

Primljen / Received: 6.3.2019.

Ispravljen / Corrected: 2.6.2019.

Prihvaćen / Accepted: 22.9.2019.

Dostupno online / Available online: 10.10.2020.

# Analiza osnotlačno opterećenih modela spiralnih pilota

## Autori:

**Yakup Türedi**, dipl.ing.građ.

Tehničko sveučilište u Iskenderunu, Turska  
Fakultet za tehničke i prirodne znanosti  
Odjel za građevinarstvo  
[yakup.turedi@iste.edu.tr](mailto:yakup.turedi@iste.edu.tr)

**Prof.dr.sc. Murat Örne**, dipl.ing.građ.

Tehničko sveučilište u Iskenderunu, Turska  
Fakultet za tehničke i prirodne znanosti  
Odjel za građevinarstvo  
[murat.ornek@iste.edu.tr](mailto:murat.ornek@iste.edu.tr)

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

**Yakup Türedi, Murat Örne**

## Analiza osnotlačno opterećenih modela spiralnih pilota

U radu je prikazano istraživanje otpornosti pojedinačnih osnotlačno opterećenih spiralnih pilota u suhom pijesku pomoću laboratorijskih fizikalnih modela i numeričkih analiza. Dobivene vrijednosti tlačne nosivosti uspoređene su s postojećim teoretskim rezultatima iz literature. Laboratorijska ispitivanja na modelima provedena su kako bi se odredili neki od parametara potrebnih za projektiranje spiralnih pilota, kao što su broj, promjer i razmak spiralnih ploča. Rezultati su pokazali da broj, veličina i razmak spiralnih ploča utječu na ponašanje spiralnih pilota. Utvrđena je dobra podudarnost između eksperimentalnih, numeričkih i teoretskih rezultata.

### Ključne riječi:

spiralni pilot, tlak, modelsko ispitivanje, numeričke analize, pijesak

Research Paper

**Yakup Türedi, Murat Örne**

## Analysis of model helical piles subjected to axial compression

An investigation into axial compression capacity of single helical piles placed in dry sand through laboratory model tests and numerical analyses is presented. The compressive bearing capacities were compared with existing theoretical results given in the literature. Laboratory model tests were performed to determine some design parameters of helical piles such as the plate number, plate diameter, and plate spacing. A good correspondence between experimental, numerical, and theoretical results was established.

### Key words:

helical pile, compression, model test, numerical analyses, sand

Vorherige Mitteilung

**Yakup Türedi, Murat Örne**

## Analyse axial belasteter Spiralpfahlmodelle

Die Arbeit präsentiert eine Studie über den Widerstand einzelner axial belasteter Spiralpfähle in trockenem Sand unter Verwendung physikalischer Labormodelle und numerischer Analysen. Die erhaltenen Werte der Druckkapazität wurden mit den vorhandenen theoretischen Ergebnissen aus der Literatur verglichen. Labortests an den Modellen wurden durchgeführt, um einige der Parameter zu bestimmen, die für die Planung von Spiralpfählen erforderlich sind, wie z. B. Anzahl, Durchmesser und Abstand der Spiralplatten. Die Ergebnisse zeigten, dass Anzahl, Größe und Abstand der Spiralplatten das Verhalten der Spiralpfähle beeinflussen. Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen, numerischen und theoretischen Ergebnissen gefunden.

### Schlüsselwörter:

Spiralpfahl, Druck, Modellprüfung, numerische Analyse, Sand

## 1. Uvod

Kao što je poznato, postupak dubokog temeljenja primjenjuje se kada plitki temelji ne udovoljavaju geotehničkim zahtjevima. Jedna vrsta dubokih temelja, poznata pod nazivom spiralni piloti (ili torzijski zabijani piloti), ima široku primjenu u mnogim državama zbog brojnih prednosti kao što su:

- mogućnost ugradnje u različitim klimatskim i terenskim uvjetima
- isplativost i brza ugradnja
- jednostavan prijevoz, vađenje i ponovno korištenje
- sposobnost preuzimanja opterećenja neposredno nakon ugradnje
- jednostavna ugradnja u različitim uvjetima u tlu i brza primjena
- prednosti u odnosu na tradicionalni sustav pilotiranja, tj. u odnosu na ugradnju pomoću tradicionalne opreme.

Osim toga, takvi piloti osiguravaju stabilnost konstrukcije i u slučajevima vlačnog opterećenja, osnog tlaka, bočnog opterećenja i pojave momenata prevrtanja, u statičkim i dinamičkim situacijama. Spiralni se piloti koriste u brojnim područjima građevinarstva kao npr. u izgradnji stambenih i poslovnih zgrada, mostova, temelja oštećenih i nesigurnih građevina, temelja povijesnih građevina, temelja energetskih sustava kao što su vjetroagregati i solarni paneli, temelja rasvjetnih stupova, temelja za razna postrojenja i cjevovode, temelja za dalekovode i stupove, sidrenja i temeljenja u morskim uvjetima te u okviru mjera za zaštitu iskopa. Ugradnja spiralnih pilota ne proizvodi značajne vibracije (pa je stoga prikladna za ojačanje temeljnih konstrukcija kod osjetljivih građevina) i nema otpadnog materijala tijekom montaže pilota. Zbog svih tih svojstava spiralni se piloti smatraju ekološki prihvatljivim rješenjem [1-3].

U ovom je radu određivanje ponašanja tlačno opterećenih modela spiralnih pilota u pjeskovitom tlu provedeno pomoću fizikalnih modela u umanjenom mjerilu i numeričkih analiza baziranih na metodi konačnih elemenata. Istraženi su utjecaji broja spiralnih ploča (jednostruka/dvostruka), odnosa razmaka spiralnih ploča ( $s/D$ ) (1, 1,5, 2, 2,5 i 3) i promjera spiralnih ploča (50 mm, 75 mm, 100 mm i 125 mm) na tlačnu otpornost pilota. Rezultati dobiveni ispitivanjima modela uspoređeni su s teoretskim rezultatima iz literature. Utvrđena je dobra podudarnost između eksperimentalnih, numeričkih i teoretskih rezultata.

## 2. Pregled literature

Posljednjih se desetljeća bilježi sve veći porast zanimanja za spiralne pilote. Pregledom dostupnih istraživanja i metoda projektiranja, može se utvrditi da je tlačno ponašanje spiralnih pilota manje zastupljeno od ostalih konvencionalnih temelja na pilotima pod tlačnim i vlačnim opterećenjem [4].

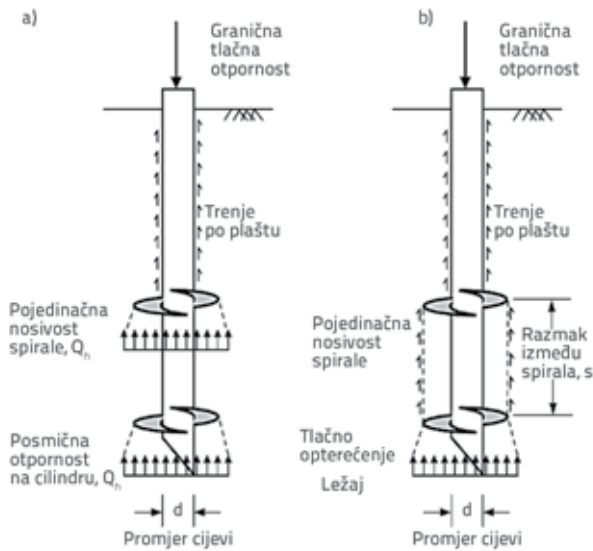
Sakr [5] je proveo niz vlačnih i tlačnih ispitivanja na jednostrukim i dvostrukim spiralnim pilotima u tlima različite gustoće. Od

ukupno jedanaest ispitivanja, provedeno je sedam tlačnih i četiri vlačna ispitivanja. Utvrđeno je da je metoda pojedinačne nosivosti najprikladnija za procjenu nosivosti pilota. Cjelokupno ponašanje pilota uvjetovano je geometrijom pilota, karakteristikama podzemne vode, profilom tla te postupkom ugradnje pilota. Također je utvrđeno da osno opterećeni spiralni piloti pokazuju znatnu tlačnu otpornost, do otprilike 1920 kN. Malik i dr. [6] istraživali su nosivost cijevnih i spiralnih pilota opterećenjem fizikalnih modela pilota u malom mjerilu. Na krivulju opterećenja i slijeganja utječe promjer baze pilota, kako kod cijevnih tako i kod spiralnih pilota. Li i Deng [7] istraživali su otpornost različitih vrsta pojedinačnih spiralnih pilota malog promjera pod osnim opterećenjem. Nekoliko spiralnih pilota ugrađeno je u znatno i koherentno tlo, nakon čega je nanoseno opterećenje. Autori su zaključili da se ponašanje spiralnih pilota može precizno ocijeniti primjenom hiperboličnog pristupa. Nakon tih ispitivanja, provedeno je i nekoliko parametarskih istraživanja kako bi se definirala optimalna ekvivalentna dužina plašta pilota.

Numerička istraživanja također su provedena radi ocjene ponašanja spiralnih pilota na djelovanje osnog tlaka, vidi npr. [4, 8-10]. Livneh i Naggar [4] proveli su ispitivanja opterećenja pilota u pravoj veličini te odgovarajuće numeričke analize kako bi ocijenili ponašanje spiralnih pilota pod osnim tlačnim opterećenjem. Ti su autori utvrdili da je u mehanizmu prijenosa opterećenja dominantno posmično popuštanje na cilindru. Sprince i Pakrastinsh [8] istraživali su tlačno ponašanje sustava spiralnih pilota ugrađenih u četiri različite vrste tla, i u tu su svrhu primijenili tri metode proračuna i simulaciju metodom konačnih elemenata. Ustanovili su da nosivost raste usporedno s veličinom spiralne ploče. Salhi i dr. [9] istraživali su ponašanje spiralnih pilota u nekoherentnom tlu i utjecaj odnosa razmaka ( $s/D_n$ ) (pri čemu je  $s$  razmak spirala a  $D_n$  je promjer spirale) primjenom dvodimenzionalne metode konačnih elemenata, nakon čega su proveli usporedbu s rezultatima ispitivanja na uzorcima u pravoj veličini. Zaključili su da se mehanizam prijenosa opterećenja mijenja od posmičnog popuštanja na cilindru do pojedinačnog popuštanja kada se omjer razmaka ( $s/D_n$ ) promijeni s 1,5 na 2. Polishchuk i Maksimov [10] analizirali su rezultate terenskog ispitivanja spiralnih pilota u glini primjenom metode konačnih elemenata. Ustanovili su da su rezultati dobiveni modeliranjem podudarni s rezultatima ispitivanja.

## 3. Metode za procjenu nosivosti

U literaturi je razvijeno nekoliko metoda projektiranja kojima se definira osna nosivost spiralnih pilota [11]. Te metode su model posmika na cilindru i model pojedinačne nosivosti (slika 1.). Do posmičnog popuštanja dolazi na površini cilindra koji spaja gornju i donju spiralu [4, 12-15]. Mehanizam popuštanja prema modelu pojedinačne nosivosti spiralne ploče predstavlja sumu svih pojedinačnih nosivosti spiralnog pilota te otpornosti na plaštu [4, 5, 13-18].



Slika 1. Procjenjivanje tlačne čvrstoće spiralnog pilota: a) metoda pojedinačne nosivosti; b) metoda posmika na cilindru [14]

Za zrnato tlo se granična tlačna otpornost spiralnih pilota određuje pomoću odgovarajućih formula koje se ovdje navode:

a) Metoda posmika na cilindru

$$Q_c = Q_{helix} + Q_{bearing} + Q_{shaft} \quad (1)$$

$$Q_{helix} = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \varphi \quad (2)$$

$$Q_n = A_n q N_q \quad (3)$$

$$Q_{shaft} = \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \varphi \quad (4)$$

$$Q_c = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma' (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \varphi + \gamma' H A_n N_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \varphi \quad (5)$$

gdje je,

- $Q_c$  – granična tlačna otpornost [kN]
- $K_s$  – bezdimenzijski koeficijent bočnog pritiska tla
- $\varphi$  – kut unutarnjeg trenja u stupnjevima
- $\gamma'$  – efektivna zapreminska težina [kN/m<sup>3</sup>]
- $A_n$  – neto površina najniže spirale [m<sup>2</sup>]
- $D_a$  – prosječni promjer spirale [m]
- $N_q$  – bezdimenzijski faktor nosivosti
- $H$  – duljina pilota [m]
- $H_{eff}$  – efektivna duljina plašta [m]
- $P_s$  – opseg plašta [m]
- $H_b$  – dubina do najniže spirale [m]
- $H_t$  – dubina do najviše spirale [m].

b) Metoda pojedinačne nosivosti

$$Q_c = \gamma' H_b A_n N_q + \gamma' H_t A_t N_q + P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \varphi \quad (6)$$

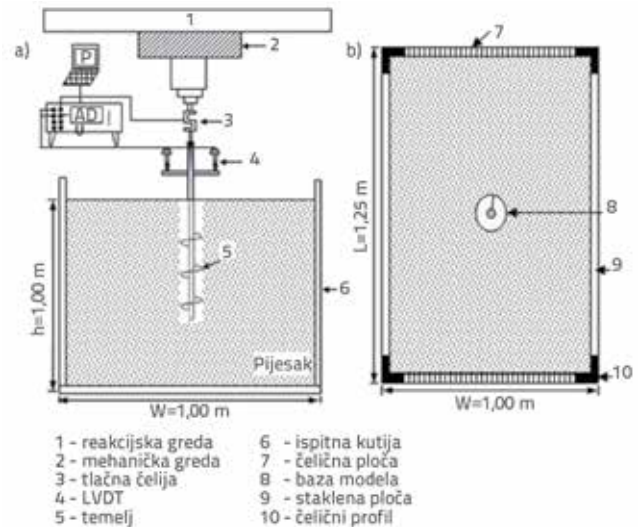
gdje je:

$Q_c$  – granična tlačna otpornost [kN]

$A_t$  – neto površina najviše spirale izračunane prema  $(D^2 - d^2)/4$ .

### 4. Materijali i metoda

Eksperimentalna ispitivanja opterećenjem provedena su u Geotehničkom laboratoriju Zavoda za građevinarstvo Tehničkog sveučilišta u Iskenderunu, Hatay, Turska. Ukupno je provedeno trideset laboratorijskih ispitivanja na modelima, pri čemu su korišteni različiti promjeri spiralnih ploča (u rasponu od 50 do 125 mm, uz inkrement promjera od 25 mm) i odnosi razmaka  $s/D$  od 1 do 3, u rahlom pijesku. Postava pokusa prikazana je na slikama 2. i 3.



Slika 2. Opći prikazi postave pokusa: a) pogled; b) tlocrt



Slika 3. Postava pokusa: pregledni prikaz

#### 4.1. Ispitna kutija

Za ispitivanje modela pilota, korištena je ispitna kutija dubine 1 m i tlocrtnih dimenzija 1,25 x 1,0 m. Bočne stranice i dno

kutije pojačani su kako bi se spriječila pojava bočnih deformacija tijekom punjenja kutije i nanošenja opterećenja. Debljina dviju suprotnih stranica kutije, izvedenih od stakla, iznosi 10 mm. Ostale su stranice izrađene od čelika debljine 3 mm. Osim toga, četiri kuta kutije oslonjena su na četiri čelična stupića. Tijekom ispitivanja, udaljenosti rubova ispitne kutije bile su veće od dimenzija pilota.

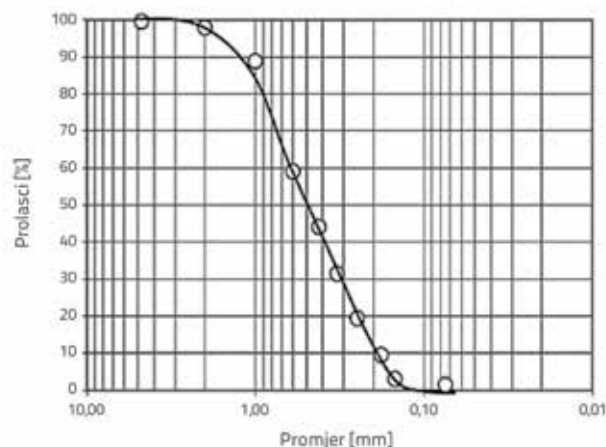
Sustav za nanošenje opterećenja sastojao se od električne mehaničke preše, a opterećenje se nanosilo vertikalno na spiralne pilote modela, pri čemu je okvir za nanošene opterećenja bio montiran na ispitnu kutiju. Mjerenja opterećenja i slijeganja provedena su pomoću ćelije za mjerenje opterećenja i uređaja LVDT (eng. *linear variable differential transformer*) tj. linearno promjenjivi diferencijalni transformator. Preciznost uređaja LVDT iznosi 0,001 mm. Oni su postavljeni između modela temelja i preše (slika 2.).

## 4.2. Pješčano tlo

Za potrebe ispitivanja tlačne otpornosti spiralnog pilota korišten je čisti jednoliko građurani sitni pijesak iz rijeke Ceyhan. Laboratorijska ispitivanja provedena su za određivanje parametara čvrstoće, maksimalne i minimalne gustoće, specifične gustoće i granulometrijskog sastava reprezentativnih uzoraka pijeska. Ta su svojstva prikazana u tablici 1. Granulometrijski sastav pijeska prikazan je na slici 4. Taj je pijesak razvrstavan pomoću USCS klasifikacije (eng. *unified soil classification system*) i svrstan je kao SP (loše građurani pijesak). Izmjereni kut unutarnjeg trenja pijeska određen konvencionalnim pokusom izravnog smicanja iznosio je  $38^\circ$ .

Tablica 1. Inženjerska svojstva pijeska

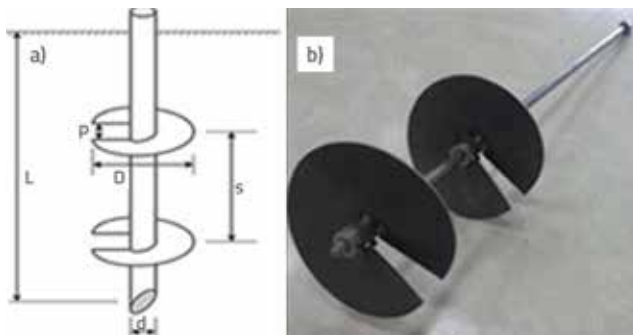
| Parametar   | Vrijednost |
|---|------------|
| Frakcija krupnog pijeska [%]  | 0,00       |
| Frakcija srednjeg pijeska [%]   | 65,00      |
| Frakcija sitnog pijeska [%]   | 35,00      |
| $D_{10}$ [mm]   | 0,18       |
| $D_{30}$ [mm]   | 0,28       |
| $D_{60}$ [mm]   | 0,58       |
| Koeficijent jednolikosti, $C_u$   | 4,46       |
| Koeficijent zakrivljenosti, $C_c$   | 1,04       |
| Specifična gustoća  | 2,75       |
| Suha zapremninska težina (zbijen pijesak) [kN/m <sup>3</sup> ], maks.                                 | 17,11      |
| Suha zapremninska težina (rahli pijesak) [kN/m <sup>3</sup> ], min.                                   | 15,44      |
| Suha zapremninska težina u laboratorijskim ispitivanjima modela ( $D_r = 25\%$ ) [kN/m <sup>3</sup> ] | 15,84      |
| Kohezija, $c$ [kPa]   | 0,00       |
| Klasifikacija (USCS)  | SP         |



Slika 4. Granulometrijska krivulja pijeska

## 4.3. Plan ispitivanja

Pokus opterećenja proveden je pomoću krute spiralne ploče pilota izrađene od mekog čelika. Debljina svih modelskih ploča iznosila je 3 mm, a promjer plašta čeličnog pilota iznosio je 12 mm. Konfiguracija spiralnih pilota za ocjenu utjecaja povećanja promjera spirale i odnosa razmaka ( $s/D$ ) na graničnu tlačnu otpornost prikazana je u tablici 2. Oznaka HP označava *spiralni pilot* (eng. *helical pile* - HP). Shematski prikaz modela spiralnog pilota predstavljen je na slici 5., a odgovarajući geometrijski podaci prikazani su u tablici 2.



Slika 5. Spiralni pilot: a) Shematski prikaz; b) Prikaz modela

Pripremajući pokus, pijesak je pažljivo postavljen u slojevima debljine 0,05 m, sve do vrha ispitne kutije. Maksimalne i minimalne vrijednosti suhe zapremninske težine pijeska iznosile su 17,11 kN/m<sup>3</sup> tj. 15,44 kN/m<sup>3</sup> (tablica 1.). U ispitnu kutiju ugrađivao se pijesak suhe zapremninske težine 15,84 kN/m<sup>3</sup>. Drugim riječima, razmatran je slučaj rahlog pijeska relativne gustoće oko 25%. Model spiralnog pilota instaliran je primjenom rotacijske sile nanosene pomoću mehaničkog uređaja. Tijekom ispitivanja opterećenje se nanosilo kontinuirano pri brzini od 3,5 mm/min. Odnos opterećenja i slijeganja pilota mjeren je pomoću dva LVDT uređaja koji su bili postavljeni svaki na jednoj strani pilota, te pomoću ćelija za nanošenje opterećenja, kako je to prikazano na slici 2.

Tablica 2. Podaci o ispitivanjima modela

| Broj ispitivanja | Oznaka pilota | Plast         |                | Spiralna ploča |                 | s/D          |               |
|------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|---------------|
|                  |               | Dužina L [mm] | Promjer d [mm] | Promjer D [mm] | Debljina e [mm] | Broj spirala | Odnos razmaka |
| HP1              | HP50          | 700           | 12             | 50             | 3               | 1            | 0,0           |
| HP2              |               | 700           | 12             | 50             | 3               | 2            | 1,0           |
| HP3              |               | 700           | 12             | 50             | 3               | 2            | 1,5           |
| HP4              |               | 700           | 12             | 50             | 3               | 2            | 2,0           |
| HP5              |               | 700           | 12             | 50             | 3               | 2            | 2,5           |
| HP6              |               | 700           | 12             | 50             | 3               | 2            | 3,0           |
| HP7              | HP75          | 700           | 12             | 75             | 3               | 1            | 0,0           |
| HP8              |               | 700           | 12             | 75             | 3               | 2            | 1,0           |
| HP9              |               | 700           | 12             | 75             | 3               | 2            | 1,5           |
| HP10             |               | 700           | 12             | 75             | 3               | 2            | 2,0           |
| HP11             |               | 700           | 12             | 75             | 3               | 2            | 2,5           |
| HP12             |               | 700           | 12             | 75             | 3               | 2            | 3,0           |
| HP13             | HP100         | 700           | 12             | 100            | 3               | 1            | 0,0           |
| HP14             |               | 700           | 12             | 100            | 3               | 2            | 1,0           |
| HP15             |               | 700           | 12             | 100            | 3               | 2            | 1,5           |
| HP16             |               | 700           | 12             | 100            | 3               | 2            | 2,0           |
| HP17             |               | 700           | 12             | 100            | 3               | 2            | 2,5           |
| HP18             |               | 700           | 12             | 100            | 3               | 2            | 3,0           |
| HP19             | HP125         | 700           | 12             | 125            | 3               | 1            | 0,0           |
| HP20             |               | 700           | 12             | 125            | 3               | 2            | 1,0           |
| HP21             |               | 700           | 12             | 125            | 3               | 2            | 1,5           |
| HP22             |               | 700           | 12             | 125            | 3               | 2            | 2,0           |
| HP23             |               | 700           | 12             | 125            | 3               | 2            | 2,5           |
| HP24             |               | 700           | 12             | 125            | 3               | 2            | 3,0           |

Baždarenje se provodilo neposredno prije ispitivanja. Vrijednosti opterećenja i slijeganja očitavane su pomoću data logera sa šesnaest kanala (uređaj za autonomno bilježenje podataka, serija MM700). Nakon toga, konverzija podataka provedena je pomoću geotehničkog programa DS7. Ispitivanja su smatrana završenima ako bi došlo do sloma tla. To znači da bi ispitivanje završilo kada bi kapacitet preše bio postignut, ili kada bi se ostvarili prihvatljivi pomaci pilota. Da bi se održali stabilni uvjeti tijekom svih ispitivanja, ispitna kutija se praznila i ponovno punila nakon svakog pokusa.

## 5. Rezultati ispitivanja i rasprava

Postoje brojne metode za interpretaciju tlačnih otpornosti spiralnih pilota dobivenih pokusima opterećenja bazirane na kriterijima sloma [4-6]. Neke od metoda prikazanih u literaturi su: metoda L1-L2, Davissonov kriterij, metoda nagiba tangente, kriterij ISSMFE, kriterij BS 8004, kriterij FHWA te kriterij FDOT, kao što je prikazano u tablici 3.

Sakr [14] je klasificirao proračune nosivosti osnotlačno opterećenih spiralnih pilota kako je prikazano na slici 6. Prema Sakru [14], nosivost spiralnog pilota odgovara pomaku od 5 % promjera spirale. Budući da je opterećenje, koje odgovara pomaku od 10 % promjera velikih spiralnih pilota bilo prilično veliko, kriterij od 5 % u mnogim slučajevima daje prihvatljive vrijednosti dopuštenih vertikalnih pomaka.

Tablica 3. Kriteriji sloma za spiralne pilote

| Kriterij sloma                          | Pomak pri slomu   |
|---|---|
| Metoda L1-L2                            |   |
| Davissonov kriterij [22]                | PL/AE+ (D/120+4) [mm]   |
| Metoda nagiba tangente [23]             | Definiran kao slijeganje na sjecištu tangenti od dijela krivulje koji opisuje naglo popuštanje i linearnoelastičnog dijela* |
| Kriterij ISSMFE [24] i kriterij BS 8004 | 10 %D   |
| Kriterij FHWA [25]                      | 5 %D  |
| Kriterij FDOT [26]                      | PL/AE + D/30 (kada je D > 0,61 m)   |

\* Nagib dijela krivulje koji opisuje naglo popuštanje = 14,3 mm/100 kN



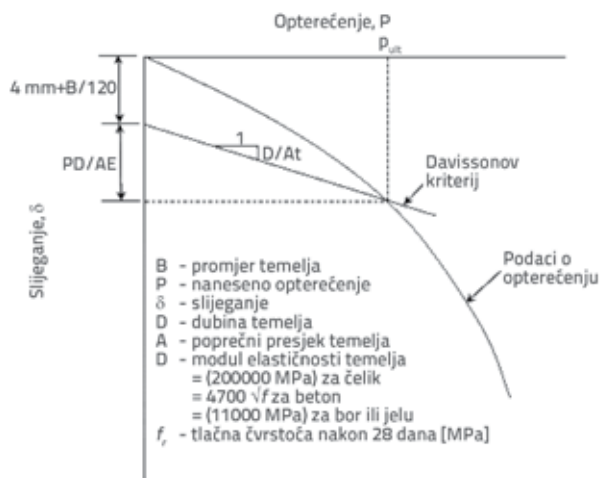
Slika 6. Granična nosivost opisana u [14]

Za analizu graničnih vrijednosti centrično opterećenih spiralnih pilota primjenjuje se i Davissonov kriterij [22] (slika 7.). Granična nosivost izravno ovisi o ukupnom pomaku, tj. o sumi elastičnih pomaka pilota i odnaka, kao što je prikazano u jednadžbi 7 [4]:

$$S = \frac{PL}{AE} + \frac{D}{120} 4 \text{ [mm]} \tag{7}$$

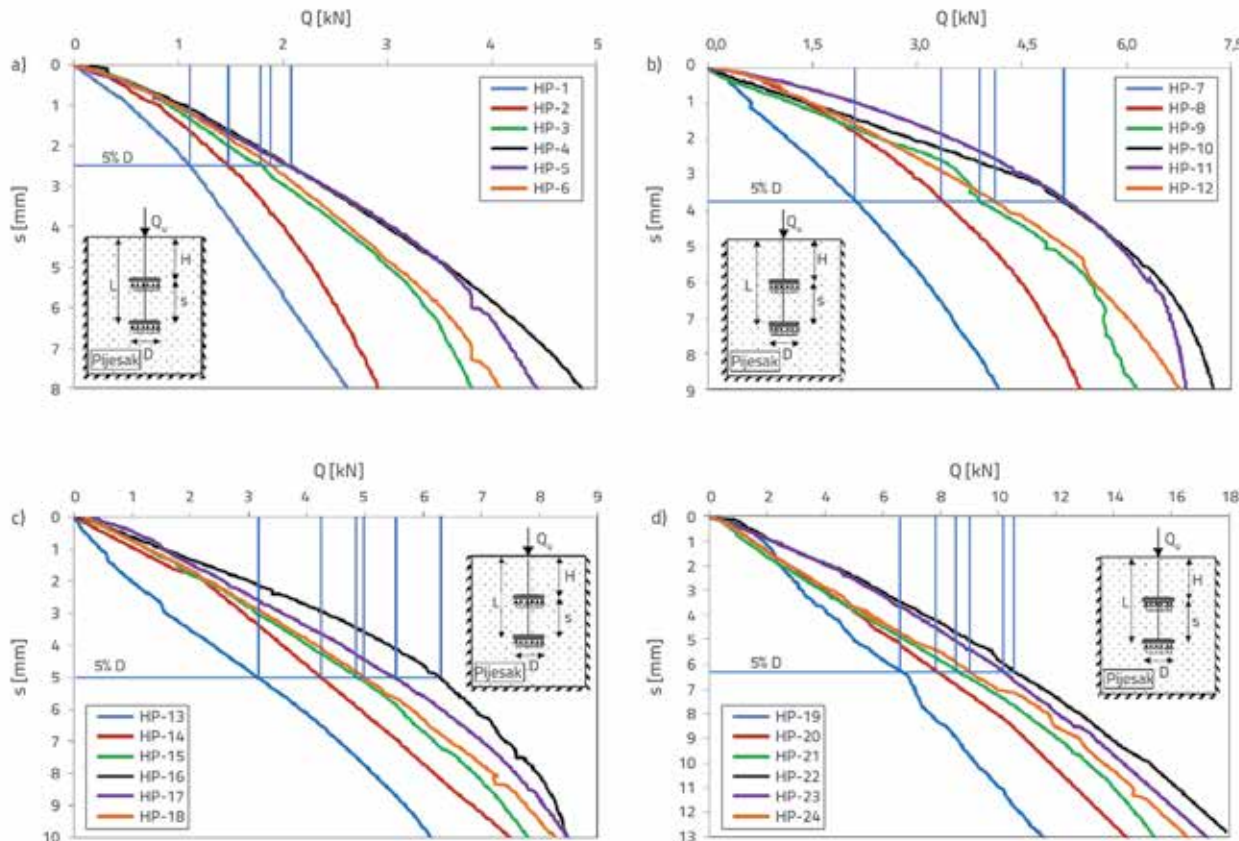
gdje je:

- S – pomak [mm]
- P – opterećenje pilota
- L – dužina pilota [m]
- A – površina poprečnog presjeka plašta pilota
- E – modul elastičnosti materijala pilota
- D – promjer najveće spirale [mm].



Slika 7. Metoda Davissonovog kriterija

Utjecaji promjera spirale i omjera razmaka (s/D) spiralnih pilota s više spirala pri centričnom opterećenju u pijesku ispitani su pomoću ispitivanja na fizikalnim modelima. Provedena su ukupno 24 ispitivanja s četiri različita promjera spirala i pet različitih omjera razmaka. Krivulje opterećenja i pomaka prikazane su na slici 8. Kod svih spiralnih pilota, granično opterećenje raste usporedno s povećanjem promjera spirale i omjera razmaka. Granična nosivost pri osnom tlaku izračunata je za sve modelirane spiralne pilote primjenom metoda pojedinačne nosivosti i posmika na cilindru. Rezultati granične nosivosti na osnovi izraza od (1) do (5) i ocjene kriterija sloma prikazani su u tablici 5. Za procjenu granične tlačne nosivosti spiralnih pilota u ispitivanjima na modelima primijenjeni su kriteriji sloma od 5 % i 10 % te kriterij sloma prema Davissonu. Omjer predviđanja (jednadžba nosivosti/procjena kriterijem sloma) korišten je za definiranje najbolje podudarnosti rezultata ispitivanja. Kao što se može vidjeti u tablici 5., procijenjene nosivosti prilično su podudarne s nosivostima baziranim na kriteriju sloma od 5 %. Na temelju analize omjera predviđanja iz ove tablice može se zaključiti da do prelaska iz faze posmičnog popuštanja na cilindru u fazu pojedinačne nosivosti dolazi kada se omjer razmaka poveća s 1,5 na 2,0. Omjeri razmaka rastu s povećanjem promjera spirale. Nosivost pilota s dvije spirale veća je otprilike za 90 do 100 % u odnosu na nosivost pilota s jednom spiralom. Osim toga, utvrđeno je da je odnos između promjera spirale i graničnog opterećenja nelinearan. Proporcionalni postotak opterećenja koje prenose elementi



Slika 8. Rezultati centričnog tlačnog opterećenja: a) HP50; b) HP75; c) HP100; d) HP125, (HP označava spiralni pilot, eng. helical pile)

Tablica 4. Sažeti prikaz centričnog tlačnog opterećenja spiralnih pilota u pijesku

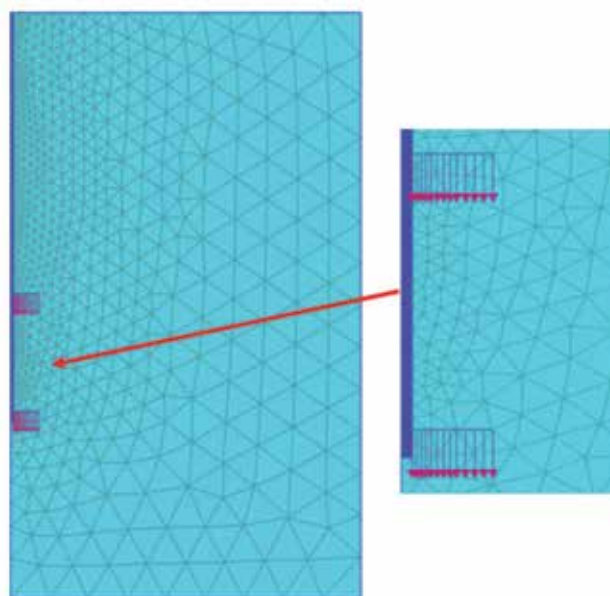
| Oznaka pilota | Broj spirala | D [mm] | s/D  | Izmjerena nosivost [kN] |       |                     | Izračunana nosivost          |         |       |                            |         | Omjer predviđanja  |                    |
|---------------|--------------|--------|------|-------------------------|-------|---------------------|------------------------------|---------|-------|----------------------------|---------|--------------------|--------------------|
|               |              |        |      | 5 %D                    | 10 %D | Davisson-ova metoda | Metoda pojedinačne nosivosti |         |       | Metoda posmika na cilindru | 5 %D    |                    |                    |
|               |              |        |      |                         |       |                     | Doprinos elemenata [%]       |         |       |                            | Qu [kN] | Pojedinačna metoda | Posmik na cilindru |
|               |              |        |      |                         |       |                     | Plašt                        | Spirala | Baza  |                            |         |                    |                    |
| HP-1          | Jedna        | 50     | 0    | 1,15                    | 1,70  | 1,66                | 2,31                         | 97,69   | 0,00  | 1,07                       | 1,07    | 0,93               | 0,93               |
| HP-2          | Dvije        |        | 1    | 1,40                    | 2,25  | 2,12                | 1,17                         | 57,55   | 41,29 | 1,82                       | 1,10    | 1,30               | 0,78               |
| HP-3          | Dvije        |        | 1,5  | 1,73                    | 2,95  | 2,72                | 1,09                         | 58,56   | 40,35 | 1,79                       | 1,11    | 1,03               | 0,64               |
| HP-4          | Dvije        |        | 2    | 2,10                    | 3,51  | 3,26                | 1,02                         | 59,61   | 39,37 | 1,76                       | 1,12    | 0,84               | 0,53               |
| HP-5          | Dvije        |        | 2,5  | 2,15                    | 3,50  | 3,28                | 0,95                         | 60,69   | 38,36 | 1,72                       | 1,13    | 0,80               | 0,53               |
| HP-6          | Dvije        |        | 3    | 1,90                    | 3,15  | 2,88                | 0,89                         | 61,81   | 37,31 | 1,69                       | 1,14    | 0,89               | 0,60               |
| HP-7          | Jedna        | 75     | 0    | 2,15                    | 3,70  | 2,60                | 1,04                         | 98,96   | 0,00  | 2,38                       | 2,38    | 1,11               | 1,11               |
| HP-8          | Dvije        |        | 1    | 3,35                    | 5,95  | 3,80                | 0,47                         | 56,77   | 42,75 | 4,15                       | 2,44    | 1,24               | 0,73               |
| HP-9          | Dvije        |        | 1,5  | 3,80                    | 5,70  | 4,70                | 0,43                         | 58,35   | 41,22 | 4,03                       | 2,47    | 1,06               | 0,65               |
| HP-10         | Dvije        |        | 2    | 4,90                    | 6,75  | 5,75                | 0,38                         | 60,02   | 39,60 | 3,92                       | 2,49    | 0,80               | 0,51               |
| HP-11         | Dvije        |        | 2,5  | 5,00                    | 6,70  | 5,80                | 0,34                         | 61,78   | 37,88 | 3,81                       | 2,51    | 0,76               | 0,50               |
| HP-12         | Dvije        | 3      | 4,20 | 6,20                    | 5,00  | 0,30                | 63,65                        | 36,05   | 3,70  | 2,54                       | 0,88    | 0,60               |                    |
| HP-13         | Jedna        | 100    | 0    | 3,15                    | 6,10  | 3,10                | 0,59                         | 99,41   | 0,00  | 4,21                       | 4,21    | 1,34               | 1,34               |
| HP-14         | Dvije        |        | 1    | 4,25                    | 7,20  | 4,25                | 0,24                         | 56,88   | 42,87 | 7,36                       | 4,32    | 1,73               | 1,02               |
| HP-15         | Dvije        |        | 1,5  | 4,65                    | 7,70  | 4,80                | 0,21                         | 59,09   | 40,70 | 7,08                       | 4,36    | 1,52               | 0,94               |
| HP-16         | Dvije        |        | 2    | 5,60                    | 8,30  | 5,40                | 0,18                         | 61,48   | 38,34 | 6,81                       | 4,40    | 1,22               | 0,79               |
| HP-17         | Dvije        |        | 2,5  | 6,30                    | 8,32  | 6,30                | 0,15                         | 64,06   | 35,79 | 6,53                       | 4,44    | 1,04               | 0,71               |
| HP-18         | Dvije        |        | 3    | 5,30                    | 8,20  | 5,20                | 0,12                         | 66,86   | 33,01 | 6,26                       | 4,48    | 1,18               | 0,84               |
| HP-19         | Jedna        | 125    | 0    | 6,60                    | 11,10 | 5,20                | 0,38                         | 99,62   | 0,00  | 6,56                       | 6,57    | 0,99               | 0,99               |
| HP-20         | Dvije        |        | 1    | 7,83                    | 14,00 | 6,30                | 0,14                         | 57,40   | 42,46 | 11,39                      | 6,73    | 1,46               | 0,86               |
| HP-21         | Dvije        |        | 1,5  | 8,10                    | 15,00 | 6,90                | 0,12                         | 60,30   | 39,58 | 10,84                      | 6,80    | 1,34               | 0,84               |
| HP-22         | Dvije        |        | 2    | 10,53                   | 16,50 | 8,60                | 0,10                         | 63,51   | 36,40 | 10,30                      | 6,86    | 0,98               | 0,65               |
| HP-23         | Dvije        |        | 2,5  | 10,14                   | 17,70 | 9,00                | 0,07                         | 67,07   | 32,85 | 9,75                       | 6,91    | 0,96               | 0,68               |
| HP-24         | Dvije        | 3      | 9,20 | 16,00                   | 7,50  | 0,05                | 71,06                        | 28,89   | 9,20  | 6,96                       | 1,00    | 0,76               |                    |

pilota prema metodi diskretnog prijenosa prikazan je u tablici 4. Jasno se može uočiti da opterećenje koje podnosi spirala raste s povećanjem promjera spirale i omjera s/D. Dok granično tlačno opterećenje za HP50 iznosi 2,10 kN, ta se vrijednost povećava na 5,60 kN za HP100 pri konstantnom omjeru s/D = 2.

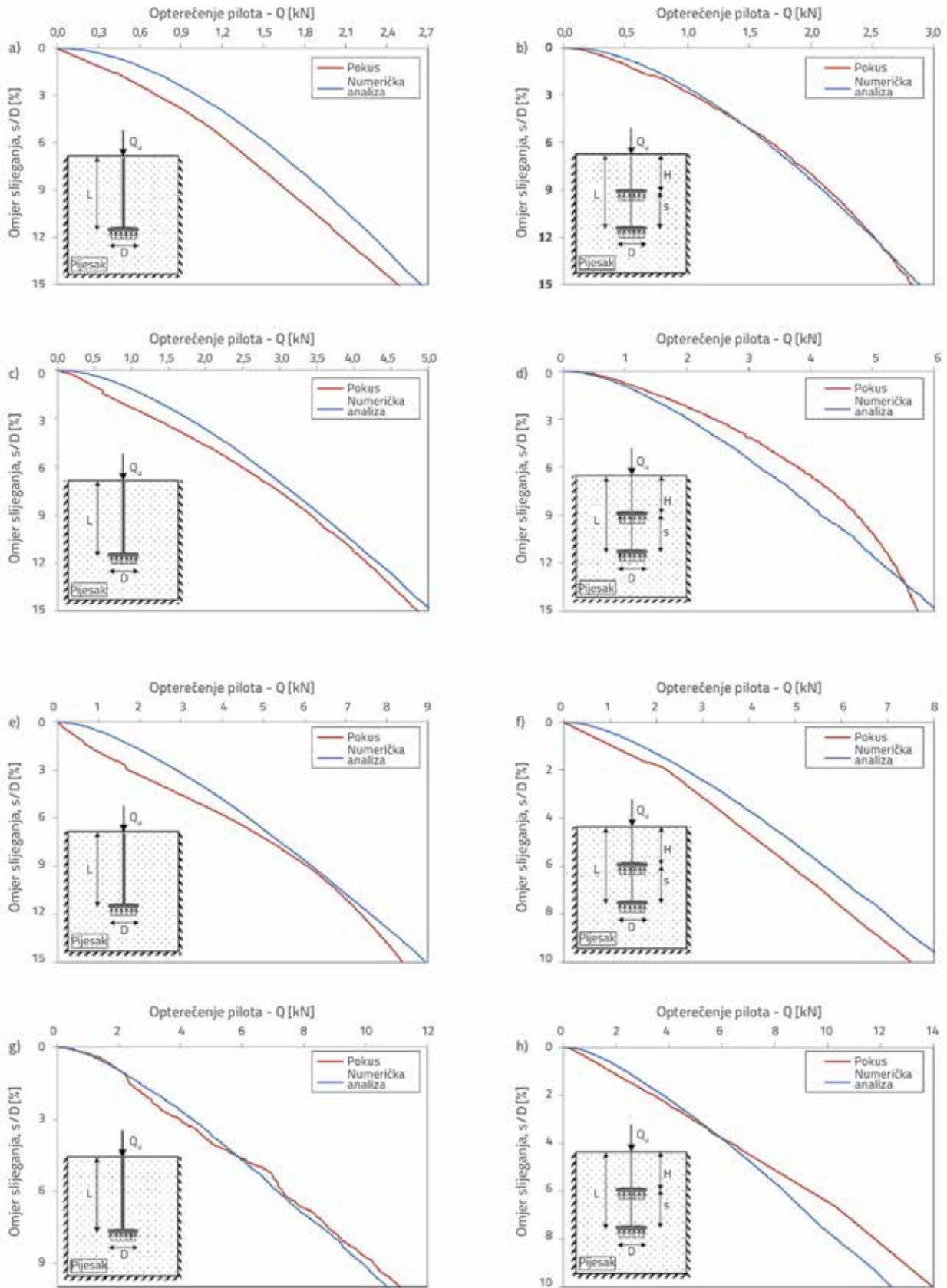
## 6. Analiza metodom konačnih elemenata

Tlačna otpornost spiralnih pilota položenih u pješčano tlo simulirana je primjenom metode konačnih elemenata pomoću računalnog programa Plaxis 2D [19]. Taj je program posebno prilagođen za analizu stabilnosti i deformacija u području geotehnike [20]. U numeričkom modelu rubni uvjeti zadani su na način da su na bočnim granicama modela dopušteni vertikalni pomaci, a fiksirani horizontalni. Pomaci na donjoj granici su fiksirani u oba smjera. Za modeliranje tla korišteni su trokutasti elementi s 15 čvorova. Analize su provedene pomoću osnosimetričnog modela za spiralne ploče u pješčanom tlu. Tipična mreža uključujući tlo i spiralni pilot, prikazana je na slici 9. Program Plaxis sadrži velik broj naprednih modela za materijale sa specifičnim obilježjima. Od tih je modela za simuliranje ponašanja pijeska odabran Mohr-Coulomb (MC) elastoplastični model koji pokriva aproksimacije prvog reda za

tlo ili stijenu. Mohr-Coulombovom modelu potreban je mali broj parametara za simuliranje stvarnog ponašanja tla.



Slika 9. Tipična mreža konačnih elemenata



Slika 10. Usporedba rezultata ispitivanja i numeričkih analiza metodom konačnih elemenata (MKE) za različite promjere spiralnih ploča: a) HP-1 test; b) HP-2 test; c) HP-7 test; d) HP-8 test; e) HP-13 test; f) HP-14 test; g) HP-19 test; h) HP-20 test



Osim toga, taj je model jednostavan za korištenje te je stoga prikladan za primjenu u praksi. Model prihvaća samo pet ulaznih parametara, a to su kut dilatacije ( $\Psi$ ), plastičnost tla ( $\varphi$  i  $c$ ), i elastičnost tla ( $E$  i  $\nu$ ). U tom se modelu za definiranje ponašanja tla koristi pristup "prvog reda". Prema informacijama iz literature, jasno je da se u analizi pješčanog tla trebaju usvojiti drenirani uvjeti. Parametri modela koji predstavlja pješčano tlo prikazani su u tablici 6. Parametri iz tablice dobiveni su konvencionalnim geotehničkim ispitivanjima. Izuzetak je kut dilatacije ( $\Psi$ ) za koji je pretpostavljena vrijednost od  $8^\circ$ , ( $\varphi - 30^\circ$ ) [21]. Plašt spiralnog pilota modeliran je pomoću linearno elastičnog modela. Za Poissonov koeficijent i modul elastičnosti plašta spiralnog pilota usvojene su vrijednosti od 0,3 i  $200 \cdot 10^6$  kPa.

Tablica 5. Parametri tla prema Mohr-Coulombovom modelu

| Parametar  | Vrijednost |
|--|------------|
| Zapremninska težina, $\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ] | 15,84      |
| Krutost, $E_v$ [kPa]                                 | 15000      |
| Kohezija, $c$ [kPa]                                  | 0,3        |
| Kut unutarnjeg trenja, $\varphi$ [°]                 | 38         |
| Kut dilatacije, $\Psi$ [°] ( $\varphi - 30^\circ$ )  | 8          |
| Poissonov koeficijent, $\nu$                         | 0,2        |

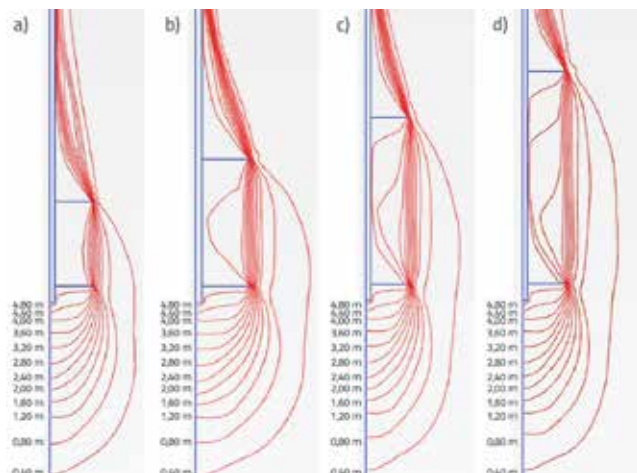
Tablica 6. Usporedba rezultata ispitivanja i numeričkih analiza

| Oznaka pilota | Broj spirala | D (promjer spirale) [mm] | s/D | Izmjerena nosivost [kN] |                                    |
|---------------|--------------|--------------------------|-----|-------------------------|------------------------------------|
|               |              |                          |     | Pokus (5 %D)            | Analiza konačnim elementima (5 %D) |
| HP-1          | Jedna        | 50                       | 0   | 1,15                    | 1,25                               |
| HP-2          | Dvije        |                          | 1   | 1,40                    | 1,42                               |
| HP-3          | Dvije        |                          | 1,5 | 1,73                    | 1,48                               |
| HP-4          | Dvije        |                          | 2   | 2,10                    | 1,51                               |
| HP-5          | Dvije        |                          | 2,5 | 2,15                    | 1,58                               |
| HP-6          | Dvije        |                          | 3   | 1,90                    | 1,61                               |
| HP-7          | Jedna        | 75                       | 0   | 2,15                    | 2,42                               |
| HP-8          | Dvije        |                          | 1   | 3,35                    | 2,83                               |
| HP-9          | Dvije        |                          | 1,5 | 3,80                    | 2,98                               |
| HP-10         | Dvije        |                          | 2   | 4,90                    | 3,08                               |
| HP-11         | Dvije        |                          | 2,5 | 5,00                    | 3,20                               |
| HP-12         | Dvije        |                          | 3   | 4,20                    | 3,27                               |
| HP-13         | Jedna        | 100                      | 0   | 3,15                    | 4,26                               |
| HP-14         | Dvije        |                          | 1   | 4,25                    | 4,96                               |
| HP-15         | Dvije        |                          | 1,5 | 4,65                    | 5,27                               |
| HP-16         | Dvije        |                          | 2   | 5,60                    | 5,47                               |
| HP-17         | Dvije        |                          | 2,5 | 6,30                    | 5,68                               |
| HP-18         | Dvije        |                          | 3   | 5,30                    | 5,88                               |
| HP-19         | Jedna        | 125                      | 0   | 6,60                    | 6,80                               |
| HP-20         | Dvije        |                          | 1   | 7,83                    | 8,10                               |
| HP-21         | Dvije        |                          | 1,5 | 8,10                    | 8,60                               |
| HP-22         | Dvije        |                          | 2   | 10,53                   | 9,10                               |
| HP-23         | Dvije        |                          | 2,5 | 10,14                   | 9,34                               |
| HP-24         | Dvije        |                          | 3   | 9,20                    | 9,65                               |

U ovom se dijelu rada određuje valjanost numeričkog modela usporedbom numeričkih simulacija i rezultata ispitivanja. Za te je potrebe proveden niz numeričkih analiza spiralnih pilota za različiti broj ploča (jedna ili dvije) i različite promjere ploča ( $D = 50, 75, 100$  i  $125$  mm) kako bi se odredila tlačna otpornost spiralnih pilota ugrađenih u pješčano tlo. Na slici 10 prikazane su krivulje omjera opterećenja ( $Q$ ) i slijeganja ( $s/D$ ) dobivene na temelju numeričkih analiza i laboratorijskih ispitivanja modela za različite promjere spiralnih ploča ( $D$ ). Usporedba numeričkih analiza i rezultata ispitivanja upućuje na kompatibilnost rezultata dobivenih za različite promjere i brojeve spiralnih ploča. Rezultati ispitivanja i numeričkih analiza uspoređeni su za svaki promjer. Konfiguracije  $s/D = 0$  i  $s/D = 1$  prikazane su kao primjeri na slici 10. Uz to, granična opterećenja dobivena numeričkim analizama prikazana su u tablici 6. zajedno s rezultatima ispitivanja za kriterij sloma od 5 %D. Kompatibilni rezultati dobiveni su za ispitivanja i numeričke analize za različite promjere i brojeve spiralnih ploča. Kao što je poznato, numeričke analize prije svega se provode kako bi se smanjili troškovi i vrijeme potrebno za projektiranje. Ovakva dosljednost u rezultatima ispitivanja i numeričkih analiza može pružiti uštede na trošku i vremenu prilikom projektiranja spiralnih pilota. Točno određivanje geotehničkih svojstava tla iznimno je važno za donošenje takvih odluka.

Na slici 11. prikazane su konture vertikalnih pomaka i mehanizmi tlačnog sloma pri vertikalnim pomacima vrha pilota od 5 mm (5 %D). Ovdje je kao primjer prikazan spiralni pilot tipa HP100

za različite omjere  $s/D$ . Analizom tih prikaza ( $s$  naglaskom na razmak između spiralnih ploča), može se primijetiti da se mehanizam pojedinačne nosivosti javlja u slučaju kada je  $s/D \geq 1,5$ . Ovo potvrđuje podatke dobivene ispitivanjima na fizikalnim modelima.



Slika 11. Konture slijeganja s različitim omjerima  $s/D$  za pomak na vrhu od 5 mm (5 %D) za tip pilota HP100: a)  $s/D = 1,0$ ; b)  $s/D = 1,5$ ; c)  $s/D = 2,0$ ; d)  $s/D = 2,5$

## 7. Zaključak

U radu je prikazan niz laboratorijskih ispitivanja fizikalnih modela i numeričkih analiza, zajedno s teoretskim pristupom za osnotlačno opterećene jednostruke spiralne pilote u pješčanom tlu. Za određivanje ponašanja pri tlačnom opterećenju odabrane su sljedeće varijable: broj spiralnih ploča, promjer spiralnih ploča te razmak između spiralnih ploča. Detaljno su prikazane krivulje odnosa opterećenja i slijeganja dobivene na bazi

eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja. Izvedeni su sljedeći zaključci:

- Unatoč relativno maloj veličini i poprečnom presjeku, modeli spiralnih pilota uspješno su postavljeni u pješčano tlo.
- Karakteristike odnosa opterećenja i slijeganja tlačno opterećenih modela spiralnih pilota upućuju na tipične trendove ponašanja, tj. kod prvog je segmenta uočeno linearno ponašanje a kod drugog je ponašanje bilo izrazito nelinearno, nakon čega je zabilježeno gotovo linearno ponašanje.
- Otpornost pilota s dvije spirale bila je otprilike dvostruko veća od otpornosti pilota s jednom spiralom.
- Iako je promjer spirale rastao linearno, zabilježeno je nelinearno povećanje tlačne otpornosti. Tlačna otpornost povećala se otprilike za tri puta, a promjer spirale je udvostručen.
- Tri različita kriterija sloma definirana su za procjenu dopuštenog tlačnog opterećenja (5 %D, 10 %D te Davissonov kriterij). Najbolja podudarnost utvrđena je kod metode 5 %D, pa je stoga ta metoda korištena za interpretaciju rezultata.
- Numerički i eksperimentalni rezultati pokazali su usklađenost trendova. Analizom pomoću metode konačnih elemenata utvrđeno je da do aktivacije mehanizma pojedinačnog popuštanja dolazi u slučaju  $s/D \geq 1,5$ .
- Ponašanje tla i spiralnog pilota pri tlačnom opterećenju može se uspješno simulirati pomoću Mohr-Coulombovog modela, čiji se parametri mogu jednostavno odrediti primjenom uobičajenih geotehničkih ispitivanja u laboratoriju.
- Rezultati ovog rada pokazuju da se projektiranje spiralnih pilota može provesti brže i ekonomičnije, ako je dostupan vjerodostojan set geotehničkih podataka.
- Rezultati ovog rada mogu se koristiti kao alternativan način modeliranja ponašanja spiralnih pilota izloženih tlačnom opterećenju, koji se sve češće koriste u području geotehničkog inženjerstva.

## LITERATURA

- [1] Tsuha, C.H.C., Aoki, N., Rault, G., Thorel, L., Garnier, J.: Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 49 (2012), pp.1102-1114, <https://doi.org/10.1139/T2012-064>.
- [2] Nazir, R., Chuan, H.S., Niroumand, H., Kassim, K.A.: Performance of single vertical helical anchor embedded in dry sand, *Measurement*, 49 (2013) 1, pp. 42-51, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.11.031>.
- [3] Sakr, M.A., Nazir, A.K., Azzam, W.R., Sallam, A.F.: Behaviour of grouted single screw piles under inclined tensile loads in sand, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21 (2016), pp. 571-592
- [4] Livneh, B., Naggar, M.H.M.: Axial testing and numerical modelling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading, *Canadian Geotechnical Journal*, 45 (2008) 8, pp. 1142-1155, DOI: 10.1139/T08-044.
- [5] Sakr, M.: Installation and performance characteristics of high capacity helical piles in cohesionless soils, *The Journal of the Deep Foundations Institute*, 5 (2011) 1, pp. 39-57, <https://doi.org/10.1179/dfi.2011.004>.
- [6] Malik, A.A., Kuwano, J., Tachibana, S., Maejima, T.: End bearing capacity comparison of screw pile with straight pipe pile under similar ground conditions, *Acta Geotechnica*, 12 (2017) 9, pp. 415-428
- [7] Li, W., Deng, L.: Axial load tests and numerical modelling of single-helix piles in cohesive and cohesionless soils, *Acta Geotechnica*, 2018., <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0669-y>.
- [8] Sprince, A., Pakrastinsh, L.: Helical pile behaviour and load transfer mechanism in different soils, 10<sup>th</sup> International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, pp.1174-1180, 2010.
- [9] Salhi, L., Nait-Rabah, Q., Christophe, D., Roos, C.: Numerical modelling of single helical pile behaviour under compressive loading in sand, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18 (2013), pp. 4319-4338.

- [10] Polishchuk, A.I., Maksimov, F.A.: Numerical analysis of helical pile–soil interaction under compressive loads, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 262 (2017), pp. 1–8, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012099>.
- [11] Mohajeranin, A., Bosnjak, D., Bromwich, D.: Analysis and design methods of screw piles, *Soils and Foundations*, 56 (2016) 1, pp. 115–128, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.01.009>.
- [12] Mitsch, M.P., Clemence, S.P.: The uplift capacity of helix anchors in sand, *Uplift behaviour of anchor foundations in soil*, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 26–47, 1985.
- [13] Zhang, D.J.Y., Chalaturnyk, R., Robertson, P.K., Segoo, D.C., Cyre, G.: Screw anchor test program (Part I & II): instrumentation, site characterization and installation, *Proceedings of the 51<sup>st</sup> Canadian Geotechnical Conference*, Edmonton, 1998.
- [14] Sakr, M.: Lateral resistance of helical piles in oil sands, *International Foundation Congress and Equipment Expo Contemporary Topics in Deep Foundations*, pp. 464–471, [https://doi.org/10.1061/41021\(335\)58](https://doi.org/10.1061/41021(335)58), 2009.
- [15] Elsherbiny, Z.H., Naggar, M.H.: Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study, *Canadian Geotechnical Journal*, 50 (2013), pp. 1191–1203, <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0487>.
- [16] Meyerhof, G.G., Adams, J.I.: The ultimate uplift capacity of foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, 5 (1968) 4, pp. 225–244, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000478](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000478).
- [17] Vesic, A.S.: Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 97 (1971) 9, pp. 1183–1205
- [18] Canadian Geotechnical Society: *Canadian Foundation Engineering Manual*, 4<sup>th</sup> Edition, pp. 488, 2006.
- [19] Plaxis 2D: *Material Models Manual*, Geotechnical Finite Element Software, Delft, Netherlands, 2018.
- [20] Brinkgreve, R.B.J., Broere, W., Waterman, D.: *Plaxis finite element code for soil and rock analysis*, 2D–Version 8.6, 2004.
- [21] Bolton, M.D.: The strength and dilatancy of sands, *Géotechnique*, 36 (1986) 1, pp. 65–78, <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.1.65>.
- [22] Davisson, M.T.: High capacity piles, *Proceedings of Lecture Series of Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois section, Chicago, pp. 81–112, 1972.
- [23] Butler, H.D., Hoy, H.E.: The Texas quick-load method for foundation load testing, *User's manual*, Rep. No. FHWA-IP-77–8., Texas State Department of Highways and Public Transportation, Austin, Texas, 1977.
- [24] ISSMFE: Axial pile loading test – Part I: Static loading, *Geotechnical Testing Journal ASTM*, 8 (1985) 2, pp. 79–80, <https://doi.org/10.1520/GTJ10514J>.
- [25] Reese, L.C., O'Neill, M.W.: *Drilled shafts: construction procedures and design methods*, FHWA-HI-88–042, Federal Highway Administration, McLean, 1988.
- [26] FDOT: *Standard specifications for road and bridge construction*, Florida Department of Transportation (FDOT), 1999.
- [27] Terzaghi, K.: Discussion of the progress report of the committee on the bearing value of pile foundations, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 68 (1942), pp. 311–323
- [28] O'Neill, M.W., Reese, L.C.: *Drilled shafts: Construction procedures and design methods*, Publication No. FHWA-IF-99–025, Office of Infrastructure, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1999.