

Laboratorijsko ispitivanje horizontalno opterećenih pilota u pijesku

Maretić, Martina Tina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:319664>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Martina Tina Maretić

Laboratorijsko ispitivanje horizontalno opterećenih pilota u pijesku

Završni rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Sveučilišni prijediplomski

Eksperimentalna mehanika tla

Martina Tina Maretić

0114033803

Laboratorijsko ispitivanje horizontalno opterećenih pilota u pijesku

Završni rad

Rijeka, 25. rujna 2023.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Martina Tina Maretić

U Rijeci, 25. rujna 2023.

ZAHVALA

Zahvaljujem svom mentoru doc.dr.sc. Vedranu Jagodniku na strpljenju i pomoći pri izradi završnog rada.

SAŽETAK

Piloti su vrsta dubinskog temeljenja koji se koriste za prenošenje sila u dublje slojeve tla. Zbog rastućeg interesa, sve više se istražuju poprečna opterećenja na pilot te kako se pilot ponaša pri takvom opterećenju. Cilj ovog rada je laboratorijsko istraživanje ovisnosti nosivosti horizontalno opterećenog pilota o fleksibilnosti pilota i zbijenosti pijeska te uspješnosti metode korelacije digitalne slike u promatranju istih. Ispitivanjima biti će podvrgnuto pet pilota istog promjera i različitih duljina u zbijenom i rahlom Dravskom pijesku. Biti će im izračunata teorijska granična nosivost uz pretpostavljene parametre tla. U laboratoriju će piloti biti opterećivani do teorijske granične nosivosti uz konstantni prirast sile, a cijeli će pokus biti zabilježen kamerom. Video zapisi će kasnije biti analizirani u računalnom programu GOM +Correlate. Također, provedena je provjera modula posmika tla bender elementima radi preciznijeg uvida u karakteristike tla.

Ključne riječi: Piloti, horizontalno opterećenje, statičko opterećenje, beskontaktno mjerenje, bender elementi

ABSTRACT

Piles are a type of deep foundation and are used to transfer force into deeper layers of soil. Because of growing demand, there has been more research about lateral loads on piles and about laterally loaded piles behaviour. The objective of this study is experimental research of dependence of laterally loaded pile capacity on pile flexibility and sand density and also the usefulness of digital image correlation in this type of research. Five piles of same diameter and different length will be examined in dense and loose Drava river sand. Their theoretical limit bearing capacity will be calculated with assumed soil parameters. In the laboratory, the piles will be loaded up to the theoretical limit load with a constant increase in force and the entire experiment will be recorded on camera. The video recordings will later be analysed in the computer program GOM Correlate. Also, the shear modulus of the soil is tested with bender elements for a more precise insight into the soil characteristics.

Key words: piles, lateral load, static load, non-contact measuring system, bender elements

Sadržaj

Popis slika	iv
Popis tablica	v
1 UVOD	1
2 HORIZONTALNO OPTEREĆENI PILOTI	3
2.1 Winklerov model tla	7
2.2 P-y krivulja	9
3 KORELACIJA DIGITALNE SLIKE	12
4 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	15
4.1 Model tla i pilota	15
4.2 Karakteristike drvenog pilota	18
4.3 Karakteristike dravskog pijeska	18
4.3.1 Ispitivanje modula posmika tla bender elementima	20
5 REZULTATI ISPITIVANJA	23
6 DISKUSIJA	29
7 ZAKLJUČAK	31
Literatura	32

Popis slika

1.1	Temeljenje vjetroelektrana na moru [1]	1
2.1	Oblici sloma horizontalno opterećenog pilota slobodne glave a) kruti b) fleksibilni, modificirano prema [2]	4
2.2	Razlika u količini maksimalnog momenta i horizontalnog pomaka u ovisnosti o kutu unutarnjeg trenja tla, modificirano prema [3]	6
2.3	Razlika u količini maksimalnog momenta i horizontalnog pomaka u ovisnosti o zapreminskoj težini tla, modificirano prema [3]	6
2.4	Winklerov model tla, modificirano prema	8
2.5	Shema zavisnosti između opterećenja grede, reakcije tla, deformacija i statičkih visina [4]	8
2.6	Teorija p-y krivulje [5]	9
2.8	Wrinklerove opruge i p-y krivulje, modificirano prema [6]	10
2.7	Teorijska p-y krivulja za pijesak [5]	10
3.1	Sučelje GOM Correlata pri analizi pomaka pilota	12
3.2	Stohastički uzorak, modificirano prema [7]	13
3.3	Pomak fasete, modificirano prema [8]	14
4.1	Shema pokusa	16
4.2	Radno okruženje: (a) sanduk, (b) posuda za opterećenje, (c) reflektor i (d) stalak	16
4.3	Grafovi opterećivanja	17
4.4	Granulometrijska krivulja, modificirano prema [9]	19
4.5	Bender uređaj [10]	20
4.6	Rezultati pokusa bender elementom za rahli uzorak	21
4.7	Rezultati pokusa bender elementom za zbijeni uzorak	22
5.1	Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.075$ m	23
5.2	Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.15$ m	24

5.3	Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.30$ m	24
5.4	Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.40$ m	25
5.5	Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.50$ m	25
5.6	Pomak glave pilota pri opterećivanju, $l=0.075$ mm	26
5.7	Pomak glave pilota pri opterećivanju, $l=0.5$ m	27
5.8	Pomak po dubini pri opterećivanju, $l=0.5$ m	28

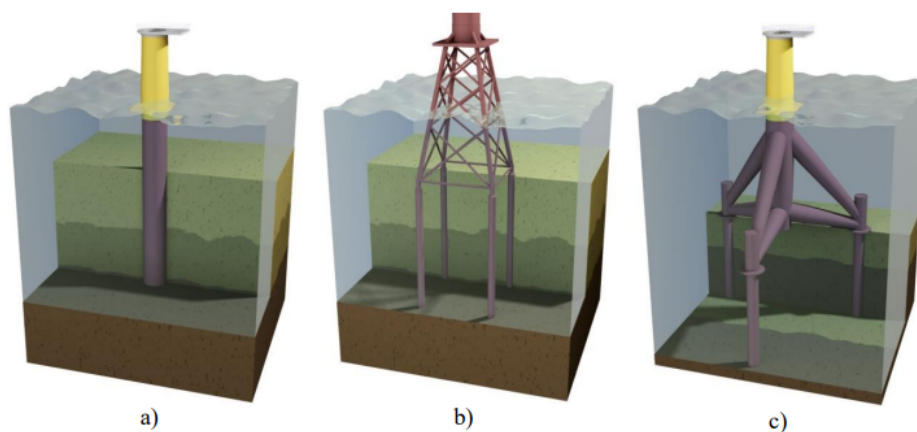
Popis tablica

2.1	Granična nosivost promatranih pilota prema izrazima (2.7) i (2.8)	5
4.1	Dimenzije pilota i njegova krutost	15
4.2	Karakteristike drvenog pilota od bukve	18
4.3	Karakteristike dravskog pijeska	19
4.4	Analitičke karakteristike dravskog pijeska dobivene benderom	21
5.1	Maksimalni pomak glave pilota ovisno o zbijenosti materijala	26
6.1	Granična nosivost promatranih pilota u rahlom tlu - korigirani rezultati .	30
6.2	Granična nosivost promatranih pilota u rahlom tlu - korigirani rezultati .	30

1. UVOD

Prijenos opterećenja od konstrukcije na tlo jedna je od ključnih zadaća geotehničkog inženjerstva. Razlikuju se plitki i duboki temelji, a dubina temeljenja ovisi o nekolicini faktora. Kada tlo u dostupnoj dubini nema dovoljnu moć nošenja ili je njegova stišljivost velika pa bi slijeganje bilo neprihvatljivo veliko, oslanjamo građevinu na dublje slojeve veće moći nošenja ili manje stišljivosti [4]. Pilot, kao primjer dubinskog temeljenja čija je dubina značajno veća od širine, treba biti projektiran tako da bude siguran od sloma te da su pomaci pilota unutar dopuštenih. Opterećenje koje treba uzeti u obzir nisu samo vertikalne sile već i horizontalne. Horizontalne sile dolaze u obliku valova u luci, potresa, visokih vjetrova kod zgrada i prijenosnih tornjeva i slično te mogu biti statičke i dinamičke.

Rastuća potražnja energije i povećanje važnosti obnovljive energije vjetra prošlih godina su dovele do planiranja vjetroelektrana u Sjevernom i Baltičkom moru [1]. Farme vjetroelektrana u dubokom moru zamjena su na mjestima gdje izvedba priobalnih vjetroelektrana nije moguća. Pokazale su se skuplje za izvedbu, ali je rast ovih tehnologija potaknut u europskim zemljama koje izlaze na Sjeverno more zbog velike kvalitete vjetra i relativno plitkog mora [11]. Vjetroelektrane na moru su često temeljene na kružnim, šupljim monopilotima od čelika zabijenih u morsko dno te preuzimaju horizontalne sile od valova i vjetra. Na mjestima gdje je morsko dno dublje od 25 m koriste se "jacket" ili "tripod" temelji kao što je prikazano na slici 1.1.



Slika 1.1: Temeljenje vjetroelektrana na moru [1]

Ovaj rad se temelji na laboratorijskom istraživanju utjecaja horizontalne sile na ponašanje pojedinog pilota slobodne glave u suhom Dravskom pijesku. Sažeta je teorija o horizontalno opterećenim pilotima, Wrinklerovom modelu tla i p-y krivuljama. Kamerom će se bilježiti različiti pokusi horizontalnog opterećivanja pilota do granične nosivosti. Promatrat će se pomaci glave pilota kao i pomaci po njegovoj dužini. Snimke pokusa analizirat će se pomoću računalnog programa GOM Correlate njemačke tvrtke Zeiss koji pruža precizne vrijednosti pomaka i deformacija. Iz deriviranih podataka izradit će se grafovi deformacija po dubini te deformacija ovisno o opterećenju. Grafovi će dati uvid u razlike u ponašanju krutog i fleksibilnog šipa u rahlom i zbijenom tlu. Fokus rada je, između ostalog, i na uspješnosti korelacije digitalne slike kao metodi promatranja horizontalno opterećenih pilota i njihovih pomaka.

2. HORIZONTALNO OPTEREĆENI PILOTI

Postoje različite pretpostavke o ponašanju pilota koji su poprečno opterećeni, a ovise o brojnim faktorima kao što je fleksibilnost pilota, vrsta i parametri tla u kojemu se pilot nalazi te njegova dreniranost, ukrućenost vrha pilota i slično.

S obzirom na ukrućenost glave, razlikujemo pilote slobodne i pilote fiksirane glave [4]. Kod pilota slobodne glave, rotacija je na vrhu omogućena dok kod fiksirane glave, vrh ostaje paralelan s vertikalom. U krupnozrnastom tlu pilot sa slobodnim vrhom odupire se horizontalnom pomaku otporom koji je proporcionalan pasivnom tlaku prema Rankinu koji glasi:

$$K_p = \tan^2(45 + \varphi) \quad (2.1)$$

gdje je: K_p koeficijent pasivnog tlaka tla, a φ kut unutarnjeg trenja tla.

Slikom 2.1 grafički je prikazana razlika između krutog i fleksibilnog pilota, uzimajući u obzir silu "H" koja djeluje u glavi pilota, hvatište sile "H" na udaljenosti od razine tla, "e", te dubinu pilota "L". Ukupna sila se može izraziti pomoću jednadžbe:

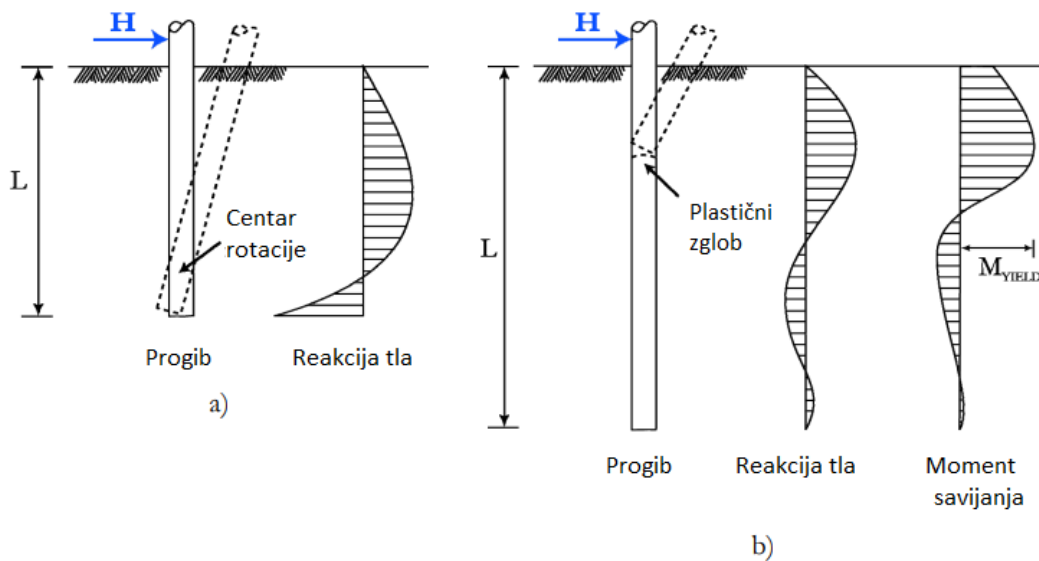
$$H = \frac{L^3}{2(e+L)} \quad (2.2)$$

Na ponašanje pilota utječe i njegova fleksibilnost. Kod krutog pilota prekid nosivosti dolazi zbog sloma okolnog tla, a sam pilot ne doživljava savijanje. Kruti pilot slobodne glave rotira se oko fiksne točke "A" duž svoje osi u smjeru sile kao što je prikazano na slici 2.1. Na istoj slici vidimo dijagram momenta savijanja i njegov maksimum. Dubina maksimalnog momenta se može izračunati pomoću izraza

$$f = \sqrt{\frac{2}{3}H} \quad (2.3)$$

gdje je f dubina maksimalnog momenta, a H veličina horizontalne sile.

Ako kruti pilot ima ukliještenu glavu onda se pomiče paralelno sa svojim prvobitnim položajem, a najveći moment savijanja očekuje se upravo na vrhu uz naglavnu gredu. Tu dubinu možemo poistovjetiti s potrebnom duljinom pilota L. Kada se dostigne najveći moment savijanja s obzirom na presjek počinje se stvarati prvi plastični zglobovi na



Slika 2.1: Oblici sloma horizontalno opterećenog pilota slobodne glave a) kruti b) fleksibilni, modificirano prema[2]

vrhu pilota. Povećavanjem duljine pilota povećavamo nosivost dok se ne stvori drugi plastični zglob na dnu pilota. S druge strane, kod fleksibilnog pilota nosivost se gubi u trenutku kada deformacija pilota prelazi graničnu vrijednost. Pilot se savija u gornjem dijelu u smjeru djelovanja sile te na tom mjestu dolazi do sloma. Fleksibilan element je definiran kao element koji ima bar dvije točke bez progiba duž svog elastičnog oblika kada je član opterećen maksimalnom horizontalnom silom [3]

Postoje više načina za odrediti fleksibilnost pilota. Pilot je fleksibilan ako je odnos duljine i promjera pilota veći od 10 [12]. Meyerhof i Liu [13] iznose uvjet za fleksibilni pilot slobodne glave prema izrazu

$$\frac{L_{eff}}{L} = 1.8K_{rs}^{0.12} \leq 1 \quad (2.4)$$

gdje je L_{eff} kritična duljina pilota, L stvarna duljina pilota te K_{rs} relativna krutost pilota.

Kritična duljina pilota označava duljinu pilota nakon koje pomaci i momenti savijanja postaju beznačajni. Relativna krutost pilota dobiva se iz jednadžbe:

$$K_{rs} = \frac{EI}{E_s \cdot L^2} \quad (2.5)$$

gdje je E Youngov modul elastičnosti pilota, I moment inercije poprečnog presjeka pilota, a E_s krutost tla.

Nadalje, Mayerhof i Yalcin [14] predlažu izraz za graničnu horizontalnu nosivost Q_{Ls} za kruti, slobodni pilot koji je u potpunosti ukopan u pijesak:

$$Q_{Ls} = 0.12 \cdot \gamma \cdot d \cdot L^2 \cdot k_b \quad (2.6)$$

gdje je γ zapreminska težina tla, d promjer pilota, L ukopana duljina pilota te k_b koeficijent pasivnog naprezanje. Patra i Pise [15] u svom radu odlučuju modificirati Mayerhofovu formulu te su pretpostavili sljedeće:

- 1) Pasivni tlak na licu pilota može se izračunati prema Kerisel i Absiju [16] uzimajući odgovarajući faktor oblika.
- 2) Aktivni tlak tla na krajevima pilota je zanemariv.
- 3) Pasivni tlak tla pri slomu pilota uzet je kao i za zid množeći ga s konstantnim faktorom oblika "3" [2].

Uzimajući u obzir te pretpostavke, predlaže se sljedeća formula za graničnu nosivost krutog, slobodnog, potpuno ukopanog pilota u pijesku:

$$Q_{Ls} = 3 \cdot 0.12 \cdot \gamma \cdot d \cdot L^2 \cdot k_b \quad (2.7)$$

te izraz za graničnu nosivost fleksibilnog:

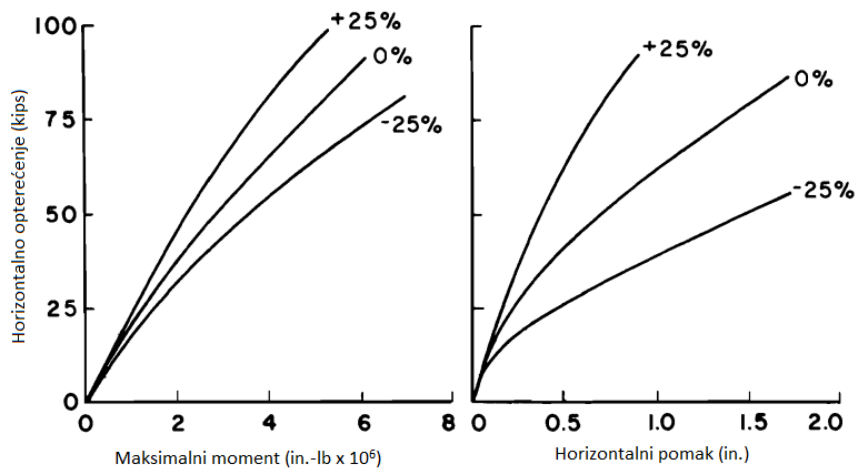
$$Q_{Ls} = 3 \cdot 0.12 \cdot \gamma \cdot d \cdot L_{eff}^2 \cdot k_b \quad (2.8)$$

Pomoću navedenih jednadžbi izračunate granične nosivosti za pilote u rahlom i zbijenom tlu te su prikazane Tablicom 2.1.

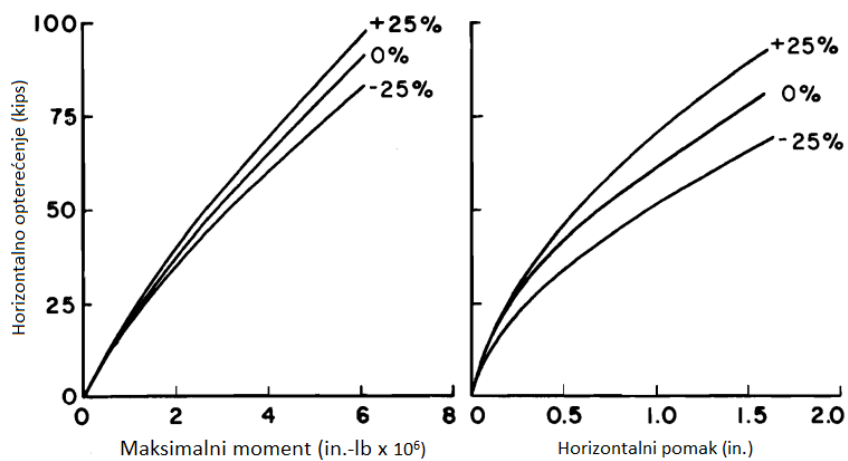
Tablica 2.1: Granična nosivost promatranih pilota prema izrazima (2.7) i (2.8)

L	L_{eff} [m]	Q_{rahlo} [N]	$Q_{zbijeno}$ [N]
0.075	0.075	1.96	2.42
0.15	0.135	6.36	7.83
0.3	0.194	13.13	16.12
0.4	0.225	17.6	21.7
0.5	0.5	22.38	27.57

Parametri tla također određuju način ponašanja poprečno opterećenih pilota. U pijesku povećanjem unutarnjeg trenja smanjuju se podosta horizontalni pomaci. U manjoj mjeri, veća zapreminska težina također doprinosi smanjenju pomaka u pijesku, dok u glini ne čini preveliku razliku. Grafički prikazi ovisnosti unutarnjeg trenja i zapreminske težine prikazani su na slikama 2.2 i 2.3



Slika 2.2: Razlika u količini maksimalnog momenta i horizontalnog pomaka u ovisnosti o kutu unutarnjeg trenja tla, modificirano prema [3]



Slika 2.3: Razlika u količini maksimalnog momenta i horizontalnog pomaka u ovisnosti o zapreminskoj težini tla, modificirano prema [3]

2.1 Winklerov model tla

Za bolje razumijevanje ponašanja horizontalno opterećenih pilota često se koristi Winklerov prostor. U Winklerovom prostoru tlo se zamjenjuje sistemom pera kod kojih su deformacije proporcionalne silama što na njih djeluju [4]. Pilot je poistovjećen s gredom. Svako pero, češće nazivano opruga, ima svoju krutost koja se poistovjećuje s modulom reakcije tla, k . Modul reakcije tla opisuje potrebnu količinu naprezanja koja izaziva jedinični pomak tla te izražava se u kN/m^3 . Na ploču se dodaje teret do određenog pomaka ili opterećenje. Prema Vesiću [17] modul reakcije tla dobiva se jednadžbom:

$$k = \frac{0.65}{B} \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{EI}} \frac{E_s}{1 - \nu^2} \quad (2.9)$$

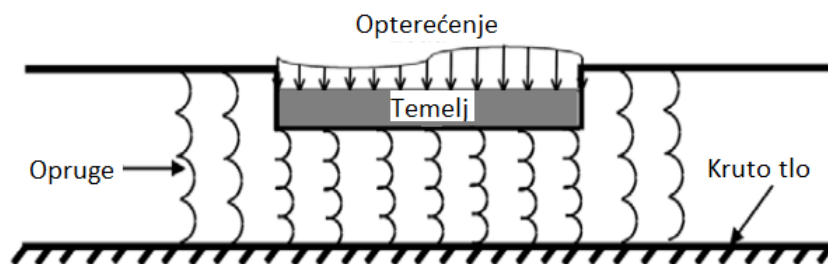
gdje je B širina pilota, E_s Youngov modul elastičnosti tla, E Youngov modul elastičnosti nosača, I moment inercije nosača te ν Poissonov koeficijent tla.

Diferencijalna jednadžba koja opisuje elastični nosač na elastičnoj podlozi, a time i poprečno opterećeni pilot glasi:

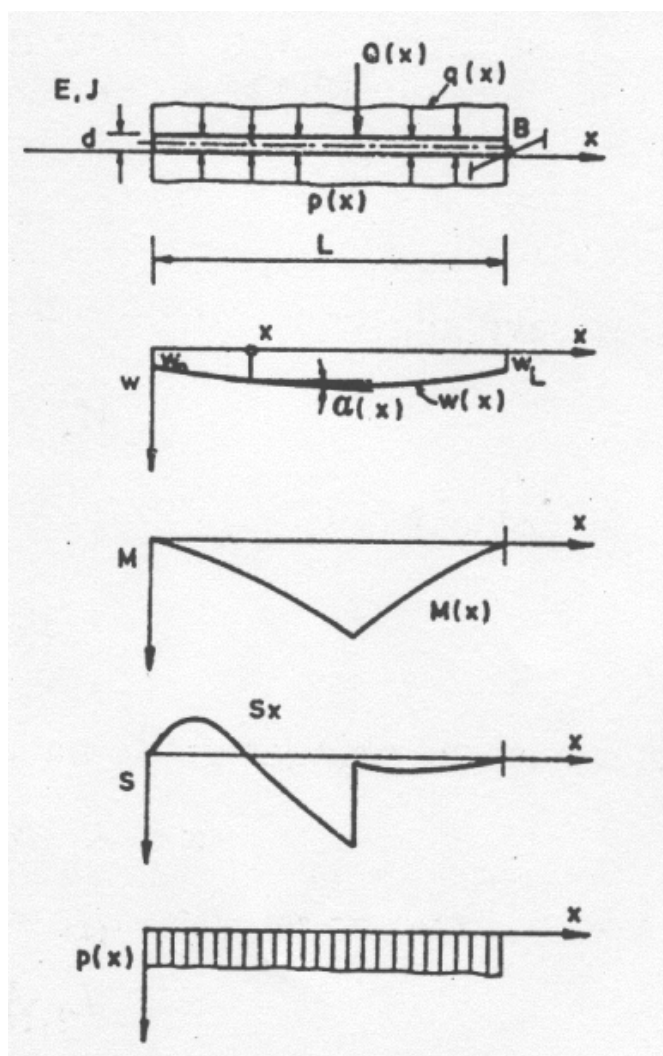
$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -[p(x) - q(x)]B \quad (2.10)$$

gdje je p intenzitet opterećenja, a q opterećenje na konstrukciju. Modul reakcije tla varira s dubinom.

Naizgled jednostavan model sa sobom donosi i nekolicinu mana kao što je poteškoća određivanja krutosti opruga. Modul reakcije tla, poistovjećen s krutošću opruge, može se ispitati probnim opterećivanjem tla pločom od 30x30 ili 100x100 cm. Za opterećenje plohe drugih dimenzija treba module reducirati jer jedinično opterećenje jednakog intenziteta izaziva veće slijeganje djeluje li na većoj površini [4]. Povećava li se opterećena površina, povećat će se slijeganje te će se smanjiti krutost opruge. Zbog toga je bitno imati unaprijed određen tip i veličinu temelja kako bi se izabrao prikladniji test. Testove je lakše provoditi na manjim površinama. Također, prema Winklerovoj teoriji, samo će opruge koje se nalaze ispod grede biti deformirane, a opruge u neposrednoj blizini elastičnog nosača će ostati netaknute. U stvarnosti se deformira tlo ispod i u neposrednoj blizini grede te se zbog toga ovo često navodi kao mana Winklerovog modela tla [4].



Slika 2.4: Winklerov model tla, modificirano prema [18]



Slika 2.5: Shema zavisnosti između opterećenja grede, reakcije tla, deformacija i statičkih visina [4]

Na slici 2.5 vidi se da su progib, kut zaokreta, moment, poprečne sile i pritisak međusobno povezani.

U nastavku teksta definirani su izrazi za kut zaokreta (2.11), moment (2.12), poprečnu silu (2.13) i naprezanje (2.14) grede na tlu.

$$\theta = \frac{dw}{dx} \quad (2.11)$$

$$M = EI \frac{d^2w}{dx^2} \quad (2.12)$$

$$Q = EI \frac{d^3w}{dx^3} \quad (2.13)$$

$$p = EI \frac{d^4w}{dx^4} \quad (2.14)$$

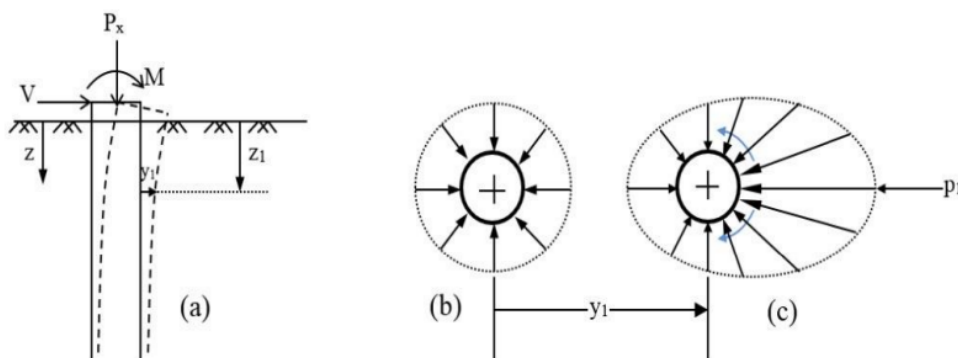
2.2 P-y krivulja

Pri analiziranju horizontalno opterećenih pilota, često se koristi p-y krivulja koja opisuje otpornost tla duž pilota u nelinearnoj ovisnosti o progibu pilota. Krivulja ovisi o dubini, vrsti tla i osobinama pilota. Na slici 2.6 prikazana je skica kružnog pilota i poprečni presjek. Slikom 2.6(b) prikazan je poprečni presjek kada na pilot ne djeluje horizontalna sila te su naprezanja normalna i jednolika sa svih strana pilota. Na slici 2.6(c) horizontalno opterećeni pilot je napravio progib y_1 te na presjeku dolazi do smanjenja naprezanja s lijeve strane te povećavanja naprezanja s desne. Opterećenje i pomak međusobno su povezani modulom reakcije tla, k:

$$p(z) = k \cdot y(z) \quad (2.15)$$

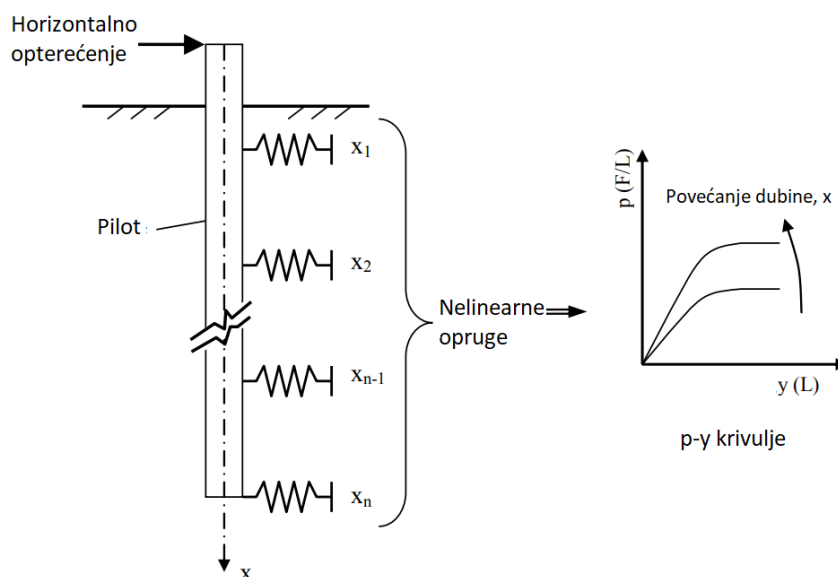
Time prijašnja diferencijalna jednačba koja opisuje elastični nosač dobiva oblik:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -[k \cdot y(x) - q(x)] \cdot B \quad (2.16)$$



Slika 2.6: Teorija p-y krivulje [5]

Za svaku se Winklerovu oprugu može nacrtati zasebna krivulja kao što je prikazano na slici 2.8. Pri porastu dubine raste i modul reakcije tla što iziskuje veće naprezanje u opruzi u dubljim slojevima tla za izazivanje jediničnog pomaka.

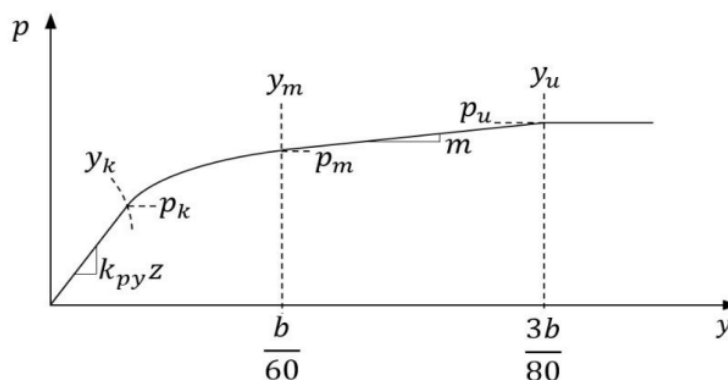


Slika 2.8: Winklerove opruge i p-y krivulje, modificirano prema [6]

Postoji više vrsta p-y krivulja, a ovise o vrsti tla u kojem se pilot nalazi. Razlikujemo p-y krivulju u mekoj glini iznad razine vode, tvrdoj glini iznad i ispod razine vode, pijesak, mekoj stijeni i čvrstoj stijeni [19].

Na Slici 2.7 prikazana je teorijska krivulja za pijesak prema Reesu [3]. Do točke (y_k, p_k) vrijedi linearna zavisnost pomaka i naprezanja može se odrediti modul reakcije tla iz nagiba P_u označava opterećenje koje pilot može preuzeti bez gubitka nosivosti, to jest opterećenje koje izaziva pomak δ

$$\delta = \frac{3b}{80} \tag{2.17}$$



Slika 2.7: Teorijska p-y krivulja za pijesak [5]

gdje je b širina pilota.

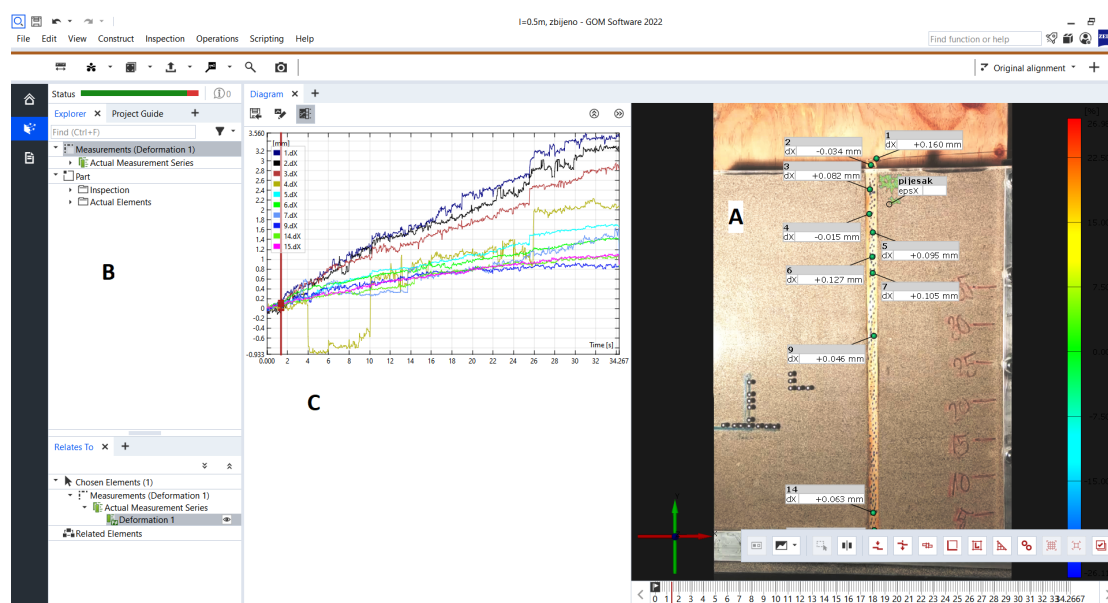
U nastavku će se koristiti ovaj izraz u usporedbi rezultata.

3. KORELACIJA DIGITALNE SLIKE

Korelacija digitalne slike (eng. Digital Image Correlation, skraćeno DIC) je inovativna, beskontaktna, optička metoda bazirana na analiziranju serije digitalnih fotografija snimljenih u različitim dijelovima opterećivanja [20]. Ovisno o broju kamera koje snimaju proces, prate se 2D ili 3D koordinate diskretnih točaka kroz vrijeme. Jedna kamera dovoljna je za 2D praćenje točka i jednostavnih ravnih elemenata dok su dvije ili više kamera potrebne za 3D evaluaciju. Digitalne slike diskretiziraju se manjim poljima piksela koja se nazivaju podskupovi (eng. subsets) ili fasete (eng. facets) [21]. Fasete, pravilne grupe piksela, najčešće uzimaju kvadratni oblik te se u središtu svake nalazi mjerna točka. Veličina fasete određuje se u računalnom programu GOM Correlate.

GOM Correlate je besplatni software njemačke, industrijske tvrtke globalne proizvodnje Carl Zeiss koji se bazira na DIC tehnici za evaluaciju pomaka, naprezanja, brzine i akceleracija predmeta. Program ima široko područje primjene u autoindustriji, avioindustriji, građevini, ispitivanju materijala, biomehanici i slično. Programu može analizirati testove sudara, mjeriti rastezanje i sakupljanje predmeta, pratiti oštećenja, zamor materijala i slično na temelju videa.

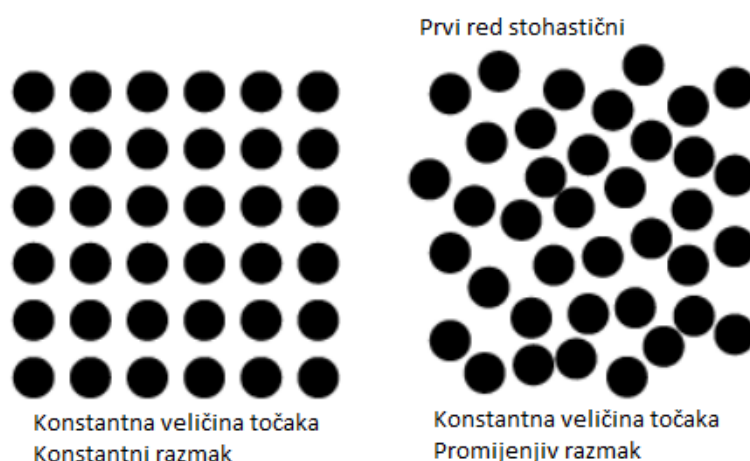
Na slici 3.1 prikazano je sučelje GOM Correlata. U glavnom prozoru, na slici ozna-



Slika 3.1: Sučelje GOM Correlata pri analizi pomaka pilota

čenim slovom A, nalazi se slika iz videa na kojoj su označene točke na pilotu i površina pijeska zelenom bojom. Svakoj točki dodijeljeno je ime te je za svaku sliku provedeno mjerenje horizontalnog pomaka. Na dnu prozora može se primijetiti vremensku lentu s brojevima slika u seriji. Na lijevoj strani sučelja, na slici označeno slovom B, nalazi se prozor s odabranim elementima i mjerenjima provedenim na njima. Slovom C označen je dijagram progiba točaka kroz vrijeme. Desno od slike nalazi se šarena lenta deformacije ε koja bojama opisuje veličinu deformacija pijeska u danom trenutku.

Kod 2D istraživanja, mjere se pomaci i elongacije na ravnoj površini, a način snimanja mora biti okomit na nju kako bi se dobro zabilježili oblici i duljine. Površina se ne smije gibati u smjeru snimanja. Počne li se površina približavati kameri, program će to zabilježiti kao elongaciju površine. Površina ne smije biti jednolična već stohastičkog uzorka kao što je prikazano na slici 3.2. Idealna površina trebala bi imati veliki kontrast između točaka i neponavljajući uzorak. Kako bi program uspješnije analizirao pomake, vrlo je bitno da točke nisu niti prevelike niti premale s obzirom na mjernu površinu [22].



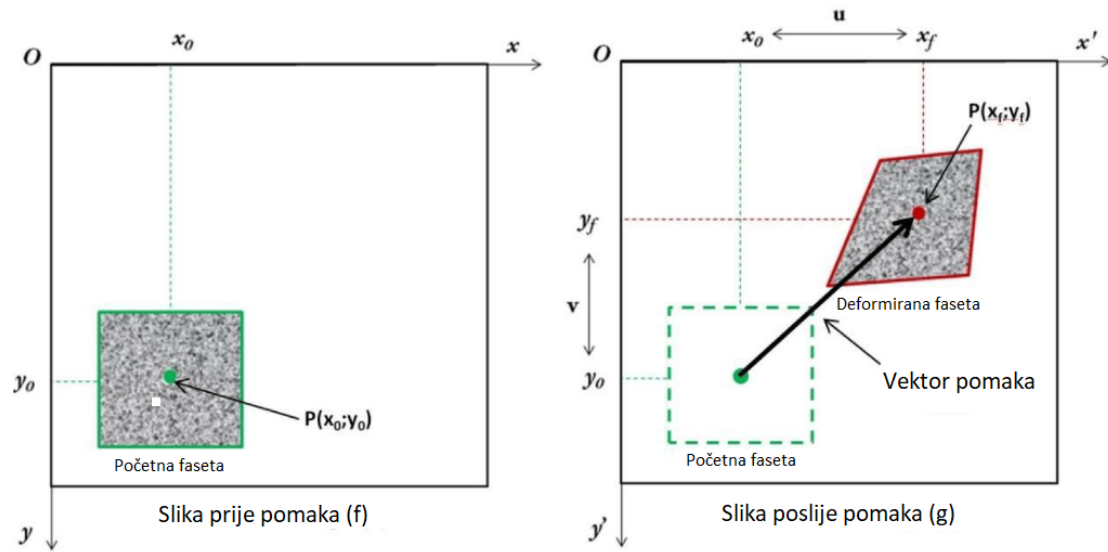
Slika 3.2: Stohastički uzorak, modificirano prema [7]

Piksel je najmanji vidljivi element slike često prikazan u obliku kvadrata [23]. Prema RGB (Red, Green, Blue) sistemu, svaki piksel, to jest boja, je sastavljen od kombinacije nijansi crvene, zelene ili plave. Svakom pikselu prema RGB sistemu boja, dodijeljena su tri broja u rangu od 0 do 255 te svaki broj opisuje pojedinu nijansu u spektru tih tri glavnih boja. Crna i bijela, kao dva polariteta označeni su sa (0, 0, 0) i (255, 255, 255) te se zbog toga preporučuje crno-bijeli uzorak za praćenje pomaka u softwaru. Program se za pronalazak određene točke oslanja i na njezinu okolicu. Preciznije, program mjeri pomak skupa piksela - prije nazvanih fasetama. Za praćenje smjera fasete, program koristi sljedeću korelacijsku funkciju C:

$$C(x, y, u, v) = \sum_{i, j = -\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} [I \cdot (x + i, y + j) - I^*(x + u + i, y + v + j)]^2 \quad (3.1)$$

gdje je x, y početni položaj fasete, a u, v mogući pomak fasete, I označava slika prije pomaka, I^* sliku nakon pomaka, a n veličinu fasete.

Vrijednosti u i v se izmjenjuju dok funkcija ne poprimi iznos 0. Kada funkcija dođe do 0, odredili smo smjer kretanja fasete.



Slika 3.3: Pomak fasete, modificirano prema [8]

4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

4.1 Model tla i pilota

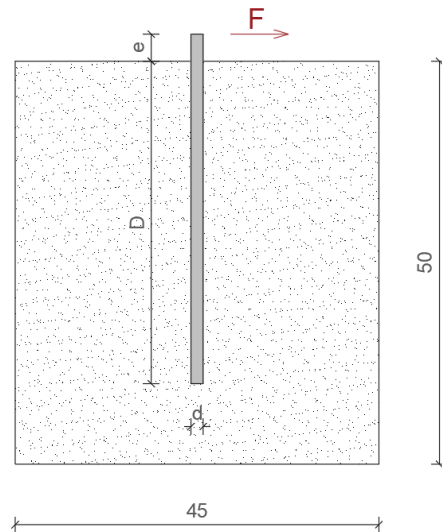
U sanduk dimenzija 0.45 m x 0.5 m x 0.15 m zapunjenog Dravskim pijeskom postavljani su pojedinačni polukružni drveni štapovi koji reprezentiraju stvarne pilote. Za eksperimente uzeti su polukružni piloti promjera 0.015 m. Odabrane su različite duljine pilota kako bi se vidjela razlika u ponašanju fleksibilnog i krutog temelja. Također, u pokusima varirana je i zbijenost pijeska te se time pokušao saznati njezin utjecaj na nosivost. Koristeći formule (2.4.) i (2.5) uz pretpostavku da je modul elastičnosti tla $E=20$ MPa te Poissonov koeficijent $\nu = 0.3$, određeno je da je pilot duljine $l=0.075$ m krut, a da su piloti duljina $l=0.15$ m, $l=0.3$ m, $l=0.4$ m i $l=0.5$ m fleksibilni.

Tablica 4.1: Dimenzije pilota i njegova krutost

Duljina pilota, l (m)	Odnos duljine i pomjera pilota l/d (-)	Krutost pilota, Krs (-)	Uvjet krutosti, F/K
0.075	5	$5.1 \cdot 10^{-2}$	K
0.15	10	$3.19 \cdot 10^{-3}$	F
0.3	20	$1.99 \cdot 10^{-4}$	F
0.4	26.67	6.31×10^{-5}	F
0.5	33.33	2.58×10^{-5}	F

F- fleksibilan pilot, K - kruti pilot

Na slici 4.2 prikazan je dio laboratorija gdje su se pokusi provodili. Na slici 4.2(a) prikazan je sanduk ispunjen dravskim pijeskom s prislonjenim modelom pilota na lice sanduka. Na sanduk je montiran metalni koloturnik, a na njemu sjedi bakrena žica koja spaja glavu pilota s plastičnom posudicom u koju se unosi opterećenje (Slika4.2(b)). Lijevo od sanduka postavljen je reflektor (Slika4.2(c)), a ispred njega stalak (Slika4.2(c)) korišten za snimanje. Opterećenje se nanosilo postepeno i kontinuirano, malim segmentima od željeza s prosječnom masom od 25 g. Na Slici 4.3 prikazana je krivulja opterećivanja kroz vrijeme za svaki pokus te svaka promjena boje predstavlja promjenu u inkrementu naprezanja.



Slika 4.1: Shema pokusa



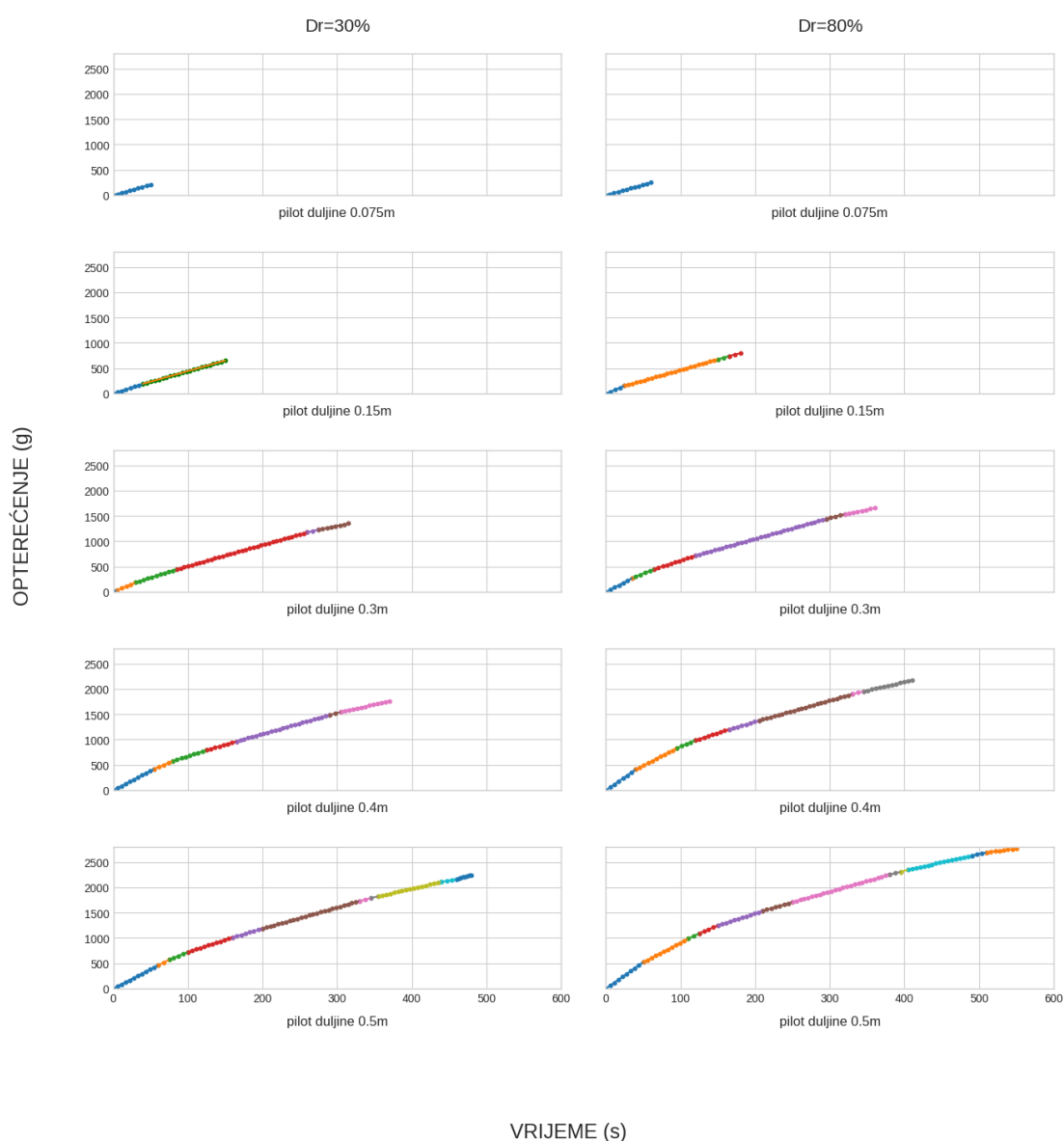
Slika 4.2: Radno okruženje: (a) sanduk, (b) posuda za opterećenje, (c) reflektor i (d) stalak

Na pilotima su ucrtane točke nepravilnog rasporeda i različitih oblika kako bi se pratio njihov pomak. Dravski pijesak je i sam specifičan i stohastičkog uzorka te ga nije potrebno dodatno označavati. Piloti su prilikom postavljanja bili premazani litijevom višenamjenskom mazivom masti kako bi se izbjeglo propadanje čestica pijeska između stakla sanduka i samog pilota te se je time omogućila vidljivost točka tijekom pokusa. Piloti su ugrađivani istovremeno s pijeskom.

U ovom završnom radu pokus se bilježio samo jednom kamerom i pratio se dvodi-

menzionalni razvoj eksperimenta. Smjer snimanja videa okomit je na staklo sanduka. Za potrebe snimanja korišten je stalak, rasvjeta i pametni telefon. Reflektorom se osvijetljavao sanduk prilikom snimanja radi boljeg kontrasta videa što je kasnije pridonijelo boljem hvatanju točaka u GOM Correlatu. Snimanje videa u 4k rezoluciji je također pomoglo boljem zabilježavanjem točaka na videu.

Video se nakon provedenog eksperimenta ubacuje u program gdje se video rastavlja na seriju slika. Početak videa, ujedno i prva slika u seriji, služi kao referentna za početni položaj točaka te se površine smatraju nedeformirane. Pri analiziranju svakog videa, potrebno je definirati mjerilo te koordinatne ravnine modela. Nadalje, definiraju se točke i površine koje program treba pratiti kroz seriju slika. Program sam izbacuje grafove pomaka točaka kroz vrijeme i elongaciju površina u postocima.



Slika 4.3: Grafovi opterećivanja

4.2 Karakteristike drvenog pilota

Za pilot korištena je polukružna drvena letva napravljena od drva bukve. Drvo je materijal koji se za izradu pilota upotrebljavao vjekovima, a svoje početke bilježi u kamenom dobu kod izrade sojenica. Mnoge povijesne građevine poput tornja Crkve sv. Marka u Veneciji, Kneževog dvora u Dubrovniku temeljene su upravo na drvenim pilotima. Kao prednosti drvenih pilota ističe se ekonomičnost, korištenje održivog materijala, laka izvedba, a kao mane mala nosivost, opasnost od truljenja i crvotočine. Budući da drvo truli kad je izloženo vlaženju i sušenju, drveni se šipovi pretežito upotrebljavaju za temelje koji su ispod razine podzemne vode [4]. Uz morskou obali drvo napadnu razne vrste crvi, koji vrlo brzo unište pilote [4]. Moment inercije letve dobivamo

$$I = \frac{d^4\pi}{64} \quad (4.1)$$

Tablica 4.2: Karakteristike drvenog pilota od bukve

Promjer pilota, d (m)	0.015
Youngov modul elastičnosti pilota, E (GPa)	13
Moment inercije pilota, I (m^4)	$2.485 \cdot 10^{-9}$

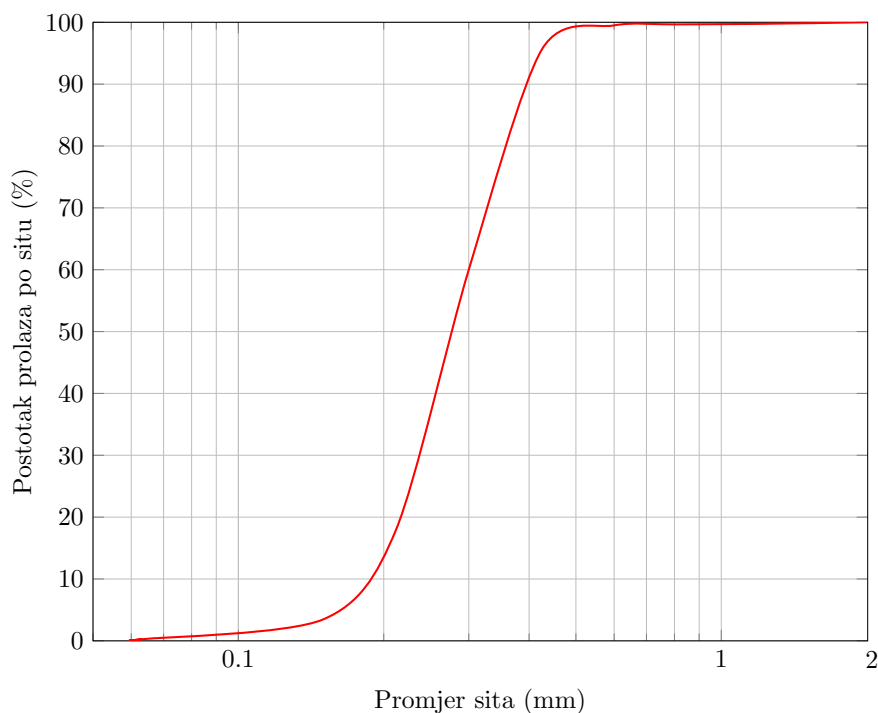
4.3 Karakteristike dravskog pijeska

Pijesak korišten u ovom radu s područja je Osijek uz rijeku Dravu koja izvire u južnom Tirolu te se kasnije ulijeva u Dunav. Dravski pijesak pripada višefaznom poplavljenom litološkom kompleksu holocenske terase formiranoj na desnoj obali rijeke Drave [24]. Debljina sedimenata riječne tease kreće se između 2 do 6 metara, a maksimalna širina terase 3.3 km [25]. U pijesku prevladavaju minerali kvarca, feldspara i karbonata. Specifična gustoća pijeska iznosi 2.66. Iz granulometrijske krivulje na slici 4.3. može se očitati vrijednost promjera sita dominantnog zrna $D_{60} = 0.3$ te promjer efektivnog zrna $D_{10} = 0.018$. Iz izraza (4.2) dobivaju se vrijednost za koeficijent uniformnost $C_u = 1.67$.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.2)$$

Pijeske s koeficijentom uniformnost $C_u > 3$ smatramo dobro graduiranima. Iz toga uvijeta i oblika granulometrijske krivulje zaključujemo da je dravski pijesak jednolično graduiran. Jednolično graduirani pijesci imaju veću kompresibilnost od dobro graduiranih te imaju manji kritični kut trenja.

Tablicom 4.3 prikazani su podaci korišteni za određivanje granične nosivosti poprečno opterećenih pilota u rahlom ($Dr = 30\%$) te zbijenom ($Dr = 80\%$). Povećava-



Slika 4.4: Granulometrijska krivulja, modificirano prema [9]

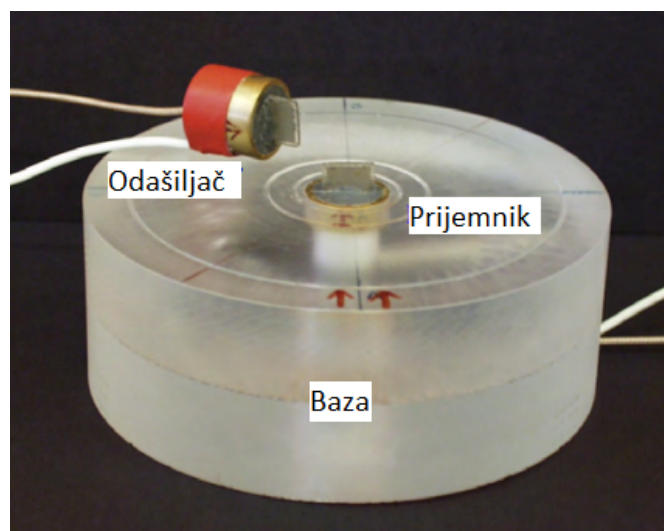
njem zbijenosti smanjuje se koeficijent pora, a raste zapreminska težina, kut unutarnjeg trenja, modul posmika i modul elastičnosti tla. Moduli posmika i moduli elastičnosti navedeni u tablici dobiveni su kompresijskim testom od 100 kPa.

Tablica 4.3: Karakteristike dravskog pijeska

Zbijenost, D_r	30%	80%
Zapreminska težina γ [kN/m^3]	19	21
Početni koeficijent pora, e	0.951	0.627
Kohezija, c [kN/m^3]	0	0
Kut unutarnjeg trenja ϕ [$^\circ$]	33.09	35.65
Koeficijent pasivnog tlaka za Rankinovo stanje, k_p	3.4	3.79
Modul posmika, G [MPa]	16.394	14.769
Youngov modul elastičnosti, E [MPa]	40.772	36.739

4.3.1 Ispitivanje modula posmika tla bender elementima

Modul posmika tla G_s može se odrediti na nekoliko načina, a neki od njih su uređaj za troosno smicanje, bender elementi, mjerenjem lokalnih napreznja, pokus rezonantnim stupcem i slično [26]. Za utvrđivanje točnog modula posmika dravskog pijeska za potrebe ovog rada izabrani su bender elementi. Određivanje modula posmika tla bender elementima je dinamička, nedestruktivna metoda ispitivanja te se koristi kod malih deformacija kako bi se dobila maksimalna vrijednost modula posmika tla G_{max} [27]. Funkcija ovog piezo-keramičkih transduktora je pretvaranje električne energije u mehaničku i obrnuto. Sastoji se od dvije tanke piezo-keramičke pločice na metalnoj podlozi, a s njihove vanjske strane se pričvrste dvije tanke elektrode koje uzrokuju savijanje elemenata [28].



Slika 4.5: Bender uređaj [10]

Na dno sanduka postavljen je prvi bender element koji je poslužio kao odašiljač spojen na generator koji proizvodi sinusoidni val. Kada prvi bender element probudi energiju u tlu ona se dalje širi do vrha gdje je postavljen drugi bender element koji služi kao prijemnik. Prijemnik prima energiju iz tla i pretvara ju natrag u električnu [28]. Prijemnik je spojen na digitalni osciloskop gdje se mjeri brzina širenja posmičnog vala kroz uzorak tla. Točnije, bilježi se vrijeme t između proizvedenog vala na prvom benderu i prvog primijećenog vala na drugom bender elementu. Duljina posmičnog vala L je duljina između prijemnika i odašiljača. Brzina se dobiva iz sljedećeg izraza:

$$v = \frac{L}{t} \quad (4.3)$$

Iz grafova očitana je vrijednost duljine induciranog vala iz prvog bendera i prvog dobivenog vala u drugom benderu i vremena između. Očitavanje prvog dobivenog vala podložno je greškama zbog odokativnog određivanja. Nadalje, za dobivanje modula

posmika korištena je izraz:

$$G = \rho v^2 \quad (4.4)$$

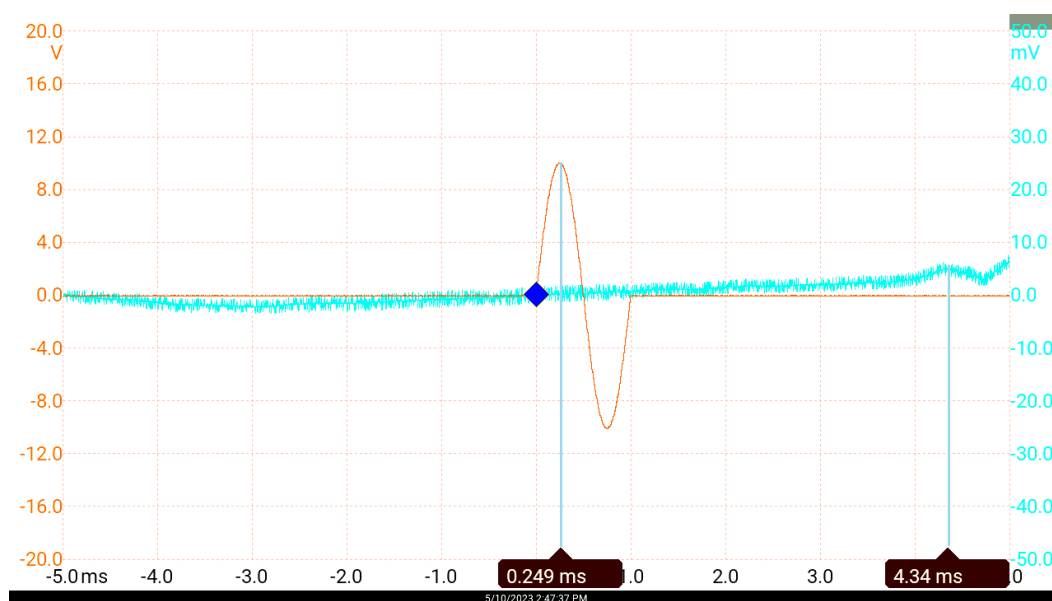
gdje je ρ gustoća suhog uzorka. Modul posmika i Youngov modul elastičnosti povezani su izrazom:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.5)$$

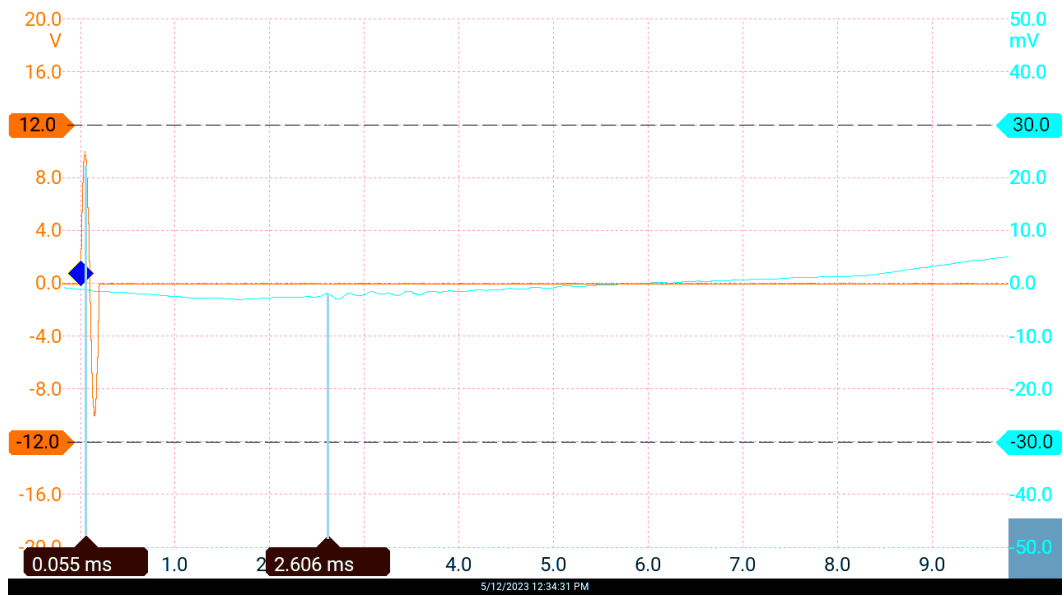
U pokusima pri postavljanju bendera zabilježen je njihov međusobni razmak. Kod pokusa s rahlim uzorkom razmak je iznosio 35 cm, a kod zbijenog uzorka 36 cm. Na slikama 4.5 i 4.7 prikazani su rezultati dobiveni benderom. Crvenom bojom označen je proizvedeni te tirkiznom bojom primijećeni. U rahlom uzorku brijeg inducirano vala započinje u 0.249 ms, a brijeg primijećenog vala u 4.34 ms. U zbijenom uzorku inducirani val započinje na 0.055 ms, a prvi primijećeni val je očit na 2.606 ms. Na kraju oba pokusa prilikom pražnjenja sanduka zabilježena je masa pijeska koja se nalazila u sanduku te podijeljena s dimenzijama sanduka kako bi se dobila gustoća.

Tablica 4.4: Analitičke karakteristike dravskog pijeska dobivene benderom

Zbijenost, Dr	30%	80%
Razmak između bendera, L (m)	0.35	0.36
Razlika između valova, Δt [ms]	4.091	2.551
Brzina valova, v [m/s]	85.56	141.176
Gustoća, ρ [kg/m ³]	1480	1678
Modul posmika, Gs [MPa]	10.83	33.46
Youngov modul elastičnosti E[MPa]	33.46	87



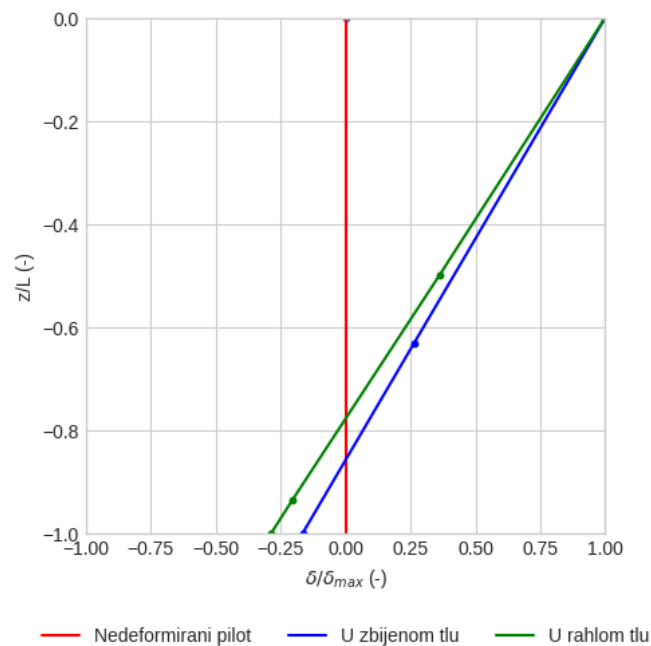
Slika 4.6: Rezultati pokusa bender elementom za rahli uzorak



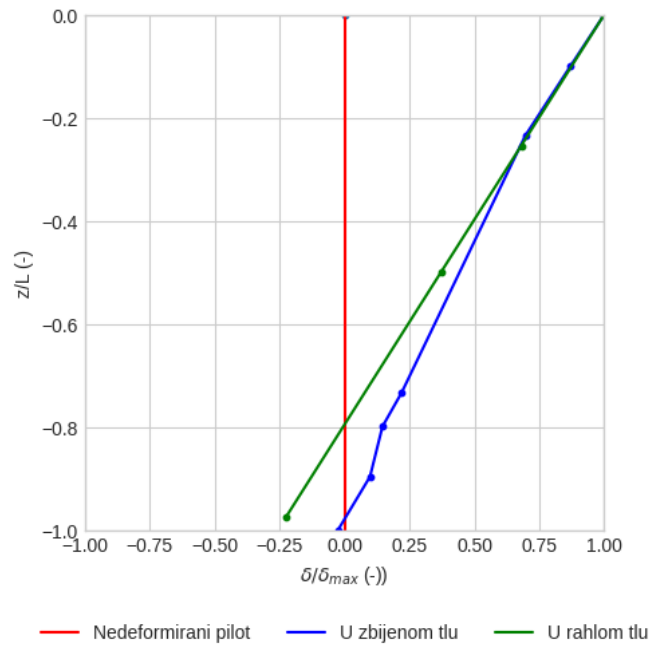
Slika 4.7: Rezultati pokusa bender elementom za zbijeni uzorak

5. REZULTATI ISPITIVANJA

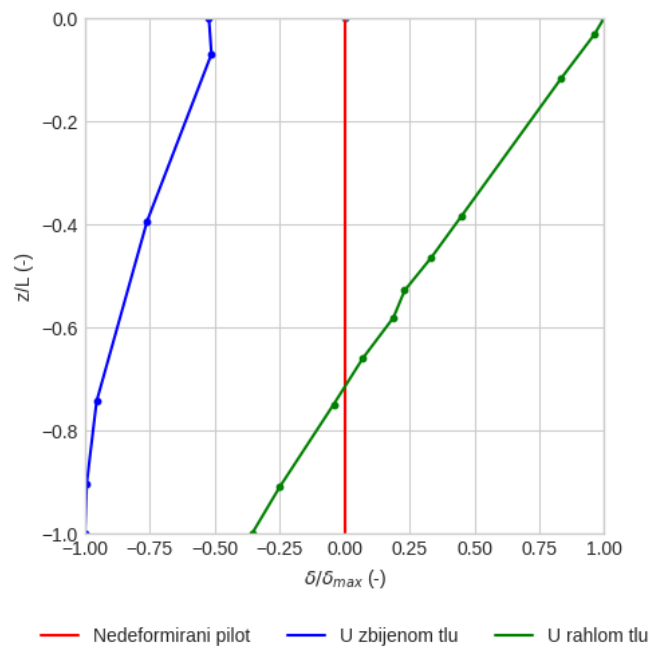
U nastavku teksta prikazani su rezultati ispitivanja pilota izvedenog u rahlom i zbijenom pijesku. Slikama 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 i 5.5 prikazani su početni i krajnji profili pilota u rahlom i zbijenom stanju za pilote duljina $l=0.075$ m, $l=0.15$ m, $l=0.3$ m, $l=0.4$ m i $l=0.5$ m. Dijagrami na navedenim slikama prikazani su u obliku pseudo-dubine (z/L) i pseudo-pomaka (δ/δ_{max}). Tablicom 5.1 sažeti su pomaci pilota izmjereni u glavi pilota za različite dužine pilota i zbijenosti.



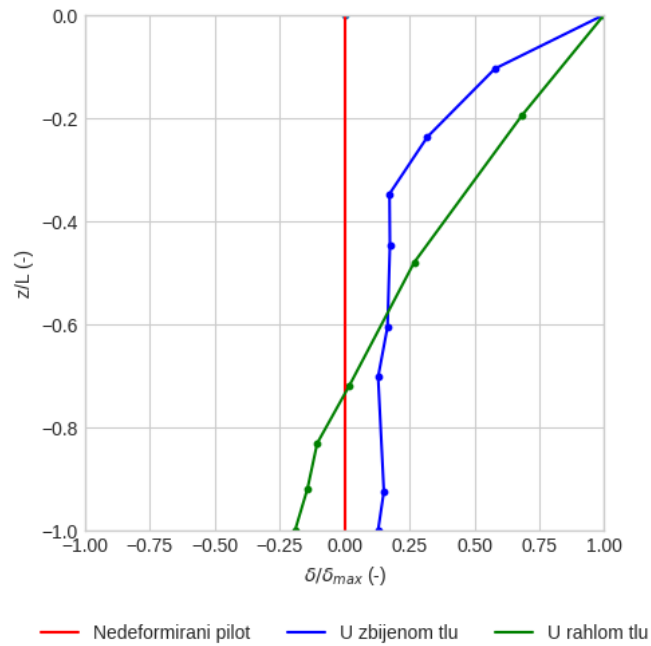
Slika 5.1: Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.075$ m



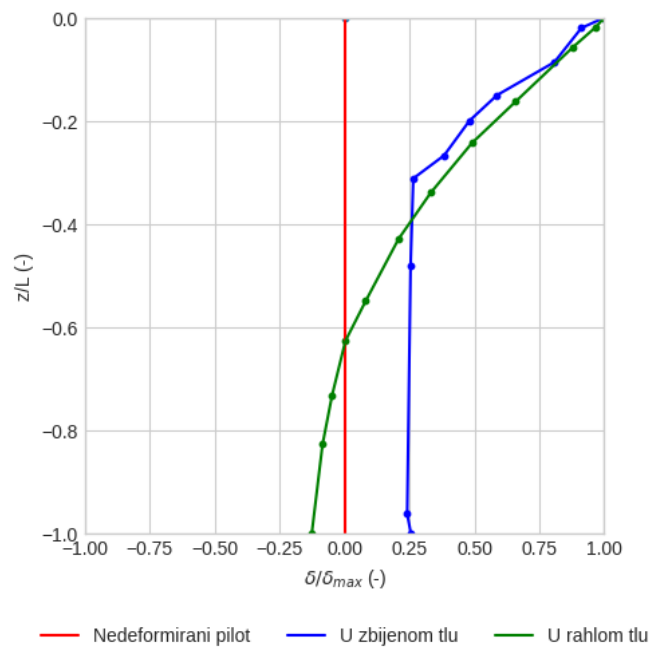
Slika 5.2: Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.15$ m



Slika 5.3: Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.30$ m



Slika 5.4: Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.40$ m



Slika 5.5: Početni i krajnji profili pilota opterećenih na horizontalnu silu u laboratoriju, $l=0.50$ m

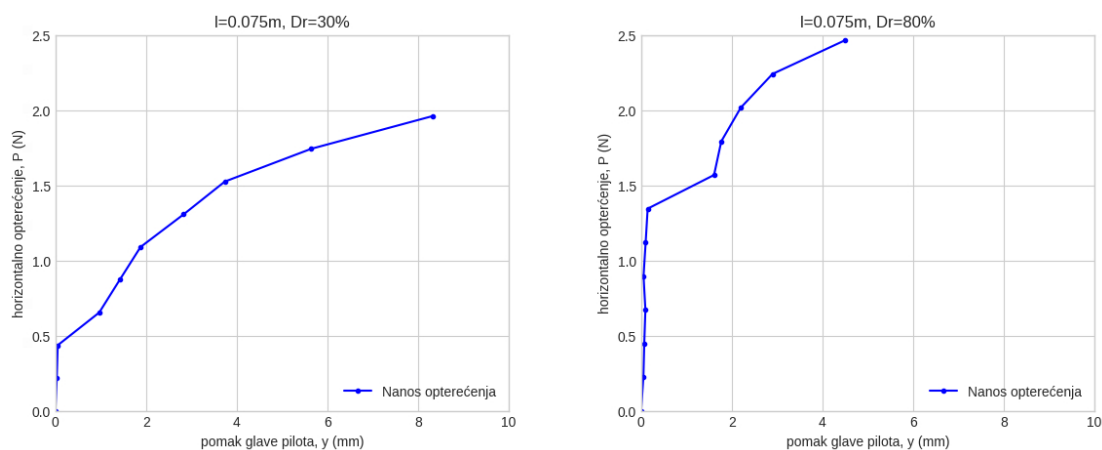
Na grafovima 5.1 i 5.2 očita je rotacija pilota duljina $l=0.075$ m i $l=0.15$ m na dubini $z=0.81$. Na grafu 5.3 prikazan je pomak pilota duljine $l=0.3$ m na kojem se primjećuje da se krajnji položaj pilota u zbijenom pijesku nalazi lijevo od početnog, neopterećenog pilota. Pretpostavlja se greška prilikom snimanja te se to ispitivanje smatra nevaljanim za daljnje proučavanje. Isti pilot u zbijenom doživio je rotaciju na $z=0.71$.

Piloti duljine $l=0.4$ m i $l=0.5$ m u zbijenom tlu su translaterani u desno za vrlo malu vrijednost (slike 5.4 i 5.5). Do savijanja je došlo u gornjoj trećini duljine, a u donje dvije su ostali ravni. U rahlom su ti isti piloti prošli kroz rotaciju i savijanje (slike 5.4 i 5.5). Rotacija je primijećena na $z=0.71$ za pilot duljine $l=0.4$ m te $z=0.61$ za pilot duljine $l=0.5$ m.

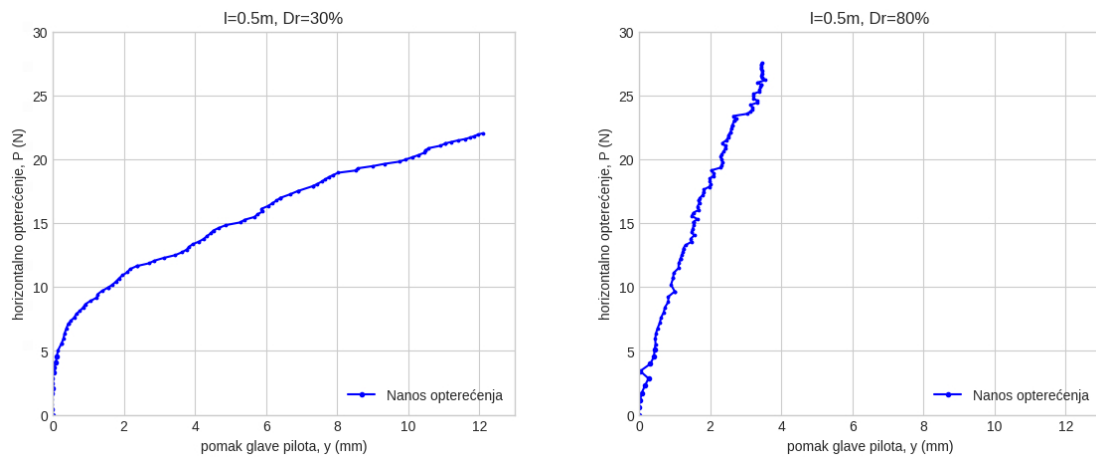
Za evaluaciju korišten je izraz za progib pri graničnoj nosivosti horizontalno opterećenog pilota, izraz (2.17). U tablici 5.1 sumirani su progibi glave pilota u zbijenom i rahlom stanju te granični progib. Granični pomak glave pilota, δ_{LIM} , pri horizontalnom opterećenju ovisi samo o širini pilota (2.17) te je jednak za sve ispitivane pilote u ovom radu.

Tablica 5.1: Maksimalni pomak glave pilota ovisno o zbijenosti materijala

L (m)	$\delta_{zbijeno}$ [mm]	δ_{rahlo} [mm]	δ_{LIM} [mm]
0.075	2.4189	8.325	5.625
0.15	1.6045	31.478	5.625
0.3	-1.158	28.447	5.625
0.4	2.347	14.429	5.625
0.5	3.485	12.081	5.625



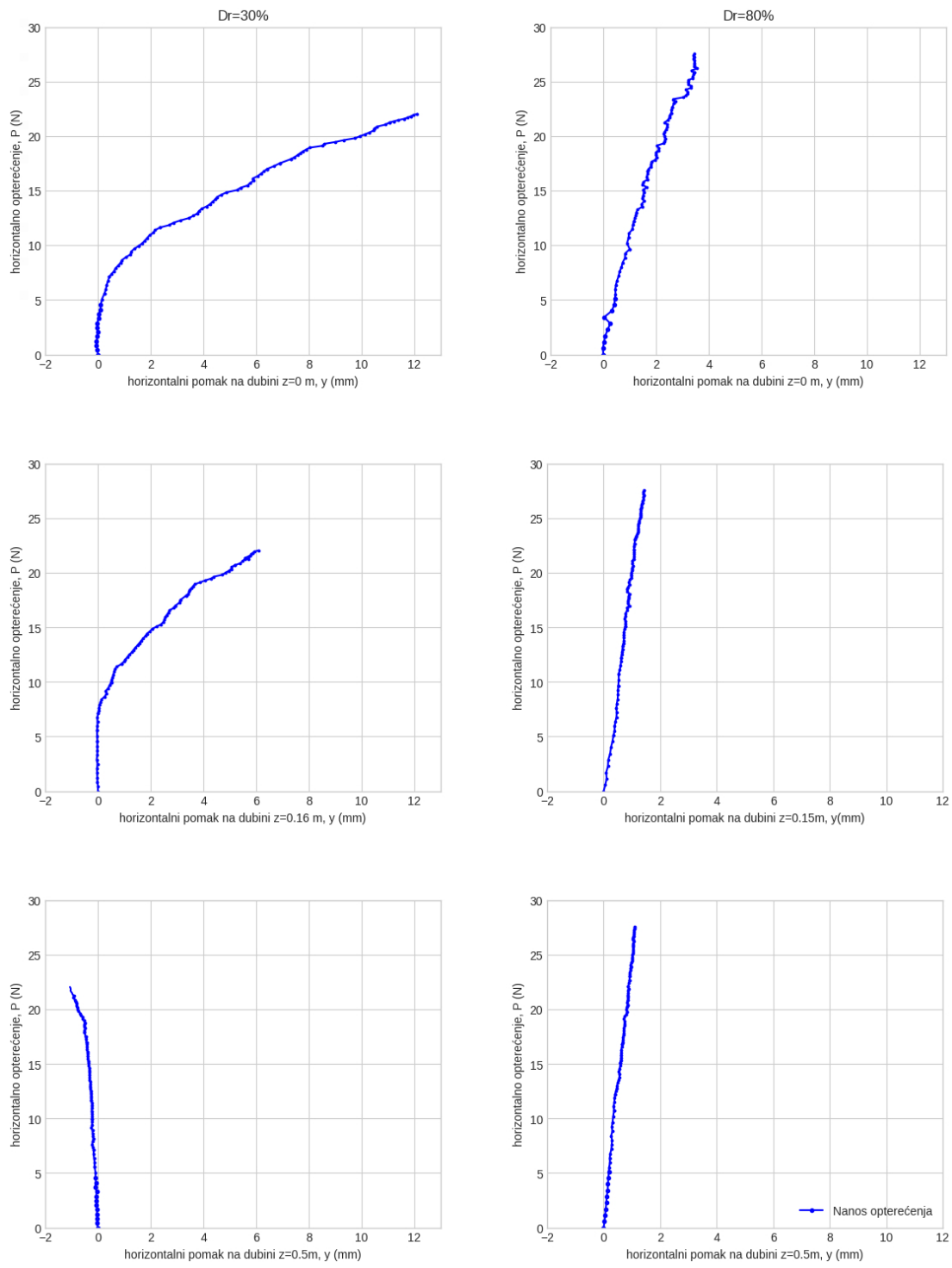
Slika 5.6: Pomak glave pilota pri opterećivanju, $l=0.075$ mm



Slika 5.7: Pomak glave pilota pri opterećivanju, $l=0.5m$

Sa slika 5.6 i 5.7 prikazani su pomaci glave krutog pilota duljine $l=0.075 m$ i fleksibilnog pilota duljine $l=0.5 m$ u ovisnosti o opterećenju. Vidljiv je nagli porast pomaka u rahlom tlu te blagi rast pomaka u zbijenom kod oba pilota. Graf pilota duljine $l=0.5 m$ u zbijenom linearnog je oblika te se smatra da nije dostigao granično opterećenje.

Na slici 5.8 promatrani su pomaci točaka pilota duljine $l=0.5 m$ na različitim dubinama u ovisnosti o opterećenju. Horizontalni pomaci se smanjuju s porastom dubine u oba slučaja zbijenosti, dok je kod rahlog tla primijećen negativni pomak koji potvrđuje rotaciju.



Slika 5.8: Pomak po dubini pri opterećivanju, l=0.5m

6. DISKUSIJA

Piloti kako bi bili uspješno projektirani, trebaju biti sigurni od sloma i imati progibe unutar dopuštenih. Za potrebe ovog rada provedeno je deset različitih pokusa pilota različitih fleksibilnosti i duljina u tlu drugačije zbijenosti. Izračunata granična nosivost pilota rasla je s porastom duljine pilota. U svih deset pokusa, piloti su zadovoljili uvjet sigurnosti od sloma. Iz progiba opterećenih pilota pretpostavlja se sljedeće:

- Vrijednosti pomaka pilota u rahlom kreću se 1.48-5.6 puta vrijednosti izračunatog graničnog pomaka. Piloti nisu zadovoljili uvjet dopuštenog progiba te se smatra da je njihova granična nosivost puno manja od izračunate u tablici 2.1.
- Vrijednosti pomaka pilota u zbijenom kreću se 0.28-0.62 puta vrijednosti izračunatog graničnog pomaka. Pretpostavlja se da je njihova granična nosivost veća od izračunate u tablici 2.1.

Kut unutarnjeg trenja i zapreminska težina pijeska rastu sa zbijenošću materijala te je to jedan od razloga manjih horizontalnih pomaka u zbijenom.

Prema krajnjem profilu pilota nakon opterećivanja vidi se rotacija na pilotima duljina $l=0.075$ m i $l=0.15$ m, i to na dubini $z=0.8l$, te se smatra da se ponašaju kao kruti piloti. Pilot ispitivan u rahlom duljine $l=0.3$ m također. Piloti duljina $l=0.4$ m i $l=0.5$ m doživjeli su infleksiju tipičnu za fleksibilni pilot.

S dijagrama 5.6 i 5.7 može se primijeti nagli porast horizontalnog pomaka u rahlom tlu za malu promjenu u naprezanju. Evidentna je plastifikacija tla i nagli gubitak nosivosti. U zbijenom tlu kao što je prikazano za $l=0.5$ m, nagib krivulje je linearan što ponovno potvrđuje da je pilot u mogućnosti oduprijeti se i većoj sili od nanošene.

Smanjenje progiba s dubinom najduljeg pilota potvrđuje povećanje modula reakcije tla s dubinom.

Proveden je pokus bender elementima kako bi se saznao precizniji modul elastičnosti tla te je isti ispravljen i korišten za proračun graničnih nosivosti pilota (tablice 6.1 i 6.2). Krutost pilota ostala je ista, a korigirane granične nosivosti fleksibilnih pilota nešto su manje od početnih dok je granična nosivost krutog pilota ostala jednaka.

Tablica 6.1: Granična nosivost promatranih pilota u rahlom tlu - korigirani rezultati

Duljina pilota, L [m]	Početne vrijednosti			Korigirane vrijednosti		
	k_{rs} [-]	L_{eff} [m]	Q_{rahlo}	k_{rs}	L_{eff} [m]	Q_{rahlo}
0.075	$5.11 \cdot 10^{-2}$	0.075	1.96	$3.05 \cdot 10^{-2}$	0.075	1.96
0.15	$3.19 \cdot 10^{-3}$	0.135	6.36	$1.91 \cdot 10^{-3}$	0.127	5.63
0.3	$1.99 \cdot 10^{-4}$	0.194	13.13	$1.19 \cdot 10^{-4}$	0.183	11.68
0.4	$6.31 \cdot 10^{-5}$	0.225	17.6	$3.77 \cdot 10^{-5}$	0.212	15.68
0.5	$2.58 \cdot 10^{-5}$	0.5	22.38	$1.54 \cdot 10^{-6}$	0.238	19.76

Tablica 6.2: Granična nosivost promatranih pilota u rahlom tlu - korigirani rezultati

Duljina pilota, L [m]	Početne vrijednosti			Korigirane vrijednosti		
	k_{rs}	L_{eff} [m]	$Q_{zbijeno}$	k_{rs}	L_{eff} [m]	$Q_{zbijeno}$
0.075	$5.11 \cdot 10^{-2}$	0.075	2.42	$1.17 \cdot 10^{-1}$	0.075	2.42
0.15	$3.19 \cdot 10^{-3}$	0.135	7.83	$7.34 \cdot 10^{-4}$	0.114	5.59
0.3	$1.99 \cdot 10^{-4}$	0.194	16.12	$4.58 \cdot 10^{-5}$	0.163	11.42
0.4	$6.31 \cdot 10^{-5}$	0.225	21.7	$1.45 \cdot 10^{-5}$	0.189	15.35
0.5	$2.58 \cdot 10^{-5}$	0.5	27.57	$5.94 \cdot 10^{-6}$	0.212	24.34

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je praćenje ponašanja pilota pri statičkom horizontalnom opterećenju u nekoherentnom tlu korištenjem korelacije digitalne slike. Promatrani piloti bili su podijeljeni na krute i fleksibilne te s obzirom na tu podjelu izračunata im je granična nosivost Q_f u rahlom i zbijenom Dravskom pijesku te ih se opterećivalo do te mjere. Pretpostavljeni su parametri tla, a kasnije i potvrđeni ispitivanjem modula posmika tla bender elementima.

Podaci su analizirani u GOM Correlatu. GOM Correlate primjer je programa baziranog na beskontaktnom mjerenju. Beskontaktno mjerenje sve češće je korišteno u inspekciji pomaka i elongacija u inženjerstvu zbog svoje jednostavne uporabe. Međutim, kako bi rješenja bila mjerodavna, bitno je pažljivo pratiti upute od kvalitetnog označavanja točaka na modelu, pozicije kamere, osvjetljenja do kasnije provjere dobivenih rezultata iz programa. Čak i minijaturna promjena u osvjetljenju ili položaju kamere, kao što je bio slučaj u ovom radu, može dovesti do pristranosti i netočnosti rezultata. Od ključne je važnosti provjera rezultata dobivenih u računalnom programu.

Provedenim pokusima opterećivanja dobiveni su rezultati drugačiji od pretpostavljenih. Piloti $l=0.15$ m i $l=0.3$ m koji su pretpostavljeni kao fleksibilni zapravo su se ponašali kao kruti. Piloti $l=0.4$ m i $l=0.5$ m, iako su savijanjem potvrdili fleksibilnost, doživjeli su i rotaciju u podnožju pilota. Kod opterećivanja pilota u rahlom primijećena je plastifikacija tla te gubitak nosivosti tla puno ranije od dostizanja granične nosivosti pilota. Piloti u zbijenom imali su manji progib od dopuštenog, tlo se nije plastificiralo, a P-y krivulja je bila linearna. Piloti u zbijenom mogli su se oduprijeti i većem opterećenju. Zaključuje se da je dulji i fleksibilniji pilot uvelike izdržljiviji od krutog te da je zbijeno tlo pogodnije za temeljenje zbog većeg pasivnog tlaka koji se odupire pomaku pilota.

LITERATURA

- [1] Taşan, H. E. Behaviour of free and fixed-head offshore piles under cyclic lateral loads. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(1):219–234, 2017.
- [2] Broms, B. B. Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 90(2):27–63, 1964.
- [3] Meyer, B. J. and Reese, L. C. Analysis of single piles under lateral loading. Technical report, Center for Highway Research, University of Texas at Austin TX, 1979.
- [4] Nonveiller, E., Mayer, Z., Čolig, J., and Subotić, L. *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Školska knjiga, 1979.
- [5] Rocscience Inc. Laterally loaded piles theory manual, 2022.
- [6] Pando, Miguel A, Ealy, Carl D, Filz, George Michael, Lesko, JJ, Hoppe, EJ, et al. A laboratory and field study of composite piles for bridge substructures. Technical report, United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure . . . , 2006.
- [7] Program, Earthquake Hazards. Stochastic Diagram. <https://www.usgs.gov/media/images/stochasticgif>, 2021. [pristup 20.8.2023.].
- [8] Caporossi, P., Mazzanti, P., and Bozzano, F. Digital image correlation (dic) analysis of the 3 december 2013 montescaglioso landslide (basilicata, southern italy): Results from a multi-dataset investigation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9):372, 2018.
- [9] Ivanda, S. *Statičko ponašanje Dravskog pijeska u dreniranim i nedreniranim uvjetima*. PhD thesis, University of Rijeka. Faculty of Civil Engineering in Rijeka, 2018.
- [10] Chan, C. Bender element test in soil specimens: identifying the shear wave arrival time. *EJGE*, 15(2010):1263–1276, 2010.

- [11] Lovrić, M. Pregled trenutnog stanja i tehno-ekonomska analiza implementacije vjetroelektrana na moru. 2020.
- [12] Boghrat, A. Sound barrier wall foundations in granular material. *Transportation Research Record*, 1288:158–167, 1990.
- [13] Liu, Q. and Meyerhof, G. G. New method for non-linear analysis of laterally loaded flexible piles. *Computers and geotechnics*, 4(3):151–169, 1987.
- [14] Meyerhof, G. G., Yalcin, A. S., and Mathur, S. K. Ultimate pile capacity for eccentric inclined load. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3):408–423, 1983.
- [15] Patra, N. R. and Pise, P. J. Ultimate lateral resistance of pile groups in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(6):481–487, 2001.
- [16] Caquot, A., Kerisel, J., and Absi, E. Active and passive earth pressure tables. 1973.
- [17] Vesic, A. B. Beams on elastic subgrade and the winkler's hypothesis. In *Proc. of 5th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng*, volume 1, pages 845–850, 1961.
- [18] David, T. K. and Forth, J. P. s. *World Acad Sci Eng Technol*, 78:769–774, 2011.
- [19] Reese, L. C and Van Impe, W. F. *Single piles and pile groups under lateral loading*. CRC press, 2000.
- [20] McCormick, N. and Lord, J. Digital image correlation. *Materials today*, 13(12): 52–54, 2010.
- [21] Baržić, I. *Primjena korelacije digitalne slike za in vitro mjerenje pomaka na svježim kostima*. PhD thesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2016.
- [22] Adrover Gili, A. Evaluation of 3d optical motion and deformation analysis using gom aramis 6m essential line. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2018.
- [23] Blinn, J. F. What is a pixel? *IEEE computer graphics and applications*, 25(5): 82–87, 2005.
- [24] Jagodnik, V., Kraus, I., Ivanda, S., and Arbanas, Ž. Behaviour of uniform drava river sand in drained condition—a critical state approach. *Applied Sciences*, 10 (17):5733, 2020.

- [25] Magaš, N. Osnovna geološka karta sfrj 1: 100 000. tumač za list osijek 134–86.[basic geological map of sfrj 1: 100000, geology of the osijek sheet–in croatian]. *Geološki zavod Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd*, 1986.
- [26] Kokusho, T. *Innovative Earthquake Soil Dynamics*. CRC Press/Balkema, 2017. ISBN 9781138029026. URL https://books.google.hr/books?id=hem_AQAACAAJ.
- [27] Gu, X., Yang, J., Huang, M., and Gao, G. Bender element tests in dry and saturated sand: signal interpretation and result comparison. *Soils and Foundations*, 55(5): 951–962, 2015.
- [28] Lebo, Ž. *Usporedba krutosti tala pri malim deformacijama*. PhD thesis, University of Zagreb. Faculty of Civil Engineering, 2011.