

Primljen / Received: 2.7.2013.

Ispravljen / Corrected: 15.10.2013.

Prihvaćen / Accepted: 21.10.2013.

Dostupno online / Available online: 10.11.2013.

# Procjene nosivosti i slijeganja bušenih pilota u mekim tlima

## Autori:



Prof. dr. sc. **Tomislav Ivšić**, dipl.ing. građ.

Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za geotehniku  
tom@grad.hr



**Mario Bačić**, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za geotehniku  
mbacic@grad.hr



**Lovorka Librić**, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za geotehniku  
llibric@grad.hr

Pregledni rad

**Tomislav Ivšić, Mario Bačić, Lovorka Librić**

## Procjene nosivosti i slijeganja bušenih pilota u mekim tlima

Iako se tehnologije izvedbe pilota sve više usavršavaju, problemi procjene nosivosti i slijeganja su i dalje prisutni, pri čemu metode procjene u znatnoj mjeri predstavljaju kombinaciju teorije i empirije. U radu se analizira nosivost i slijeganje bušenih pilota, kao najčešće korištenog tipa pilota u domaćoj praksi. Empirijske metode procjene nosivosti iz geotehničkih parametara tla uvode niz određenih pojednostavljenja, čime se izostavljaju pojedini elementi složene interakcije pilot-tlo. S druge strane, rezultati terenskih ispitivanja pilota su izravna zbirna posljedica složenih sveukupnih uvjeta na kontaktu tla i pilota.

### Ključne riječi:

bušeni piloti, nosivost pilota, slijeganje pilota, empirijske procjene nosivosti, terenska ispitivanja pilota

Subject review

**Tomislav Ivšić, Mario Bačić, Lovorka Librić**

## Estimation of bored pile capacity and settlement in soft soils

Although the technologies of pile construction are improving, the problems of load capacity and settlements determination are still present, where estimation methods are mostly a combination of theory and empiricism. This paper analyzes the bearing capacity and settlement of bored piles, as the most frequently used type of piles in local practice. Empirical methods based on geotechnical soil parameters for capacity estimation, introduce some simplifications which lead to neglecting certain elements of a complex pile-soil interaction. On the other hand, the results of pile field testing methods are a direct summary consequence of the overall complex conditions on pile-soil contact.

### Key words:

bored piles, pile capacity, pile settlement, empirical estimation of capacity, field testing of piles

Übersichtsarbeit

**Tomislav Ivšić, Mario Bačić, Lovorka Librić**

## Einschätzung der Tragfähigkeit und Setzungen von Bohrpfehlen in weichen Böden

Obwohl die Technologie der Pfahlkonstruktion stetig verbessert wird, sind Probleme bezüglich der Bestimmung von Tragfähigkeit und Setzungen weiterhin vorhanden. Einschätzungsmethoden beinhalten meistens eine Kombination von Theorie und Empirie. In dieser Arbeit werden Tragfähigkeit und Setzungen von häufig in der regionalen Praxis angewandten Bohrpfehlen analysiert. Empirische Methoden, die auf Einschätzungen der Tragfähigkeit anhand geotechnischer Bodenparameter beruhen, beinhalten eine Reihe von Vereinfachungen und sehen über bestimmte Elemente der komplexen Pfahl-Boden-Interaktion hinweg. Die Resultate von Feldversuchen stellen dagegen eine direkte Zusammenfassung der Auswirkungen komplexer Zustände am Kontakt zwischen Pfahl und Boden dar.

### Schlüsselwörter:

Bohrpfähle, Pfahltragfähigkeit, Pfahlsetzung, empirische Tragfähigkeitseinschätzung, Feldversuche an Pfählen

## 1. Uvod

Piloti kao način temeljenja, dio su graditeljske tradicije već tisućljećima. Naselja sojenica u močvarnim terenima uz jezera ili u riječnim inundacijama bila su česta u srednjoj Europi još u brončano doba. Rekonstruirana pretpovijesna naselja sojenica u šest alpskih država su 2011. godine dobila zaštitu UNESCO.

Zapisi iz starog Rima svjedoče o korištenju pilota kao "rutinske" tehnologije. U Zapisima o Galskim ratovima Cezar [1] piše o izgradnji mosta preko Rajne pri čemu su korišteni drveni (kosi i uspravni) piloti promjera 16 palaca (oko 45 cm) koji su strojevima zabijani u dno rijeke. Približno u isto vrijeme Vitruvije [2] piše svojih Deset knjiga o arhitekturi, u kojima daje i praktične upute za gradnju te posebice spominje pilote za temeljenje građevina u mekšim tlima. U rimsko doba razlikuju se dva tipa pilota: a) *palis* (zašiljeni kolci promjera 10–15 cm, dužine 50–70 cm) koji se ručnim batom gusto zabijaju u tlo radi ojačanja tla neposredno ispod temeljnih greda i zidova, i b) *sublicae*, deblje i dugačke oblice-stupovi koji se zabijaju strojevima do nosivih slojeva tla na većim dubinama. U rimskoj literaturi spominje se primjena pilota pri temeljenju mostova, zgrada, obalnih građevina i utvrda na širem području carstva od Britanije do Anatolije [3]. Tehnologija zabijanja pilota primjenjuje se neprekidno tijekom povijesti i na građevine izgrađene u srednjem vijeku (npr. Venecija, Amsterdam).

Drveni zabijeni piloti bili su jedini tip pilota u upotrebi praktički do druge polovine 19. stoljeća kad počinje primjena i drugih materijala te parnih, a kasnije i dizelskih strojeva (maljeva) za zabijanje. Ideja bušenih pilota razvila se inicijalno iz postupka izvedbe dubokih bunara (ponajprije za pitku vodu, a kasnije i kao elementa dubokih, masivnih temelja). Puni razvoj bušeni piloti doživljavaju tek oko 1950. do 1960. godine kad su razvijeni bušaći strojevi za građevinske potrebe (iz strojeva za naftne bušotine), pa je postalo moguće ekonomično izvoditi stabilizirane bušotine većeg promjera i ispod razine podzemne vode. Danas se navodi više od 60 komercijalnih postupaka izvedbe pilota, npr. [4], od kojih se više od 60 % odnosi na razne postupke zabijanih pilota. U novijim pregledima [5] navodi se da je upotreba bušenih pilota u porastu i doseže oko 50 % (oko 2000. godine), ali je raspodjela svih tipova pilota neujednačena po svijetu i znatno ovisi o lokalnoj tradiciji i tržištu.

Piloti se prije svega izvode na lokacijama na kojima temeljno tlo na manjim dubinama nema dovoljnu otpornost ili krutost da preuzme djelovanja gornje konstrukcije bez velikih pomaka ili sloma. Ispunjenje zahtjeva prihvatljive otpornosti i prihvatljivih pomaka određuje i potrebnu dubinu pilota u slojevima temeljnog tla. Tisućljetno iskustvo zabijanja pilota u tlo se sastojalo u tome da se drveni kolci ili stupovi zabijaju sve dok se prodiranje u tlo ne zaustavi. Takav primjer poznat kao "odbijanje" ili "uskrata" (engl. refusal) kombinacija je slojeva tla i ograničenja uređaja za zabijanje, a predstavlja i svojevrsnu empirijsku potvrdu nosivosti i slijeganja. Tradicionalno, ocjena

nosivosti pilota je bila iskustvena i uključivala je prethodna znanja i vještine izvoditelja.

Današnje vrijeme od inženjera zahtijeva da u projektnoj fazi odredi dimenzije konstrukcijskih, nosivih elemenata građevine, te pruži potvrde ili jamstva o dovoljnoj otpornosti za očekivana djelovanja. U tom smislu, određivanje dimenzija pilota za različite tehnologije izvedbe, kao i zadovoljavajuće pouzdane procjene nosivosti i slijeganja pilota uključuju prethodno istraživanje sastava i svojstava temeljnog tla, "proračune", tj. brojčane opise (simulacije) mehaničkog ponašanja te potvrdu probnim opterećenjem pokusnih pilota (kao jedina prava potvrda). Za manje projekte, gdje je budžet za izgradnju skroman, probna opterećenja pilota predstavljaju prevelik trošak i očekuje se da se izvedbene dimenzije pilota odrede i potvrde proračunom.

U većini uobičajenih građevinskih konstrukcija proračun i standardne tehničke specifikacije materijala i izvedbe predstavljaju dovoljno pouzdanu potvrdu dimenzija konstrukcijskih elemenata, jer teorijska osnova proračuna i standardizirana svojstva uporabnih materijala daju prihvatljivo točne numeričke opise ponašanja. U geotehničkom inženjerstvu i projektiranju točnost uobičajenih numeričkih modela je manja (pa time i pouzdanost potvrde proračunom) zbog složenosti ponašanja tla i stijena, raspona parametara i heterogenosti te interakcije umjetnih i prirodnih materijala. Tako je i proračun (zapravo, procjena) nosivosti i slijeganja pilota i u današnje vrijeme u znatnoj mjeri "mješavina" teorije i empirije [6, 7, 8].

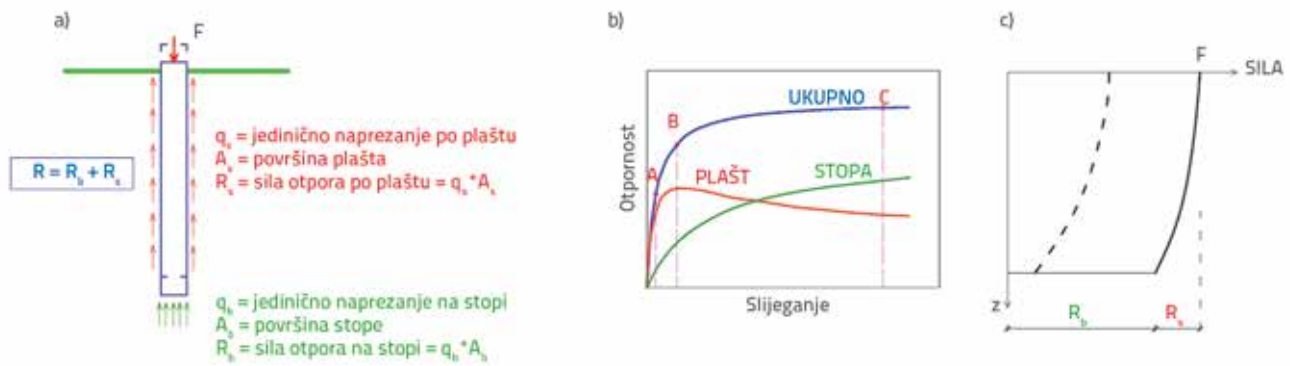
## 2. Definicija problema

U ovom radu ponajprije se raspravlja o pilotima u mekšem tlu koji silu prenose i po plaštu i po stopi. Na slici 1. prikazani su osnovni aspekti ponašanja pilota opterećenog osnom tlačnom silom, tj. elementi prijenosa te sile u temeljno tlo. Slika 1.b prikazuje opće odnose sila otpora i slijeganja pilota, pri čemu su prikazane tri komponente otpora:

1. otpor po plaštu ( $R_s$ ),
2. otpor na stopi ( $R_b$ ) i
3. kombinirani tj. ukupni otpor.

Na slici 1.c prikazana je idealizirana raspodjela vertikalne (aksijalne) sile po dubini za različite pomake.

Kako se povećava sila na glavi pilota ( $F$ ), on se sliježe i mobilizira otpor po plaštu (točka A na slici 1b). Prijenos sile na okolno tlo rezultira opadajućom silom po dubini pilota (crtkano na slici 1c). U početku se sila dominantno prenosi trenjem po plaštu i dio sile prenesen na stopu je relativno mali. S povećanjem sile mobilizira se puni otpor po plaštu (točka B). Daljnje povećanje sile iza točke B preuzet će se samo na stopi pilota, do postizanja maksimalnog kombiniranog otpora (točka C), pri čemu je pomak za dostizanje tog maksimuma sile procijenjen kao 10 % promjera pilota. Otpor po plaštu između točaka B i



Slika 1. Prikaz prijenosa sila u tlačno opterećenom pilotu

C može ostati konstantan, ali se može i smanjiti ovisno o karakteristikama mehaničkog ponašanja na sučelju plašta i tla (tzv. "očvršćavajuće" ili "omekšavajuće" mehaničko ponašanje usporedivo i s konceptom vršne i rezidualne čvrstoće tla). Također, u mekšim tlima, s porastom slijeganja pokazuje se porast otpora (tj. nema "klasičnog" sloma tla nego samo popuštanje - povećani pomaci), pa stoga ukupna sila otpora nije jasno definirana.

Važni aspekti ponašanja bušenih pilota u mekšim tlima su sljedeći:

- otpori po plaštu i na stopi razvijaju se kao funkcija pomaka, a maksimalne (vršne) vrijednosti događaju se pri različitim pomacima,
- maksimalni otpor po plaštu pojavljuje se pri relativno malim slijeganjima koja su, u pravilu, neovisna o promjeru pilota - tipični pomaci su 5-15 mm [6, 9]; stariji autori npr. [10], mali pomak definiraju kao 0,3-1 % promjera,
- maksimalni otpor na stopi pilota se javlja pri relativno velikim pomacima i funkcija je promjera pilota i materijala tla u zoni stopa,
- krivulja ukupnih pomaka i sile otpora je rezultanta (kombinacija) navedenih veličina i složene interakcije na sučelju (plaštu) i stopi pilota.

Valja napomenuti da se nosivost ili puni otpor (odnosno sila koja zadovoljava kriterij sloma, tj. povećanje pomaka bez dodatnog inkrementa sile) postiže samo za komponentu otpora po plaštu, dok se ukupna nosivost definira kao sila za zadani veći pomak (10 % promjera pilota), pri kojem nije definirana i potpuna slomna sila. Taj propisani ("slomni") pomak vezan je za konstrukcijske aspekte gornje konstrukcije, a ne za slomnu silu u podlozi.

Ekstrem na drugoj strani materijalnog ponašanja tla bio bi slučaj u kojem stopa pilota završava u tvrdoj stijeni, pa su svi pomaci mali i u elastičnom području, a trenje po plaštu se i nije aktiviralo u punom iznosu. U kontekstu navedenih ovisnosti otpornosti o ostvarenom pomaku, određivanje ukupne nosivosti kao običnog zbroja neovisno određenih "nosivosti" po plaštu i na stopi postaje stvar inženjerske prosudbe.

### 3. Određivanje nosivosti pilota

#### 3.1. Problemi pri određivanju proračunske nosivosti

Poulos [11] je još 1989. godine razvrstao postupke proračuna i projektiranja pilota u tri šire kategorije u rasponu od jednostavnih - empirijskih metoda do vrlo složenih postupaka kad se primjenjuju nelinearni modeli tla i napredne numeričke metode. S aspekta predviđanja mehaničkog ponašanja pilota, baš kao i drugdje u geotehničkom inženjerstvu, rezultati su toliko dobri koliko su potpune i detaljne ulazne informacije tj. relevantni parametri modela. U novijem pregledu Poulos [12] identificira područja ponašanja pilota u kojima i danas istraživanje i primjena složenijih teorija imaju smisla te gdje istraživanja mogu unaprijediti praksu.

S druge strane, složeni numerički postupci proračuna i prethodna istraživanja tla ne daju automatski u svim situacijama zadovoljavajuće rezultate i vidljivo povećanje pouzdanosti, pa se projektanti i dalje moraju oslanjati na empirijske veličine i metode. Takvi stavovi prisutni su i u propisima (npr. EC7 [13]) gdje svi prihvatljivi postupci za projektiranje pilota moraju neposredno ili posredno biti zasnovani na rezultatima statičkih probnih opterećenja pilota. Razlozi za takvu prednost upotrebi empirijskih konačnih rezultata (krivulja sila-pomak) su u tome što sve složene mehanizme interakcije pilota s tlom, koji sudjeluju u prijenosu sile, nije moguće dovoljno pouzdano raščlaniti te istražiti, teorijski opisati i koristiti za pouzdano predviđanje. Kao glavni razlozi navode se [14]:

- Utjecaji izvedbe pilota, pri čemu postupci zabijanja, utiskivanja, vibriranja ili bušenja mijenjaju svojstva temeljnog tla od njegovog *in-situ* stanja prije izvedbe u stanje koje se teško može adekvatno izmjeriti ili procijeniti (u smislu teorije mehanike tla).
- Opterećenje pilota izaziva promjene u temeljnom tlu koje se ne mogu razmatrati istim metodama razvijenim za plitko temeljenje. Primjerice, stopa pilota je u području (tj. na dubini) znatno većih efektivnih naprezanja, a također su i kontaktni pritisci znatno veći od onih na plitkim temeljima. U tom području naprezanja javljaju

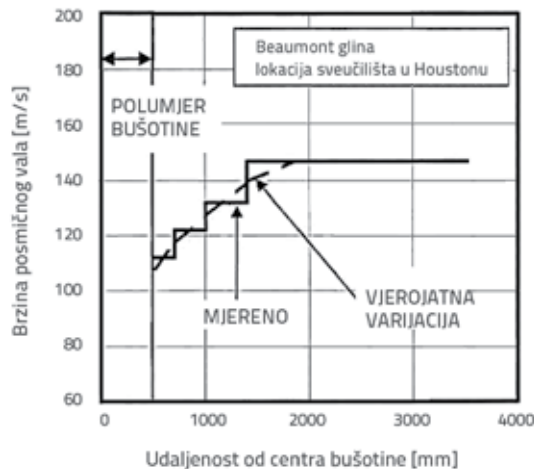
se promjene stižljivosti tla uslijed drobljenja zrna kao i promjene (redukcija) kuta trenja, pa linearna anvelopa sloma tla uglavnom nije mjerodavna.

- c) Neposredni mehanizam prijenosa sile aplicirane na glavi pilota u okolno i podnožno tlo nije do kraja razjašnjen, pa ima i kontradiktornih tumačenja [14]. Primjerice svodni efekti prilikom prijenosa tlačnih sila u gornjem dijelu pilota mogu povećati trenje po plaštu u središnjem dijelu i smanjiti ga u donjem dijelu [15, 16] (slika 2.a).

Suprotni efekt može se pojaviti kao posljedica lokalnog istiskivanja tla ispod stope pilota prema gore, tijekom slijeganja (utiskivanja) pilota, ali i zbog dilatacije zbijenog tla pri smicanju. Ti efekti izazivaju povećanje bočnih pritisaka u dijelu pilota oko stope pa time i povećanje trenja po plaštu (slika 2.b). Za usporedbu, trenje po plaštu vlačnih pilota u istom tlu nije pod utjecajem ovih mehanizama pa bi trebalo biti manje nego kod tlačnih pilota [14]. Takav stav kao i neke rezultate mjerenja iznio je i O'Neill [6], što je izazvalo reakciju drugih autora koji smatraju da je trenje po plaštu pilota neovisno o smjeru aplicirane sile na pilot [17, 18], pa time smatraju i da mehanizmi sa slike 2. zapravo nemaju značajan utjecaj na raspodjelu trenja po plaštu. Budući da eksperimentalna potvrda još uvijek nije potpuno jednoznačna, ovaj aspekt i nadalje čeka konačno tumačenje.

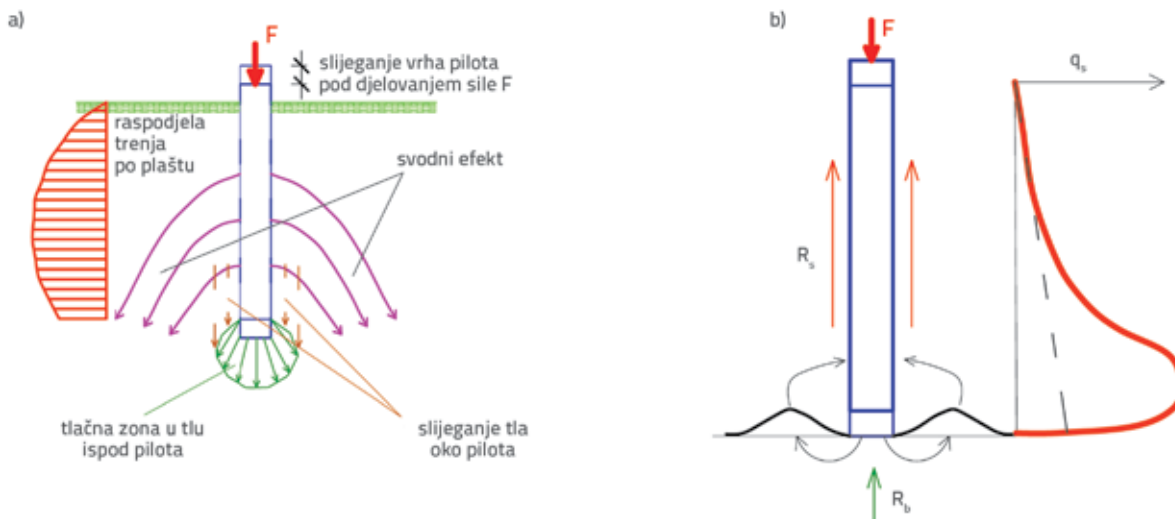
Utjecaj izvedbe pilota pokušava se objektivizirati mjerenjima, no takvi eksperimenti su još uvijek rijetki i nedovoljno sistematični. Neki rezultati se, kao ilustracija, nalaze na slikama 3. i 4. Slika 3. pokazuje doseg utjecaja relaksacije naprezanja tla nakon bušenja bušotine za pilot promjera 1 m. Mjerenje brzine posmičnih valova pokazuje da je pad brzine uz bušotinu oko 30% u odnosu na okolno tlo te da se utjecaj širi na udaljenost 1-1.5 promjera bušotine. Budući da je nedrenirana čvrstoća korelirana s modulom posmika, tj. kvadratom brzine, ovo mjerenje pokazuje da je bušenje izazvalo poremećaj i da

je na kontaktu mjerodavna osjetno reducirana čvrstoća tla. Konkretno, ovdje mjerenja potvrđuju upotrebu empirijskog koeficijenta  $\alpha$  za određivanje trenja po plaštu u koherentnim materijalima.



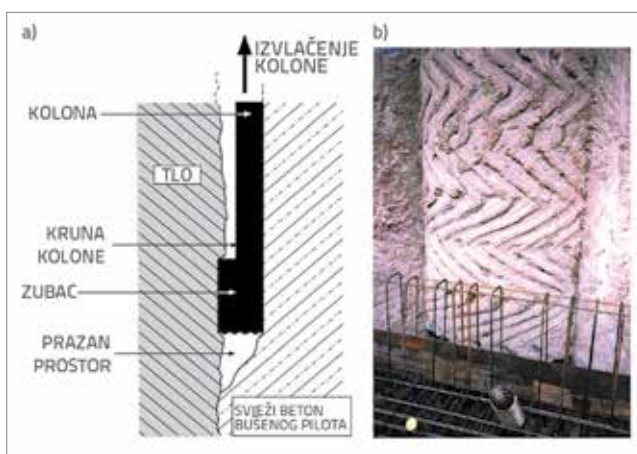
Slika 3. Utjecaj iskopa bušotine na posmični modul pri malim deformacijama za bušene pilote na lokaciji Sveučilišta u Houstonu (prekonsolidirana glina) [6]

Kontaktno ponašanje na sučelju pilota i okolnog tla, tj. trenje po plaštu pilota, ovisi o više faktora, no posebice o svojstvima tla, hrapavosti površine plašta, stanju naprezanja i brzini posmičnog procesa, pa i o specifičnostima neposrednog postupka izvedbe. Čak i unutar zacjvljene bušotine za pilot može prilikom vađenja kolone privremeno ostati šupljina na kontaktu. Ovisno o konzistenciji i razini naprezanja u betonu i tlu, tlo se pomiče u svježiji beton (razrahljenje tla) ili svježiji beton ulazi u tlo (povećavajući pritom naprezanja u okolnom tlu), ili se događaju oba efekta na različitim dubinama ili slojevima tla duž pilota. Eksperimentalno istraživanje o čvrstoći kontakta betonske površine plašta i čvrste gline opisao je Moormann [19].



Slika 2. Prijenos sila s glave pilota u okolno tlo - različiti efekti i tumačenja [14]

Nazupčana kolona (kojom su, po čestoj praksi njemačkih izvođača, zaštićene bušotine i u glinovitom tlu) prilikom podizanja rotira ili oscilira te ostavlja šupljinu i brazde različite dubine u okolnoj glini (slika 4.). Piloti su naknadno iskopani, a iz tipičnih "uzoraka" po plaštu pilota napravljeni su otisci - "negativi", pa opet pozitivni u betonu, pomoću kojih je u velikim uređajima za direktno smicanje simulirano sučelje plašta s glinovitim tlom i ispitivana čvrstoća na nadržavljenom kontaktu. Opaženo je da se slomna ploha razvija u uskoj zoni u glini neposredno uz betonski zubac. Rezultati pokusa za različite dubine brazdi (u ovom konkretnom istraživanju) pokazali su da su parametri čvrstoće bili u prosjeku samo 10 % manji od parametara izvornog tla (što je više od uobičajenih preporuka, npr. o kontaktnom kutu trenja tla i betona od 1/2 do 2/3 kuta trenja tla).



Slika 4. a) Detalj nastanka kontaktne površine prilikom podizanja kolone i ulijevanja betona u bušotinu; b) Nazupčani plašt pilota nastao popunjavanjem brazdi u okolnom tlu [19]

### 3.2. Empirijski postupci na osnovi geotehničkih istraživanja tla

Nosivost bušenih pilota se može procijeniti na osnovi parametara temeljnog tla, određenih prethodnim laboratorijskim ili *in situ* pokusima. U geotehničkoj literaturi postoji više empirijskih metoda za određivanje nosivosti, koja ovisi o geometrijskim odnosima pilota i sastavu tla u kojem se pilot izvodi. Takve metode su razvijene na osnovi velikog broja terenskih ispitivanja. U većini preporučenih metoda uzima se da je ukupna nosivost pilota za tlačnu silu ( $R_c$ ) jednaka zbroju nosivosti na stopi pilota ( $R_b$ ) i nosivosti po plaštu pilota ( $R_s$ ), neovisno o mobiliziranim slijeganjima, kako je obrazloženo u poglavlju 2.

Ukupna nosivost se može odrediti prema izrazu:

$$R_c = R_b + R_s \quad (1)$$

uz

$$R_b = A_b \cdot q_b \quad (2)$$

$$R_s = \sum A_{s,i} \cdot q_{s,i} \quad (3)$$

gdje su:

$A_b$  i  $q_b$  - površina stope pilota i jedinični otpor na stopi

$A_{s,i}$  i  $q_{s,i}$  - površina plašta pilota u sloju  $i$  i jedinični otpor plašta u sloju  $i$ .

Izrazi za jedinični otpor na stopi pilota proizlaze iz složenih matematičkih teorija, koje obično pretpostavljaju potpunu plastifikaciju materijala oko stope ili velike (slomne) pomake. Ispunjenje tih teorijskih pretpostavki u pragmatično određenom "slomnom" pomaku navedenom u poglavlju 2. nije sasvim jasno, pa se za ovaj dio nosivosti pilota u većini metoda jednostavno "propisuju" konačni, često pojednostavljeni, izrazi. U daljnjem dijelu teksta dodatno će se komentirati samo izrazi za nosivost po plaštu pilota.

Kod koherentnih materijala nosivost po plaštu može iznositi čak i do 90 % ukupne nosivosti, dok je kod nekoherentnih materijala nosivost ravnomjernije raspoređena između plašta i stope [20]. Najčešće primijenjena empirijska metoda procjene se bazira na revidiranoj API metodi [21] (modifikaciji Reese i O'Neill metode iz 1999. [22]), koja će se detaljnije analizirati u nastavku.

**Nekoherentno tlo.** Kod nekoherentnih tala, jedinični otpor po plaštu u najopćenitijem obliku glasi:

$$q_s = K \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta \quad (4)$$

Navedena formula je proizašla iz Mohr-Coulombovog zakona čvrstoće  $q_s = c_a + \sigma'_h \cdot \tan \delta$ . U ovom izrazu je  $c_a$  adhezija između tla i pilota (koja je kod nekoherentnih tala jednaka 0),  $\sigma'_h = K \cdot \sigma'_v$  horizontalno naprezanje u tlu ( $K$  je koeficijent bočnog pritiska), a  $\delta$  je kut trenja kontakta tla i pilota za koji Kulhawy [23] navodi da je ovisan o izvedbi pilota i da je manji od kuta trenja tla. Burland [24] u izraz (4) uvodi Bjerrum-Burrlandov koeficijent  $\beta$  koji je jednak  $K \cdot \tan \delta$ . Prema API metodi, izraz (4) ima oblik

$$q_{s,i} = \beta \cdot \sigma'_{v_o} \leq 200 \text{ [kPa]} \quad (5)$$

gdje je koeficijent  $\beta$  određen empirijskim izrazima:

za pijeske:

$$\beta = 1.5 - 0.25 \cdot z^{1/2} \text{ [m]} \quad 0.25 \leq \beta \leq 1.2$$

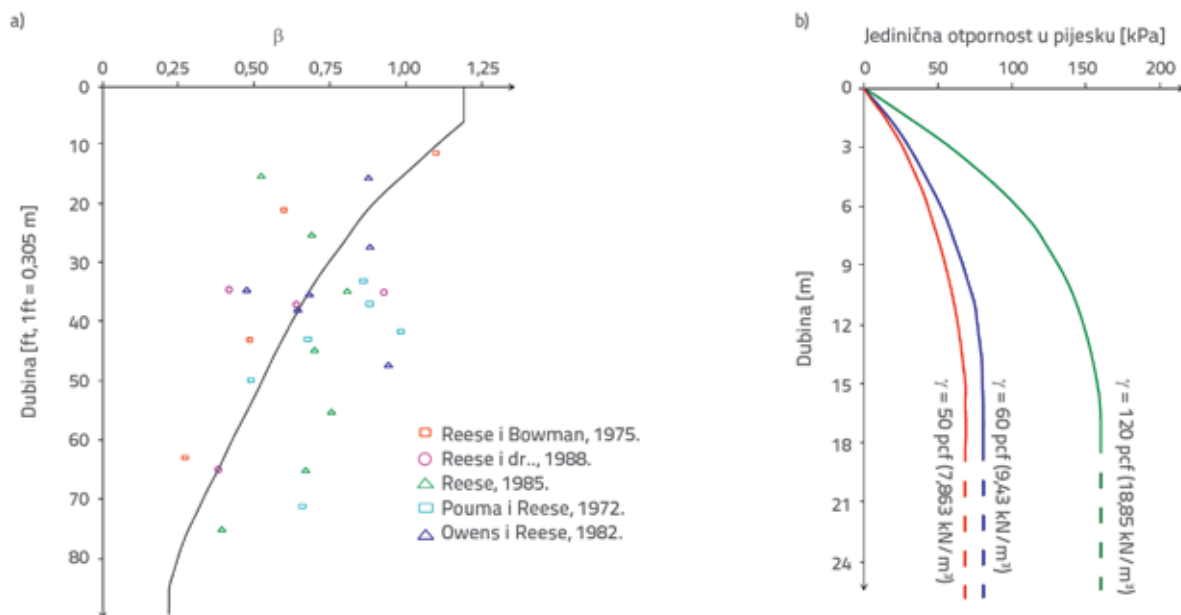
$$\beta = N_{60} / 15 \cdot (1.5 - 0.25 \cdot z^{1/2}) \quad \text{za } N_{60} \leq 15$$

ili za šljunke:

$$\beta = 2.0 - 0.15 \cdot z^{3/4} \text{ [m]} \quad 0.25 \leq \beta \leq 1.8$$

Na slici 5a je, međutim, vidljiv veliki rasap koeficijenta  $\beta$  rekonstruiranog iz terenskih mjerenja oko prosječne krivulje za pijesak definirane gornjim izrazom. Vidljivo je da  $\beta$  isključivo ovisi o dubini. Drugi član u izrazu (5),  $\sigma'_{v_o}$ , također ovisi o dubini pomnoženoj sa zapreminskom težinom, slika 5.b. Dubina, uz zapreminsku težinu, stoga predstavlja jedini parametar za

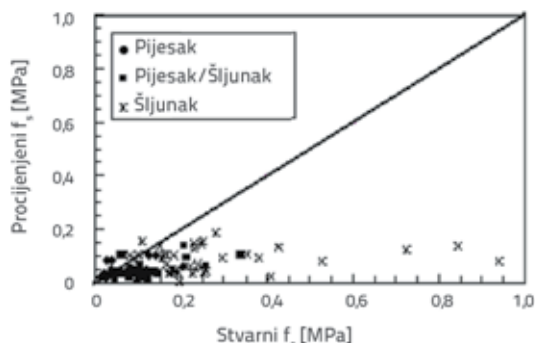




Slika 5. a) Rasap koeficijenta  $\beta$  oko krivulje; b) Ovisnost jedinične otpornosti u pijesku o zapreminskoj težini [25]

određivanje jedinične nosivosti po plaštu u nekoherentnim materijalima, čime se očigledno zanemaruju složeni odnosi između pilota i tla.

Veliki rasap koeficijenta  $\beta$  oko krivulje su u svojim istraživanjima analizirali Rollins i dr. [26]. Oni pak navode da je veliki rasap posljedica razlike u graduiranosti, zaobljenosti zrna, postotku sitneži, zbijenosti, geološkoj starosti tla i metodi izvedbe pilota. Zanimljiv pregled procijenjenih i stvarnih vrijednosti jediničnog trenja po plaštu u nekoherentnim tlima dali su Harraz i dr. [27]. Analizirajući rezultate s 56 ispitanih bušenih pilota izvedenih u pijesku, šljunku/pijesku i šljunku ustanovili su da je, po svim metodama procjene, jedinična nosivost po plaštu podcijenjena. Jedna od metoda procjene je i spomenuta metoda Reese i O'Neill [22], slika 6., koja se oslanja na procjenu jedinične nosivosti po plaštu koristeći koeficijent  $\beta$ .



Slika 6. Procijenjena i stvarna jedinična nosivost po plaštu iz rezultata ispitivanja 56 bušenih pilota [27]

**Koherentno tlo.** Izraz za određivanje jediničnog otpora plašta u koherentnom tlu se dobiva primjenom tzv. alfa

( $\alpha$ ) metode [28] kod koje se pretpostavlja da je otpor plašta neovisan o efektivnom opterećenju nadsloja tla, nego da ovisi samo o nedreniranoj čvrstoći materijala,  $c_u$ , kao:

$$q_{s,i} = \alpha \cdot c_u \tag{6}$$

Prema revidiranoj API metodi [21], koeficijent adhezije  $\alpha$  se može odrediti kao:

$$\alpha = 0,55 \text{ za } c_u / p_a \leq 1,5$$

$$\alpha = 0,55 - 0,1 \cdot (c_u / p_a - 1,5) \text{ za } 1,5 \leq c_u / p_a \leq 2,5$$

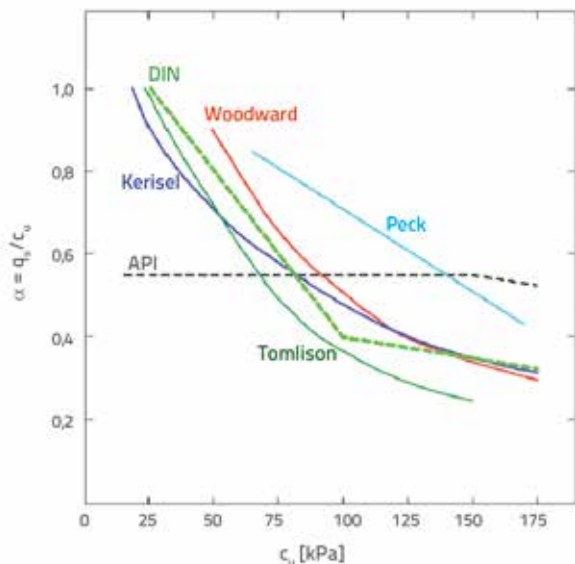
za  $c_u / p_a > 2,5$  vrijede izrazi za meku stijenu

gdje su:

$c_u$  - nedrenirana čvrstoća na razmatranoj dubini u sloju  $i$ ,  
 $p_a$  - atmosferski pritisak (101,3 kPa).

Koeficijent adhezije  $\alpha$  je ovisan o strukturi i čvrstoći gline, dimenzijama pilota, metodi ugradnje i vremenskim utjecajima. Mnogi su znanstveni radovi objavljeni na temu određivanja koeficijenta adhezije s obzirom na to da je on najvažniji čimbenik pri određivanju jedinične otpornosti po plaštu u koherentnim tlima. Međutim, samo je nekoliko radova pokazalo određenu razinu slaganja s numeričkog i (ili) metodološkog aspekta [29]. Iako se postupak određivanja koeficijenta adhezije s teoretske strane čini jednostavnim, u praksi je prisutan problem njegova određivanja.

Na slici 7. su prikazane krivulje ovisnosti nedrenirane čvrstoće u odnosu na koeficijent adhezije [14] te je vidljiva značajna disperzija različitih krivulja.



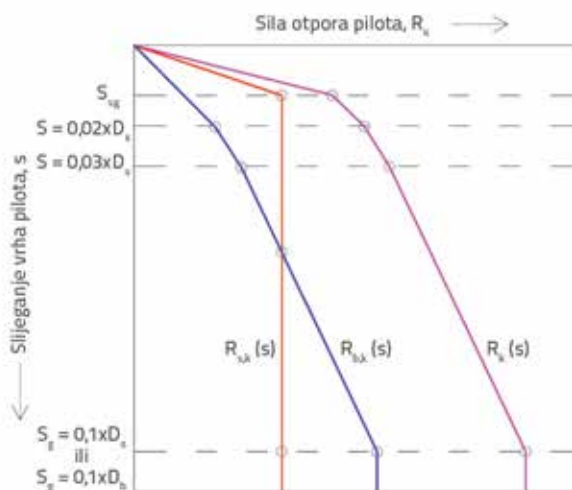
Slika 7. Disperzija krivulja za određivanje koeficijenta  $\alpha$  (prema [14] s dopunama)

Kako je  $\alpha$  izravno ovisan o nedreniranoj koheziji, Chen i Kulhawy [30] proučavali su razlike u vrijednostima nedrenirane kohezije dobivenih različitim triaksijalnim pokusima (neconsolidirani nedrenirani UU, konsolidirani nedrenirani UC i izotropno konsolidirana nedrenirana kompresija CIUC). Rezultati su pokazali da manje pouzdana ispitivanja UU i UC mogu osjetno podcijeniti nedreniranu čvrstoću u odnosu na CIUC pokus, ali da se približno jednake vrijednosti na osnovi svih ispitivanja dobiju kada se ispituje srednje ili visoko prekonsolidirana glina. Dennis i Olson [31] preporučuju da se izraz (6) s desne strane dodatno množi faktorima  $F_c$  i  $F_L$ . Faktor  $F_c$  ovisi o vrsti ispitivanja nedrenirane čvrstoće, a  $F_L$  je faktor korekcije ovisan o duljini pilota.

**Drugi postupci.** U domaćoj se praksi za procjenu nosivosti pilota dugo vremena primjenjivala konzervativna metoda prema "Pravilniku o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata" [32], koja svoje korijene ima u izrazima za nosivost plitkih temelja. Poznavanje parametara tla koji se mogu odrediti jednostavnim pokusima (zapreminska težina, te mobilizirana kohezija i kut trenja) omogućuje procjenu

nosivosti pilota na stopi i plaštu. Međutim, kako je to čest slučaj, veći broj ulaznih parametara potencijalno rezultira većim stupnjem nesigurnosti pri procjeni nosivosti. Također, za navedene izraze nije poznato jesu li kalibrirani terenskim ispitivanjima nosivosti pilota.

Nadalje, prema njemačkoj normi DIN 1054 [33] definira se nosivost bušenih pilota na temelju empirijskih vrijednosti i u ovisnosti o slijeganju vrha pilota, pri čemu su granične vrijednosti slijeganja (slom) usklađene s kriterijima Eurokoda 7 [34]. Karakteristične krivulje nosivosti pilota prema DIN-u prikazane su na slici 8.



Slika 8. Karakteristična krivulja nosivost – slijeganje vrha pilota (DIN 1054) [33]

Jedinični otpori na stopi i plaštu pilota,  $q_{b,k}$  i  $q_{s,k,l}$  određuju se u DIN normi prema tabličnim vrijednostima kao funkcije prosječnog otpora na šiljku CPT za nekoherentna tla (dopušta se i primjena korelacija CPT s drugim penetracijskim pokusima) i nedrenirane čvrstoće za koherentna tla (tablice 1. i 2.). Treba istaknuti i to da vrijednosti karakterističnih jediničnih otpora, definirane u tablicama, vrijede za bušene pilote, izvedene pomoću zacjvljenja ili isplake, koji su ukopani barem 2,5 m u nosivi sloj tla te za promjere plašta ili stope pilota od 0,30 do 3,0 m [34]. Sve međuvrijednosti u tablicama 1. i 2. mogu se linearno interpolirati.

Tablica 1. Jedinični otpori na stopi pilota,  $q_{b,k}$  u MPa [33]

Normalizirano slijeganje vrha pilota $s/D$	NEKOHERENTNA TLA				KOHERENTNA TLA	
	Prosječni otpor na šiljku CPT $q_c$ [MPa]				Nedrenirana čvrstoća $c_{u,k}$ [MPa]	
	10	15	20	25	0,100	0,200
	$q_{b,k}$ [MPa]				$q_{b,k}$ [MPa]	
0,02	0,70	1,05	1,40	1,75	0,35	0,90
0,03	0,90	1,35	1,80	2,25	0,45	1,10
0,10 ( $s_g$ )	2,00	3,00	3,50	4,00	0,80	1,50

Tablica 2. Jedinični otpori po plaštu,  $q_{s,k}$  u MPa [33]

NEKOHERENTNA TLA		KOHERENTNA TLA	
Prosječni otpor na šiljku CPT $q_c$ [MPa]	Specifični otpor na plaštu $q_{s,k}$ [MPa]	Nedrenirana čvrstoća $c_{u,k}$ [MPa]	Specifični otpor na plaštu $q_{s,k}$ [MPa]
0	0	0,025	0,025
5	0,040	0,100	0,040
10	0,080	$\geq 0,200$	0,060
$\geq 15$	0,120		

Matković [20] je dao pregled i ostalih metoda procjene koje se temelje na ispitivanjima statičkim penetrometrom. Neke od metoda koriste i trenje po plaštu i otpornost na šiljku sonde za procjenu jedinične otpornosti po plaštu, odnosno na stopi [35, 36, 37], dok neke od metoda koriste samo otpornost na šiljku sonde za procjenu jedinične otpornosti i po plaštu i na stopi [38, 39]. Osim navedenih metoda, kojima se izravno iz rezultata statičkog penetriranja može procijeniti nosivost, postoje i metode koje se temelje na izvedenim vrijednostima otpora statičke penetracije [40]. Metoda Bustamante i Ganeselli [38] je, od navedenih metoda, do sada našla najširu primjenu u inženjerskoj praksi zbog relativno dobre razrađenosti i mogućnosti primjene na najširi spektar tipova tla i pilota [20], pri čemu je ova metoda zasnovana samo na rezultatima otpornosti na šiljku sonde.

Postoji još niz metoda kojima se na empirijski način, s manjim ili većim stupnjem pouzdanosti, može procijeniti nosivost bušenih pilota. Primjerice Powell i dr. [41] analizirali su procjenu nosivosti iz rezultata terenskih ispitivanja kao što su Marchetti Dilatometar (DMT) i Presiometar tipa Menard (MPM).

Navedene empirijske metode samo su jedan dio velikog niza empirijskih metoda za određivanje nosivosti pilota na temelju parametara tla, koji se jednostavno mogu odrediti laboratorijskim ili *in situ* pokusima. Detaljnije analize metoda upućuju i na mjestimične znatne razlike u brojčanoj interpretaciji jediničnih otpora po plaštu ili na stopi pilota, a za većinu metoda nije dostupna kalibracijska baza podataka i detalji terenskih ispitivanja kako bi se mogao procijeniti rasap rezultata (kao npr. na slici 5.). Osim toga, metode se zasnivaju na pojednostavljenjima kojima se unosi određena pogreška u procjene nosivosti. Pojednostavljuju se određeni uvjeti u tlu čime se odstupa od stvarnog zakona ponašanja tla,

a i aspekt instalacije bušenih pilota nije u potpunosti uključen u procjene. Time se, u većem ili manjem opsegu, zanemaruju složeni odnosi interakcije pilota i tla u kojem je on izveden.

### 3.3. Ispitivanja nosivosti pilota na terenu

Ispitivanja nosivosti terenskim metodama su pouzdanija od procjena nosivosti empirijskim metodama iz očiglednog razloga – piloti se ispituju u uvjetima u kojima će se nalaziti u fazi uporabe te su rezultati ispitivanja izravna posljedica interakcije pilota i tla. Metode terenskih ispitivanja nosivosti su statičko ispitivanje, Osterbergove ćelije, dinamičko ispitivanje i Statnamic ispitivanje, slika 9.

Među navedenim, statička ispitivanja nosivosti predstavljaju osnovnu metodu terenskog određivanja nosivosti, u odnosu na koju se kalibriraju sve ostale terenske metode. Zato se prema normi HRN EN 1997-1:2012 [13] projektiranje temeljenja na pilotima mora oslanjati na jednom od sljedeće navedenih pristupa:

1. na rezultatima ispitivanja nosivosti pilota statičkim postupkom, za koje se pomoću proračuna, ili na koji drugi način, dokazalo da su u skladu s drugim odgovarajućim iskustvom
2. na empirijskim ili analitičkim metodama proračuna čija se valjanost dokazala statičkim ispitivanjima u usporednim situacijama
3. na rezultatima ispitivanja nosivosti pilota dinamičkim postupkom čija se valjanost dokazala statičkim ispitivanjima u usporednim situacijama
4. na opažanju ponašanja (pomaka) usporedivog pilota, uz uvjet da je ovaj pristup podržan rezultatima terenskog istraživanja i ispitivanja temeljnoga tla.



Slika 9. Terenska ispitivanja nosivosti pilota: a) statičkim postupkom; b) Osterbergovim ćelijama; c) dinamičkim postupkom; d) Statnamic postupkom [9]



**a) Statičko ispitivanje pilota**

Da bi se utvrdila nosivost pilota primjenjuje se statičko ispitivanje pilota kao najčešća i najpouzdanija metoda. Općeprihvaćeni postupak statičkog ispitivanja pilota prikazan je u ASTM normi [42]. Način provođenja ispitivanja, kao i interpretacije rezultata, nisu ujednačeni na svjetskoj razini [43]. Ispitivanje se provodi nanošenjem sile na vrh pilota izvedenog na pokusnom polju ili na vrh pilota koji će u konačnici činiti dio temeljnog sustava. Sila se nanosi ili opterećenjem težinom, ili češće, koristeći hidrauličku prešu za nanošenje sile. U potonjem slučaju potrebno je imati reaktivni sustav, koji se sastoji od konstrukcije (čelična ili armiranobetonska) za prijenos sile te vlačnih pilota s ugrađenim geotehničkim sidrima. Navedena norma obuhvaća ravnopravno više postupaka ispitivanja s aspekta brzine i redosljeda nanošenja opterećenja. Kod nas se koristi postupak sa zadržanim opterećenjem (engl. *sustained loading*). Pritom se pilot ispituje prema unaprijed definiranom programu ispitivanja, koji uključuje niz faza opterećivanja i rasterećivanja pilota, a tijekom ispitivanja se kontinuirano bilježi aplicirana sila i slijeganje pilota, kako bi se odredila krivulja sila-pomak.

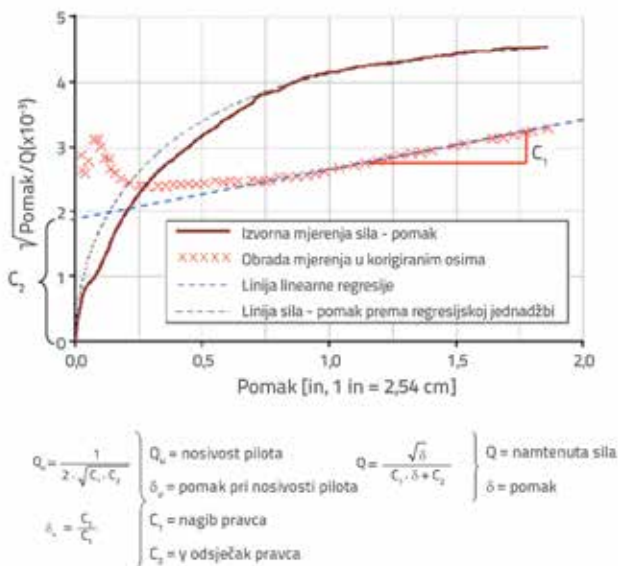
Iako su podaci dobiveni statičkim ispitivanjem jednoznačni, potrebno je dobivene krivulje interpretirati radi utvrđivanja nosivosti pilota. U mnogim slučajevima se iz krivulje rezultata statičkog ispitivanja ne može jasno odrediti sila pri kojoj dolazi do sloma. Fellenius [44] navodi devet različitih definicija nosivosti pilota dobivenih interpretacijom krivulje sila-pomak iz statičkog ispitivanja, među kojima su od posebnog interesa Davissonov kriterij, Hansenova nosivost, Chin-Kondnerova ekstrapolacija, Decourt ekstrapolacija, DeBeerova granica popuštanja te metoda točke najveće zakrivljenosti.

**Davissonov kriterij**

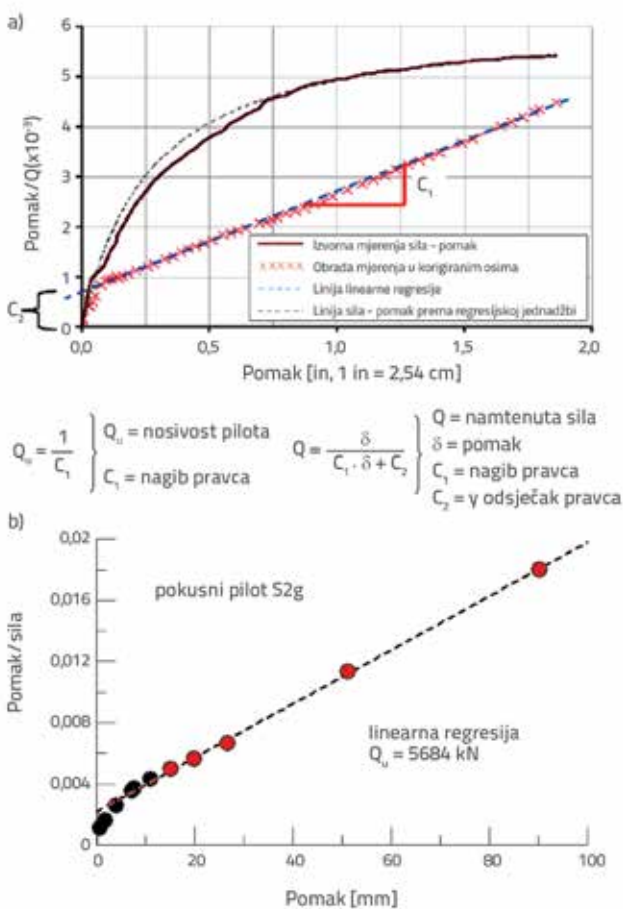
Nosivost pilota prema Davissonu odgovara pomaku koji premašuje elastičnu komponentu krivulje sila-pomak za vrijednost od 0.15" (3,8 mm) + D (promjer)/120. Metoda se temelji na pretpostavci da se nosivost pilota dosegne pri malim pomacima dna pilota, pa se tim kriterijom nastoji procijeniti vrijednost takvog pomaka kompenziranjem krutosti (duljine i promjera) pilota. Navedeni kriterij je izrazito osjetljiv na pogreške u mjerenju sile i pomaka, te predstavlja empirijsku metodu koja ne uzima u obzir stvarni oblik krivulje sila-pomak. Metoda, da bi bila uzeta u obzir, zahtijeva da se pilot ispita do sloma tla. Ostali nedostaci Davissonove interpretacije krivulje statičkih ispitivanja opisani su u literaturi [45].

**Hansenov kriterij**

Prema Hansenovom kriteriju, oblik krivulje sila-pomak je takav da kada se u odnos stavi pomak s korijenom pomaka podijeljenog s odgovarajućom silom, dijagram će imati oblik ravne linije nagiba  $C_1$ , i  $\gamma$ -odsječka  $C_2$ , kao na slici 10. Nosivost pilota  $Q_u$  u tom slučaju odgovara pomaku  $S_{\gamma}$ , ako sila  $0,8 \cdot Q_u$  daje pomak  $0,25 \cdot S_{\gamma}$ , ili ako sila  $0,9 \cdot Q_u$  daje pomak  $0,5 \cdot S_{\gamma}$ . Matematički izraz za određivanje "idealne" krivulje sila-pomak (crtkano na slici) prikazan je na slici 10.



Slika 10. Određivanje nosivosti pilota prema Hansenovom kriteriju [44]



Slika 11. Određivanje nosivosti pilota prema Chin-Kondnerovoj ekstrapolaciji: a) opći primjer [44]; b) pokusni pilot S2g sa slike 17.b

### **Chin-Kondnerova i modificirana Chin-Kondnerova ekstrapolacija (hiperbolna)**

Chin-Kondnerova ekstrapolacija podrazumijeva metodu interpretacije rezultata statičkog pokusa prema kojoj se svaki pomak dijeli s pripadajućom silom i takva vrijednost se stavlja u odnos s pomakom. Rezultati, prema slici 11, nakon početnog odstupanja padaju na ravnu liniju, a inverzni nagib te linije predstavlja Chin-Kondnerovov kriterij ekstrapolacije za nosivost pilota. Izrazi za određivanje nosivosti i "idealne" krivulje prikazani su na slici 11.a. Na slici 11.b je prikazan postupak određivanja nosivosti Chin-Kondnerovom ekstrapolacijom za pokusni pilot S2g (promjera 80 cm i duljine 20 m) na lokaciji mosta preko Drave. O ispitivanju pilota na toj lokaciji bit će više riječi u poglavlju 4. U upotrebi je i modificirani Chin-Kondnerov kriterij na osnovi kojeg se ocjenjuje da je nosivost inverzna vrijednost nagiba pravca pomnožena s vrijednosti 1,2.

### **Decourtova ekstrapolacija**

Decourtova ekstrapolacija je metoda slična Hansenovoj i Chin-Kondnerovoj metodi, samo što se u ovom slučaju svaka vrijednost opterećenja dijeli s odgovarajućim pomakom te se takva dobivena vrijednost stavlja u odnos s opterećenjem. Linearna regresija (u slučaju sa slike 12.a preko zadnjih 5 točaka) definira liniju koja služi za određivanje nosivosti pilota. "Idealna" krivulja se može izračunati i usporediti s krivuljom sila-pomak iz statičkog testa, slika 12.b. Decourtov, Hansenov i Chin-Kondnerov kriterij omogućuju da se dio krivulje pri većim silama odredi matematičkim relacijama, čime je moguće ekstrapolirati krivulju izvan područja unutar kojeg je ona mjerena. Metode ekstrapolacije mogu upućivati na vrijednost sile stanja otkazivanja nosivosti [46]. Međutim, s inženjerskog aspekta nije poželjno za nosivost pilota koristiti sile koje su veće od najveće sile iz statičkog testa. Na slici 12.c je prikazan postupak određivanja nosivosti pokusnog pilota S2g na lokaciji mosta preko Drave prema Decourtovoj ekstrapolaciji, a na slici 12.d je za isti pilot dana usporedba izmjerene krivulje s prognoznim krivuljama prema Chin-Kondnerovoj i Decourtovoj ekstrapolaciji

### **De Beerova granica popuštanja**

De Beerova granica popuštanja predstavlja metodu kod koje se rezultati prikazuju u logaritamskom mjerilu, a ne u linearnom. Time odnos između sile i pomaka postaje linearan. Granična sila pilota je određena kao sila pri kojoj se u dijagramu mijenja nagib linije za aproksimaciju podataka iz statičkog testa.

### **Točka najveće zakrivljenosti**

Ako se promotri krivulja sila-pomak dobivena iz statičkog testa, lako se može uočiti dio kod kojeg za mali porast opterećenja dolazi do većih pomaka pilota, te je taj dio krivulje dan pravcem. Dio krivulje na kojem je zakrivljenost najveća odgovara takozvanoj sili popuštanja, koja se prema ovom

kriteriju smatra nosivošću pilota. Shen i Niu [47] su dali matematičke izraze za određivanje najveće zakrivljenosti na krivulji sila-pomak.

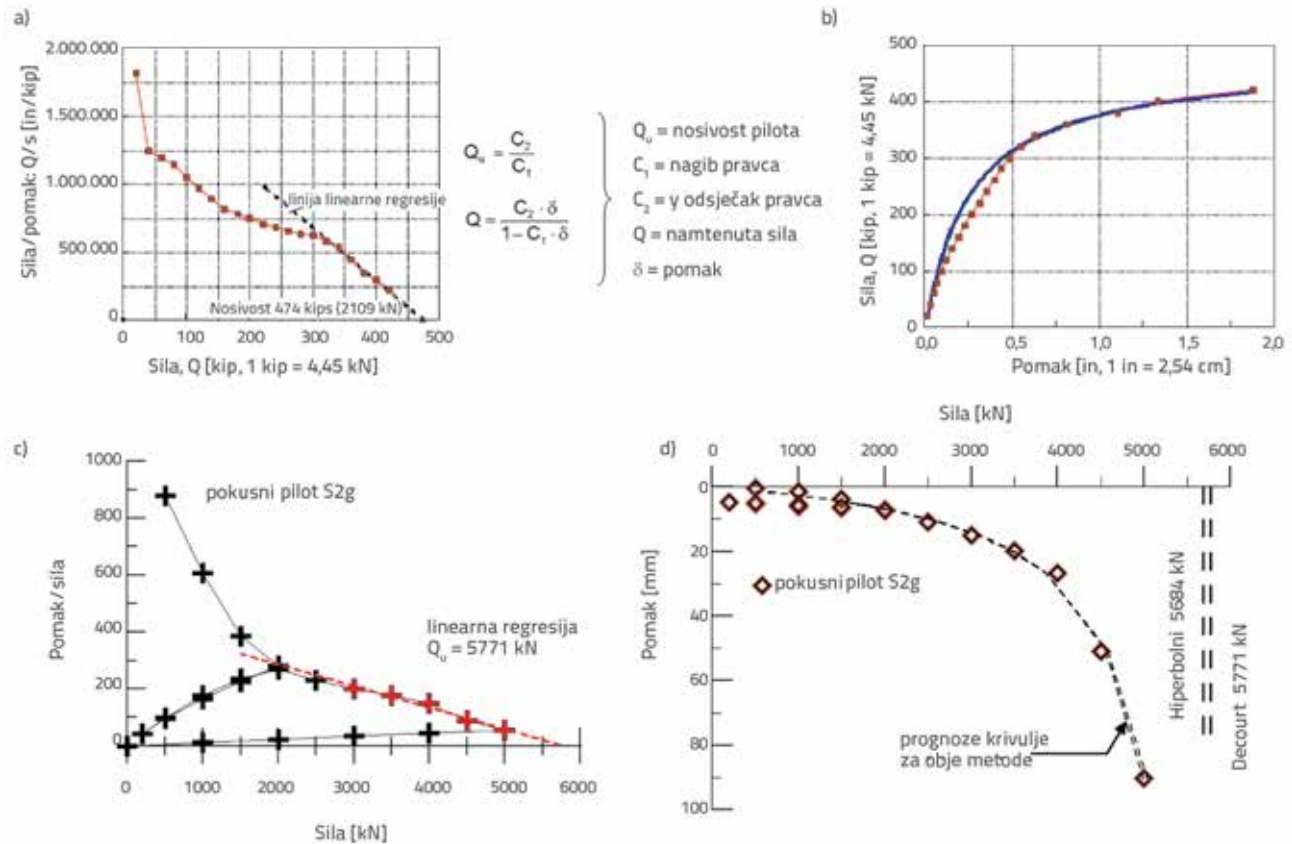
### **Razmatranje kriterija procjene nosivosti**

Treba uzeti u obzir da De Beerova metoda i metoda nazvana točka najveće zakrivljenosti ne određuju nosivost pilota, već silu popuštanja, tj. silu pri kojoj tlo u okolini pilota ulazi u područje plastičnih deformacija.

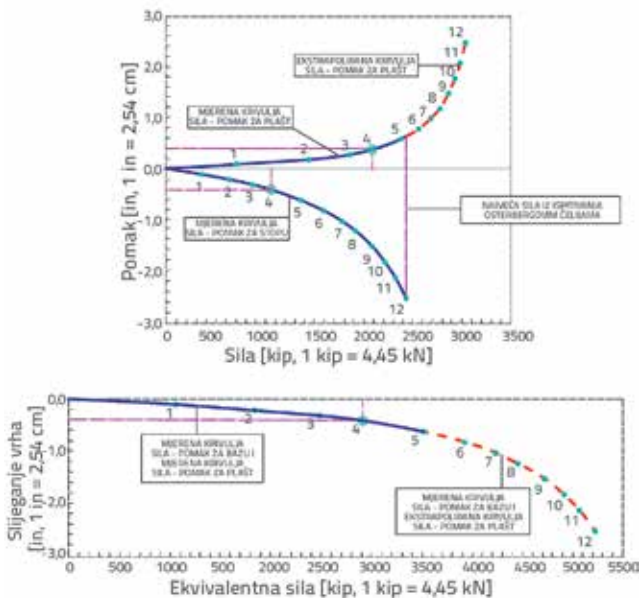
Ovisno o metodi koja se koristi, potrebno je primijeniti i određene faktore sigurnosti na silu nosivosti. Primjerice za konzervativniji Davissonov kriterij, trebao bi manji faktor sigurnosti nego npr. za Hansenovu nosivost. Prema Felleniusu [44], za Davissonov kriterij trebao bi faktor sigurnosti biti u rasponu od 1.8 do 2.0. Prema literaturi [48], faktor sigurnosti od 2.5 se smatra odgovarajućim kada se radne sile određuju iz nosivosti prema Hansenovom ili Decourtovom kriteriju, dok se za Chin-Kondnerov i modificirani Chin-Kondnerov kriterij preporučuje faktor sigurnosti od 3.5 jer navedene metode imaju tendenciju procjenivanja većih nosivosti od stvarnih. De Beerova metoda i metoda točke najveće zakrivljenosti temelje se na određivanju sile popuštanja, te je stoga i odabir faktora sigurnosti potrebno tome prilagoditi. Racionalni odabir primjerene metode interpretacije nosivosti je težak zadatak iz razloga jer pojedina metoda interpretacije ovisi o iskustvu u primjeni metode i načinu shvaćanja komponenti koje su "odgovorne" za ukupnu nosivost pilota [44]. Bustamante [49] navodi da se dodatni problemi mogu pojaviti kada se ekstrapoliraju rezultati ispitivanja s pokusnog pilota na pilot koji će biti sastavni dio konstrukcije. Potencijalni problemi su u međusobnom djelovanju pokusnog pilota i reaktivnog sustava (koji tijekom upotrebe neće postojati), moguće povećane nosivosti pilota i vremena kao i razlike u naprezanjima u tlu na lokaciji pilota prilikom pokusnog ispitivanja i tijekom uporabe.

### **b) Osterbergove čelije**

Osterbergove čelije [50] su hidrauličke dizalice velikog promjera postavljene unutar pilota između dviju ploča sličnih dimenzija kao i pilot. Obično se ugrađuju u donji dio pilota ili neposredno iznad stope pilota, iako ih je moguće ugraditi na više visina. Nakon ugradnje i nakon što beton pilota dostigne minimum čvrstoće, na Osterbergovu čeliju se primjenjuje hidraulički tlak te se čelija počinje širiti, čime se izaziva uzdužna sila u pilotu. Ispitivanje Osterbergovim čelijama je statičko ispitivanje u kojem trenje po plaštu predstavlja reakciju opterećenju kojim se opterećuje stopa pilota. Ispitivanje omogućuje mjerenje sile u odnosu na pomak, i to posebno za stopu (krivulja sila-pomak prema dolje) a posebno za plašt (krivulja sila-pomak prema gore, ali je određena statička otpornost plašta jednaka kao i pri statičkom ispitivanju kad se definira krivulja sila-pomak prema dolje). Način određivanja ukupne "ekvivalentne" krivulje sila-pomak [9] prikazan je na slici 13. i opisat će se u nastavku.



Slika 12. Određivanje nosivosti pilota: a) prema Decourtovoj ekstrapolaciji; b) usporedba idealne krivulje i krivulje iz statičkog testa [44]; c) određivanje nosivosti (Decourtova ekstrapolacija) pokusnog pilota S2g sa slike 17.b; d) usporedba mjerene krivulje i prognoznih krivulja za pokusni pilot S2g



Slika 13. Određivanje statičke nosivosti pilota iz ispitivanja Osterbergovim ćelijama [9]

Na slici 13.a su prikazane zasebno krivulje sila-pomak za stopu i za plašt. Primjerice, pomak od 0.4 inča (~1 cm) označen je na obje krivulje točkom "4". U dijagramu na slici 13.b se ukupna sila za pomak 0.4 inča dobije zbrajanjem sila koje su uzrokovale isti pomak za plašt i za stopu. Ovaj postupak se ponavlja kako bi se dobile točke krivulje na slici 13.b, sve do vrijednosti pomaka koji odgovara manjoj od dviju vrijednosti (pomak stope ili plašta) pri najvećoj sili ispitivanja (u ovom slučaju točka "5" krivulje sila-pomak plašta). Za ostatak krivulje na slici 13.b (od točke "5" do točke "12") potrebno je provesti ekstrapolaciju krivulje sila-pomak plašta do vrijednosti pomaka koji odgovara najvećem pomaku u krivulji sila-pomak stope.

Ispitivanjem Osterbergovim ćelijama omogućuje se odvojeno određivanje nosivosti plašta i nosivosti stope, ali to može postati i najveći nedostatak ove metode. Ispitivanjem se ne može izravno mjeriti kombinirano ponašanje stope i plašta pri većim deformacijama (aproximacija krivulje sila – pomak za plašt pri većim deformacijama). Ukupnu nosivost za stopu i plašt pilota je stoga teško odrediti jer do gubitka nosivosti pojedinog segmenta (plašta ili stope) neće doći u istom trenutku.

**c) Dinamičko ispitivanje**

Dinamičko ispitivanje pilota predstavlja metodu koja se u praksi primjenjuje već dugi niz godina. Dinamička ispitivanja pilota služe za procjenu statičke nosivosti pilota, a temelje se na principima valne mehanike, te na rezultatima mjerenja deformacija i ubrzanja tijekom samog ispitivanja. Postupak ispitivanja se provodi generiranjem vala u pilotu prilikom pada tereta, čija težina iznosi od 1 do 2 % željene sile ispitivanja. Sama sila udarca mora biti veća od statičke otpornosti tla, zato što dio sile treba prevladati dinamičku otpornost tla. Da bi se aktivirala uzdužna otpornost, potrebno je po pilotu izvesti dva do deset udaraca, gdje penetracija po udarcu obično iznosi 1-2 mm [44]. U domaćoj se praksi kao mjerodavan standard za dinamičko ispitivanje najčešće primjenjuje ASTM standard [51].

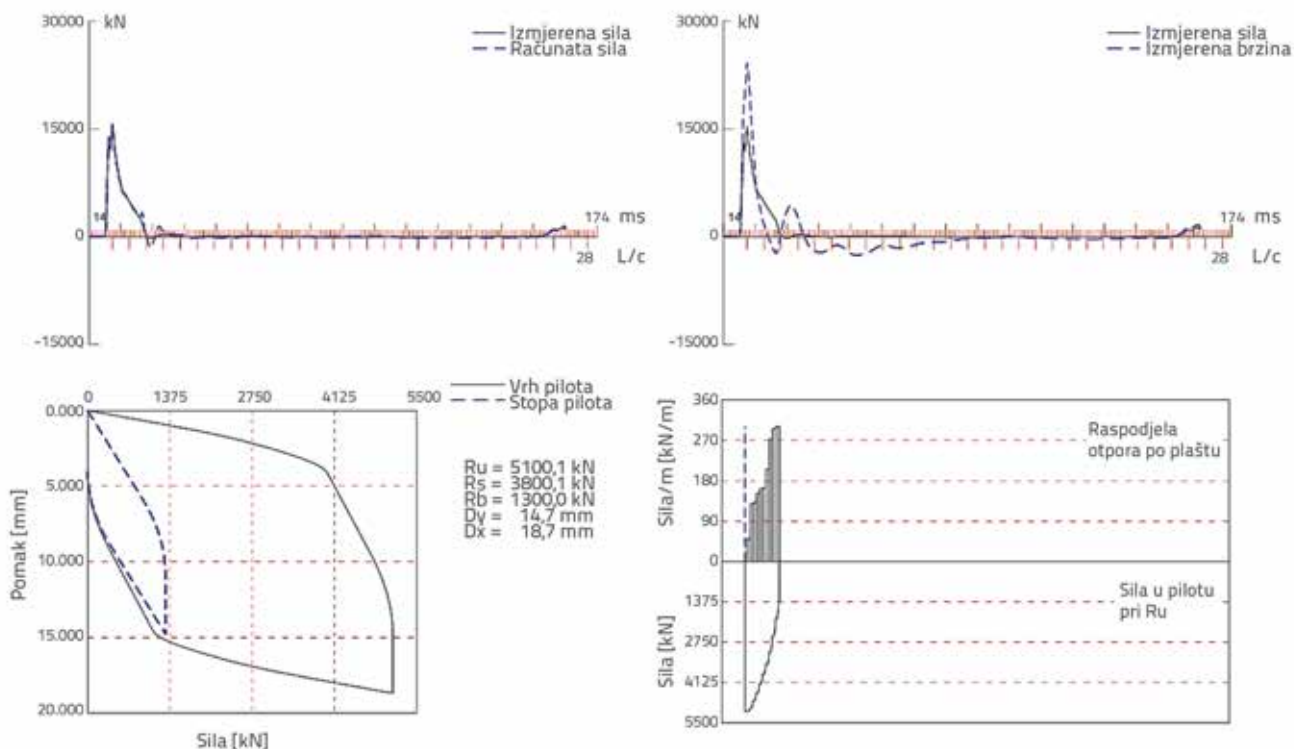
Cijeli se postupak nanošenja opterećenja i mjerenja relevantnih parametara provodi koristeći tzv. Pile Driving Analyzer (PDA). Statička nosivost pilota se može procijeniti već tijekom samog ispitivanja primjenjujući tzv. Case metodu. Međutim, preporučuju se složenije analize dinamičkih ispitivanja za procjenu statičke nosivosti, kao što je analiza dana računalnim programom CAPWAP [52], koji procjenjuje nosivost po plaštu i na stopi pilota. Osnovna ideja rada programa se sastoji u modeliranju pilota i tla koji su definirani nizom opruga i prigušivača, te se zatim model "opterećuje" krivuljom mjerene brzine (iz ispitivanja) i određuje njegov odgovor. Metodom iteracije (promjenom modela pilota i tla) traži se najbolje preklapanje mjerene i računane krivulje. Kada se postigne zadovoljavajuće preklapanje krivulja, poznata su

svojstva modela tla i granična nosivost ispitivanog pilota. Dinamičkim ispitivanjem se može procijeniti statička nosivost, ali se ne može sa zadovoljavajućom točnošću definirati ponašanje sila-pomak, koje karakterizira stvarno ponašanje pilota pod statičkim uvjetima (slika 14.) niti se mogu odrediti slijeganja povezana s dugotrajnim opterećenjima. S obzirom da se statička nosivost interpretira (tj. ne mjeri direktno), zahtijeva se visokoobrazovano osoblje za korektnu analizu, jer je sam postupak modeliranja i procjene parametara složen i nije jednoznačan.

**d) Statnamic ispitivanje**

Statnamic ispitivanje, poznato kao i ispitivanje brzim opterećenjem, jedna je od dinamičkih metoda ispitivanja pilota koja se provodi radi određivanja njihove statičke nosivosti. Opterećenje pri ispitivanju je takvo da inercijski efekt i efekt prigušivanja imaju velik utjecaj na samo ispitivanje, ali je i dovoljno dugog trajanja (do 20 puta dulje nego kod dinamičkog ispitivanja) da su efekti napredovanja vala kroz pilot minimalni. Veličina opterećenja iznosi 5-7 % željene sile ispitivanja. Relativno dugo trajanje impulsa rezultira jednakim brzinama na dnu i vrhu pilota, čime se pilot pomiče kao kruto tijelo (tj. translacija se). Ovakva pretpostavka nije primjenjiva za dulje pilote (dulje od 25-30 m) [54]. Tijekom ispitivanja mjeri se sila, pomak i ubrzanje pilota.

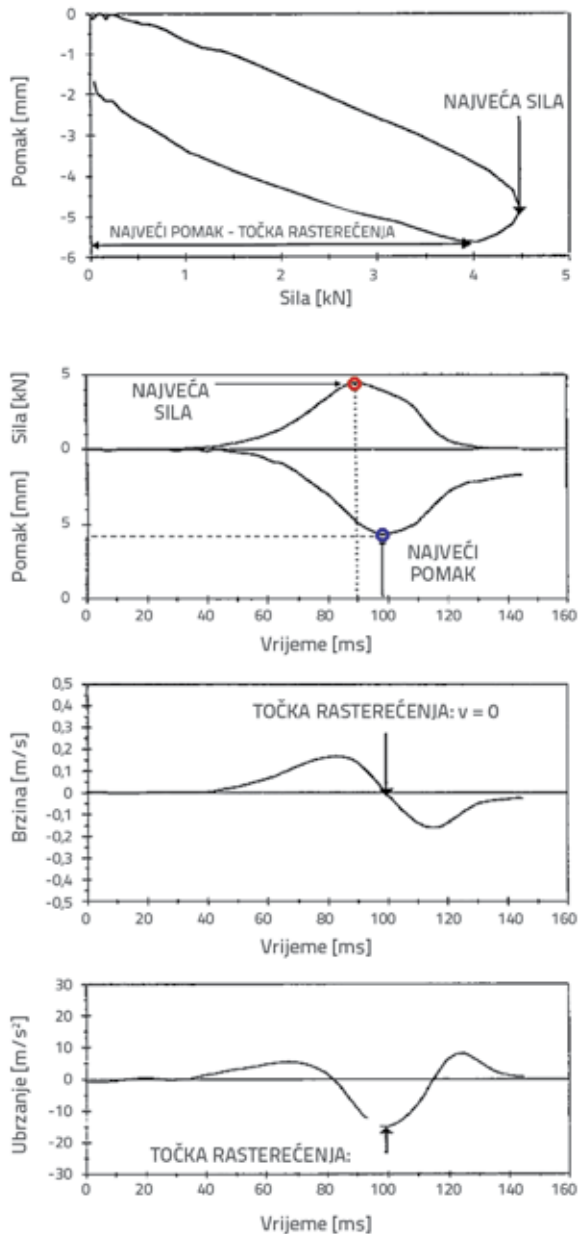
Nizom ispitivanja je ustanovljeno dobro statističko poklapanje rezultata Statnamic pokusa sa statičkim ispitivanjima, te je od 2008. godine na snazi i odgovarajući ASTM standard [55]. Statička nosivost se ovim ispitivanjem ne određuje izravno,



Slika 14. Interpretacija rezultata dobivenih dinamičkim ispitivanjem pilota [53]



već je interpretirana (od ukupne nosivosti je potrebno oduzeti dinamičke efekte – silu inercije pilota i silu prigušenja tla). Za interpretaciju se u praksi najčešće koristi metoda točke rasterećenja (eng. *Unloading Point Method*) [56], prikazana na slici 15. te opisana u nastavku.



Slika 15. Interpretacija rezultata dobivenih *Statnamic* ispitivanjem pilota [44]

Najveći pomak pilota kod *Statnamic* ispitivanja nije pri najvećoj sili, već se ostvaruje u trenutku kad pilot promijeni svoj smjer gibanja (od dolje prema gore), tj. uslijed odskoka pilota. Najveća sila u pilotu (mjerena sila) pojavljuje se nešto prije nego što pilot ostvari najveći pomak. U točki najvećeg pomaka, nema brzine te je time dinamička komponenta

prigušenja jednaka nuli. Potrebno je zatim od sile mjerene u toj točki oduzeti silu inercije (poznata iz mjerenog ubrzanja), te je rezultat statička nosivost pilota. Nedostatak je u činjenici da je statička nosivost izvedena, nije mjerena, a određeni radovi [57] upućuju na činjenicu da se UPM metodom statička nosivost precjenjuje, te da u glinama *Statnamic* ispitivanja daju i do dva puta veću nosivost nego što je to nosivost određena statičkim ispitivanjem nosivosti.

#### 4. Obrada mjerenja na lokaciji mosta preko rijeke Drave

Određivanje nosivosti pilota na tlačnu silu obavljeno je na lokaciji mosta preko rijeke Drave, koji je ujedno i najvažnija građevina na dionici Beli Manastir – Osijek, autoceste Beli Manastir – Osijek – Svilaj, koja čini dio budućeg međunarodnog paneuropskog cestovnog koridora Vc. Temeljenje mosta je projektirano na armiranobetonskim bušenim pilotima promjera  $\phi 150$  cm, duljine i do 30 m (ispod pilona), povezanih naglavnim pločama. Provedena su statička i dinamička ispitivanja nosivosti na 4 pokusna pilota promjera  $\phi 80$  cm i duljine 20 m [53]. Razlog zbog kojega su se ispitivali piloti manjih dimenzija od onih u uporabi jest činjenica da bi ispitivanje pilota "uporabnih" dimenzija zahtijevalo izrazito visoke financijske resurse, ponajviše zbog robusne konstrukcije za prihvatanje sila reakcije. Ispitana su po dva pilota s osječke (stupište S19 i pilon S1g) i s baranjske strane (stupište S42 i pilon S2g), a u nastavku će se dati usporedba procijenjenih i mjerenih nosivosti kao i usporedba prognoznih krivulja sila-pomak s mjerenima. Za procijenjene vrijednosti u razmatranje će se uzeti vrijednosti određene na osnovi:

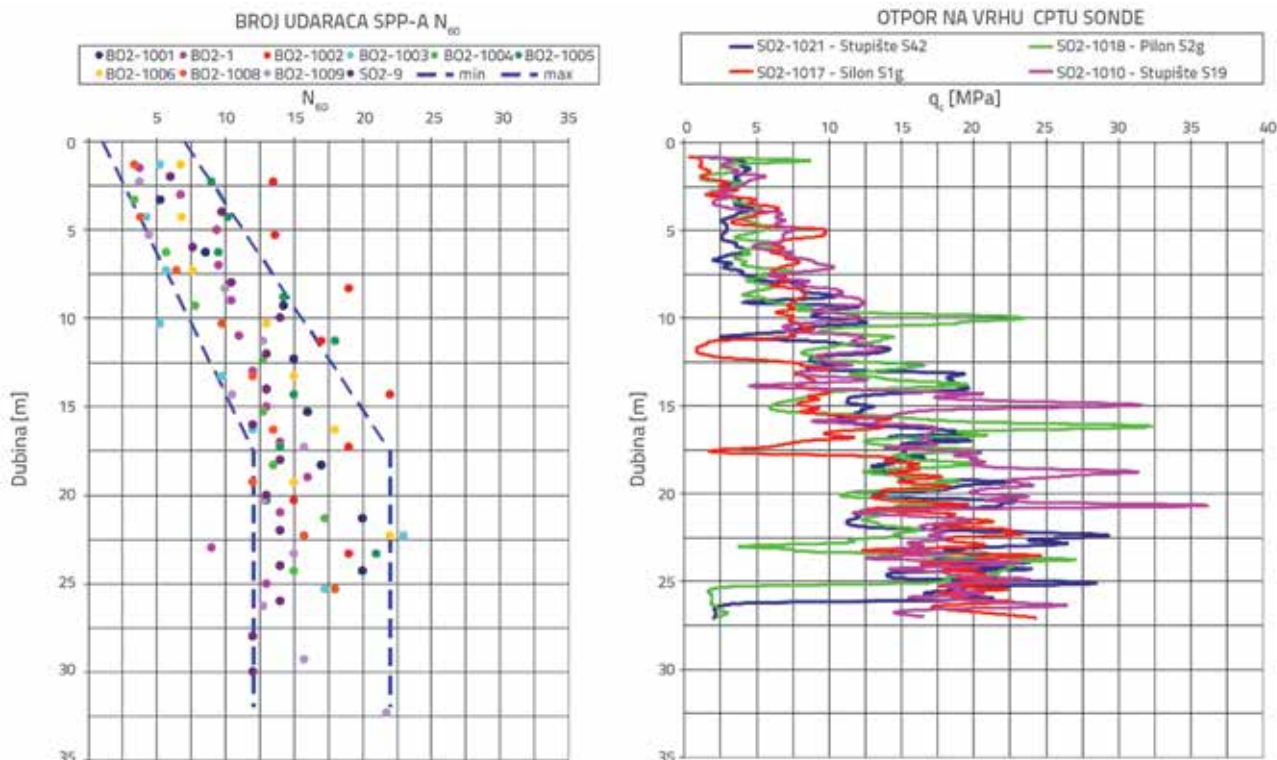
- revidirane API metode [21],
- Pravilnika o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata [32]
- metode Bustamantea i Giancesellia koja se temelji na CPTU ispitivanju [38]
- DIN 1054 metode [33],

dok će se za mjerene vrijednosti razmatrati rezultati statičkih i dinamičkih ispitivanja. Procjena nosivosti pokusnih pilota rađena je na temelju jedinstvenog projektnog profila za sve lokacije pokusnih pilota (revidirana API metoda i Pravilnik) ili na temelju CPTU profila za svaku lokaciju zasebno (Bustamante i Gianceselli, te DIN 1054). Na slici 16. vidljivo je da broj udaraca SPT ispitivanja (za potrebe procjena je izračunat ponderirani prosjek), odnosno otpor na sondi CPTU ispitivanja općenito rastu s dubinom, uz manja odstupanja.

Rezultati procijenjenih nosivosti i mjerenih vrijednosti sažeti su u tablici 3.

Pri analiziranju prognoznih krivulja sila-pomak treba naglasiti da su one određene empirijskim metodama (program SHAFT 6.0 [25]) i prema normi DIN 1054 [33]), a mjerena je krivulja rezultat statičkog ispitivanja nosivosti. Na ovoj razini





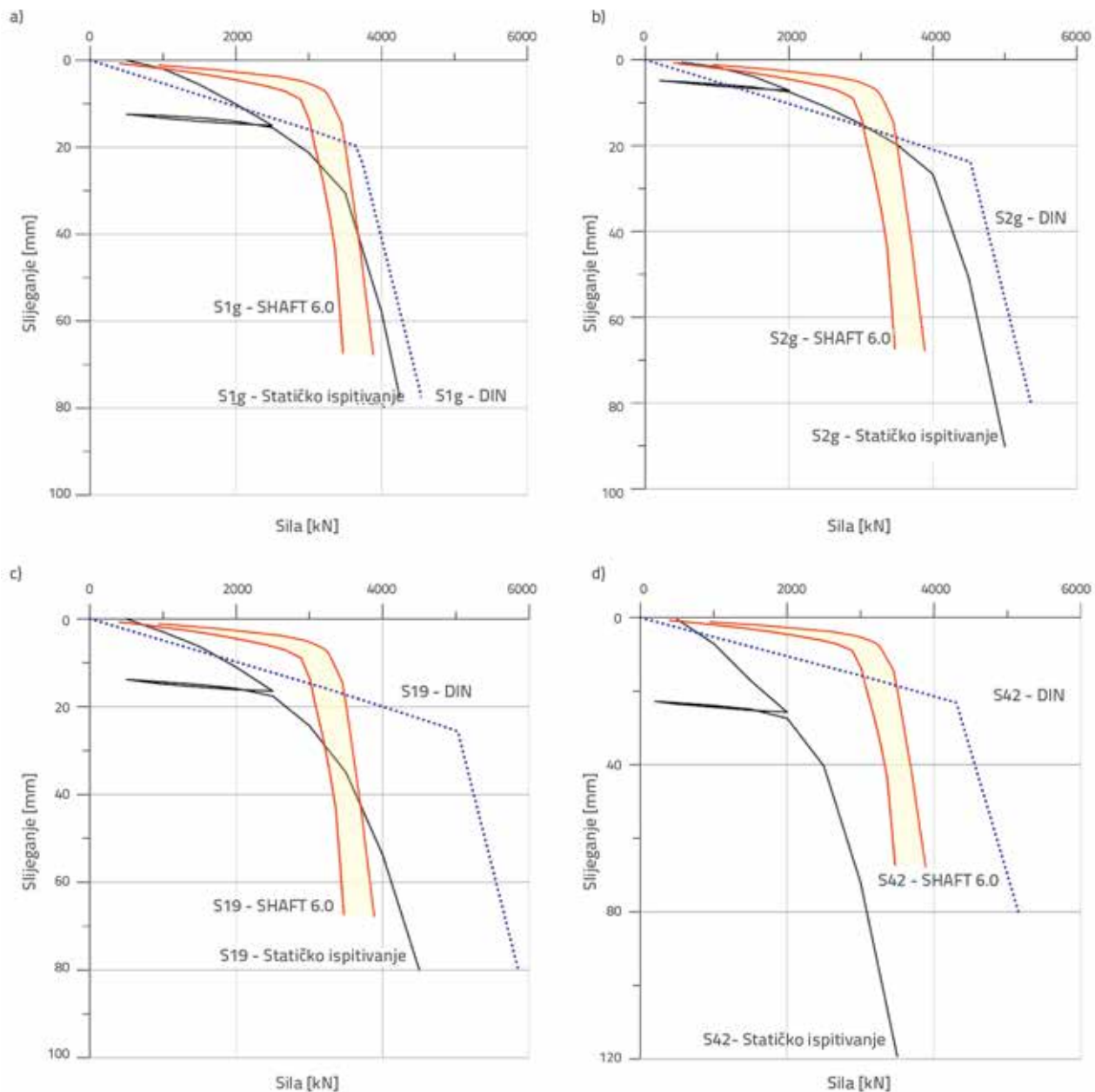
Slika 16. Rezultati ispitivanja na lokaciji mosta preko rijeke Drave: a) SPT; b) CPTU (prema [53])

usporedbe može se, osim vrijednosti nosivosti, odrediti i veličina slijeganja za pojedinu metodu procjene ili mjerenja, ali i analizirati ponašanje pilota za različite razine opterećenja. SHAFT je računalni program koji u sebi ima implementiranu bazu krivulja sila-pomak, koje su dobivene interpretacijom rezultata mjerenja statičkih pokusa na velikom broju pokusnih ili radnih pilota. Za zadani profil tla program generira raspon očekivanih krivulja usklađen s maksimalnom nosivošću, određenom revidiranom API metodom.

Iz slike 17. očito je da krivulje konstruirane prema DIN-u 1054 precjenjuju vrijednosti dobivene statičkim ispitivanjima. Kod pokusnih pilota ispod pilona S1g i S2g, takvo je "precjenjivanje" praktički nezatno, dok je kod pokusnih pilota ispod stupišta S19 i S42 jasno izraženo. Krivulje dobivene prema DIN 1054 međusobno se razlikuju, jer se svaka krivulja temelji na neovisnom CPTU ispitivanju (po jedno ispitivanje na mjestu svakog pokusnog pilota). Krivulje dobivene programom SHAFT posve su jednake na slikama 17.a do 17.d, jer

Tablica 3. Rezultati procjene nosivosti pokusnih pilota u [kN]

Položaj pilota	Nosivost [kN]	Rev. API	Pravilnik	CPTU Bustamante i Ganeselli	DIN 1054	STATIČKO	DINAMIČKO
Stupište S19	$Q_s$	3101	1072	2444	4122,8	-	3833,0
	$Q_b$	577	5444	4493	1730,8	-	940,6
	$Q_{ult}$	3678	6366	6937	5853,6	4500	4773,6
Pilon S1g	$Q_s$	3101	1072	1866	2940,2	-	3597,4
	$Q_b$	577	5444	3092	1646,8	-	826,8
	$Q_{ult}$	3678	6366	4958	4587,0	4250	4424,2
Pilon Ssg	$Q_s$	3101	1072	2082	3765,1	-	3800,1
	$Q_b$	577	5444	2927	1597,2	-	1300,0
	$Q_{ult}$	3678	6366	5009	5362,3	4900	5100,1
Stupište S42	$Q_s$	3101	1072	2268	3620,6	-	2831,1
	$Q_b$	577	5444	3285	1529,1	-	983,8
	$Q_{ult}$	3678	6366	5553	5149,7	3100	3814,9



Slika 17. Usporedba procijenjenih i mjerenih krivulja sila-pomak za pilote na lokaciji mosta preko Drave: a) S1g, b) S2g, c) S19, d) S42

moguća mikrolokacijska odstupanja uslojenosti i vrijednosti parametara tla između pojedinih pokusnih lokacija nisu uzeta u obzir zato što nisu smatrana značajnim za nosivost pilota. U području manjih slijeganja (do 3 mm) krivulje dobivene SHAFT-om precjenjuju vrijednosti dobivene statičkim ispitivanjem, nakon čega ih podcjenjuju.

Značajna razlika, kada krivulje prema SHAFT-u značajno precjenjuju vrijednosti statičkih ispitivanja u svim dijelovima, postoji kod pilota ispod stupišta S42. U tablici 3. također se vidi da je za pilot S42 ukupna nosivost kod statičkog i dinamičkog ispitivanja niža nego kod ostalih pokusnih pilota. Razlog za to treba tražiti u činjenici da su se prilikom izvedbe pilota ispod stupišta S42 pojavili

tehnički problemi koji su u konačnici rezultirali reduciranom nosivosti.

Ako se usporede konačne vrijednosti nosivosti prema metodama procjene s nosivostima iz rezultata mjerenja (tablica 3.), vidljivo je da sve procjene, osim nosivosti procijenjene  $\beta$ -postupkom, precjenjuju vrijednosti nosivosti iz statičkih ispitivanja.  $\beta$ -postupak te vrijednosti podcjenjuje, iako je na slici 17.a-c vidljivo da ih precjenjuje u području manjih slijeganja. Dinamička ispitivanja precjenjuju vrijednosti statičkih ispitivanja za približno 5 % na mjestima pilota S1g, S2g i S19, te za 23 % na mjestu pilota S42 (kod kojeg je bilo tehničkih problema prilikom izvedbe). Sve to pokazuje da dinamička ispitivanja djelomično mogu zamijeniti statička

ispitivanja, ali ne u potpunosti, jer se jedino statička ispitivanja mogu smatrati mjerodavnima za formiranje realne krivulje sila-pomak [13].

### Određivanje projektnih nosivosti

U tablici 3. prikazane su procjene graničnih nosivosti pilota i mjereni rezultati, no za upotrebu u projektima koriste se projektne ili "dopuštene" nosivosti u kojima se proračunane ili izmjerene vrijednosti reduciraju propisanim koeficijentima ili faktorima. Propisane vrijednosti, baš kao i koncept izražavanja nepouzdanosti, znatno su različiti u propisima pojedinih država.

Nekad je bio raširen koncept općeg (globalnog) faktora sigurnosti, kojim se određivala tzv. dopuštena nosivost pilota iz prethodno prikazanih graničnih nosivosti. Vrijednosti globalnog faktora najčešće su bile u rasponu od 2,5 do 3,5 (uz različite rasprave o prikladnoj vrijednosti), a dopuštena nosivost se uspoređivala s nefaktoriziranim proračunskim opterećenjima na pilote. U prijašnjem propisu [32], koji je vrijedio i u Hrvatskoj, umjesto globalnog faktora primjenjivani su parcijalni faktori sigurnosti za parametre materijala.

Suvremeni koncept preciznijeg lociranja i diverzifikacije nepouzdanosti izražen je kroz parcijalne koeficijente za djelovanja i otpornosti, te je obuhvaćen europskim konstruktorskim normama (eurokodovi), a kao koncept se širi i dalje (npr. preporuke američke agencije [9]).

Projektna nosivost izražena pomoću parcijalnih koeficijenata za otpornost nije direktno usporediva s prijašnjim "dopuštenim" opterećenjem pilota. Osim toga, u Europskoj uniji (barem zasad) je dopušteno svakoj državi da propiše projektni pristup i parcijalne koeficijente svojim nacionalnim dodatkom, pa se ni u tom ("ujednačenom") sustavu normi neće dobiti jedinstveni rezultati.

Za usporedbu se mogu dati projektne nosivosti uz parcijalne koeficijente iz Hrvatskog nacionalnog dodatka "geotehničkoj" EC 7 [58], za preporučeni projektni pristup 2 :

- za postupke kojima se direktno određuje karakteristična nosivost iz rezultata *in situ* pokusa na vrijednosti iz tablice 3. primjenjuje se parcijalni koeficijent za otpornost  $\gamma_t = 1,2$  i korelacijski koeficijenti  $\xi_3 = 1,6$  (za srednju vrijednost), odnosno  $\xi_4 = 1,5$  (za minimalnu vrijednost), što daje projektne nosivosti u rasponu od 2043 do 2728 kN,
- za postupak koji alternativno određuje karakteristične nosivosti iz parametara tla (Pravilnik - iako izrazi nisu preporučljivi za upotrebu zbog nepoznate kalibracijske baze) primjenjuje se parcijalni koeficijent za otpornost  $\gamma_t = 1,2$  i modelski faktor 1,5, što daje "projektnu" nosivost od 3537 kN

- za dinamička ispitivanja iz mjerenih rezultata (bez stupišta S42), te pojedinačni korelacijski koeficijent  $\xi_5 = 1,6$ , minimalna projektna nosivost je 2765 kN
- za statička ispitivanja iz mjerenih rezultata (bez stupišta S42), te pojedinačni korelacijski koeficijent  $\xi_1 = 1,4$ , minimalna projektna nosivost je 3036 kN.

Rezultati pokazuju da se primjenom različitih parcijalnih koeficijenata nešto smanjio rasap projektnih nosivosti (u odnosu na granične nosivosti iz tablice 3.).

## 5. Zaključak

Upotreba pilota poznata je čovječanstvu već tisućljećima, a u današnje doba imamo na raspolaganju širok spektar vrsta pilota, koji se razlikuju po materijalu građe i/ili po načinu ugradnje. Određivanje nosivosti i slijeganja pilota u mekim tlima predstavlja nejednoličan i izazovan zadatak za inženjera, gdje su postupci određivanja navedenih parametara pretežno "mješavina" teorije i empirije.

Jedino terenskim statičkim ispitivanjem može se izravno odrediti krivulja statička sila-pomak, iz koje se zatim nekim od niza postupaka interpretacije određuje nosivost pilota. Rezultati ostalih terenskih metoda se interpretiraju radi određivanja statičke nosivosti, ali zbog određenih ograničenja pokusa ne mogu dati "realnu" krivulju sila-pomak u obliku u kojem se ona može dobiti statičkim ispitivanjem.

Usporedba empirijskih postupaka i terenskih ispitivanja za određivanje nosivosti i slijeganja bušenih pilota u mekim tlima prikazana je i na primjeru četiriju pokusnih pilota na lokaciji mosta preko rijeke Drave, koji se nalazi na dionici budućeg međunarodnog paneuropskog cestovnog koridora Vc. Na ovom primjeru je potvrđena važnost provedbe terenskih ispitivanja, jer su metode računske procjene većinom precijenile vrijednosti nosivosti dobivene terenskim ispitivanjima.

Iako im je glavna zadaća osiguravati nosivost, tj. pouzdano temeljenje građevina, postoje još neki aspekti iskorištavanja bušenih pilota koji nisu spomenuti u radu. Ti aspekti, prema Poulosu [12], uključuju korištenje pilota kao potpornih konstrukcija, u ojačavanju temeljnog tla (mikropiloti), kao drenažnih elemenata ili pak u iskorištavanju geotermalne energije, gdje se geotermalne cijevi vežu za armaturu bušenog pilota i na taj način osigurava učinkovit prijenos energije [59]. Ekološki prihvatljivi aspekti projektiranja pilota (osim "energetskih" pilota) obuhvaćaju danas još i ponovnu upotrebu već izvedenih pilota, ali i projektiranje i izvedbu pilota za buduće ponovne upotrebe [8].

## LITERATURA

- [1] Cezar, G.J.: Zapisi o Galskom ratu, pogl.4, prijevod, Jesenski i Turk, Zagreb, 2010.
- [2] Vitruvije: Deset knjiga o arhitekturi, prijevod, Golden marketing i IGH, Zagreb, 1999.
- [3] Rheidt, K.: Pile Foundation in the Anatolian Mountains-Wrong technique at the Wrong place?, 3rd International Congress on Construction History, Cottbus, pp. 1219-1226, 2009.
- [4] Internet: <http://www.geoforum.com/info/pileinfo/>, preuzeto 07.05.2013.
- [5] Van Impe, W.F.: Screw piling: still a challenging discussion topic?, IV Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, ed. Van Impe, Millpress, Rotterdam, pp. 3-8, 2003.
- [6] O'Neill, M.W.: Side resistance in piles and drilled shafts, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(1), pp.3-16, 2001.
- [7] Mandolini, A., Russo, G., Viggiani, C.: Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design, 16th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, pp. 177-213, 2005.
- [8] Simpson, B., Morrison, P., Yasuda, S., Townsend, B., Gazetas, G.: State of the art report: Analysis and design, 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, pp. 2873-2929, 2009.
- [9] FHWA-NHI-10-016: Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods, U.S. Department of Transportation, 2010.
- [10] Tomlinson, M., Woodward, J.: Pile Design and Construction Practice, 5th ed., Taylor & Francis, 2008.
- [11] Poulos, H.G.: Pile behaviour – theory and application, Géotechnique, 39(3), pp.365-415, 1989.
- [12] Poulos, H.G.: Deep foundations – Can further research assist practice?, IV Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, ed. Van Impe, Millpress, Rotterdam, pp. 45-55, 2003.
- [13] HRN EN 1997-1:2012 - Eurokod 7: Geotehničko projektiranje -- 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004+AC:2009), HZN e-Glasilo 3/2012, 164 p., 2012.
- [14] Smoltczyk, U. (ed.): Geotechnical Engineering Handbook, Ernst & Sohn, 2003.
- [15] Reese, L.C.: Design and construction of drilled shafts, Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, 104(1), pp. 91-116, 1978.
- [16] Meyerhof, G.G.: Bearing capacity and settlement of pile foundations, Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, 102(3), pp. 195-228, 1976.
- [17] Fellenius, B.H.: Discussion of "Side Resistance in Piles and Drilled Shafts" by Michael W. O'Neill, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 128(5), pp.446-448, 2002.
- [18] El Hakhim, A.F., Mayne, P.W.: Discussion of "Side Resistance in Piles and Drilled Shafts" by Michael W. O'Neill, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 128(5), pp.448-449, 2002.
- [19] Moormann, C.: Contact behaviour at the interface between bored piles and subsoil, IV Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, ed. Van Impe, Millpress, Rotterdam, pp. 163-170, 2003.
- [20] Matković, I.: Određivanje nosivosti pilota pomoću statičkog penetracijskog ispitivanja, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 147 p., 2011.
- [21] Reese, L.C., Isenhower, W.M., Wang, S.T.: Analysis and design of shallow and deep foundations, John Wiley&Sons, 2006.
- [22] O'Neill, M.W., Reese, L.C.: Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods, Publication No. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 758 p., 1999.
- [23] Kulhawy, F.H.: Drilled Shaft Foundations, Chapter 14 in Foundation Engineering Handbook, 2nd Ed., H.-Y. Fang, Editor, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 537-552, 1991.
- [24] Burland, J.B.: Shaft friction of piles in clay, Ground engineering, 6(3), pp. 30-42, 1973.
- [25] SHAFT, Ver 6.0: A Program for the Study of Drilled Shafts Under Axial Loads, Ensoft Inc, 2007.
- [26] Rollins, K.M., Clayton, R.J., Mikesell, R.C., Blaise, B.C.: Drilled Shaft Side Friction in Soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(8), pp. 987-1003, 2005.
- [27] Harraz, A.M., Houston, W.N., Walsh, K.D., Perry, C.R., Houston, S.L.: Comparison of Measured and Predicted Skin Friction Values for Axially Loaded Shaft Foundations in Gravelly Soils, Advances in Deep Foundations, ASCE, 2005.
- [28] Tomlinson, M.J.: Some effects of pile driving on skin friction, Proceedings of the Conference on the Behaviour of Piles, Institution of Civile Engineers, London, 1971.
- [29] Cherubini, C., Vessia, G.: Reliability approach for the side resistance of piles by means of the total stress analysis (a Method), Canadian Geotechnical Journal, 44(11), pp. 1378-1390, 2007.
- [30] Chen, Y.J., Kulhawy, F.H.: Undrained strength interrelationships among CIUC, UU and UC tests. Journal of Geotechnical Engineering, 119, pp. 1732-1749, 1993.
- [31] Dennis, N.D., Olson, R.E.: Axial capacity of steel pipepiles in clay, Proceedings of Geotechnical Practice in Offshore Engineering, Austin, Texas. Edited by Stephen Wright. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 370-388., 1983.
- [32] Pravilnik o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata, Sl. l. SFRJ 015/1990, pp. 653-667, 1990.
- [33] DIN 1054; Sicherheit im Erd- und Grundbau, Englische Fassung der DIN 1054 (Schlussmanuskript Oktober 2005), NA 005 Normenausschuss Bauwesen (NABau)
- [34] Ivšić, T., Szavits-Nossan, A., Ocvirk, E.: Suvremeni praktični postupci proračuna pilota, Priopćenja 4. Savjetovanja HGD-a, Ojačanje tla i stijena, Opatija, pp. 381-390, 2006.
- [35] DeRuiter, J., Beringen, F.L.: Pile foundation for large North Sea Structures, Marine Geotechnology, 3(3), pp. 267-314, 1979.
- [36] Schertman, J.H.: Guidelines for cone test, performance and design, Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78209., 1978.
- [37] Tumay, M.Z., Fakhroo, M.: Pile capacity in soft clays using electric QCPT data, Proceedings of a Conference on Cone Penetration Testing and Experience, St. Louis, pp. 434-455, 1981.
- [38] Bustamante, M., Gianceselli, L.: Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer CPT, Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, pp. 493-500, 1982.
- [39] HRN EN 1997-2:2012 - Eurokod 7: Geotehničko projektiranje -- 2. dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnoga tla (EN 1997-2:2007+AC:2010), HZN e-Glasilo 3/2012, 191 p., 2012.

- [40] Eslami, A., Fellenius, B.H.: Pile capacity by direct CPT and CPTU methods applied to 102 cas histories, *Candaian Geotechnical Journal*, 34, pp. 886-904, 1997.
- [41] Powell, J.J.M., Lunne, T., Frank, R.: Semi Empirical Design Procedures for axial pile capacity in clays, *Proc. XV ICSMGE*, Istanbul, Balkema, pp. 991-994, 2001.
- [42] ASTM-D1143: Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, 15 p.
- [43] ISSMFE Subcommittee on Field and Laboratory Testing, Axial Pile Loading Test, Suggested Method, *ASTM Journal*, Vol. 8, No. 2, 1985, pp. 79-90.
- [44] Fellenius, B.H.: Basics of Foundation Design, Electronic Edition, 2009., preuzeto s [www.fellenius.net](http://www.fellenius.net) 25.04.2013.
- [45] NeSmith, W. M., Siegel, T. C.: Shortcomings of the Davisson offset limit applied to axial compressive load tests on cast-in-place piles, *Foundation Congress and Equipment Expo, Contemporary Topics in Deep Foundations*, Geotechnical Special Publication No. 185, ASCE, pp. 568-574, 2009.
- [46] Barbalić, I., Galjan, B., Bandić, M., Ivandić, K.: Ispitivanje probnih pilota na gradilištu putničke luke Dubrovnik, *Građevinar*, 57(8), pp. 693-703, 2007.
- [47] Shen, B., Niu, D.: A new method for determining the yield load of piles, *Proceedings of the 4th International Conference on Piling and Deep Foundations*, Deep Foundation Institute, Stresa, pp. 531-534, 1991.
- [48] Abdelrahman, G.E.: Prediction of Ultimate pile load test from Axial Load Tests and Penetration Tests, *The Egyptian Geotechnical Journal of Soil Mech. And Found. Eng.*, 10, 15 p., 2002.
- [49] Bustamante, M.: Auger and Bored pile construction monitoring and testing IV Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, ed. Van Impe, Millpress, Rotterdam, pp. 27-41, 2003.
- [50] Osterberg, J. O.: Recent Advances in Load Testing Driven Piles and Drilled Shafts Using the Osterberg Load Cell Method, *Geotechnical Division, Illinois Section, ASCE*, 79 pp., 1994.
- [51] ASTM D4945-12 Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations, 9 p.
- [52] Rausche, F., Goble, G.G. & Likings, G.: Dynamic Determination of Pile Capacity, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (03), pp. 367-383, 1985
- [53] Bolanča, K., Bačić, M., Kovačević, M.S.: Ispitivanja nosivosti pilota na mostu preko rijeke Drave, *Dani prometnica 2013 - Mjerenja, ispitivanja i monitoring na prometnicama / Lakušić, Stjepan (ur.)*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, pp. 195-225, 2013.
- [54] Brown, D.: Evaluation of Static Capacity of Deep Foundations from Statnamic Testing, *ASTM, Geotechnical Testing Journal*, 17(4), pp. 403-414, 1994.
- [55] ASTM D7383-10: Standard Test Methods for Axial Compressive Force Pulse (Rapid) Testing of Deep Foundations, 9 p.
- [56] Middendorp, P., Bermingham, P., Kuiper, B.: Statnamic Load Testing Of Foundation Pile, *Proceedings of 4th International Conference On Application Of Stress-Wave Theory To Piles*, The Hague, pp. 581-588, 1992.
- [57] Middendorp, P., Beck, C., Lambo, A.: Verification of Statnamic load testing with static load testing in a cohesive soil type in Germany, *Proceedings of the 8th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles*, IOS Press, Amsterdam, pp. 531-536, 2008.
- [58] HRN EN 1997-1:2012/NA:2012, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje — 1. dio: Opća pravila — Nacionalni dodatak, HZN eGlasilo 3/2012
- [59] Kovačević, M.S., Bačić, M., Arapov, I.: Mogućnosti podzemnog inženjerstva u iskorištavanju plitke geotermalne energije, *Građevinar*, 64(12), pp. 1019-1028, 2012.