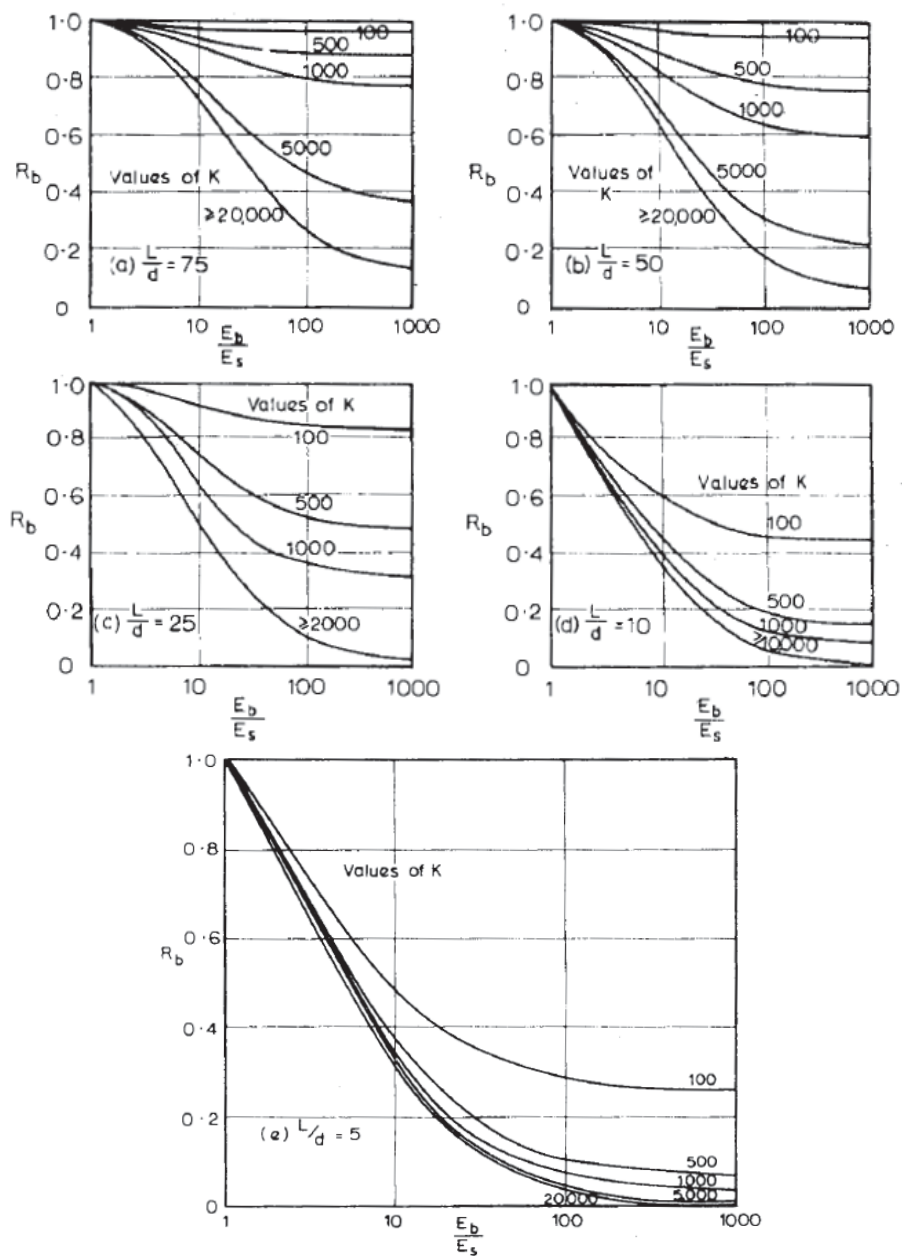
Слика 1. Коефицијент слегања, I_o (Poulos,Davis,1980)
 Figure 1. Settlement-influence factor, I_o (Poulos,Davis,1980)

За *стојећи* шип на чвршћој подини са модулом еластичности E_b на дубини $h = L$, уместо R_h у (1) се уноси R_b – коеф. редукције због чвршће подине (Слика 3).



Слика 2. Коефицијенти (a) R_K због K шипа, (b) R_h због h , (c) R_v због v (Poulos, Davis, 1980)

Figure 2. Correction factors (a) R_K due to K , (b) R_h due to h , (c) R_v due to v



Слика 3. Коэффициент редукције R_b због подине стојећег шипа (Poulos,Davis,1980)
 Figure 3. Base modulus correction factor R_b for end-bearing pile (Poulos,Davis,1980)

РЕШЕЊЕ RANDOLPH, WROTH(1978)

Randolph and Wroth (1978) анализирали су интеракцију базе шипа и еластичног континуума и одвојено интеракцију омотача и два решења сјединили у поједностављено теоријско опште решење за слегање, релативно крутог шипа у еластичном полупростору, са актуелним верзијама у савременој литератури и пракси.

Према верзији Viggiani et al.(2012), слегање (s) врха шипа познате дужине (L), полупречника врата ($r = d/2$) и базе ($r_b = d_b/2$) и модула еластичности (E_p), осно оптерећеног компресионом силом (V), у тлу као хомогеној еластичној средини са Поасоновим коефицијентом (ν) и модулом еластичности (E_s), може се срачунати као

$$s = [V/(E_s L)] I_s \quad (2)$$

$$I_s = \frac{2L(1+\nu)}{r} \left[1 + \frac{4}{1-\nu} \frac{\eta \operatorname{tgh}(\mu L)}{\xi} \frac{L}{\mu L} \frac{1}{r} \right] / \left[\frac{4}{1-\nu} \frac{\eta}{\xi} + \frac{2\pi\rho \operatorname{tgh}(\mu L)}{\zeta} \frac{L}{\mu L} \frac{1}{r} \right] \quad (3)$$

где су: $\eta = r_b/r$ $\eta = 1$ за цилиндрични шип, $\eta > 1$ за шип са проширеном базом

$\xi = G_s/G_b$ $G = E/[2(1+\nu)]$ за тло са G_s око шипа и G_b испод базе

$\rho = \bar{G}/G_s$ за шипове кроз тло са променљивом крутошћу

$\zeta = \ln\{0,25 + [2,5\rho(1-\nu) - 0,25]\xi\} L/r$

$\lambda = E_p/E_s$ релативна крутост шипа

$\mu L = \sqrt{2/(\zeta\lambda)} L/r$

Како се види, решење је примењиво и за двослојну средину, са чвршћим тлом базе.

Према верзији Maune, Niazi(2009), изведеној из општег решења после теренских експерименталних провера, нешто погоднијој за примену у пракси, може се одредити слегање крутог лебдећег (floating) или стојећег (end-bearing) шипа дате дужине (L) и пречника (d) у двослојној еластичној средини у којој је око шипа тло са Поасоновим коефицијентом (ν) и еквивалентним модулом еластичности (E_s) – који може бити константа или може да расте линеарно са дубином, за одабрано $k_E = \Delta E / \Delta z$ као у генерализованом Gibson-тлу, од E_{s0} око врха шипа при површини терена до $E_{sM} = E_{s0} + k_E(L/2)$ око средине шипа и до $E_{sL} = E_{s0} + k_E L$ поред базе шипа – а испод шипа је тло базе са модулом еластичности (E_b). За такве услове, слегање се може срачунати као

$$s = [V/(E_{sL} d)] I_s \quad (4)$$

$$I_s = \frac{1}{\frac{E_b}{E_{sL}} \frac{1}{1-\nu^2} + \frac{\pi}{1+\nu} \frac{L/d}{\zeta_p}} \quad (5)$$

$$\zeta_p = \ln \left\{ 5 \frac{L}{d} \left\{ \frac{E_{sL}}{E_b} [\rho_E(1-\nu) - 0,1] + 0,1 \right\} \right\} \quad (6)$$

где је: $\rho_E = \frac{E_{sM}}{E_{sL}} = 1 - \frac{1}{2E_{s0}/(k_E L) + 2}$

У оквиру ове верзије за наведени најсложенији случај даје се и пропорција отпора базе (V_b) при слегању и укупног оптерећења шипа (V):

$$\frac{V_b}{V} = \frac{1}{1 + \frac{\pi}{\zeta_p} \frac{E_{sL}}{E_b} \frac{L}{d} (1 - \nu)} \quad (7)$$

За најједноставнији случај, са хомогеним тлом ($\nu, E_s = \text{const.}$) око и испод шипа, и решење (4)-(6) за слегање постаје једноставно:

$$s = [V/(E_s d)] I_s \quad I_s = \frac{1}{\frac{1}{1 - \nu^2} + \frac{\pi}{1 + \nu} \frac{L/d}{\ln[5(L/d)(1 - \nu)]}} \quad (4', 5')$$

ПРИМЕНА РЕШЕЊА У СЛОЈЕВИТОЈ ЕЛАСТИЧНОЈ СРЕДИНИ

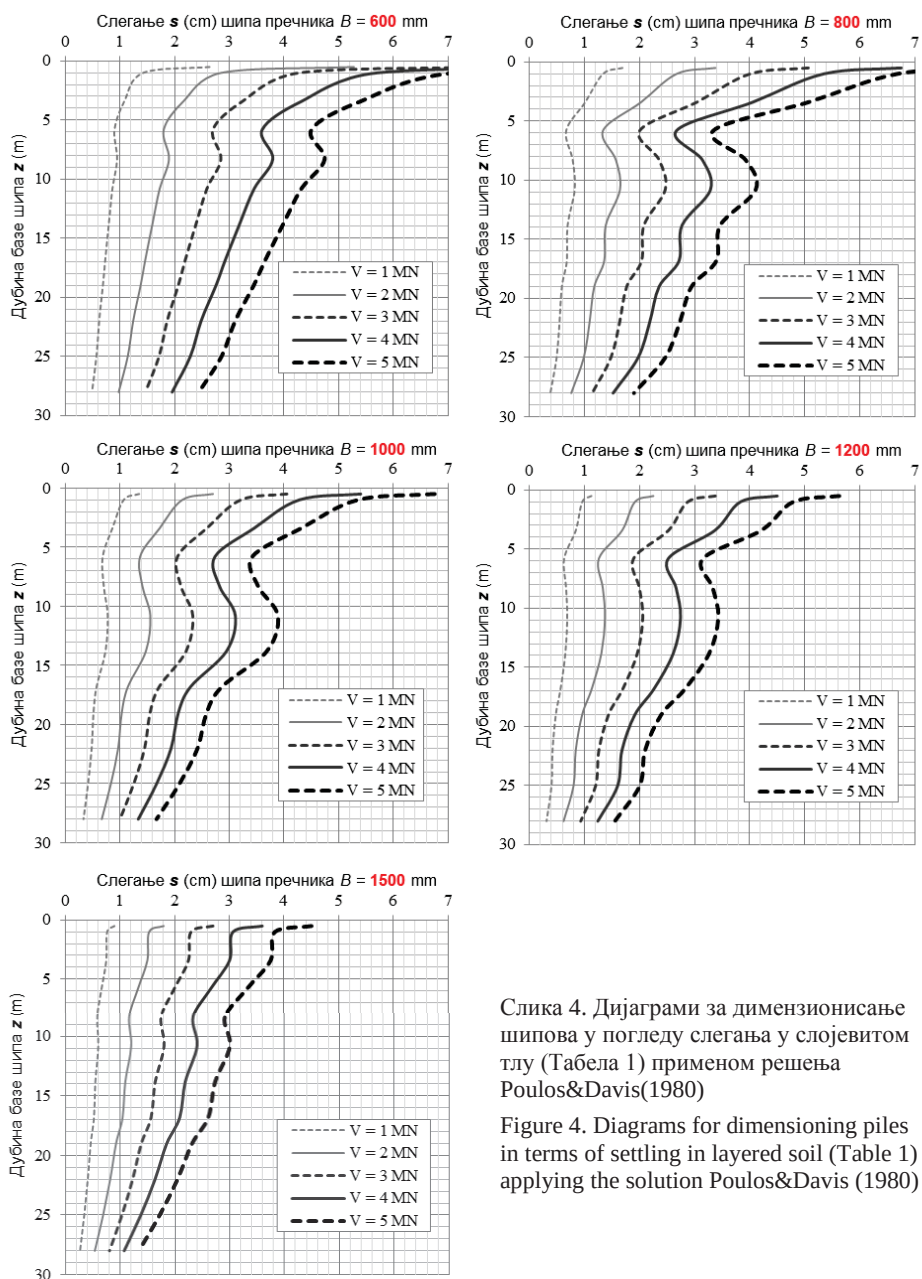
За рачунску анализу геотехничких услова темељења планиране 22-етажне пословно-стамбене куле висине 92 m у Нишу (Самардаковић и др., 2019), аутори овога рада проширили су софтверски пакет *GeoData2* (Самардаковић, 1996, 2005) прорачуном дијаграма за директан избор пречника и дубина бушених шипова за жељену носивост према југословенском Правилнику (1990) и директним СРТ-решењима LCPC (1982), Миловић (2018) и LPC (2012), као и за жељено слегање шипова у еластичној средини према решењима Poulos, Davis (1980) и Randolph, Wroth (1978) – са дијаграмима међузависности дозвољене *носивости*, пречника и дубине шипа у слојевитом тлу, као и међузависности ових утицаја и *слегања* шипа у слојевитом тлу.

Као и за прорачуне дијаграма носивости у другом раду аутора у овом Зборнику, рачунских 5 слојева терена до истражене дубине 30 m (Табела 6) издељено је у укупно 12 ламела висина h_i , свака са својим еластичним константама (ν_i, E_i). Аутоматизованим табеларним прорачунима, за дубине $z = L$ до дна сваке ламеле одређују се еквивалентне еластичне константе групе слојева поред шипа

$$\nu_s = (1/z) \sum_0^z h_i \nu_i \quad E_s = (1/z) \sum_0^z h_i E_i$$

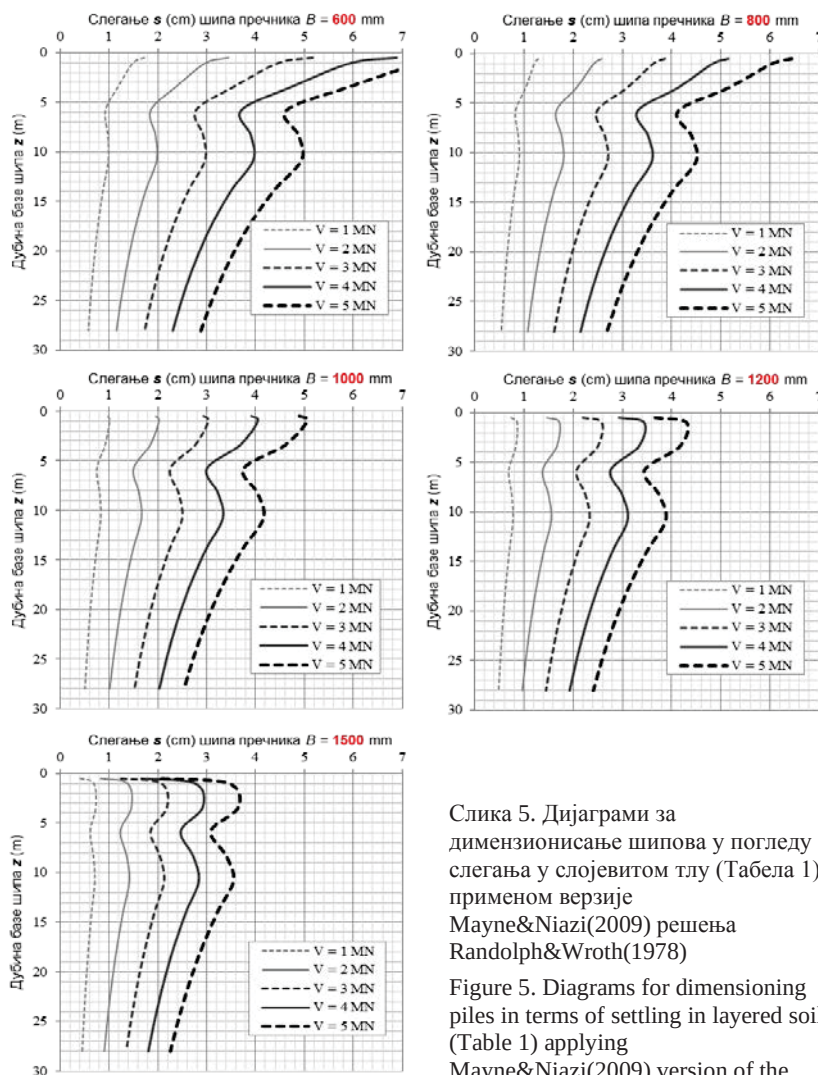
и за сваки одабрани пречник шипа (d) одговарајуће вредности коефицијената слегања $I_{dz} = I_s/(E_s d)$ а затим и слегања ($s = V I_{dz}$) за очекивана оптерећења (V) – према описаном решењу Poulos, Davis (1980) и Maupé, Niazi (2009) верзији решења Randolph, Wroth (1978), са резултатима графички приказаним у виду дијаграма (Слике 4 и 5) за грађу и својства терена наведеног високог објекта (Табела 1), одређена СРТ пенетрацијама до дубине до које се допрло под дејством 200 kN а наниже на основу савремених корелација са резултатима SPT и лабораторијских испитивања.

Како се може видети, дијаграми омогућавају (директно или непосредном интерполацијом) процену слегање шипа произвољних димензија под произвољним оптерећењем или димензионисање шипа за жељено слегање, што у оквиру геотехничке подлоге пројекта конструктору објекта олакшава поређење, избор и разраду рационалне варијанте решења за дубоко темељење.



Слика 4. Дијаграми за димензионисање шипова у погледу слегања у слојевитом тлу (Табела 1) применом решења Poulos&Davis(1980)

Figure 4. Diagrams for dimensioning piles in terms of settling in layered soil (Table 1) applying the solution Poulos&Davis (1980)



Слика 5. Дијаграми за димензионисање шипова у погледу слегања у слојевитом тлу (Табела 1) применом верзије Mayne&Niazi(2009) решења Randolph&Wroth(1978)

Figure 5. Diagrams for dimensioning piles in terms of settling in layered soil (Table 1) applying Mayne&Niazi(2009) version of the

Табела 1. Геометрија слојева терена и својства тла у слојевима (Самардаковић и др.,2019)
Table 1. The geometry of the layers of terrain and soil properties in layers

	Слој	z [m]	h [m]	γ_{ef} [kN/m ³]	c' [kPa]	φ' [°]	q_c [MPa]	M_v [MPa]	ν	E [MPa]
1	Шљунчани јастук	1,00	1,00	11,0	0	35	20	40	0,25	33
2	Шљунак песковит	5,80	4,80	11,0	0	33	20	25	0,25	21
3	Глина песковита	10,80	5,00	10,0	25	20	3	6	0,3	5
4	Песак лапоровит	16,80	6,00	10,5	10	31	10	13	0,25	11
5	Глина лапоровита	28,00	11,20	10,5	20	28	12	15	0,3	11

ЗАКЉУЧНЕ НАПОМЕНЕ

Како је наведено, савремена сазнања упућују на решења за димензионисање шипова која би требало заснивати, у складу са ЕС7, пре свега на систематизованим емпиријским резултатима за препознатљиве регионалне ситуације, највише на резултатима статичких пробних оптерећења. Док таква национална регулатива не буде конституисана и за домаће услове као за богатије регионе (нпр. AFNOR, 2012 или DIN 1054, 2005), за анализе слегања шипова преостају позната афирмисана рачунска решења Poulos, Davis (1980) и Randolph, Wroth (1978), у раду сажето приказана за (пожељну обилнију) праксу. Увођењем еквивалентних еластичних константи за слојеве тла око шипа, оба решења за хомогени континуум примењена су за шипове у слојевитом тлу, са добијањем GeoData2 дијаграма (Слике 4 и 5) за директно димензионисање шипова у погледу жељеног оптерећења и слегања у слојевитом тлу, што конструктору битно олакшава избор и разраду рационалне варијанте решења дубоког темељења. Примена приказаних решења је бржа и економичнија од скупљих савремених софтверских пакета а поређење Слика 4 и 5 показује да се међусобно битно не разликују, при чему је аналитичко решење Randolph једноставније, без читавања са дијаграма.

ЛИТЕРАТУРА И РЕФЕРЕНЦЕ

- AFNOR NF P94-262 (2012): *Justification des ouvrages géotechniques, Normes d'application nationale de l'Eurocode 7, Fondations profondes*, Paris.
- DIN 1054(2005): *Ground – Verification of the safety of earthworks and foundations*, Annex B: Design of axially loaded bored piles based on empirical values, pp.99-103.
- EN 1997-1:2004 Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules, pp.70-88.
- Ivšić, T. i dr., (2006): Suvremeni praktični postupci proračuna pilota, *Priopćenja 4. savjetovanja HGD*, Opatija, str.381-390.
- Mayne, P.W., Niazi, F.S. (2009): Evaluating axial elastic pile response from Cone Penetration Test, *Proceedings, CIGMAT*, University of Houston, pp.1-3.
- Poulos, H.G., Davis, E.H. (1980): *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley & Sons, New York, pp.86-90.
- Randolph, M.F., Wroth, C.P. (1978): Analysis of deformation of vertically loaded piles, *Journal Geot. Eng. Division, ASCE*, Vol.104, GT12, pp.1465-1488.
- Samardaković, M. (1996): Geomehanički programski sistemi GeoData1 i GeoData2, *Zbornik radova Međunarodnog naučnog skupa Pravci razvoja geotehnike*, RGF, Beograd, str.395-404.
- Samardaković, M. (2005): Dimenzionisanje osno opterećenog šipa u višeslojnom tlu, *Zbornik radova savetovanja „Geotehnički aspekti građevinarstva“*, SGIT SCG, Kopaonik, str.295-300.
- Samardaković, M. i др. (2019): *Geotehnički uslovi izgradnje stambenih i poslovnih objekata br.33-36 kompleksa "Novi Niš"*, GeoSol DOO, Niš, 249 strana.
- Viggiani, C. et al. (2012): *Piles and Pile Foundations*, Spon Press, London, pp.98-100.