



*Znanstveni rad/Scientific paper*  
*Primljen/Received: 11. 2. 2019.*  
*Prihvaćen/Accepted: 24. 4. 2019.*

## KALIBRACIJA NUMERIČKOG MODELIRANJA I NOVA DIREKTNNA METODA ZA PRORAČUN SLIJEGANJA PLITKIH TEMELJA U PIJESKU

**Ivana Lukić Kristić**, dipl.ing. građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, [ivana.lukic@gf.sum.ba](mailto:ivana.lukic@gf.sum.ba)

**Maja Prskalo**, prof. dr. sc.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, [maja.prskalo@gf.sum.ba](mailto:maja.prskalo@gf.sum.ba)

**Vlasta Szavits-Nossan**, prof. dr.sc.

Umirovljena s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

**Sažetak:** U radu se razmatraju nelinearne metode za proračun slijeganja plitkih temelja u pijesku. Jedna od njih se oslanja na konstitutivni odnos Hardening Soil Small uključen u računalni program Plaxis 2D. Ona ima značajan nedostatak u potrebi modeliranja nepoznate povijesti deformacije temeljnog tla prije simuliranja pokusnog opterećenja na plitkom temelju. To se može prevladati predopterećenjem tla tlakom koji daje dobro slaganje između izračunatih i izmjerenih slijeganja. Međutim, na takav način nije moguće napraviti predviđanja slijeganja tla jer povijest deformacije tla nije unaprijed poznata. U radu se pokazuje kako se Plaxisom 2D mogu napraviti predviđanja slijeganja tla kalibracijom proračuna prema jednostavnoj izravnoj metodi. U skladu s ovom jednostavnom metodom razvijena je nova izravna metoda na temelju rezultata 16 pokusnih opterećenja izvedenih na 4 lokacije. Važna prednost ove nove metode je to što na odgovarajući način uzima u obzir ponašanje tla pri vrlo malim deformacijama.

**Ključne riječi:** plitki temelji, slijeganja, krutost tla, početni modul smicanja, rezultati pokusnog opterećenja, nova metoda proračuna slijeganja, vrlo male deformacije.

**Abstract:** Nonlinear methods for calculation of shallow foundation settlements in sand are addressed in the paper. One of them relies on the Hardening Soil Small constitutive relationship incorporated in the computer program Plaxis 2D. It has a significant drawback in the need to model the unknown strain history of the foundation soil prior to simulating the load test on a shallow foundation. This can be overcome by preloading the soil with a pressure which gives good matching between calculated and measured settlements. However, predictions of soil settlements cannot be made in such a way, because the soil strain history is not a priori known. It is shown in the paper how predictions of soil settlements can be made by Plaxis 2D by calibrating calculations against a simple direct method. A new direct method is developed along the lines of this simple method, on the basis of results of 16 load tests performed at 4 locations. The important advantage of the new method is that it properly takes into account the soil behavior at very small strains.

**Keywords:** shallow foundations, settlements, soil stiffness, initial shear modulus, results of load tests, new method for settlement calculation, very small strains.



## 1. Uvod

Proračun slijeganja plitkih temelja obično se zasniva na teoriji elastičnosti i postoji mnogo metoda koje koriste korelacije parametara elastičnosti s rezultatima *in situ* penetracijskih pokusa (standardni penetracijski pokus – SPT, statički penetracijski pokus – CPT). Pretpostavlja se da se temeljno tlo ponaša linearno elastično. Međutim, brojni laboratorijski pokusi i terenska pokusna opterećenja pokazuju nelinearno elastoplastično ponašanje tla.

Benz (2007.) je predstavio novi konstitutivni odnos za tla, Hardening Soil Small (HSSmall), koji uzima u obzir smanjenje modula smicanja s maksimalne vrijednosti pri vrlo malim deformacijama, i koje se dalje smanjuje nelinearno s povećanjem posmične deformacije. Ovaj konstitutivni odnos je uključen u računalni program konačnih elemenata Plaxis 2D (Brinkgreve, 2011.). U numeričkoj analizi pokusni kvadratni temelj je modeliran kao ekvivalentni kružni temelj jednake tlocrtno površine. U sljedećem odjeljku će se pokazati da, iako HSSmall odnos daje vrlo dobro slaganje izračunate krivulje opterećenje - slijeganje temelja u pijesku i mjerenja, slaganje ovisi o pretpostavljenoj povijesti deformacije tla, koja se u numeričkoj analizi može rekonstruirati pokusnim predopterećenjem temeljnog tla. Tako, vrijednost predopterećenja nije poznata prije pokusnog opterećenja. Osim toga, HSSmall odnos zahtijeva više parametara tla određenih iz laboratorijskih pokusa na neporemećenim uzorcima tla, koje je vrlo teško dobiti iz krupnozrnih tala.

Međutim, u slučajevima velikih temelja, širine recimo 30 m, i slojevitog temeljnog tla, za proračun slijeganja plitkih temelja ne mogu se koristiti postojeće nelinearne metode, tako da je prikladna mogućnost numeričko modeliranje. U radu je pokazano kako se predviđanja slijeganja mogu prihvatljivo napraviti numeričkim modeliranjem na takav način da se povijest deformacije tla rekonstruira kalibracijom proračuna prema vrlo jednostavnoj izravnoj metodi za proračun slijeganja (Mayne i sur., 2012.). Jedini parametar potreban za metodu Mayne i sur. (2012.) je prosječni otpor temeljnog tla prodiranju šiljka statičkog penetracijskog pokusa (CPT-a).

Izravna metoda za proračun slijeganja plitkih temelja uključuje Mayne (2000.), Akbas i Kulhawy (2009a), i Mayne i sur. (2012.). Mayne (2000.) je uveo nelinearni odnos između slijeganja i prosječnog tlaka koji temelj vrši na tlo, temeljen na linearnom izrazu koji su predložili Mayne i Poulos (1999.), korištenjem modificirane hiperbole Faheya i Cartera (1993.) za odnos naprezanje - deformacija. Ovaj odnos opisuje laboratorijsku krivulju smanjenja modula smicanja s povećanjem posmične deformacije, i koristi dva parametra koja se moraju odrediti iz pokusa troosnog ili torzijskog smicanja. Mayne (2000.) ovaj odnos ekstrapolira na *in situ* uvjete korištenjem omjera primijenjenog tlaka temelja i nosivosti tla umjesto omjera laboratorijskog devijatorskog naprezanja i devijatorskog naprezanja pri lomu. Također određuje i specifične vrijednosti za ova dva parametra i provjerava svoju metodu na jednom temelju u pijesku i drugom u glini, s vrlo dobrim rezultatima. Ova metoda uzima u obzir ponašanje tla pri vrlo malim deformacijama, ali zahtijeva određivanje nosivosti tla, na primjer Vesićevom metodom (Vesić, 1975.).

Akbas i Kulhawy (2009a) su predložili empirijski hiperbolički odnos između omjera primijenjenog opterećenja i graničnog opterećenja, i omjera  $s/B$ , gdje je  $s$  slijeganje, a  $B$  veličina ekvivalentnog kvadratnog temelja, na temelju  $L_1$ - $L_2$  metode (Hirany i Kulhawy, 1989.), te analizom mjerenja opterećenje - slijeganje iz 167 pokusnih opterećenja na 37 lokacija. Iz ovih mjerenja Akbas i Kulhawy (2009a) definiraju opterećenja  $Q_{L1}$  i  $Q_{L2}$  koja odgovaraju kraju prvog linearnog dijela krivulje opterećenje - slijeganje, odnosno početku njezinog završnog linearnog dijela, podešavajući hiperbolu između ove dvije točke za svaki temelj.  $Q_{L2}$  odgovara graničnom opterećenju koje se može odrediti na temelju Vesićeve metode za izračunavanje nosivosti tla (Akbas i Kulhawy, 2009b). Autori (2009a) navode da se  $Q_{L2}$  postiže pri  $s/B = 0,539$ .



Mayne i sur. (2012.) definiraju granični tlak pri  $s/B = 0,1$ . U praksi se obično pretpostavlja da pri ovoj vrijednosti  $s/B$  dolazi do loma tla. Oni su predložili vrlo jednostavan empirijski odnos između primijenjenog tlaka temelja i  $(s/B)^{0,5}$  kao korelaciju s otporom prodiranju šiljka statičkog penetracijskog pokusa, analiziranjem mjerenja iz 31 pokusnog opterećenja na 13 lokacija. Koliko god bila jednostavna i korisna za praksu, metoda Mayne i sur. (2012.) ne može predvidjeti ponašanje tla pri vrlo malim deformacijama ustanovljeno laboratorijski i na terenu, koje je važno za seizmičke analize plitkih temelja. Vrlo male posmične deformacije su između  $10^{-5}$  i  $10^{-4}$  (npr. Lee i sur. 2004.). U ovom rasponu deformacija, krutost tla je beskonačna prema Mayneu i sur. (2012.) (a također i prema Akbasu i Kulhawyu, 2009a), umjesto da je jednaka krutosti tla pri vrlo malim deformacijama (npr. Burland, 1989.). Modul smicanja pri vrlo malim deformacijama se lako može odrediti iz *in situ* mjerenja brzine posmičnih valova.

Na taj način u radu je predstavljena nova izravna metoda za proračun slijeganja plitkih temelja. Ona se temelji na metodi Maynea i sur. (2012.), s elementima metode Maynea i Poulosa (1999.), i dodatkom za odgovarajuće predviđanje ponašanja tla pri vrlo malim deformacijama.

## 2. Kalibracija numeričkog modeliranja

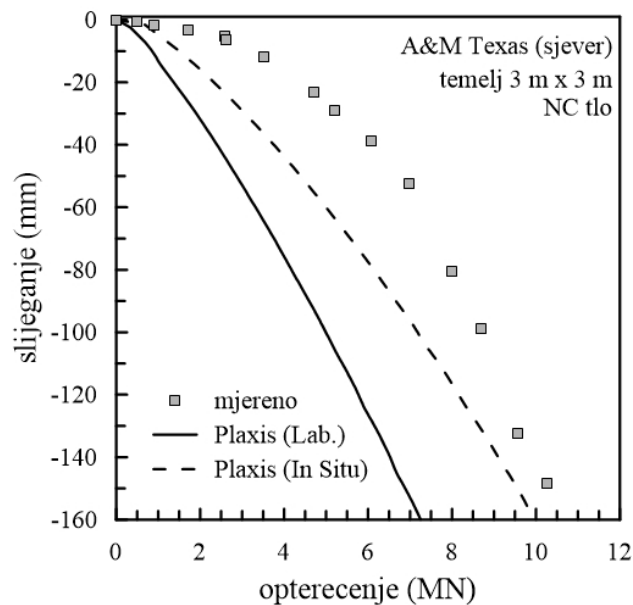
### 2.1. Pokusno mjesto na Sveučilištu A&M Texas

Pet pokusnih opterećenja izvedeno je na Sveučilištu A&M Texas na kvadratnim temeljima veličine u rasponu od 1 m do 3 m, ukopanim 0,76 m u 11 m debeo sloj srednje gustog, prilično ujednačenog prašnog sitnog kvarcnog pijeska u čijoj podlozi se nalazila kruta glina (Briaud i Gibbens, 1994.; 1997.). Na tom pijesku provedena su opsežna *in situ* i laboratorijska ispitivanja, i tijekom pokusnih opterećenja mjerena su slijeganja (Briaud i Gibbens, 1997.). Između ostalih mjesta, Benz (2007.) je simulirao i jedno od ovih pokusnih opterećenja. Iz rezultata troosnih pokusa i pokusa rezonantnim stupom odredio je brojne parametre tla potrebne za HSSmall odnos. Benz je objavio dva skupa parametara, koji se razlikuju samo po vrijednostima početne krutosti tla  $E_0^{\text{ref}}$ , i posmične deformacije  $\gamma_{0,7}$  pri kojoj se sekantni modul smicanja smanjuje na oko 70% svoje početne vrijednosti (Tablica 1). Poznati odnos između Youngovog modula i modula smicanja je  $E = 2G(1+\nu)$ , gdje je  $\nu$  Poissonov koeficijent. Youngov modul *in situ* pri vrlo malim deformacijama i bočnom tlaku od 100 kPa,  $E_0^{\text{ref}}$  je određen iz mjerenja brzine posmičnih valova,  $v_s$  iz  $G_0 = \rho v_s^2$ , gdje je  $\rho$  gustoća tla.

Tablica 1. Vrijednosti dvaju parametara za HSSmall model (iz Benz, 2007.)

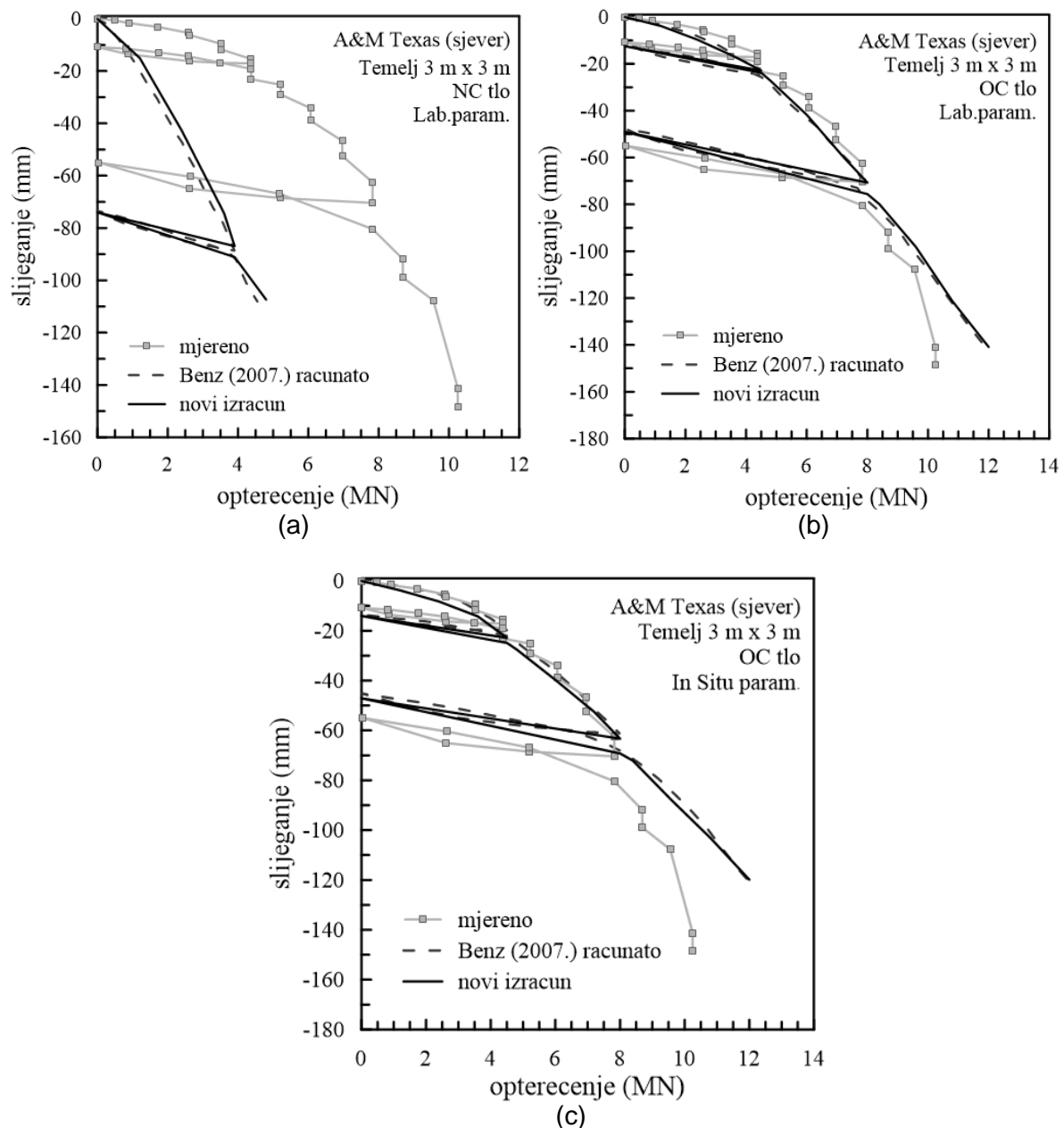
Parametar	Jedinica	Lab.	<i>In situ</i>
$E_0^{\text{ref}}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	260	390
$\gamma_{0,7}$	[-]	0,0002	0,0004

Razlika između korištenja krutosti tla  $E_0^{\text{ref}}$  iz laboratorijskih i iz *in situ* pokusa za numeričko modeliranje je ilustrirana na slici 1 za normalno konsolidirano tlo, što znači da povijest deformacije nije simulirana. Posebnu pozornost treba posvetiti velikim odstupanjima između izmjerenih i izračunatih slijeganja u rasponu malih deformacija za oba skupa parametara. Može se reći da *in situ* parametri funkcioniraju bolje. Osim toga, mnogo je lakše odrediti krutost tla pri vrlo malim deformacijama pokusima *in situ* nego laboratorijskim pokusima.



Slika 1. Izmjerena i izračunata slijeganja sjevernog temelja 3 m x 3 m s A&M Texas-a; izračunata slijeganja su s laboratorijskim i *in situ* parametrima iz tablice 1 za normalno konsolidirano tlo; izmjerena slijeganja su iz Briaud i Gibbens (1997.)

Benz (2007.) pokazuje 3 grafikona s izračunatim krivuljama opterećenje - slijeganje za odabrani temelj. Prvi dijagram je za normalno konsolidirano tlo i laboratorijske parametre. Drugi je za prekonsolidirano tlo s poviješću deformacije rekonstruiranom kroz predopterećenje temeljnog tla, i laboratorijske parametre. Treća krivulja je za prekonsolidirano tlo i *in situ* parametre. Benz (2007.) ne navodi vrijednosti tlakova potrebnih za predopterećenje u dva slučaja prekonsolidiranog tla. Zbog toga su autori ponovo izračunali krivulje opterećenje - slijeganje kako bi pokušavanjem odredili vrijednosti predopterećenja potrebne za usklađivanje s Benzovim krivuljama (Sl. 2). Model prekonsolidiranog tla je predopterećen i rasterećen, a zatim je simulirano pokusno opterećenje. S laboratorijskim parametrima (Sl. 2b), tlo je za novo-izračunatu krivulju moralo biti predopterećeno s 360 kPa. S *in situ* parametrima (Sl. 2c), tlo je moralo biti predopterećeno s 125 kPa. Za daljnje numeričke analize temelja s A&M Texas-a korišteni su *in situ* parametri.



Slika 2. Izmjerena i izračunata slijeganja sjevernog temelja 3 m x 3 m s A&M Texas-a; (a) normalno konsolidirano tlo (NC), laboratorijski parametri; (b) prekonsolidirano tlo (OC), laboratorijski parametri; (c) prekonsolidirano tlo (OC), *in situ* parametri; izmjerena slijeganja iz Briaud i Gibbens (1997.)

Pošto je vrijednost predopterećenja potrebnog za numeričku analizu nepoznata prije pokusnog opterećenja, smatralo se važnim pronaći način za kalibriranje krivulje opterećenje - slijeganje proizvedene pomoću Plaxisa 2D, tako da se mogu napraviti pouzdana predviđanja slijeganja temeljnog tla. Konstitutivni model koji treba koristiti je HSSmall, jer daje pravi oblik nelinearne krivulje opterećenje - slijeganje za mjerodavne projektne „deformacije” do  $s/B = 0,01$ . Briaud i Gibbens (1997.) koriste izmjereno opterećenje pri ovoj vrijednosti „deformacije” kao dopušteno opterećenje, a izmjereno opterećenje pri  $s/B = 0,1$  za nosivost tla.



## 2.2. Kalibracija simulirane krivulje opterećenje – slijeganje

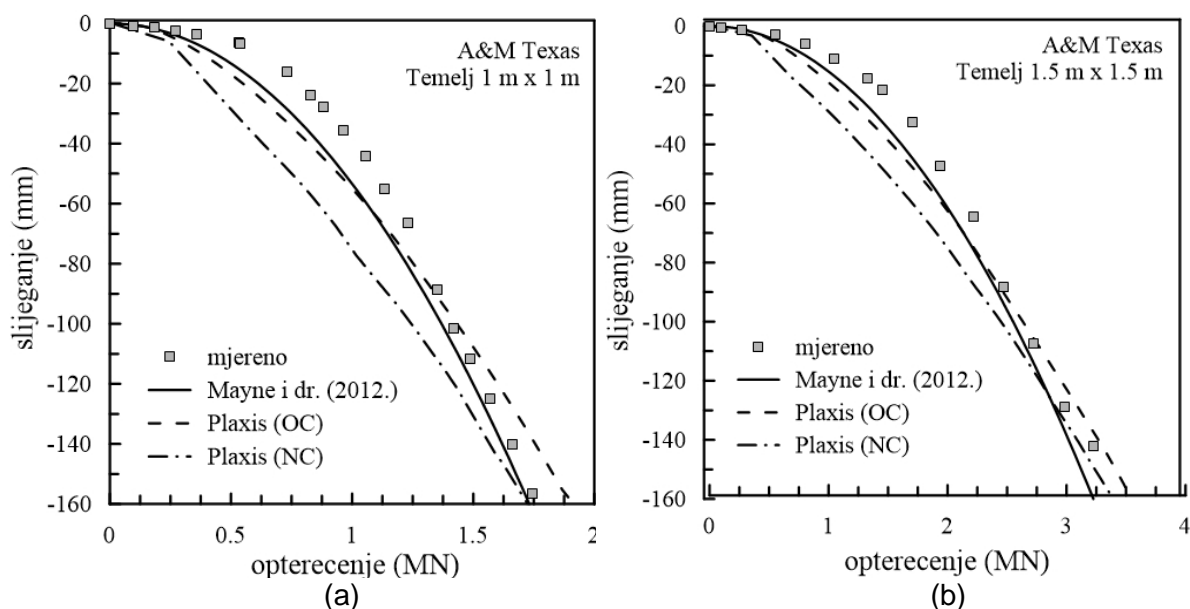
Kako bi se slijeganje plitkog temelja moglo pouzdano predvidjeti u pijescima koristeći Plaxis 2D s HSSmall modelom, simuliranu krivulju opterećenje - slijeganje potrebno je kalibrirati na takav način da se odredi odgovarajuće predopterećenje temeljnog tla. U tu svrhu može se koristiti metoda Mayne i sur. (2012.). Ova metoda se izražava korelacijom

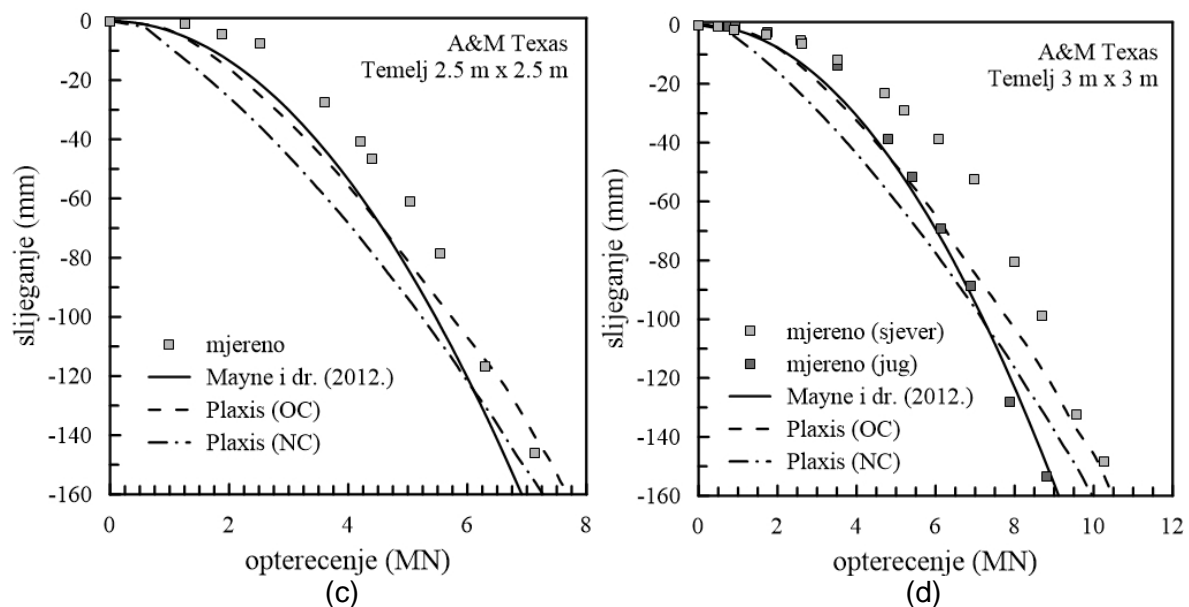
$$p = 0.585 q_c \sqrt{s/B} \quad (1)$$

gdje je  $p$  primijenjeni tlak temelja, a  $q_c$  je otpor prodiranju šiljka statičkog penetracijskog pokusa.

U ovoj metodi pretpostavljeno je da se vrijednost  $q_c$  određuje kao prosječni otpor tla ispod temelja pri prodiranju šiljka i niz razmak  $2B$ . U sljedećem odjeljku pokazat će se da metoda daje vrlo dobro slaganje s izmjerenim slijeganjima na 4 lokacije.

Proces kalibracije primjenjuje se izračunavanjem krivulje opterećenje - slijeganje iz jednadžbe (1) i korištenjem Plaxisa 2D s *in situ* parametrima za HSSmall model za pronalaženje potrebne vrijednosti predopterećenja kako bi se uskladili rezultati Plaxisa i krivulje Maynea i sur. (2012.), osobito pri malim deformacijama. Ovaj postupak je proveden za sjeverni temelj 3 m x 3 m s A&M Texas-a. Ustanovljeno je da jednadžbi (1) odgovara predopterećenje od 90 kPa, gdje je  $q_c = 7,5$  MPa (Mayne i sur., 2012.). Ista vrijednost predopterećenja je korištena za druge temelje na A&M Texas-u (Sl. 3). Na slici 3. prikazane su i krivulje Plaxisa za normalno konsolidirano temeljno tlo. Može se vidjeti da predopterećeno tlo daje mnogo bolja predviđanja slijeganja od normalno konsolidiranog tla.





Slika 3. Izmjerena i proračunata slijeganja za sve temelje na A&M Texas-u; izmjerena slijeganja iz Briaud i Gibbens (1997.); izračunata Plaxisom 2D za prekonsolidirano tlo uz kalibraciju s Mayne i sur. (2012.); izračunata Plaxisom 2D za normalno konsolidirano tlo

### 3. Nova izravna metoda za proračun slijeganja plitkih temelja u pijesku

#### 3.1. Nova metoda

U ovoj metodi „deformacija”  $s/B$  se razlaže na elastičnu i plastičnu komponentu

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (2)$$

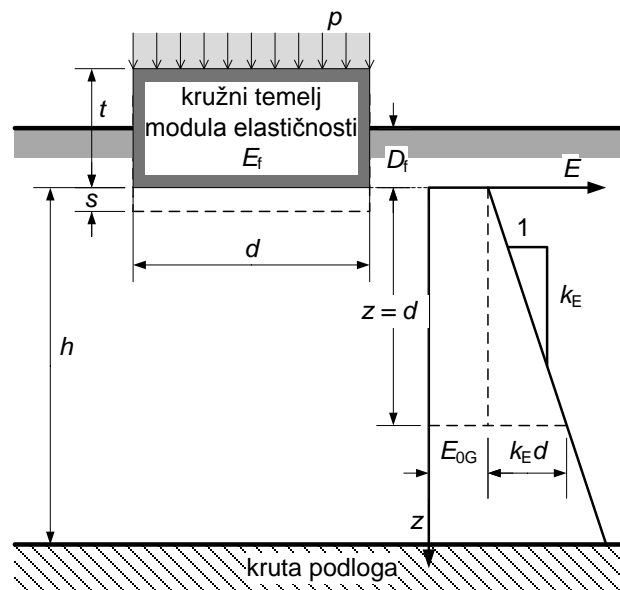
Elastična komponenta se, prema Mayneu i Poulosu (1999.), definira kao

$$\varepsilon^e = \left( \frac{s}{B} \right)^c = \frac{pI}{E_0} \quad (3)$$

$$I = \frac{I_h}{\sqrt{\pi}/2} \quad (4)$$

$$I_h = I_G I_F I_E (1 - \nu^2) \quad (5)$$

Mayne i Poulos (1999.) su razmatrali savitljivi kružni temelj promjera  $d$ , debljine  $t$  i modula elastičnosti  $E_t$ . Dubina ukopavanja u tlo je  $D_t$ , a debljina tla od osnove temelja do čvrste podloge  $h$ . Youngov modul temeljnog tla linearno raste s dubinom (Gibson, 1967.), tako da na osnovi temelja iznosi  $E_0$ , a na dubini  $zE = E_0 + k_E z$  (Sl. 4).



Slika 4. Označavanja vezana za metodu Maynea i Poulosa (1999.) za proračun slijeganja savitljivog kružnog temelja ukopanog u Gibsonov tip tla (Gibson, 1967.)

Neka je

$$\beta = \frac{E_0}{k_E d} \quad (6)$$

Tada se faktor nehomogenosti može pisati kao

$$I_G \approx \frac{1.6 \frac{h}{d}}{\left(1 + \frac{0.6}{\beta^{0.8}}\right) \left(1 + 1.6 \frac{h}{d}\right)} \quad (7)$$

Faktor krutosti elastičnog temelja Mayne i Poulos (1999.) daju kao

$$I_F = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{\frac{1}{1 - \pi/4} + 10 \frac{E_f}{E_0 + 0.5k_E d} \left(\frac{2t}{d}\right)^3} \quad (8)$$

Faktor ukopavanja temelja Mayne i Poulos (1999.) daju kao

$$I_E \approx 1 - \frac{1}{3.5 \exp(1.22\nu - 0.4) \left(\frac{d}{D_f} + 1.6\right)} \quad (9)$$

Plastična komponenta jednadžbe (2) je, prema Mayne i sur. (2012.), definirana kao





$$\varepsilon^p = a \left( \frac{p}{p_L} \right)^b \quad (10)$$

gdje je  $p_L$  tlak pri „deformaciji”  $s/B = 0,1$  (tj. nosivost), a  $a$  i  $b$  su parametri koje je potrebno odrediti.

Iz jednadžbi (2) i (10) može se pisati

$$\varepsilon^p = \varepsilon - \varepsilon^e = \frac{s}{B} - \frac{pI}{E_0} = a \left( \frac{p}{p_L} \right)^b \quad (11)$$

iz čega slijedi da za  $p = p_L$

$$a = 0.1 - \frac{p_L I}{E_0} \quad (12)$$

To daje izraz za novu metodu za proračun slijeganja plitkih temelja u pijesku kao

$$\frac{s}{B} = \frac{pI}{E_0} + \left[ 0.1 - \frac{p_L I}{E_0} \right] \left( \frac{p}{p_L} \right)^b \quad (13)$$

Parametri  $b$  i  $p_L$  se određuju metodom najmanjih kvadrata za izmjerena slijeganja tijekom svakog od 16 pokusnih opterećenja izvedenih na 4 lokacije. Nakon toga se parametar  $b$  određuje kao prosječna vrijednost za ovih 16 temelja, i postavlja se korelacija između  $p_L$  za sve temelje i otpora prodiranju šiljka statičkog penetracijskog pokusa na 4 lokacije.

### 3.2. Baza podataka 16 pokusnih opterećenja na četiri lokacije

Četiri lokacije odabrane za određivanje parametara  $b$  i  $p_L$  su navedene u tablici 2. Na ovim lokacijama ukupno je opterećenjem ispitano 16 temelja. Treba napomenuti da Mayne i sur. (2012.) definiraju nagib primijenjenog tlaka temelja prema  $(s/B)^{0.5}$  i navode njegovu vrijednost za svaku od 13 analiziranih lokacija. Četiri lokacije u tablici 2 pokrivaju cijeli raspon vrijednosti nagiba za 12 od tih 13 lokacija. U slučaju lokacije A&M Texas, vrijednost nagiba je najveća, a u slučaju lokacije Perth ona je najmanja od 12 lokacija, iako vrijednosti odgovarajućeg otpora šiljku statičkog penetracijskog pokusa nemaju isti trend. Svi temelji su od armiranog betona (AB). Za sve temelje izmjerena slijeganja tijekom pokusnih opterećenja su dostupna u navedenoj literaturi.



Tablica 2. Pokusna mjesta, stranica ekvivalentnog kvadratnog temelja i reference (iz Mayne i sur., 2012.)

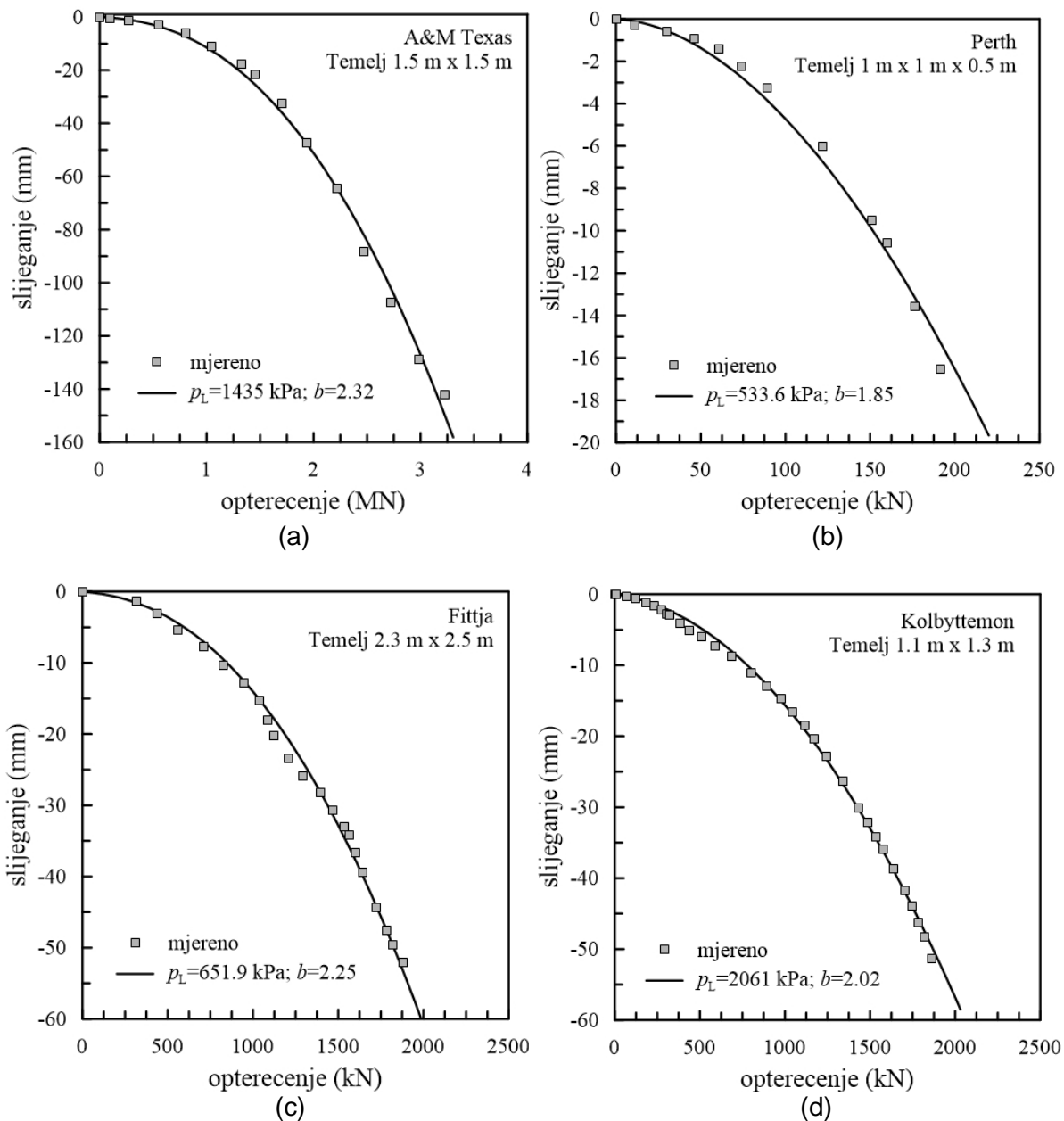
Naziv mjesta	Lokacija	Vrsta pijeska	Stranica temelja	Dubina ukopavanja, $D_f$ (m)	Referenca
A&M Texas	SAD	Pleistocenski pijesak	5 kvadratnih AB: $B = 1,0; 1,5; 2,5$ i $3,0$ m	0,76	Briaud i Gibbens (1997.)
Perth	Australija	Silicijski pijesak dina	4 kvadratna AB: $B = 0,67; 1,0$ i $1,5$ m	0,5 do 1,0	Lehane i sur. (2008.)
Fittja	Švedska	Glaciofluvijalni pijesak	3 pravokutna AB: $B = 0,6; 1,7$ i $2,4$ m	0,4 do 1,6	Bergdahl i sur. (1985.)
Kolbytteimon	Švedska	Glaciofluvijalni pijesak	4 pravokutna AB: $B = 0,6; 1,2;$ $1,7$ i $2,4$ m	0,4 do 1,6	Bergdahl i sur. (1985.)

### 3.3. Određivanje parametara za novu metodu

Za svaki od parametara  $b$  i  $p_L$  metodom najmanjih kvadrata dobiveno je 16 vrijednosti (Tablica 3). Na slici 5. prikazan je po jedan primjer izmjerenih podataka i podešene krivulje za svaku lokaciju.

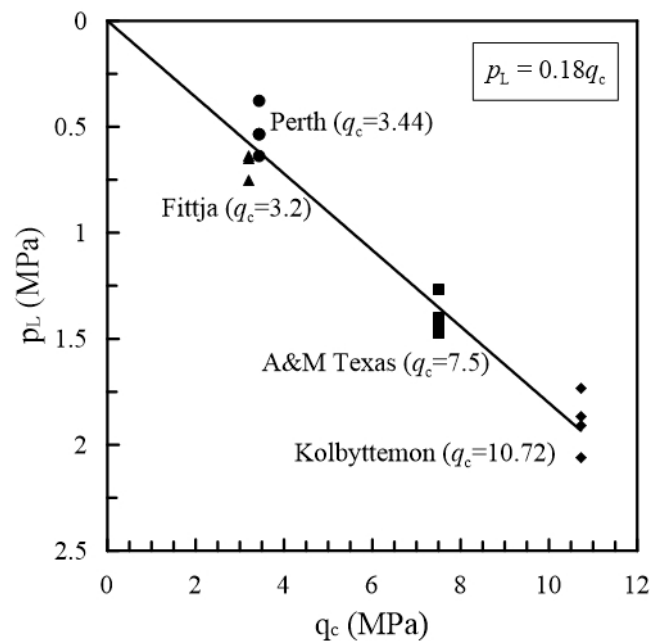
Tablica 3. Vrijednosti parametara  $p_L$  i  $b$  za svih 16 temelja

Dimenzije temelja	$p_L$ (kPa)	$b$
<b>A&amp;M Texas</b>		
1m x 1m	1463	2,56
1,5m x 1,5m	1435	2,32
2,5m x 2,5m	1402	2,62
3m x 3m (sjever)	1474	2,71
3m x 3m (jug)	1266	2,44
<b>Perth</b>		
0,67m x 0,67m x 1m	635,9	1,58
1m x 1m x 0,5m	533,6	1,85
1m x 1m x 1m	533,5	1,85
1,5m x 1,5m x 1m	380,7	2,42
<b>Fittja</b>		
0,55m x 0,65m	635,1	1,99
1,6m x 1,8m	750,7	1,66
2,3m x 2,5m	651,9	2,25
<b>Kolbytteimon</b>		
0,55m x 0,65m	1731	2,08
1,1m x 1,3m	2061	2,02
1,6m x 1,8m	1908	1,99
2,3m x 2,5m	1869	1,97
<b>Prosjek</b>		<b>2,14</b>



Slika 5. Izmjereni podaci i podešena krivulja za po jedan temelj sa svake lokacije:  $p_L$  i  $b$  iz tablice 3

Prosječna vrijednost je  $b=2,14$ . Ova vrijednost je vrlo blizu eksponentu koji su koristili Mayne i sur. (2012.),  $b=2$ . Slika 6. prikazuje 16 vrijednosti  $p_L$  i odgovarajućih  $q_c$  za četiri pojedine lokacije.



Slika 6.  $p_L$  i  $q_c$  za svih 16 temelja (vrijednosti  $q_c$  preuzete iz Mayne i sur., 2012.)

Najbolje podešana linija na slici 6 daje

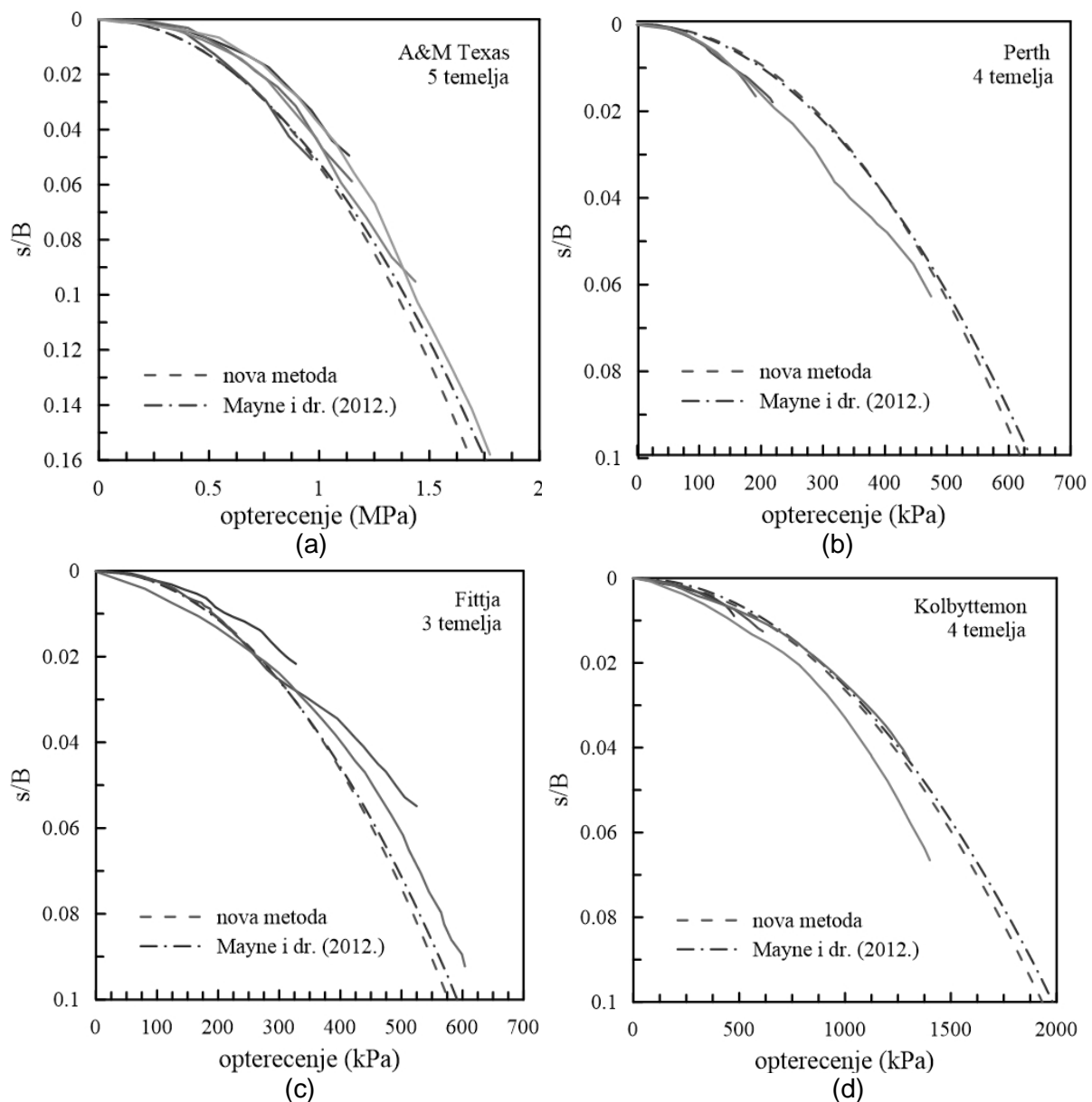
$$p_L = 0.18q_c \quad (14)$$

Ova korelacija je ista kao u Mayne i sur. (2012.).

Prema tome, može se očekivati da nova metoda daje rezultate vrlo slične onima dobivenim jednadžbom (1) koju su predložili Mayne i sur. (2012.). To je pokazano na slici 7. za četiri lokacije. Slaganje izmjerenih normaliziranih vrijednosti slijeganja,  $s/B$ , i onih izračunatih pomoću ovih dviju metoda je vrlo dobro. Izračunate krivulje neznatno precjenjuju izmjerena slijeganja za A&M Texas, i neznatno ih podcjenjuju za Perth. Razlog tomu je što te dvije lokacije imaju najveću, odnosno najmanju vrijednost nagiba primijenjenog tlaka temelja prema  $(s/B)^{0.5}$ , kako je gore navedeno.

Konačni oblik jednadžbe za novu metodu je dan s

$$\frac{s}{B} = \frac{pI}{E_0} + \left[ 0.1 - \frac{0.18q_c I}{E_0} \right] \left( \frac{p}{0.18q_c} \right)^{2.14} \quad (15)$$



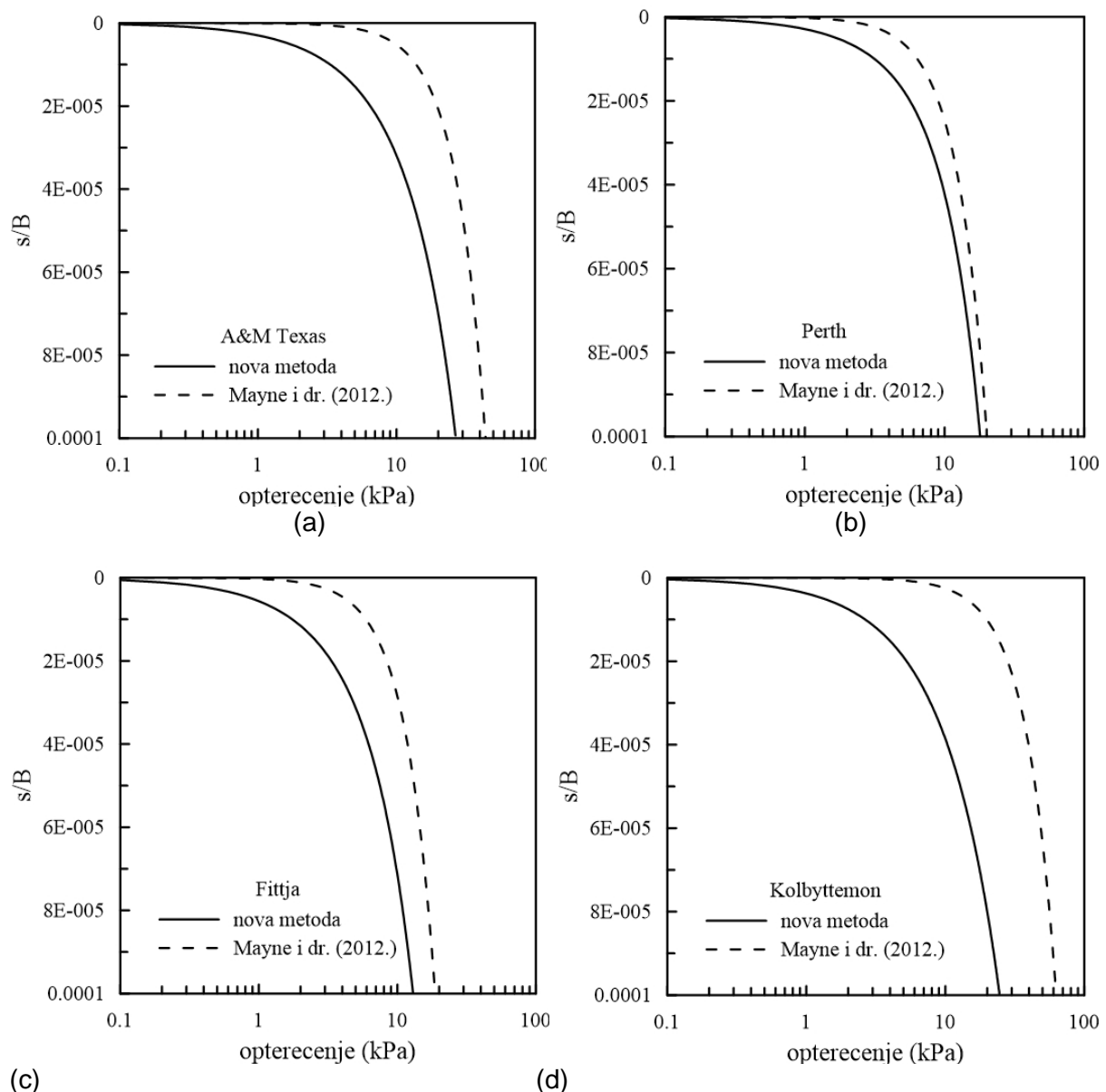
Slika 7. Normalizirano slijeganje prema primijenjenom tlaku temelja za četiri lokacije

Na slici 7. prikazana je još jedna značajka koja se odnosi na izmjerene podatke. Fellenius i Altaee (1994.) su pokazali da, kad se podaci izmjereni tijekom pokusnih opterećenja na pijesku iscrtaju kao  $s/B$  prema primijenjenom tlaku temelja, dobivene krivulje za kvadratne temelje različitih veličina ( $B = 0,25, 0,50, 0,75$  i  $1,0$  m) se gotovo podudaraju. To su pokazali i Briaud i Gibbens (1997.) za 5 temelja na A&M Texas-u, što je prikazano na slici 7a. Ovdje se pokazuje da isto vrijedi i za ostala tri analizirana pokusna mjesta, kao što se može vidjeti na slikama od 7b. do 7d. To znači da se nosivost pijeska može odrediti iz jednostavne korelacije dane jednadžbom (14) i da ona ne ovisi o širini temelja. To je u suprotnosti s osnovnim Terzaghijevim izrazom za nosivost pijeska za trakasti temelj na površini tla,  $p_L = 0.5\gamma BN_\gamma$ , gdje je  $\gamma$  jedinična težina tla, a  $N_\gamma$  faktor nosivosti koji ovisi o kutu trenja  $\varphi'$ . Briaud i Gibbens to objašnjavaju time da ili nosivost tla ne ovisi o širini temelja, ili faktor nosivosti  $N_\gamma$ , osim o  $\varphi'$ , ovisi i o širini temelja.



### 3.4. Vrlo male deformacije

Važna razlika između nove metode i metode Maynea i sur. (2012.) je u rasponu vrlo malih deformacija. To je ilustrirano na slici 8., gdje je primijenjeni tlak temelja prikazan na logaritamskoj skali. Slika 8. prikazuje izrazito i pravilno odstupanje krivulje izračunate novom metodom od apscise, s nagibom koji odgovara  $E_0$ . Tangenta na krivulju koju su izračunali (Mayne i sur., 2012.) je sama apscisa, što ukazuje na beskonačnu krutost tla pri vrlo malim deformacijama. Ponašanje tla pri vrlo malim deformacijama u novoj metodi je dodatak metodi Maynea i sur. (2012.) koji omogućava seizmičke analize plitkih temelja.



Slika 8. Normalizirano slijeganje prema primijenjenom tlaku temelja pri vrlo malim deformacijama za četiri lokacije

### 4. Zaključci

Prema Benzu (2007.), konstitutivni odnos Hardening Soil Small, uključen u Plaxis 2D, daje dobro slaganje sa slijeganjima izmjenjenim u pijesku tijekom pokusnog opterećenja



kvadratnog temelja veličine 3 m izvedenog na Sveučilištu A&M Texas (Briaud i Gibbens, 1997.). Međutim, ovo dobro slaganje se postiže nakon što se temeljno tlo u numeričkoj analizi prije pokusnog opterećenja predopteretiti i rastereti kako bi se prekonsolidiralo. Uvođenje unaprijed nepoznatog predopterećenja kako bi se izračunata slijeganja uskladila s izmjerenima je značajna prepreka u korištenju numeričkog modeliranja za predviđanje slijeganja plitkih temelja u pijesku u praksi. S druge strane, empirijski odnosi (Akbas i Kulhawy, 2009.; Mayne i sur., 2012.) ne mogu se koristiti za predviđanje slijeganja plitkih temelja u slojevitim tlima, uključujući pijeske. Isto vrijedi i za velike plitke temelje na relativno tankim slojevima pijeska. U ovim slučajevima predviđanja slijeganja temeljena na numeričkom modeliranju su korisna, ali samo ako su pravilno kalibrirana.

U radu se pokazuje da se numeričko modeliranje slijeganja plitkih temelja može uspješno izvesti Plaxisom 2D i konstitutivnim odnosom HSSmall ako se simulirana krivulja opterećenje - slijeganje kalibrira s obzirom na vrijednost predopterećenja prema krivulji izračunatoj metodom Mayne i sur. (2012.). Vrlo dobri rezultati se dobiju kad se ovaj postupak koristi za 5 kvadratnih temelja veličine u rasponu od 1 m do 3 m, ispitanih na A&M Texas-u (Briaud i Gibbens, 1997.).

Metoda Mayne i sur. (2012.) je vrlo jednostavna i koristi samo jedan parametar, otpor prodiranju šiljka statičkog penetracijskog pokusa  $q_c$ . Međutim, njome se ne mogu predvidjeti slijeganja tla pri vrlo malim deformacijama, što je važno za seizmičke analize plitkih temelja, jer u ovom rasponu deformacija krutost tla koju daju Mayne i sur. (2012.) je beskonačna. U radu je predstavljena nova izravna metoda za proračun slijeganja plitkih temelja u pijesku koja uklanja ovaj problem. Razvijena je u skladu s metodom Maynea i sur. (2012.), na temelju pristupa Maynea i Poulosa (1999.), s dodatkom za elastične (vrlo male) deformacije. Ova metoda daje ispravnu krutost tla pri vrlo malim deformacijama, koja odgovara početnom Youngovom modulu  $E_0$ , lako dostupnom iz mjerenja brzine posmičnih valova *in situ*.

Nova metoda je razvijena iz baze podataka 16 pokusnih opterećenja na 4 lokacije, koja pokrivaju mjerodavni raspon od 12 od 13 lokacija koje su analizirali Mayne i sur. (2012.). Na taj način, jedan od dva nepoznata parametra iz nove metode je dobiven u istom obliku korelacije kao u Mayne i sur. (2012.), a drugi ima vrijednost vrlo sličnu onoj koju su dobili ovi autori. Iz tog razloga ove dvije metode daju vrlo slične rezultate za 4 analizirane lokacije, osim pri vrlo malim deformacijama, gdje se rezultati znatno razlikuju.

Također se ponovno naglašava iz Maynea i sur. (2012.) da se nosivost pijeska može dobiti iz jednostavne korelacije s otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa, jer su Fellenius i Altaee (1994.) i Briaud i Gibbens (1997.) pokazali da se izmjereni podaci iz pokusnih opterećenja na kvadratnim temeljima različitih veličina na pijescima gotovo podudaraju kad se nanesu na grafikon  $s/B$  prema primijenjenom tlaku temelja. Pokusna lokacija u Briaud i Gibbens (1997.) je jedna od četiri analizirane ovdje, a pokazuje se da isto vrijedi i za ostale tri lokacije. To ukazuje na to da, kao što su prethodno naveli Briaud i Gibbens (1997.), nosivost pijeska ne ovisi o širini temelja.

## 5. Literatura

1. Akbas, S. O., Kulhawy, F. H., (2009a), Axial Compression of Footings in Cohesionless Soils I: Load - Settlement Behavior, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135 (11), pp. 1562-1574.
2. Akbas, S. O., Kulhawy, F. H., (2009b), Axial Compression of Footings in Cohesionless Soils II: Bearing Capacity, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135 (11) pp. 1575-1582.
3. Benz, T., 2007. Small strain stiffness of soil and its numerical consequences, PhD Thesis, University of Stuttgart, Germany.



4. Bergdahl, U., Hult, G., Ottosson, E., 1985. Calculation of settlement of footings in sand, International Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco 4, pp. 2167-2170.
5. Briaud, J. L., Gibbens, R. M., 1994. Editors, Predicted and measured behavior of five spread footings on sand, ASCE Geotechnical special publication, No. 41.
6. Briaud, J. L., Gibbens, R. M., 1997. Large scale load tests and data base of spread footings on sand, US Federal Highway Administration, Washington, D.C. Report RD-97-068.
7. Brinkgreve, R. B. J., 2011. Plaxis 2D 2011, Delft University of Technology & Plaxis bv, The Netherlands.
8. Burland, J.B., 1989. 9th Laurits-Bjerrum-Memorial-Lecture - Small Is Beautiful - The Stiffness Of Soils At Small Strains, Canadian Geotechnical Journal, (26), pp. 499-516.
9. Fahey, M., Carter, J. P., 1993. A finite element study of the pressuremeter test in sand using a nonlinear elastic plastic model, Canadian Geotechnical Journal, 30, pp. 348-362.
10. Fellenius, B. H., Altaee, A., 1994. Stress and settlement of footings in sand, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vertical and Horizontal Deformations for Foundations and Embankments, Vol. 2 (GSP 40), ASCE, Reston, VA, pp. 1760-1773.
11. Gibson, R. E., (1967), Some results concerning displacements and stresses in a non - homogeneous elastic half - space, Géotechnique, 17 (1), pp. 58-67.
12. Hirany, A., Kulhawy, F. H., 1989. Interpretation of load tests on drilled shafts, Part 1: Axial compression, In Foundation Engineering: Current Principles and Practices (GSP 22), pp. 1160–1172.
13. Lee, J., Salgado, R., Carraro, J. A. H., 2004. Stiffness degradation and shear strength of silty Sands, Canadian Geotechnical Journal, 41. pp. 831–843.
14. Lehane, B. M., Doherty, J. P., Schneider, J. A., 2008. Settlement prediction for footings on sand, Fourth International Symposium on deformation characteristics of Geomaterials, Amsterdam, Netherlands, 1, pp. 133-150.
15. Mayne, P. W., Poulos, H. G., 1999. Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 453-460.
16. Mayne, P. W., 2000. Enhanced Geotechnical Site Characterization by Seismic Piezocone Penetration Tests, Invited Lecture, Fourth International Geotechnical Conference, Cairo University, pp. 95-120.
17. Mayne, P. W., Uzielli, M., Illingworth, F., 2012. Shallow footing response on sands using a direct method based on cone penetration tests. Full Scale Testing and Foundation Design ASCE, Reston, Virginia, pp. 664-679.
18. Vesić A. S., (1975), Bearing Capacity of Shallow Foundations, Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Co., New York.