

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Ivana Jurić i Ivana Zovko

**EVALUACIJA LIKVEFAKCIJSKOG POTENCIJALA TLA
PRIMJENOM METODE STATIČKOG
PENETRACIJSKOG POKUSA**

Zagreb, 2021.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom doc.dr.sc. Maria Bačića, mag.ing.aedif. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade za akademsku godinu 2020. / 2021.

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Hipoteza i ciljevi istraživanja.....	7
2.1. Hipoteza.....	7
2.2. Cilj istraživanja.....	7
3. Metodologija istraživanja.....	8
4. Metode evaluacije likvefakcijskog potencijala na temelju rezultata CPTU	9
4.1. Statički penetracijski pokus (CPTU)	9
4.2. Metode evaluacije likvefakcijskog potencijala.....	14
4.2.1. Razvoj metode određivanja koeficijenta cikličkog naprezanja (CSR).....	15
4.2.2. Razvoj determinističkih metoda baziranih na CPT ispitivanjima za određivanje koeficijenta cikličke otpornosti (CRR)	17
4.2.3. Razvoj probabilističkih metoda baziranih na CPT ispitivanjima.....	23
5. Pilot područje Brest Pokupski.....	24
5.1. Opis lokacije	24
5.2. Pojava likvefakcije	26
5.3. Provedeni istražni radovi	28
6. Analize evaluacije likvefakcijskog potencijala.....	38
6.1. Ocjena likvefakcijskog potencijala u Phytion programskom okruženju	41
6.2. Analize osjetljivosti likvefakcijskog potencijala o ulaznim parametrima.....	49
6.3. Rezultati analize osjetljivosti likvefakcijskog potencijala.....	51
7. Zaključak.....	75
Literatura	76
Popis slika	79
Popis tablica	81
Sažetak	82
Summary	83

1. Uvod

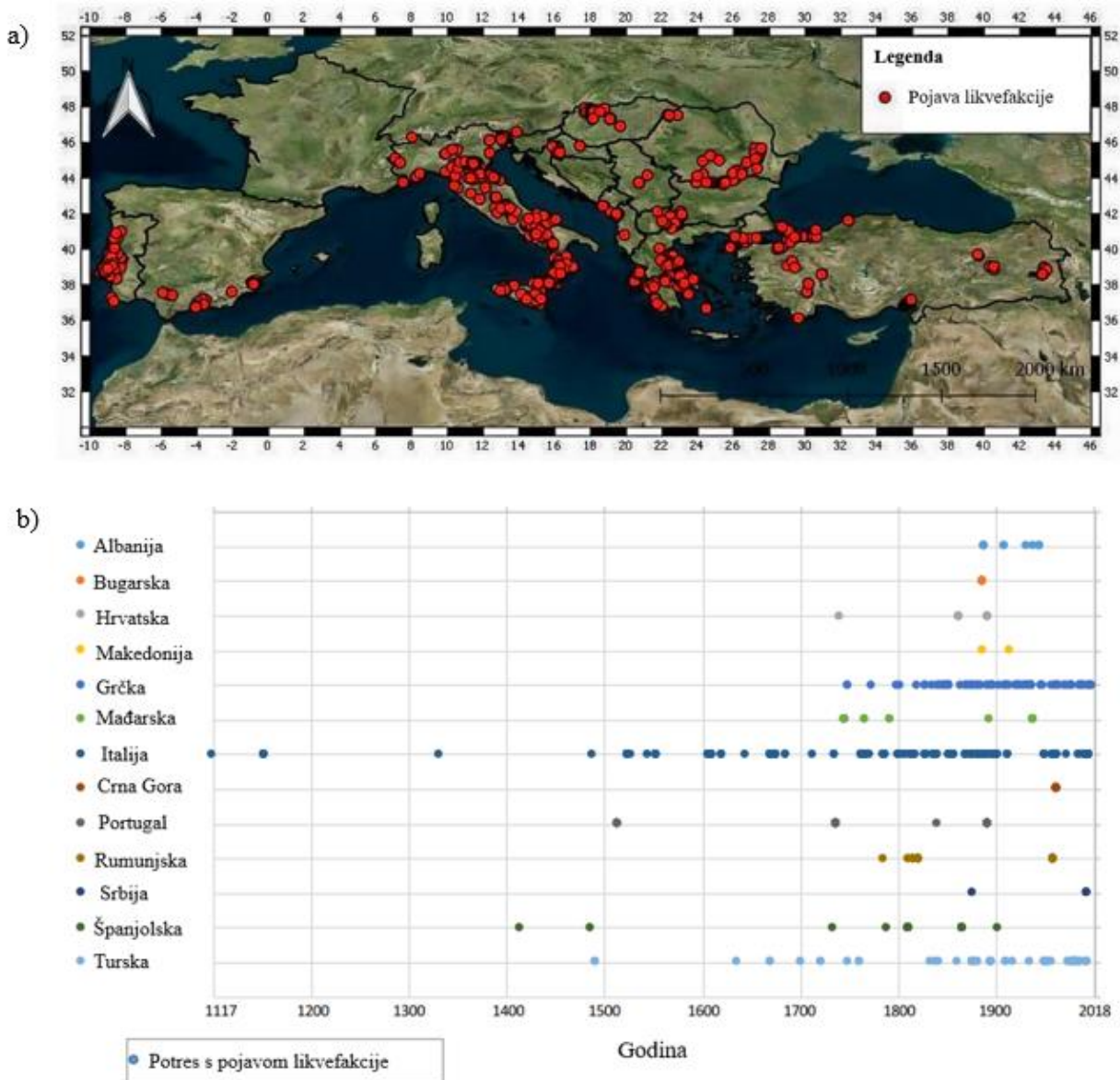
Potres je posljedica iznenadnog oslobađanja nakupljene energije unutar ograničenog područja zemlje i predstavlja geohazard velike razorne snage koji može rezultirati teškim posljedicama za ljude i konstrukcije [1]. S geoznanstvenog stajališta vrlo su značajni budući da omogućavaju saznanja o pomacima i deformacijama, kao i o elastičnim strukturama Zemljine unutrašnjosti [2]. Preko 90 % od ukupnog broja svih potresa na Zemlji čine tektonski potresi koji su rezultat gibanja litosfernih ploča (podvlačenje, razmicanje i smicanje). Gibanja uzrokuju elastične napetosti veće nego što ju čvrstoća stijene može podnijeti. Premašivanje čvrstoće uzrokuje relativni pomak duž rasjeda, a maksimumi pomaka postižu se kroz kraći ili duži vremenski period. Na površini loma nastaju potresni ili seizmički valovi. Brzina seizmičkih valova uvjetovana je vrstom materijala kroz koju taj val prolazi, ali i nekim drugim parametrima kao što su tlak i temperatura [1].

Postoje dvije mjere kojima se opisuje utjecaj i jakost potresa. Jedna od mjera je makroseizmički intenzitet koji opisuje učinak seizmičkog izvora koji ovisi o jakosti i udaljenosti potresa te lokalnim svojstvima tla. S pojavom prvih seizmografa pojavila se potreba za razvojem druge mjere kojom bi se objektivnije definirala jakost potresa u samom izvoru, odnosno količina oslobođene energije u žarištu. Mjera oslobođene količine energije naziva se magnituda potresa [1]. Temelji se na mjerenju najveće amplitude pomaka seizmičkog vala opažene na nekoj seizmološkoj postaji, pri čemu se u obzir ne uzimaju udaljenost od epicentra i naseljenost područja.

Prikupljanjem podataka o intenzitetima i magnitudama dobiva se bolji i precizniji uvid u mogućnost pojave koseizmičkih utjecaja na određenoj lokaciji. Budući da potres uzrokuje inducirane geološke procese poput slijeganja, klizanja terena i likvefakcije pjeskovitog tla, poznavanje istih omogućuje prilagodbu gradnje lokalnim uvjetima tla. Time se uvelike mogu minimalizirati materijalne štete te izbjeći ljudske žrtve [1].

Potres u Petrinji, magnitude $M = 6.4$ (2020.), podrhtavanjem tla izazvao je koseizmičke učinke koji su ostavili umjeren trag u krajoliku [3]. Veliku pozornost privukla je pojava likvefakcije, koja se u Hrvatskoj pojavila svega 3 puta u posljednja četiri stoljeća [4]. Likvefakcija je fenomen karakterističan za saturirane pješčane depozite s malom mogućnošću dreniranja. Naime, pri cikličkom opterećenju, izazvanim potresom, rahli pijesak ima tendenciju zbijanja zbog čega dolazi do prijenosa normalnih napreznja s čestica tla na vodu u porama. Istovremeno, s porastom porednog tlaka smanjuju se efektivna napreznja u tlu. U

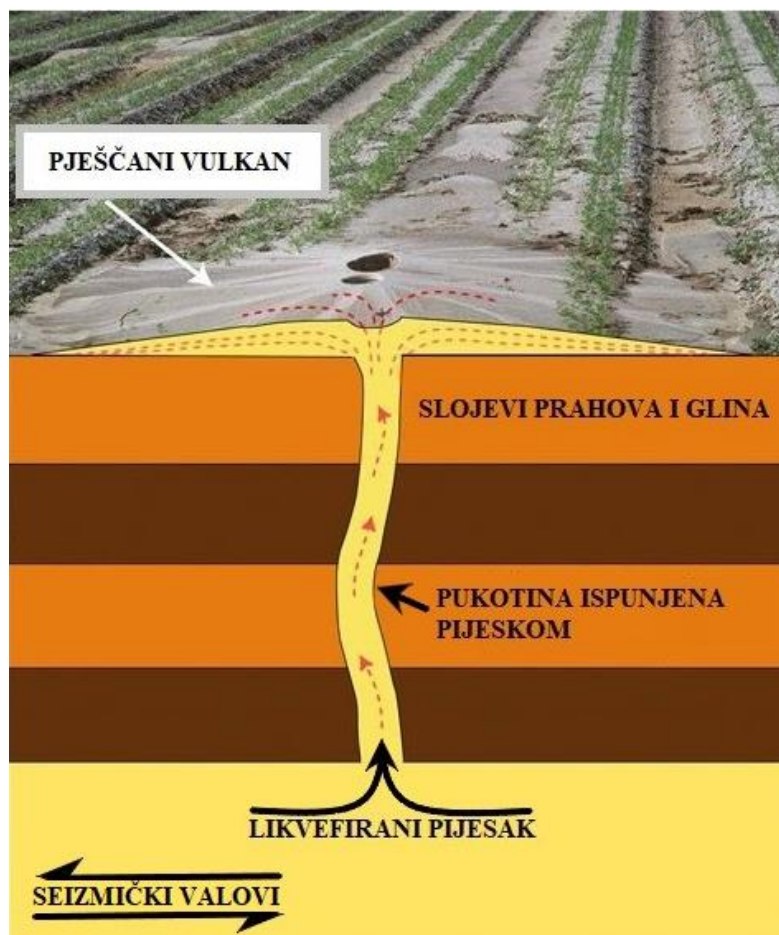
konačnici, njihovo smanjenje rezultira gubitkom čvrstoće i krutosti zbog čega dolazi do velikih deformacija [5]. Na slici 1. a) može se vidjeti rasprostranjenost pojave likvefakcije na području Europe, dok slika b) prikazuje učestalost ovog fenomena u pojedinoj državi za period od 1117. do 2018. godine [4].



Slika 1. Povijesni prikaz pojave likvefakcije u Europi: a) karta rasprostranjenosti; b) graf učestalosti [4]

Pojava likvefakcije uzrokuje širok spektar posljedica. Ovisno o karakteristikama terena i potresa, kao i o karakteristikama konstrukcija, posljedice mogu varirati od promjena u krajoliku do oštećenja konstrukcija. Na slici 2. i 3. vidljiva je manifestacija likvefakcije,

odnosno površinskih pukotina tla iz kojih je izlazila mješavina pijeska i vode, te nastalih pješčanih vulkana.



Slika 2. Shematski prikaz nastanka pješčanih vulkana (prema Simsu i Garvinu, 1995.) [6]

a)



b)



Slika 3. Manifestacija likvefakcije u polju u Topolovcu: a) izbijanje pijeska na površinu b) vidljive površinske pukotine u polju kraj rijeke

Na slici 4. prikazani su različiti tipovi oštećenja građevinskih struktura.

a)



b)



c)



Slika 4. Oštećenja građevinskih struktura uzrokovanih likvefakcijom: a) slom nasipa; b) slom prometnice u Novoj Drenčini; c) oštećenje podrumskog zida kao posljedica likvefakcije

Nakon jakih potresa koji su se dogodili, primjerice u Japanu (1964. godine), shvatila se važnost razumijevanja uzroka i posljedica likvefakcije. Svaka nova pojava ovog fenomena omogućavala je povećanje baze podataka na temelju koje su se mogle razvijati metode ocjene likvefakcijskog potencijala. Prvotne metode bile su isključivo bazirane na laboratorijskim ispitivanjima, no zbog neekonomičnosti i otežanog dobivanja neporemećenih uzoraka, sve češće su se primjenjivala terenska ispitivanja (standardni penetracijski pokus - SPT, statički penetracijski pokus - CPT i metoda seizmičke refrakcije - MSR) [7]. Danas se u praksi za pouzdano određivanje likvefakcijskog potencijala najčešće koristi CPT metoda. Kod ove metode mogućnost dobivanja kontinuiranog geotehničkog profila tla te brzina provedbe imaju značajnu ulogu u ocjeni stanja tla u seizmički aktivnom periodu. Osnovu ocjene likvefakcijskog potencijala čine izračuni te usporedba dvaju parametara, izračuna koeficijenta cikličke otpornosti (CRR) te izračuna koeficijenta cikličkog naprezanja (CSR), na osnovu kojih se može zaključiti da li je analizirano područje likvefabilno.

Potresom u Petrinji $M = 6.4$, 29.12.2020., javio se do tada rijetko viđen fenomen likvefakcije na području Hrvatske. Budući da je taj fenomen izazvao veliku pažnju, te je pregledom literature utvrđeno da tlo koje je jednom likvefiralo ima tendenciju ponovnog likvefiranja, u ovom radu provest će se analiza evaluacije likvefakcijskog potencijala. Odabrano pilot područje je Brest Pokupski u kojem je likvefakcija bila osobito izražena. U prvom dijelu rada, prikazati će se literaturni pregled metode ocjene likvefakcijskog potencijala zasnovane na rezultatima CPTU ispitivanja. Za što bolje razumijevanje dobivenih rezultata, u radu je prikazan postupak ispitivanja te opisan razvoj različitih metoda evaluacije likvefakcijskog potencijala. U drugom dijelu rada opisana je odabrana lokacija pilot područja i navedena problematika istog. Također, navedeni su provedeni istražni radovi s osvrtnom na rezultate tih ispitivanja. U konačnici, na osnovu dobivenih rezultata, korištenih u razvijenom kodu u programskom okruženju Phyton, dobivene su vjerojatnosti ponovne pojave likvefakcije na odabranom području. Vjerojatnosti pojave likvefakcije promatrane su u ovisnosti o varijacijama vrijednosti magnituda, površinskog ubrzanja te razine podzemne vode.

2. Hipoteza i ciljevi istraživanja

2.1. Hipoteza

Metodom statičkog penetracijskog pokusa (CPT) se može na pouzdan način procijeniti vjerojatnost pojave likvefakcije kontinuirano po dubini temeljnog tla, čime se prevladava točkasti (diskretni) karakter ostalih in-situ metoda ocjene likvefakcijskog potencijala te pri čemu brzina provedbe ispitivanja ima značajnu ulogu u ocjeni stanja tla u seizmički aktivnom periodu. Parametarske analize omogućavaju bolji uvid u osjetljivost modela evaluacije likvefakcijskog potencijala o veličini pojedinog parametra, uključivo karakteristike samog potresa te geotehničke uvjete u tlu.

2.2. Cilj istraživanja

Kao glavni cilj istraživanja definira se evaluacija likvefakcijskog potencijala temeljnog tla na ciljanoj mikrolokaciji seizmički aktivnog područja Sisačko-moslavačke županije, primjenom in-situ metode statičkog penetracijskog pokusa. Evaluacija likvefakcijskog potencijala u post-potresnom periodu će omogućiti optimizaciju varijantnih rješenja sanacije temeljnog tla. Cilj istraživanja je odrediti kako varijacija pojedinog parametra odabranih modela ocjene likvefakcijskog potencijala utječe na procjenu vjerojatnosti pojave likvefakcije.

3. Metodologija istraživanja

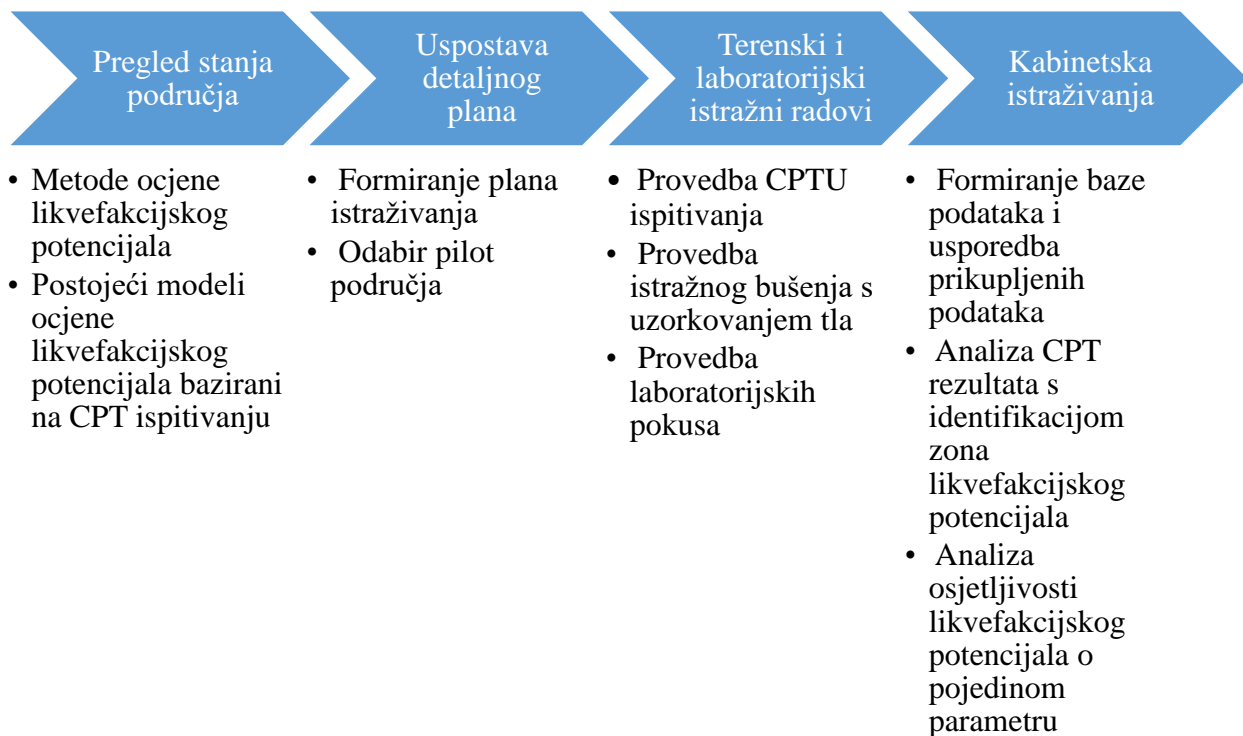
Metodologija istraživanja obuhvaća četiri osnovne faze, provedene u cilju evaluacije likvefakcijskog potencijala. Grafički prikaz metodologije ispitivanja dan je na slici 5.

Prva faza uključuje teorijsko istraživanje stanja područja, pri čemu je proveden opsežan pregled dostupne znanstvene i stručne literature. Osnovni cilj ove faze je steći teorijska saznanja o postojećim metodama i modelima ocjene likvefakcijskog potencijala baziranim na CPT ispitivanjima.

Druga faza obuhvaća uspostavu detaljnog plana istraživanja te odabir pilot područja.

Treća faza započela je provedbom terenskih CPT ispitivanja na pilot području, nakon čega je uslijedilo istražno bušenje s uzorkovanjem tla. Uzeti uzorci, dopremljeni su u geotehnički laboratorij gdje su provedena daljnja ispitivanja.

U četvrtoj fazi usporedbom prikupljenih podataka formirana je baza te je izvršena analiza CPT rezultata s identifikacijom zona likvefakcijskog potencijala. Na osnovu dobivenih rezultata, korištenjem programskog jezika Python provedena je analiza osjetljivosti likvefakcijskog potencijala o pojedinom parametru.



Slika 5. Grafički prikaz metodologije istraživanja

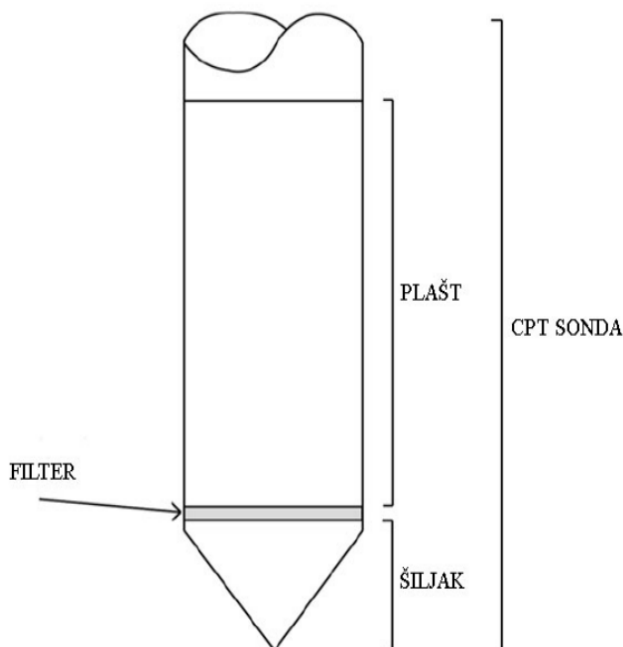
4. Metode evaluacije likvefakcijskog potencijala na temelju rezultata CPTU

4.1. Statički penetracijski pokus (CPTU)

Ispitivanje tla utiskivanjem šipki poznato je još od sedamdesetih godina 19. stoljeća kada je u Kanadi izveden prvi statički penetracijski pokus. Svrha pokusa bila je odrediti nosivost raznih slojeva u tlu, za potrebe izvedbe mosta [8]. Poseban napredak, ispitivanje je doživjelo uvođenjem sonde za mjerenje pornog tlaka, čime je razvijen tzv. CPTU. Ranih 1960-ih električna sonda je dopunjena mnogobrojnim sensorima za mjerenje različitih uvjeta u tlu. Ispitivanje se provodi posebnom sondom koja se utiskuje u tlo, određenom brzinom, pri čemu se konstantno po dubini mjeri otpor prodiranju na šiljku sonde i trenje na plaštu sonde.

Osnovne dijelove opreme čine CPT sonda koja se sastoji od šiljka za mjerenje otpora prodiranju sonde i plašta za mjerenje trenja. Između plašta i šiljka nalazi se porozni prsten (filter) koji se koristi za mjerenje pornog tlaka. Uz CPT sondu, u osnovne dijelove opreme ubrajamo sustav za prikupljanje podataka i opremu za potiskivanje koja se uglavnom sastoji od hidrauličke dizalice i sustava za prihvaćanje reakcije tla [8]. Na slici 6. vidljiv je shematski prikaz sonde te su naznačeni osnovni dijelovi te različite veličine CPT sonde.

a)



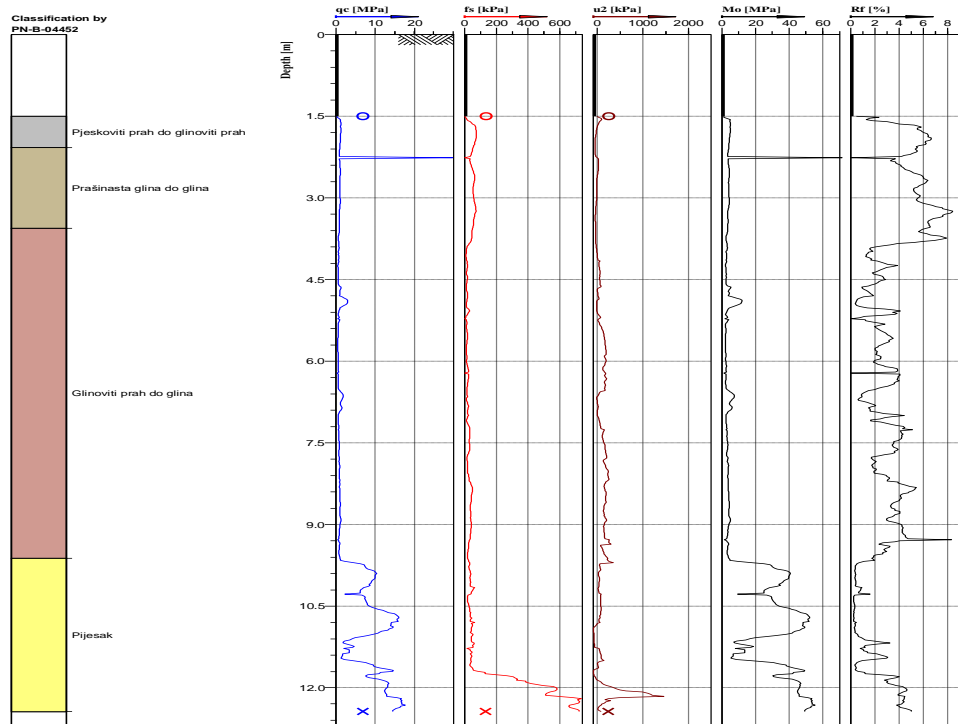
b)



Slika 6. CPT sonda: a) shematski prikaz CPT sonde; b) veličine CPT sonde (s lijeva: 2 cm², 10 cm², 15 cm² i 40 cm²)

Prije početka ispitivanja potrebno je obaviti predbušenje kroz tvrde površinske slojeve tla kako bi se izbjegla preopterećenost i oštećenje sonde. Utiskivanje može biti ograničeno u šljuncima i cementiranim tlima zbog čega je potrebno doći do mekših slojeva tla u kojima može započeti ispitivanje. Ukoliko se prilikom ispitivanja naiđe na prepreku u tlu (npr. kamena gromada) često se ne može postići željena dubina ispitivanja. Ispitivanje je potrebno provoditi vertikalno sa prethodno kalibriranom sondom, pri čemu valja obratiti pozornost na brzinu penetracije sonde u tlo. Uz standardnu brzinu penetracije od 20 mm/s, moderne sonde imaju mogućnost postići veliku točnost i ponovljivost mjerenja. Kako bi se dobili kvalitetni i kontinuirani podaci, opremom trebaju upravljati vješti rukovatelji [8].

Parametri koji se dobiju kao rezultat CPTU pokusa su otpor na šiljku sonde q_t (za CPT je $q_t = q_c$), nekorrigirana vrijednost trenja po plaštu sonde f_s te porni tlak u_2 . Slika 7. ispod prikazuje svojstvene dijagrame prethodno navedenih rezultata CPTU pokusa. Otpor na šiljku sonde predstavlja naprezanje koje je dobiveno kao omjer ukupne aksijalne sile na šiljku i površine poprečnog presjeka baze šiljka. Trenje po plaštu predstavlja omjer ukupne sile trenja koja se javlja na kontaktu plašta sonde i tla, i razvijene površine plašta. Zbog utjecaja pornog tlaka izmjereni otpor i trenje potrebno je korigirati. Omjer ovih parametara izražen je preko pokazatelja trenja R_f . Krupnozrnata tla generalno pokazuju veće vrijednosti otpora na šiljku i trenja na plaštu u odnosu na sitnozrnata tla, dok za pokazatelj trenja R_f vrijedi obrnuto [8].



Slika 7. Primjer rezultata dobivenih CPTU pokusom

Od klasifikacijskih dijagrama za interpretaciju CPT rezultata ne može se očekivati procjena vrste tla na temelju granulometrijskog sastava, ali se može sigurno doći do mehaničkih karakteristika tla i na osnovu toga odrediti 'tip ponašanja tla' (SBT – Soil Behaviour Type). Prvi klasifikacijski dijagram za određivanje SBT-a predložio je Robertson 1986. godine, pri čemu se na apscisi nalazio pokazatelj trenja, a na ordinati otpor na šiljku. Budući da q_t i f_s rastu sa dubinom zbog povećanja dodatnih vertikalnih napreznja, za vrlo plitka ili duboka sondiranja rezultati CPT pokusa zahtijevaju normalizaciju za dodatna napreznja. Kako bi se prethodno navedeno uključilo u daljnje proračune, Robertson je 1990. godine predložio normalizirani klasifikacijski dijagram koji je poboljšao 2009. godine. Također, kako bi pojednostavili korištenje normaliziranog klasifikacijskog dijagrama, uvodi se indeks ponašanja I_c . I_c predstavlja radijus osnovnih koncentričnih kružnica koje predstavljaju granicu između pojedinih SBT zona [9].

$$I_c = ((3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2)^{0.5} \quad (1)$$

gdje je:

- normalizirani otpor na šiljku jednak:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (2)$$

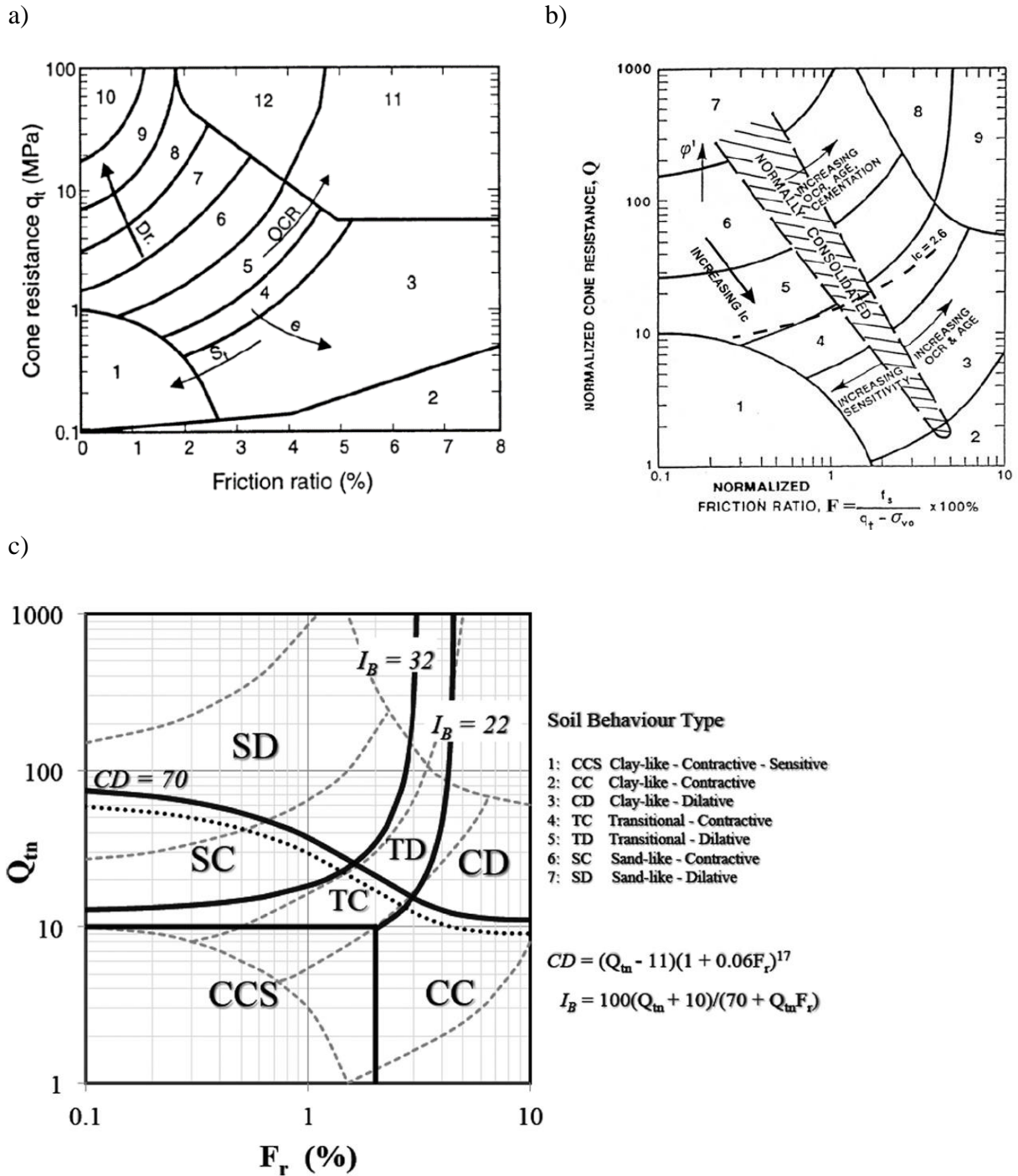
- normalizirani pokazatelj trenja:

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} * 100\% \quad (3)$$

pri čemu σ_{v0} predstavlja ukupna vertikalna napreznja, a σ'_{v0} efektivna ukupna vertikalna napreznja.

Kako bi se preciznije objasnio ponašanje tla, Robertson 2016. godine razvija modificirani klasifikacijski dijagram određivanja vrste tla na osnovu CPT rezultata. U njemu se tlo dijeli u 3 grupe: glina ("clay like"), pijesak ("sand like") te prijelazno tlo ("transitional"). Uz to, ponašanje tla se opisuje kao kontraktivno, odnosno dilatивно [10].

Na slici 8. a) vidi se nenormalizirani klasifikacijski dijagram, Robertson iz 1986. godine, b) prikazuje normalizirani klasifikacijski dijagram prema Robertsonu iz 1990. godine, dok slika 8. c) prikazuje modificirani klasifikacijski dijagram, Robertson iz 2016. godine.



Slika 8. a) Ne-normalizirani klasifikacijski dijagram, Robertson (1986) [9]; b) normalizirani klasifikacijski dijagram, Robertson (1990)[9]; c) modificirani klasifikacijski dijagram, Robertson (2016)[10]

U tablici 1. vidljiva je predložena SBT klasifikacija prema Robertsonovim klasifikacijskim dijagramima iz 1986. i 1990. godine pri čemu su naznačeni nazivi pojedine

kategorije tla. Tablica 2. prikazuje SBT klasifikaciju prema modificiranom klasifikacijskom dijagramu iz čega je vidljivo da 2016. godine, Robertson uvodi opis ponašanja pojedinog tla.

Tablica 1. Predložena SBT klasifikacija prema Robertsonovim klasifikacijskim dijagramima iz 1986. i 1990. godine [11]

<i>SBT zone (1986)</i>	<i>SBT zone (1990)</i>	<i>SBT klasifikacija – vrste tla</i>
1	1	<i>Osjetljiva sitnozrna tla</i>
2	2	<i>Organska tla (treset)</i>
3	3	<i>Gline: glina do prašinstava glina</i>
4 i 5	4	<i>Prahovite mješavine: glinoviti prahovi – prašinstava gline</i>
6 i 7	5	<i>Pjeskovite mješavine: prašinstava pijesak – pjeskoviti prahovi</i>
8	6	<i>Pijesci: čisti pijesci – prašinstava pijesci</i>
9 i 10	7	<i>Šljunkoviti pijesci do pijesci</i>
12	8	<i>Vrlo zbijeni pijesci do glinoviti pijesci</i>
11	9	<i>Vrlo kruta sitnozrna tla</i>

Tablica 2. Predložena SBT klasifikacija prema modificiranom Robertsonovom klasifikacijskom dijagramu iz 2016. godine [10]

<i>SBT zone (2016)</i>	<i>SBT klasifikacija – vrste tla</i>
1	<i>CCS Glina – kontraktivno ponašanje – osjetljivo</i>
2	<i>CC Glina – kontraktivno ponašanje</i>
3	<i>CD Glina – dilatativno ponašanje</i>
4	<i>TC Prijelazno tlo – kontraktivno ponašanje</i>
5	<i>TD Prijelazno tlo – dilatativno ponašanje</i>
6	<i>SC Pijesak – kontraktivno ponašanje</i>
7	<i>SD Pijesak – dilatativno ponašanje</i>

Danas CPT pokus nalazi veliku primjenu u geotehničkoj praksi. Najčešće se koristi za identifikaciju tla i izradu geotehničkog profila te utvrđivanje in situ pornih tlakova. Također, primjenjuje se za procjenu povijesti naprezanja u tlu, određivanje karakteristika tečenja i konsolidacije tla. U novije vrijeme rezultati CPT pokusa postaju važno sredstvo indicacije osjetljivosti tla na likvefakciju [8].

4.2. Metode evaluacije likvefakcijskog potencijala

Laboratorijskim i terenskim ispitivanjima dokazano je da karakteristike tla i potresa te početna naprezanja u tlu utječu na likvefakcijski potencijal. Značajni faktori obuhvaćaju: vrstu tla, koeficijent pora, relativnu gustoću, bočne pritiske u tlu, intenzitet i trajanje potresa [12].

Provedenim cikličkim laboratorijskim ispitivanjima, na širokom rasponu tala, rahli nekoherentni pijesci pokazali su veću osjetljivost na pojavu likvefakcije za razliku od šljunaka, prahova i glina. Također, prepoznato je da se povećanjem zbijenosti u istoj vrsti tla smanjuje potencijal likvefakcije. Veliki utjecaj imaju i bočna naprezanja u tlu. Povećanjem bočnih naprezanja potrebno je veće cikličko opterećenje koje bi izazvalo likvefakciju. Intenzitet i trajanje potresa su značajni faktori čiji se utjecaj na određivanje potencijala likvefakcije ogleda u određivanju magnitude i broja ciklusa naprezanja ili deformacija kojima je tlo izloženo tijekom potresa [12].

Tijekom povijesti razvijeni su razni pristupi i metode određivanja likvefakcijskog potencijala kojima su u obzir uzeti prethodno navedeni faktori. Cilj razvijenih metoda je određivanje odnosa seizmičkog utjecaja na tlo izraženog preko koeficijenta cikličkog naprezanja (CSR) te otpornosti tla na likvefakciju kroz koeficijent cikličke otpornosti (CRR) na koju primarno utječe stanje tla [13]. Ako je $CSR > CRR$, može se zaključiti da je analizirano tlo podložno likvefakciji, dok je za $CSR < CRR$ vjerojatnost pojave likvefakcije mala [14]. Omjer spomenutih koeficijenata izražen je i kao faktor sigurnosti [15]:

$$FS = \left(\frac{CRR_{7.5}}{CSR} \right) * MSF * K_{\sigma} * K_{\alpha} \quad (4)$$

pri čemu $CRR_{7.5}$ označava koeficijent cikličke otpornosti pri magnitudi od 7.5, MSF faktor optimizacije magnitude potresa, K_{σ} koeficijent korekcije bočnih naprezanja i K_{α} koeficijent korekcije početnog (statičkog) posmičnog naprezanja.

Ako magnituda potresa (M) nije 7.5, vrijednosti CRR-a trebaju biti korigirane pomoću faktora optimizacije magnitude potresa te koeficijenta korekcije bočnih naprezanja.

Idriss je 1999. predložio izraz za MSF [16]:

$$MSF = 6.9 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 0.058 \leq 1.8 \quad (5)$$

Idriss i Boulanger, 2014. godine, predlažu novi izraz za MSF [17]:

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1)(8.64 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 1.325) \quad (6)$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180}\right)^3 \leq 2.2 \quad (7)$$

gdje je q_{c1Ncs} , otpornost na šiljku CPT sonde u čistim pijescima, normalizirana na 100 kPa.

Također, Idriss i Boulanger su 2004. godine predložili izraz za koeficijent korekcije bočnih naprezanja kako slijedi [17]:

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln\left(\frac{\sigma_{v0}'}{P_a}\right) \leq 1 \quad (8)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{37.3 - 8.27 * (q_{c1N})^{0.264}} \leq 0.3; q_{c1N} \leq 211 \quad (9)$$

pri čemu je:

q_{c1N} – normalizirana otpornost na šiljku korigirana za nadsloj

2014. godine predložili su novi izraz za C_{σ} , gdje su q_{c1N} zamijenili sa q_{c1Ncs} , dok je izraz za K_{σ} ostao jednak.

Seed, 1983. godine, uvodi uporabu korekcijskog faktora K_{α} kojim se u obzir uzimaju početna statička naprezanja za uvjete nagnutog terena [14]. Budući da je u ovom radu odabrano pilot područje relativno ravne površine terena, vrijednost CRR-a nije potrebno korigirati ovim faktorom. U nastavku ovog odlomka dan je prikaz opće prihvaćene metode dobivanja CSR-a i razvoj različitih metoda dobivanja CRR-a.

4.2.1. Razvoj metode određivanja koeficijenta cikličkog naprezanja (CSR)

Katastrofalne posljedice potresa u Niigati 1964. godine, ukazale su na važnost procjene utjecaja likvefakcije na inženjerske strukture. Potaknuti time, Seed i Idriss su 1971., razvili pojednostavljenu metodu određivanja koeficijenta cikličkog naprezanja CSR. Ova metoda, kojom je omogućen bolji uvid u posljedice koje može prouzročiti fenomen likvefakcije, koristi se i danas. U svrhu procjene likvefakcijskog potencijala, nužno je odrediti da li su posmična naprezanja, inducirana potresom, dovoljno velika da uzrokuju likvefakciju na toj dubini [12]. Tijekom potresa, razvoj posmičnih naprezanja na bilo kojoj dubini tla, primarno ovise o širenju seizmičkih S valova prema površini terena. Na slici 9. shematski je prikazan

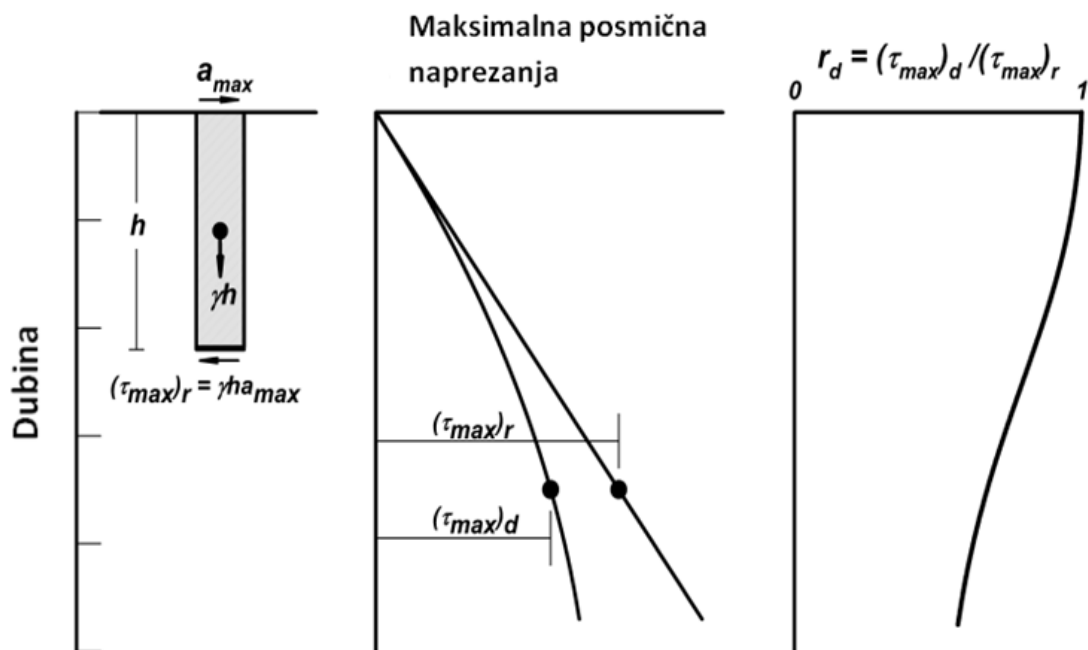
stupac tla koji se nalazi iznad elementa tla na dubini h . Ako se stupac promatra kao kruto tijelo, pri čemu je a_{max} maksimalno vršno seizmičko ubrzanje tla, maksimalno posmično naprezanje $(\tau_{max})_r$ na dubini h može se izraziti kao [12]:

$$(\tau_{max})_r = \frac{\gamma * h}{g} * a_{max} \quad (10)$$

pri čemu γ predstavlja zapreminsku težinu tla. No, budući da se u stvarnosti stupac tla ponaša kao deformabilno tijelo posmično naprezanje $(\tau_{max})_d$ na dubini h je manje od $(\tau_{max})_r$ te se može izraziti kao:

$$(\tau_{max})_d = r_d * (\tau_{max})_r \quad (11)$$

gdje je r_d koeficijent redukcije naprezanja s vrijednošću manjom od 1. Razlika $(\tau_{max})_r$ i $(\tau_{max})_d$ vidljiva je na slici 9. dijagrama u sredini, dok se na desnom dijagramu vidi smanjenje koeficijenta r_d s povećanjem dubine.

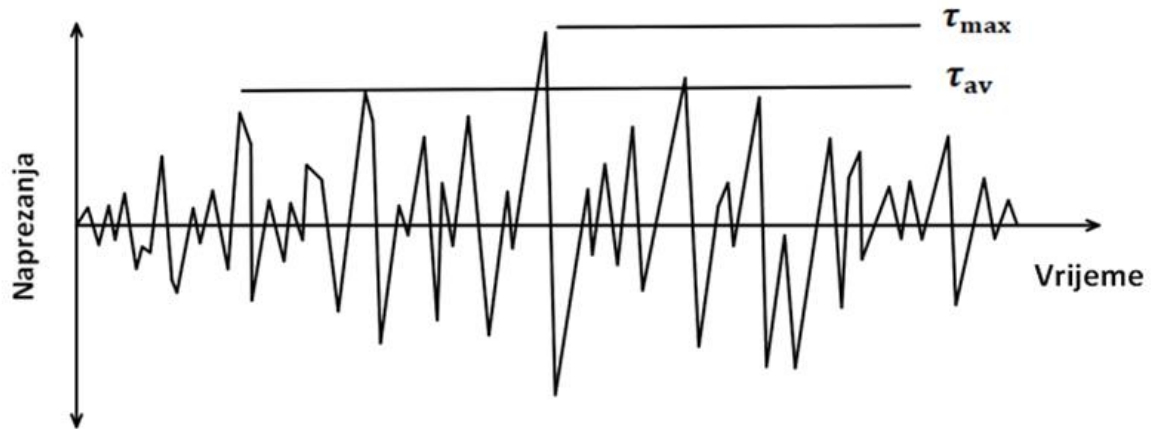


Slika 9. Dijagrami određivanja maksimalnog posmičnog naprezanja i koeficijenta redukcije naprezanja [5]

Na osnovu ispitivanja, Seed i Idriss, zaključili su da do dubine od cca. 13 m maksimalno posmično naprezanje razvijeno tijekom potresa se može sa dovoljnom sigurnošću izraziti kao [12]:

$$\tau_{max} = \frac{\gamma * h}{g} * a_{max} * r_d \quad (12)$$

No, zbog nejednolikih ciklusa posmičnih napreznja (slika 10.), bilo je potrebno odrediti ekvivalentno, jednoliko srednje posmično napreznje, τ_{av} .



Slika 10. Posmična napreznja tijekom potresa [12]

Iz tog razloga, Seed i Idriss su na osnovi usporedbe laboratorijskih rezultata individualnih ciklusa napreznja, zaključili da je τ_{av} otprilike jednak 65% maksimalnog posmičnog napreznja. Kombinacijom ovih rezultata i postojećeg izraza (12), došli su do jednakosti za srednje cikličko posmično napreznje:

$$\tau_{av} \cong 0.65 * \frac{\gamma * h}{g} * a_{max} * r_d \quad (13)$$

Slijedi da je, koeficijent cikličkog napreznja CSR, jednak omjeru srednjeg cikličkog posmičnog napreznja i efektivnog vertikalnog napreznja (σ_v') na određenoj dubini, odnosno:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma_v'} = 0.65 * \left(\frac{a_{max}}{g} \right) * \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \right) * r_d \quad (14)$$

pri čemu je σ_v ukupno vertikalno napreznje jednako produktu zapreminske težine i dubine ($\gamma * h$).

4.2.2. Razvoj determinističkih metoda baziranih na CPT ispitivanjima za određivanje koeficijenta cikličke otpornosti (CRR)

Do 1980. godine, u primjeni su bile metode uporabe rezultata terenskih ispitivanja baziranih na standardnom penetracijskom pokusu (SPT). U praksi se pokazalo da greške pri SPT ispitivanju nisu zanemarive. Primijećena je disperzija rezultata uzrokovana uvjetima

geoloških formacija, kvaliteti opreme i procedurom izvedbe ispitivanja. Navedeni problemi otežavali su praktičnu primjenu metoda baziranih na SPT-u. Iz tog razloga, 1980. godine, Zhou predlaže prve korelacije evaluacije likvefakcijskog potencijala bazirane na CPT ispitivanju čime je omogućen brži, jednostavniji i točniji pristup [18].

Kroz naredne godine, mnogi istraživači razvijali su razne determinističke metode dobivanja parametara za određivanje likvefakcijskog potencijala. Determinističke metode zasnivale su se na predviđanju pojave likvefakcije preko faktora sigurnosti. Na konferenciji Nacionalnog centra za istraživanje potresnog inženjerstva (NCEER) održanoj 1996., okupljena je grupa stručnjaka za unapređenje do tada razvijenih metoda. Stoga su, 1997., Robertson i Wride sumirali donesene zaključke te razvili metodu određivanja CRR-a kako slijedi [13]:

$$CRR_{7.5} = 0.833 * \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right) + 0.05; q_{c1Ncs} < 50 \quad (15)$$

$$CRR_{7.5} = 93 * \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^3 + 0.08; 50 \leq q_{c1Ncs} < 160 \quad (16)$$

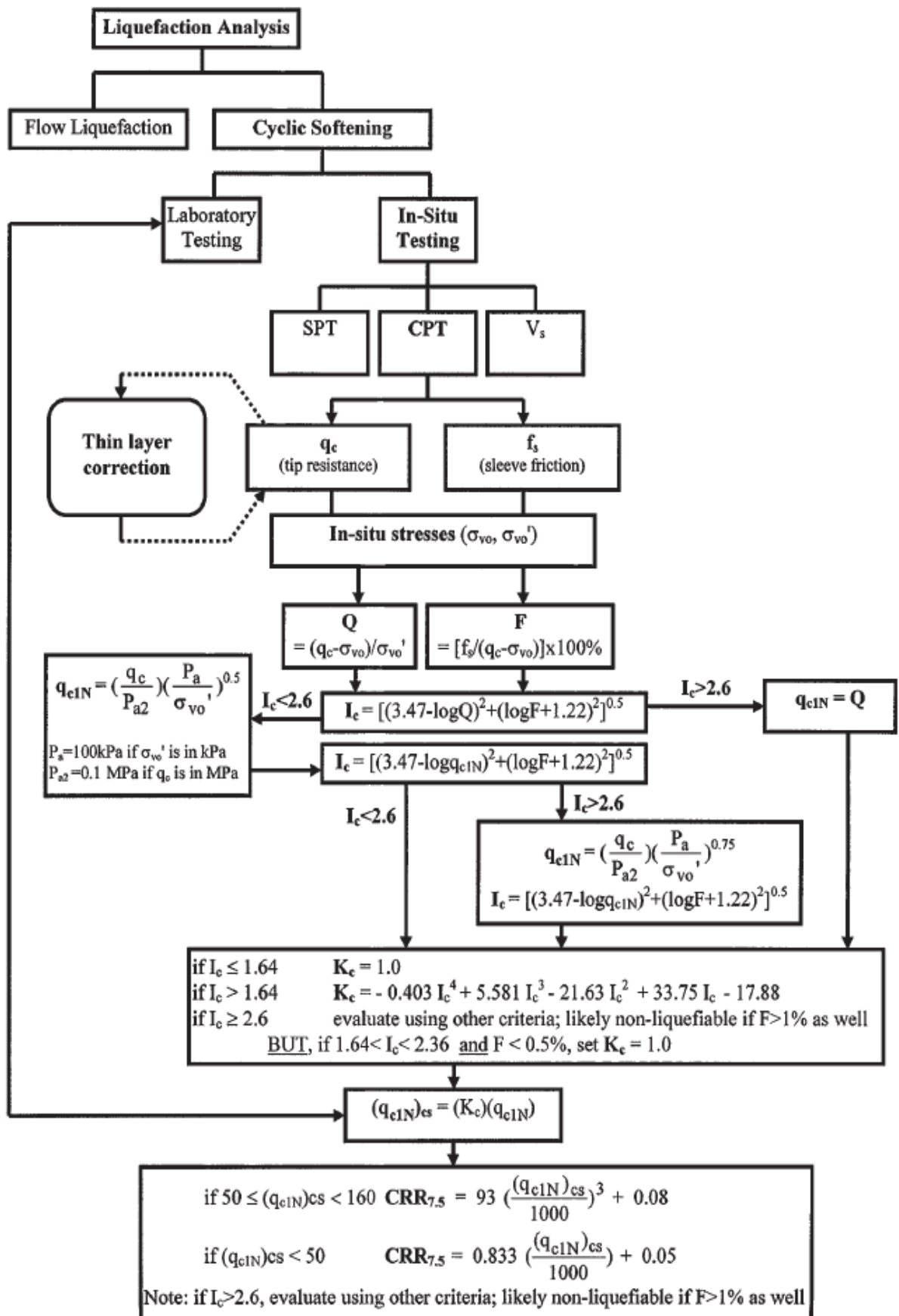
pri čemu se q_{c1Ncs} računa kao:

$$q_{c1Ncs} = K_c * q_{c1N} \quad (17)$$

gdje je:

K_c – faktor korekcije CPT-a na karakteristike zrna

Detaljan postupak određivanja K_c i q_{c1N} prikazan je na slici 11.

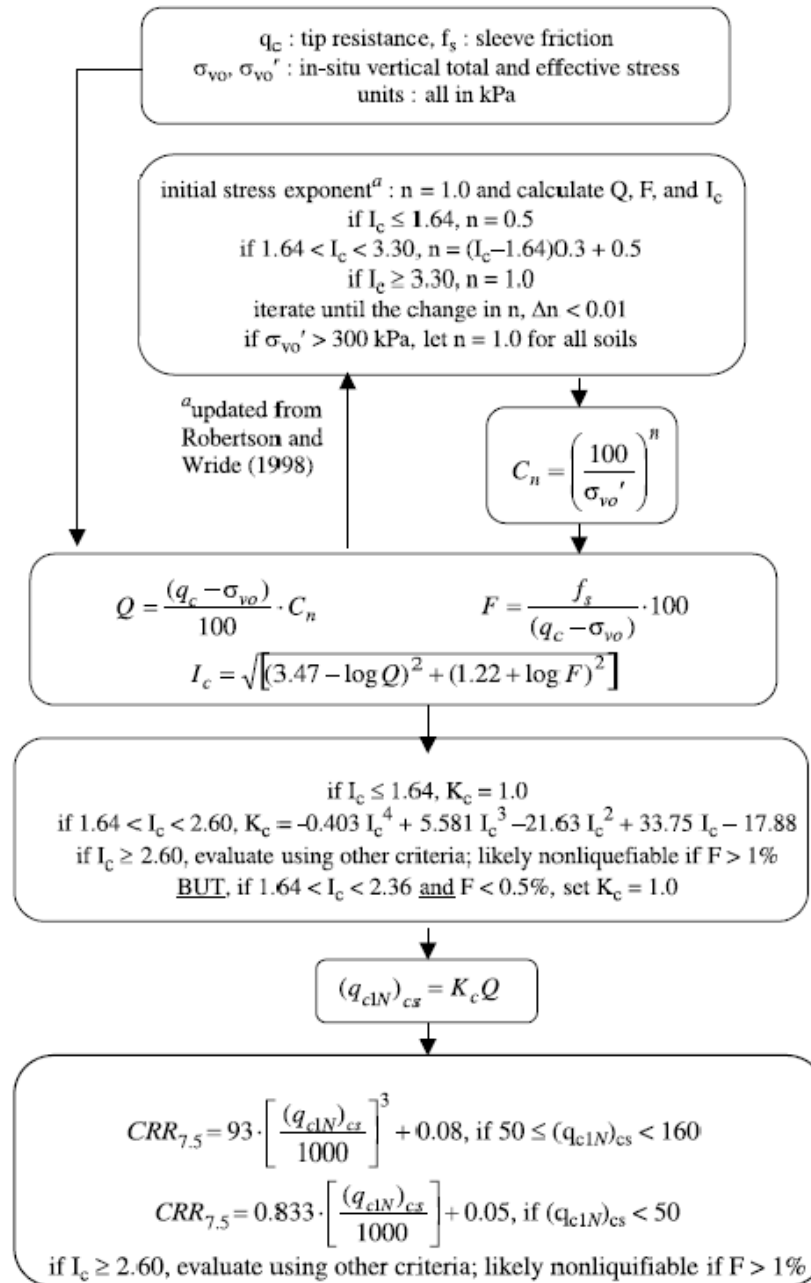


Slika 11. Određivanje CRR-a metodom Robertson & Wride (1997)[19]

Kasnije su Robertson i Wride, 1998. godine, uveli modificiranu metodu određivanja CRR-a preko rezultata CPT-a koja se razlikuje od originalne u nekoliko koraka. Najznačajnija razlika vidljiva je pri određivanju q_{c1Ncs} , dok je izraz za $CRR_{7.5}$ ostao nepromijenjen [19].

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (18)$$

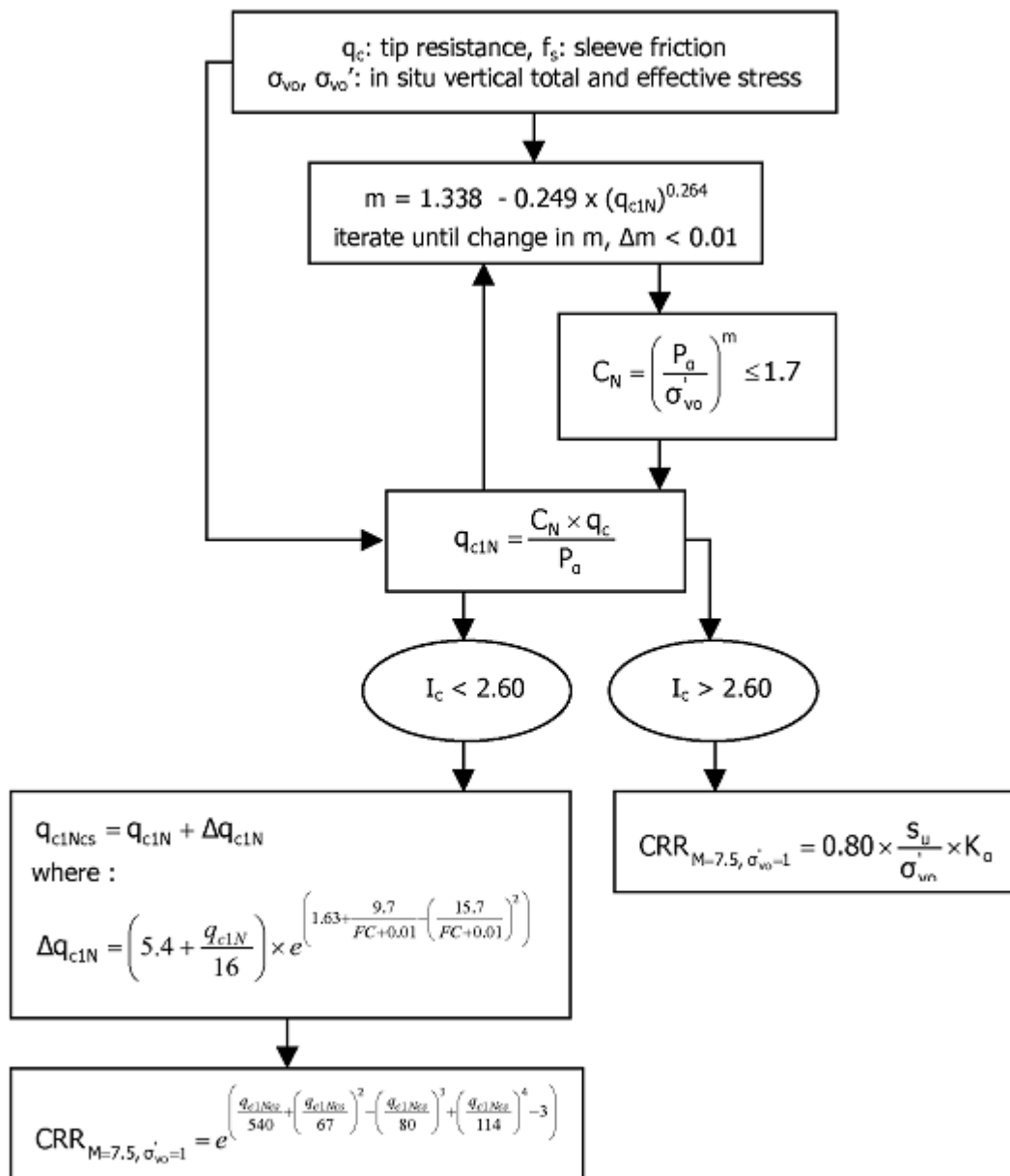
Detaljan prikaz Robertson i Wride metode, iz 1998., vidi se na dijagramu na slici 12.:



Slika 12. Određivanje CRR-a metodom Robertson & Wride (1998) [20]

Idriss i Boulanger, 2004. godine, ažuriraju semi-empirijske procedure bazirane na terenskim ispitivanjima za evaluaciju likvefakcijskog potencijala nekohezivnih tala tijekom potresa. Predlažu nove izraze za MSF i K_σ kao što je već prethodno navedeno, te novi izraz za $CRR_{7.5}$ [17].

$$CRR_{7.5} = exp * \left(\left(\frac{q_{c1Ncs}}{540} \right) + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{67} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{80} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{114} \right)^4 - 3 \right) \quad (19)$$



Slika 13. Određivanje CRR-a metodom Idriss i Boulanger (2004) [20]

Deset godina nakon, Idriss i Boulanger, 2014. godine, razvijaju novu metodu za određivanje CRR-a uvodeći q_{c1Ncs} umjesto do tada korištenog q_{c1N} . Okvir za provedbu analiza likvefakcije temeljenih na naprezanjima za nekohezivna tla prema Idrissu i Boulangeru uključuje 4 funkcije ili veze. One opisuju fundamentalne aspekte dinamičkog odgovora tla, ponašanja i karakteristika tla te otpornosti na prodiranje [16]:

- $r_d = f$ (dubina, karakteristike potresa i gibanja tla, dinamičke karakteristike tla)

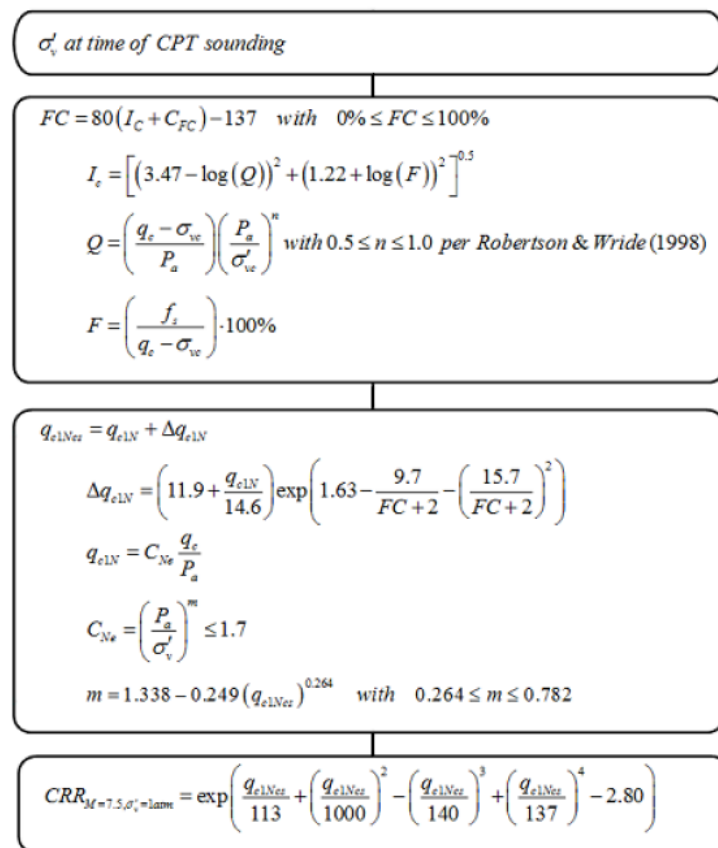
- $C_n = f$ (σ'_v , relativna gustoća, udio sitnih čestica); koji predstavlja faktor korekcije nadsloja

- $K_\sigma = f$ (σ'_v , relativna gustoća, udio sitnih čestica)

-MSF = f (karakteristike potresa i gibanja tla, relativna gustoća, udio sitnih čestica)

Također, novi izraz za CRR slijedi kao:

$$CRR_{7.5} = exp * \left(\left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} \right) + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right) \quad (20)$$



Slika 14. Određivanje CRR-a prema Idriss-u i Boulanger-u (2014) [20]

4.2.3. Razvoj probabilističkih metoda baziranih na CPT ispitivanjima

Usporedno s razvojem determinističkih metoda razvijale su se i metode bazirane na probabilističkim pristupima. Brojni istraživači pridonijeli su razvoju probabilističkih metoda evaluacije likvefakcije, čiji je cilj prikazati potencijal likvefakcije kroz vjerojatnost pojave. Među njima bili su C. Hsein Juang i R. E. S. Moss. Juang je 2002. godine predložio izraz za određivanje vjerojatnosti likvefakcije [21]:

$$P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_s}{A}\right)^B} \quad (21)$$

pri čemu F_s predstavlja faktor sigurnosti, a A i B koeficijente koji ovise o vrsti provedenog terenskog ispitivanja. U ovom istraživanju su, za CPT ispitivanja, odabrane vrijednosti $A=1.0$ i $B=3.3$, što je vidljivo u tablici 3.

Tablica 3. Parametri A i B za različite vrste terenskih ispitivanja [21]

	SPT		CPT		V_s	
Parameter	Bayesian Mapping	Logistic Regression	Bayesian Mapping	Logistic Regression	Bayesian Mapping	Logistic Regression
A	0.8	0.9	1.0	1.1	0.73	0.69
B	3.5	3.7	3.3	3.5	3.4	3.1

2006. godine, Moss predlaže novi izraz [22]:

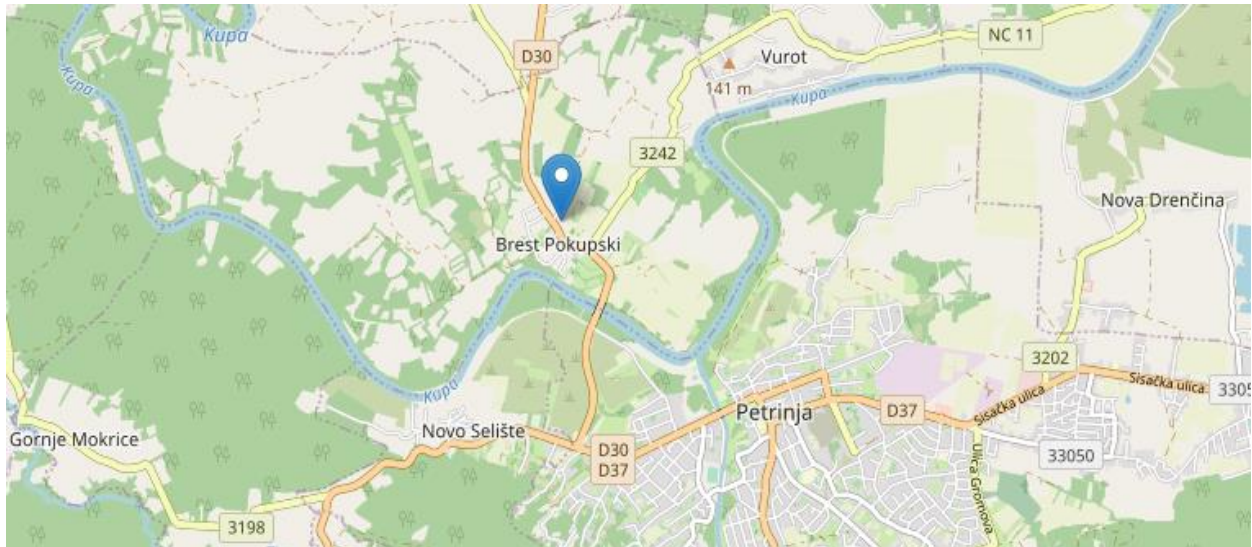
$$P_L = \phi\left\{ \left(q_{c,1}^{1.045} + q_{c,1} (0.110 * R_f) + (0.001 * R_f) + c * (1 + 0.850 * R_f) - 7.177 * \ln(CSR) - 0.848 * \ln(M_w) - 0.002 * \ln(\sigma'_v) - 20.923) / 1.632 \right\} \quad (22)$$

gdje je $q_{c,1}$ normalizirani otpor na šiljku, R_f pokazatelj trenja, c normalizacijski eksponent i $\phi(P_L)$ kumulativna normalna distribucija.

5. Pilot područje Brest Pokupski

5.1. Opis lokacije

Brest Pokupski je mjesto u Sisačko-moslavačkoj županiji smješteno na lijevoj obali rijeke Kupe, na glavnoj prometnici iz Petrinje prema Zagrebu. Područje cijelog sliva rijeke Kupe odlikuje složena geološka građa terena i složeni strukturno – tektonski odnosi [23]. Na slici 15. vidljiva je lokacija odabranog pilot područja.

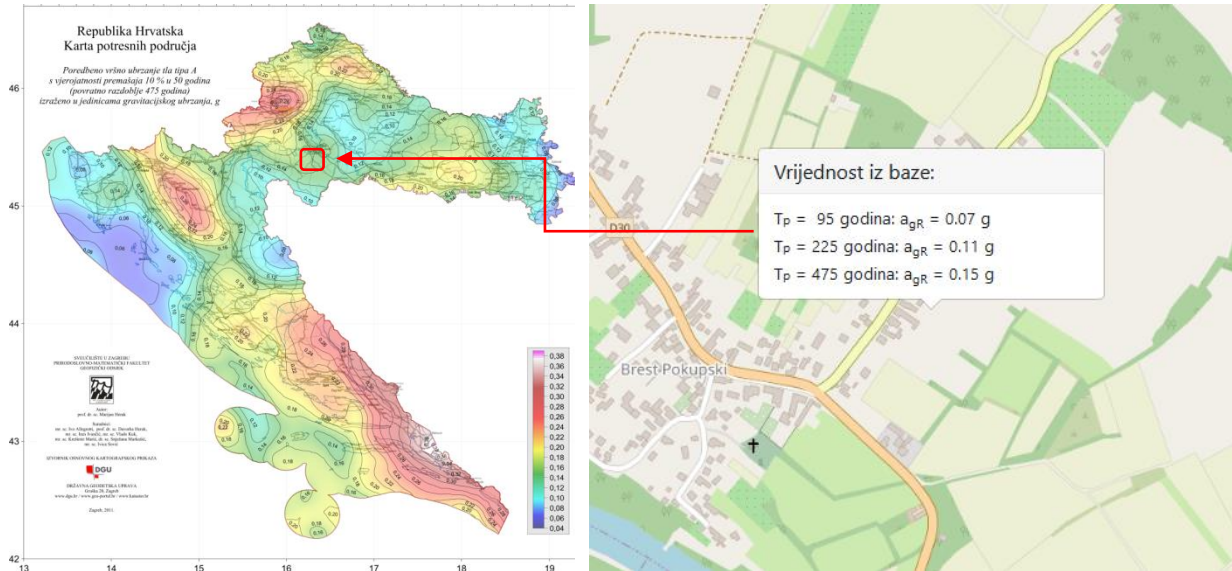


Slika 15. Brest Pokupski [24]

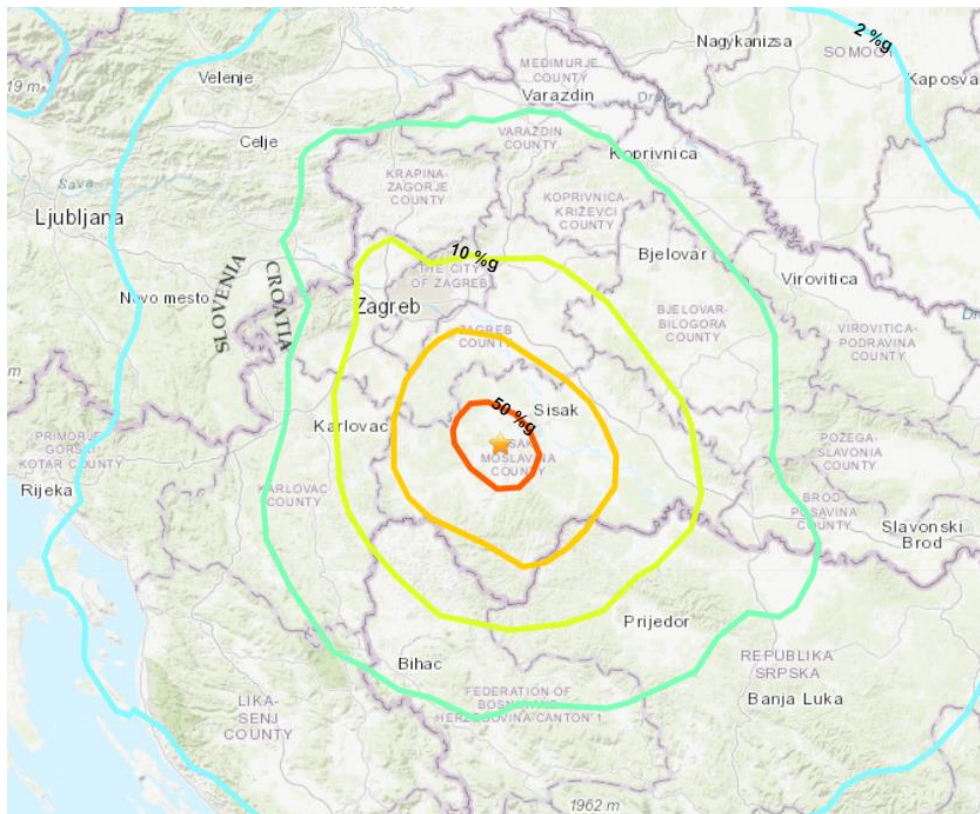
Geološko-petrografski oblici ovog područja pretežno su nastali u nedavnoj geološkoj prošlosti. Bitan utjecaj u oblikovanju strukture imali su neotektonski pokreti u neogenu i kvartaru, prilikom čega su uslijed vertikalnih pokreta nastale strukture tipa horstova i graba [25]. Veći dio područja prekriven je naslagama kvartara u kojima dominira međuzrnata poroznost i raznolika propusnost [23]. Najniže dijelove prostora prekrivaju najmlađi aluvijalni sedimenti pijeska i šljunka, različite debljine. Ti slojevi prekriveni su muljevitim i glinovitim tlom, dok u podlozi prevladavaju mlade stijene [25].

U geotektonskom smislu područje pripada Panonskom bazenu te se nalazi u pokupskom epicentralnom području. S obzirom na koncentraciju epicentara potresa te prisutne strukture i rasjede zaključeno je da potresi nastaju u široj zoni između Zrinske gore i Vukomeričkih gorica [23]. U geotehničkoj praksi prilikom projektiranja, potresno djelovanje određuje se preko proračunskog ubrzanja tla a_g , koje odgovara povratnom periodu potresa od 475 godina. Računsko ubrzanje tla ovisi o stupnju potresnog rizika i određuje se na temelju odgovarajućih

seizmoloških ispitivanja lokacije građevine ili prema usvojenim seizmičkim kartama. Prema seizmičkoj karti Republike Hrvatske, za predmetnu dionicu referentno je proračunsko ubrzanje od $a_g = 0.15g$ za povratni period od 475 godina, a $a_g = 0.07g$ za povratni period od 95 godina. Na slici 16. prikazane su vrijednosti vršnog seizmičkog ubrzanja na lokaciji Bresta Pokupskog, dok slika 17. prikazuje konture seizmičkog ubrzanja za petrinjski potres.



Slika 16. Vršno seizmičko ubrzanje tla odabranog pilot područja [26]



Slika 17. Konture seizmičkog ubrzanja za petrinjski potres [27]

5.2. Pojava likvefakcije

Najjača seizmička aktivnost u Hrvatskoj u posljednja dva stoljeća dogodila se na granici dvaju glavnih geoloških područja Hrvatske: planinskog pojasa Dinarida i Panonskog bazena. Potres magnitude $M = 6.4$ dogodio se 29.12.2020., 15 km jugozapadno od Siska i 45 km jugoistočno od Zagreba. Glavnom udaru prethodila su dva uvodna dan prije, magnituda $M = 5.2$ i $M = 4.8$. Potres je proizveo površinske koseizmičke efekte uglavnom raspoređene na području između Petrinje i Siska [3].

Koseizmički rasjed, na kojem se dogodio potres, kontrolira postojeća aktivna Petrinjska zona rasjeda u okviru trajnog potiskivanja Jadranske ploče prema sjeveru uz rubove Panonskog bazena. Koseizmički učinci sastojali su se od primarnih puknuća površine, izravno povezanih s klizanjem duž potresnog rasjeda i drugih koseizmičkih učinaka izazvanih podrhtavanjem tla. Između Petrinje i Siska, duž ravnice rijeke Kupe, uočeni su prijelomi i otvorene pukotine manje od 10 cm. Uglavnom su povezane s pojavom likvefakcije te su izazvale oštećenja obale i brane uz rijeku Kupu [3]. Slika 18. prikazuje depozite izbačenog pijeska.



Slika 18. Depoziti pijeska u Brestu Pokupskom

Likvefakcija je posebno bila raširena duž SI – JZ orijentirane zone rasjeda unutar aluvijalne ravnice rijeke Kupe. Na području Bresta Pokupskog uočena je likvefakcija koja se prvotno manifestirala vodenim fontanama sličnim gejzirima visine otprilike 50 – 70 cm, uz

izbacivanje depozita pijeska s većih dubina na površinu terena. Na slici 19. vidljive su prethodno navedene manifestacije likvefakcije na području Bresta Pokupskog.



Slika 19. Likvefakcija u dvorištu jednog kućanstava u Brestu Pokupskom

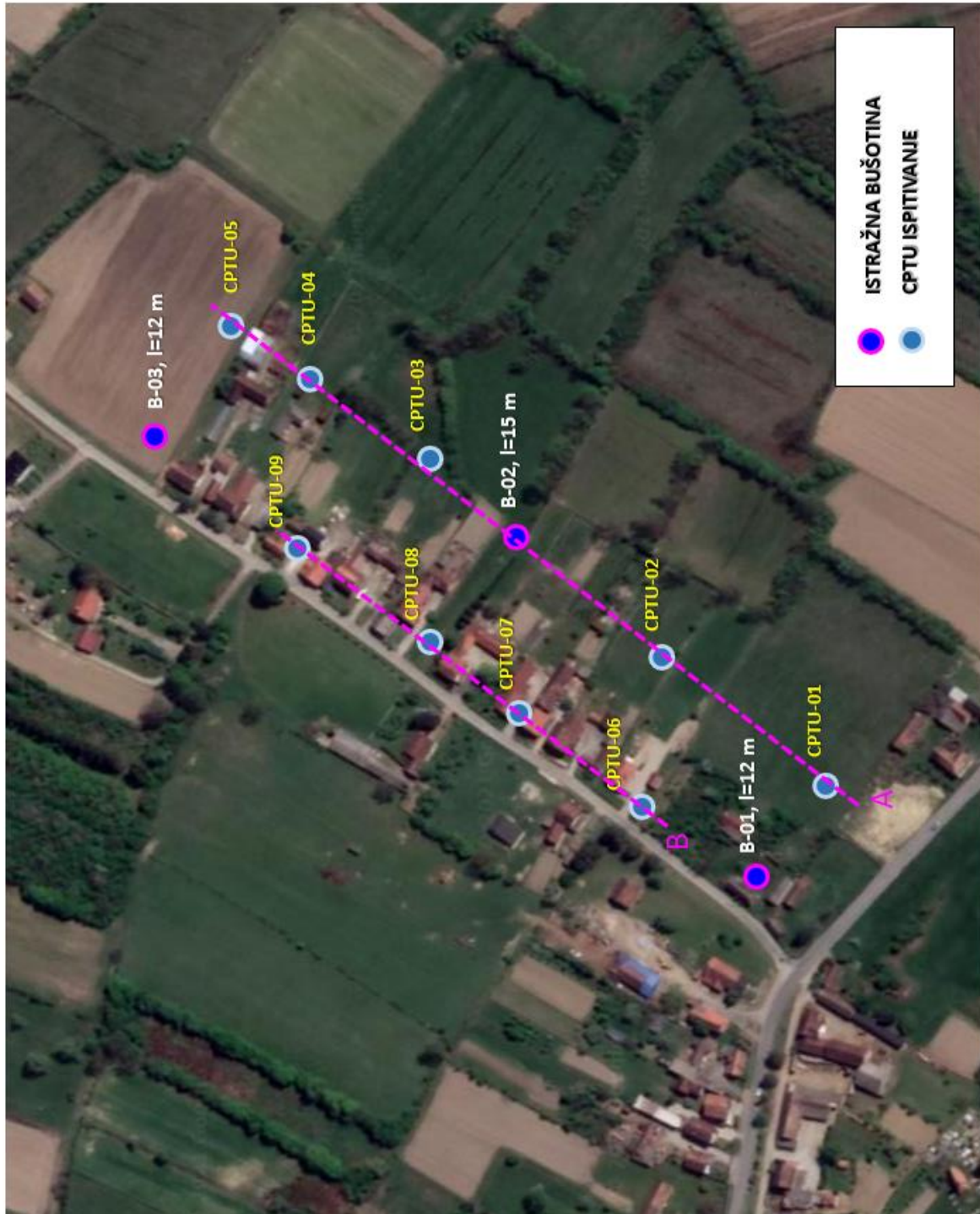
5.3. Provedeni istražni radovi

Program istražnih radova na lokaciji Brest Pokupski obuhvaćao je terenske i laboratorijske istražne radove. Terenski istražni radovi uključivali su geotehničko istražno bušenje s kontinuiranim jezgrovanjem te ispitivanje statičkom penetracijskom sondom s mjerenjem pornog tlaka. Bušotinskim ispitivanjem s kontinuiranim jezgrovanjem dobiven je uvid u geološku strukturu temeljnog tla. Na slici 20. prikazana je zona obuhvaćena geotehničkim istražnim radovima.



Slika 20. Zona obuhvata na lokaciji Bresta Pokupskog

Bušotinska ispitivanja provedena su na ukupno 3 lokacije, dok su CPTU ispitivanja provedena na 9 različitih lokacija prikazanih na slici 21. Ispitivanja su obuhvaćala područje jugoistočnog dijela ulice Desni odvojak u dva paralelna niza. U prvom nizu, koji se nalazio u polju iza stambenih objekata, provedeno je 5 ispitivanja, dok je niz uz cestu obuhvatio 4 ispitivanja. Također, provedena su istražna bušenja na jednoj lokaciji u polju te dvije uz cestu.



Slika 21. Provedeni istražni radovi na lokaciji Bresta Pokupskog

Provođenje CPT ispitivanja na predmetnoj lokaciji obavljeno je do dubina od 9 – 15 m samohodnim strojem na gusjenicama “Geotech AB – penetrometer 220” vidljivim na slici 22., a ispitivanje je obavljeno CPTU sondom s bežičnim prijenosom mjernih podataka, proizvedenom od švedske tvrtke Geotech AB. Za prikupljanje podataka na terenu koristio se programski paket CPT-Log, ver. 5.03, tvrtke Ingenjörfirman Geotech AB. U tablici 4. prikazani su tehnički podaci korištenih CPTU sondi.



Slika 22. Geotech AB – penetrometer 220

Tablica 4. Tehnički podaci korištenih CPTU sondi

Serijski broj sonde	4238	4230
ŠILJAK		
Promjer	35,7	35,7
Vršni kut	60°	60°
Površina poprečnog presjeka	10 cm ²	10 cm ²
PLAŠT		
Površina	150 cm ²	150 cm ²
FILTER		
Položaj	u ₂ (5 mm iznad šiljka)	u ₂ (5 mm iznad šiljka)
Tip	sinterirani bročani	sinterirani bročani
Vrsta fluida	glicerin	glicerin
OTPOR NA ŠILJKU		
Maksimalni otpor	50 Mpa	50 Mpa
Raspon	50 MPa	50 MPa
Faktor razmjeravanja	1388	1321
Rezolucija	0,5497 Mpa (18 bit)	0,5775 (18 bit)
POGREŠKE		
Maksimalni utjecaj temperature u neopterećenom stanju	15,9413 kPa	21,9450 kPa
Raspon temperature	0-40°C	0-40°C
TRENJE PO PLAŠTU		
Maksimalni otpor	0,5 Mpa	0,5 Mpa
Raspon	0,5 Mpa	0,5 Mpa
Faktor razmjeravanja	3689	3868
Rezolucija	0,0104 kPa (18 bit)	0,0099 kPa
POGREŠKE		
Maksimalni utjecaj temperature u neopterećenom stanju	0,3432 kPa	0,5346 kPa
Raspon temperature	0-40°C	0-40°C
PORNI TLAK		
Maksimalni otpor	2 MPa	2 MPa
Raspon	2 MPa	2 MPa
Faktor razmjeravanja	3688	4009
Rezolucija	0,0207 kPa (18 bit)	0,0190 kPa
POGREŠKE		
Maksimalni utjecaj temperature u neopterećenom stanju	0,9729 kPa	0,9120 kPa
Raspon temperature	0-40°C	0-40°C
INKLINACIJA		
	0-40°	0-40°

Unutar svake bušotine izvađeni su uzorci na referentnim dubinama u tlu te su slagani u sanduk, pri čemu je izvršena inženjerska identifikacija i opis jezgre bušotina. Izvađeni uzorci dopremljeni su u geotehnički laboratorij Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu te su na njima provedena daljnja laboratorijska ispitivanja. Nakon provedbe ispitivanja, pristupilo se obradi rezultata. Na slici 23. prikazani su pod a) izvađeni uzorci za bušotinu B1, pod b) za bušotinu B2 i pod c) za bušotinu B3.



a)



b)



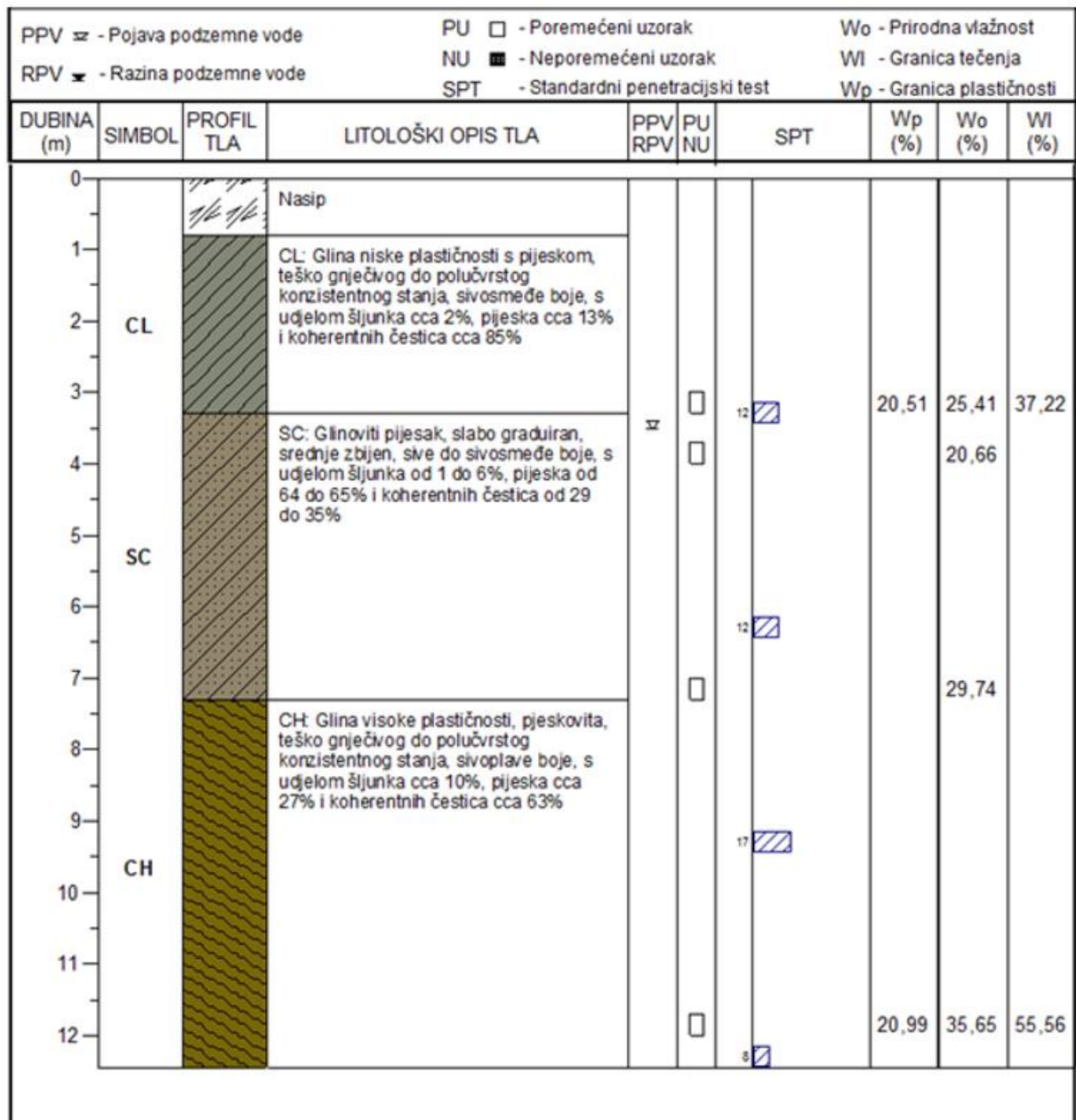
c)

Slika 23. Sanduci s izvađenim uzorcima tla a) bušotina B1; b) bušotina B2; c) bušotina B3

U nastavku su prikazani geotehnički profili tla te rezultati laboratorijskih istražnih radova.

Na mjestu bušotine B1 provedeno je istražno bušenje i terenska identifikacija na temelju čega je predložen sljedeći profil tla (slika 24.):

Do dubine 0,8 m nalazi se nasip. Od 0,8 do 3,3 m nalazi se glina niske plastičnosti s pijeskom (CL), teško gnječivog do polučvrstog konzistentnog stanja, sivosmeđe boje, s udjelom šljunka cca 2%, pijeska cca 13% i koherentnih čestica cca 85%. Od 3,3 do 7,3 m nalazi se glinoviti pijesak (SC), slabo graduiran, srednje zbijen, sive do sivosmeđe boje, s udjelom šljunka od 1 do 6%, pijeska od 64 do 65% i koherentnih čestica od 29 do 35%. Od 7,3 do 12,0 m nalazi se glina visoke plastičnosti, pjeskovita, (CH) teško gnječivog do polučvrstog konzistentnog stanja, sivoplave boje, s udjelom šljunka cca 10%, pijeska cca 27% i koherentnih čestica cca 63%. Razina podzemne vode za vrijeme bušenja bila je na površini terena.

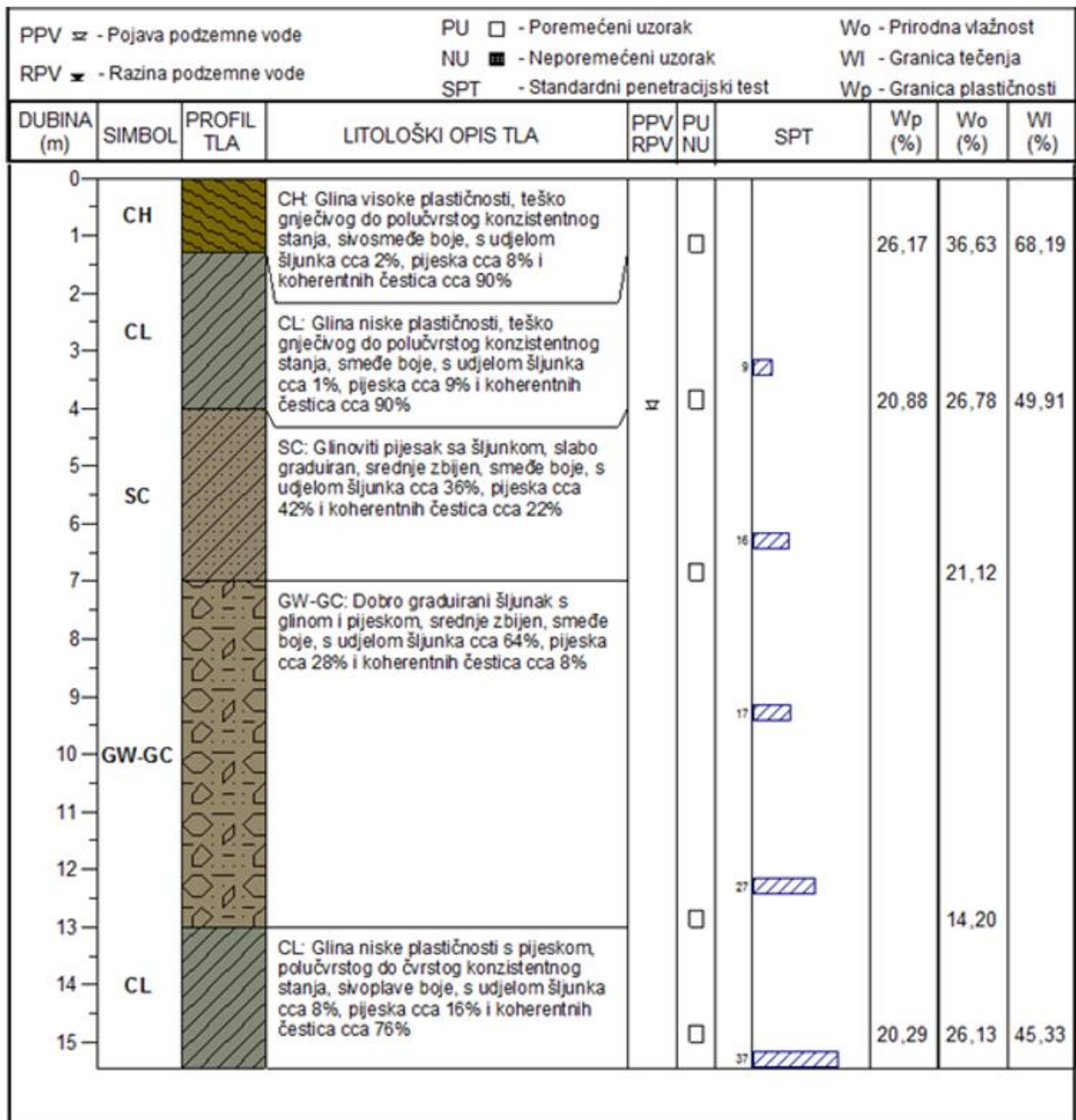


Slika 24. Karakteristični geotehnički profil tla na mjestu bušotine B1

Na mjestu bušotine B2 provedeno je istražno bušenje i terenska identifikacija na temelju čega je predložen sljedeći profil tla (slika 25.):

Do dubine 1.3 m nalazi se glina visoke plastičnosti (CH), teško gnječivog do polučvrstog konzistentnog stanja, sivosmeđe boje, s udjelom šljunka cca 2%, pijeska cca 8% i koherentnih čestica cca 90%. Od 1.3 do 4.0 m nalazi se glina niske plastičnosti (CL), teško gnječivog do polučvrstog konzistentnog stanja, smeđe boje, s udjelom šljunka cca 1%, pijeska cca 9% i koherentnih čestica cca 90%. Od 4.0 do 7.0 m nalazi se glinoviti pijesak sa šljunkom (SC), slabo graduiran, srednje zbijen, smeđe boje, s udjelom šljunka cca 36%, pijeska cca

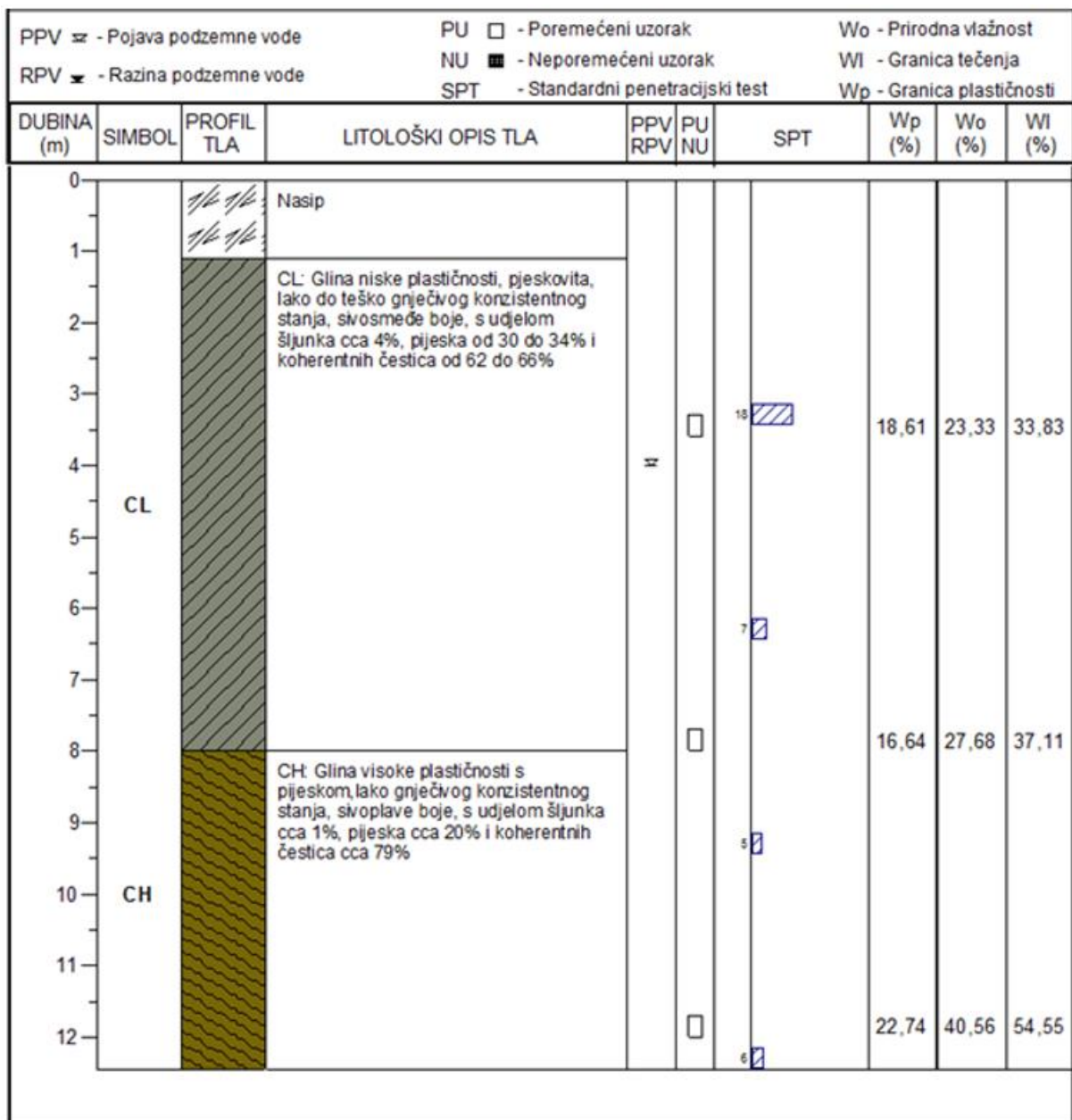
42% i koherentnih čestica cca 22%. Od 7.0 do 13.0 m nalazi dobro graduirani šljunak s glinom i pijeskom (GW-GC), srednje zbijen, smeđe boje, s udjelom šljunka cca 64%, pijeska cca 28% i koherentnih čestica cca 8%. Od 13.0 do 15.0 m nalazi se glina niske plastičnosti s pijeskom (CL), polučvrstog do čvrstog konzistentnog stanja, sivoplave boje, s udjelom šljunka cca 8%, pijeska cca 16% i koherentnih čestica cca 76%. Razina podzemne vode za vrijeme bušenja bila je na površini terena.



Slika 25. Karakteristični geotehnički profil tla na mjestu bušotine B2

Na mjestu bušotine B3 provedeno je istražno bušenje i terenska identifikacija na temelju čega je predložen sljedeći profil tla (slika 26.):

Do dubine 1.1 m nalazi se nasip. Od 1.1 do 8.0 m nalazi se glina niske plastičnosti, pjeskovita (CL), lako do teško gnječivog konzistentnog stanja, sivosmeđe boje, s udjelom šljunka cca 4%, pijeska od 30 do 34% i koherentnih čestica od 62 do 66%. Od 8.0 do 12.0 m nalazi se glina visoke plastičnosti s pijeskom (CH), lako gnječivog konzistentnog stanja, sivoplave boje, s udjelom šljunka cca 1%, pijeska cca 20% i koherentnih čestica cca 79%. Razina podzemne vode za vrijeme bušenja bila je na površini terena.

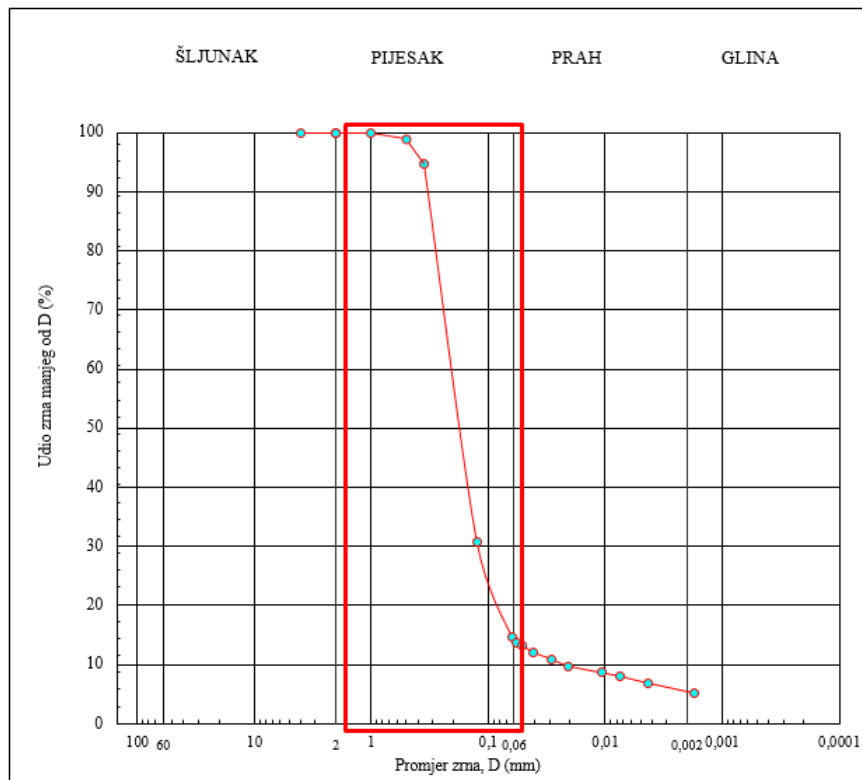


Slika 26. Karakteristični geotehnički profil tla na mjestu bušotine B3

U tablici 5. prikazani su dobiveni rezultati laboratorijskih ispitivanja, dok je na slici 27. prikazan granulometrijski dijagram uzorka uzetog 9. siječnja na lokaciji Bresta Pokupskog iz kojeg se jasno vidi da se radi o uniformnom pijesku.

Tablica 5. Rezultati laboratorijskih istražnih radova

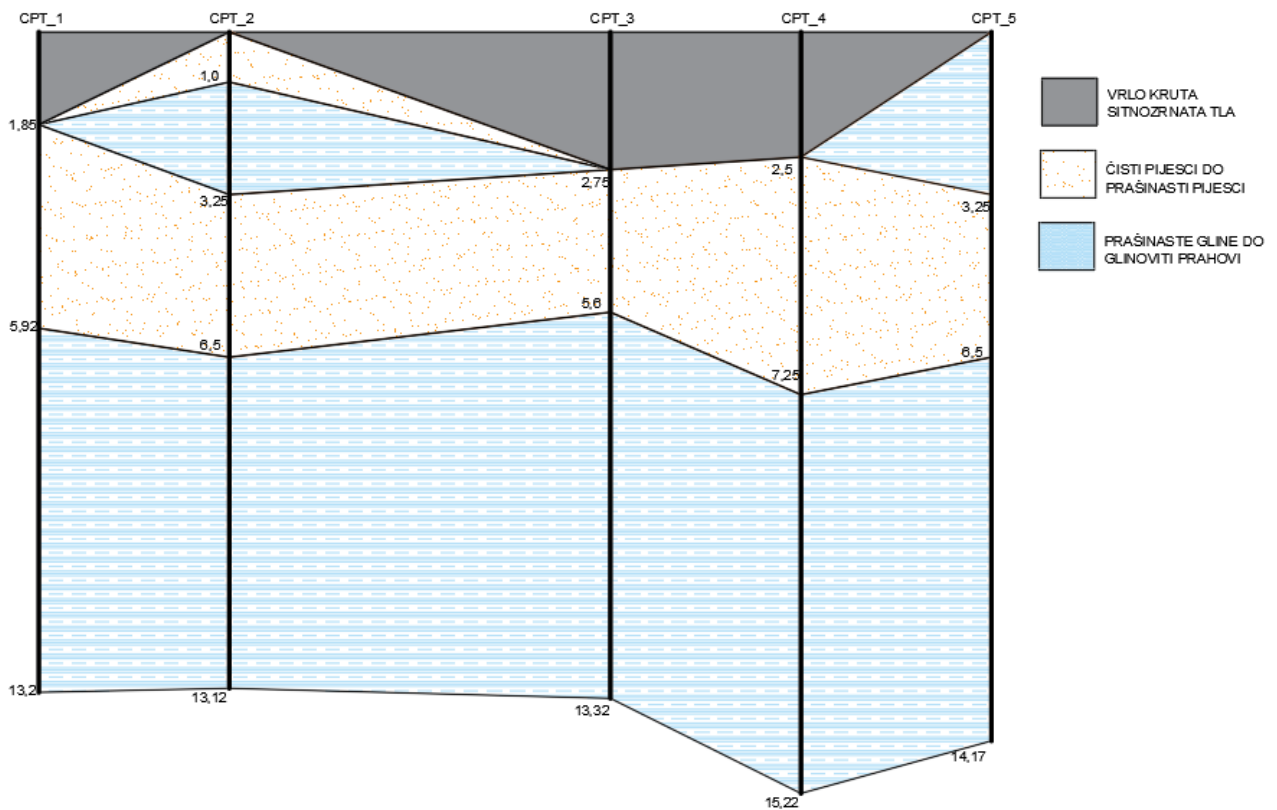
SONDA	DUBINA	W ₀	W _L	W _P	I _P	I _C	ρ	ρ _d	Granulometrijski sastav			SIMBOL
									63 - 2 mm	2 - 0,063 mm	< 0,063 mm	
									m	%	%	
B1	3,00 - 3,30	25,41	37,22	20,51	16,71	0,71	1,93	1,54	2,05	13,22	84,73	CL
	3,70 - 4,00	20,66					2,07	1,72	0,61	64,28	35,11	SC
	7,00 - 7,30	29,74					2,03	1,56	6,12	64,52	29,36	SC
	11,70 - 12,00	35,65	55,56	20,99	34,57	0,58	1,92	1,42	9,95	27,02	63,03	CH
B2	1,00 - 1,30	36,63	68,19	26,17	42,02	0,75	1,80	1,31	1,49	8,17	90,34	CH
	3,70 - 4,00	26,78	49,91	20,88	29,03	0,80	2,02	1,59	1,27	8,95	89,78	CL
	6,70 - 7,00	21,12					2,25	1,86	36,41	41,79	21,80	SC
	12,70 - 13,00	14,20					2,30	2,02	63,57	28,37	8,06	GW-GC
	14,70 - 15,00	26,13	45,33	20,29	25,04	0,77	1,98	1,57	8,25	15,58	76,17	CL
B3	3,30 - 3,60	23,33	33,83	18,61	15,22	0,69	1,98	1,60	3,94	30,00	66,06	CL
	7,70 - 8,00	27,68	37,11	16,64	20,47	0,46	2,04	1,60	3,84	33,76	62,40	CL
	11,70 - 12,00	40,56	54,55	22,74	31,81	0,44	1,77	1,26	1,57	19,59	78,84	CH



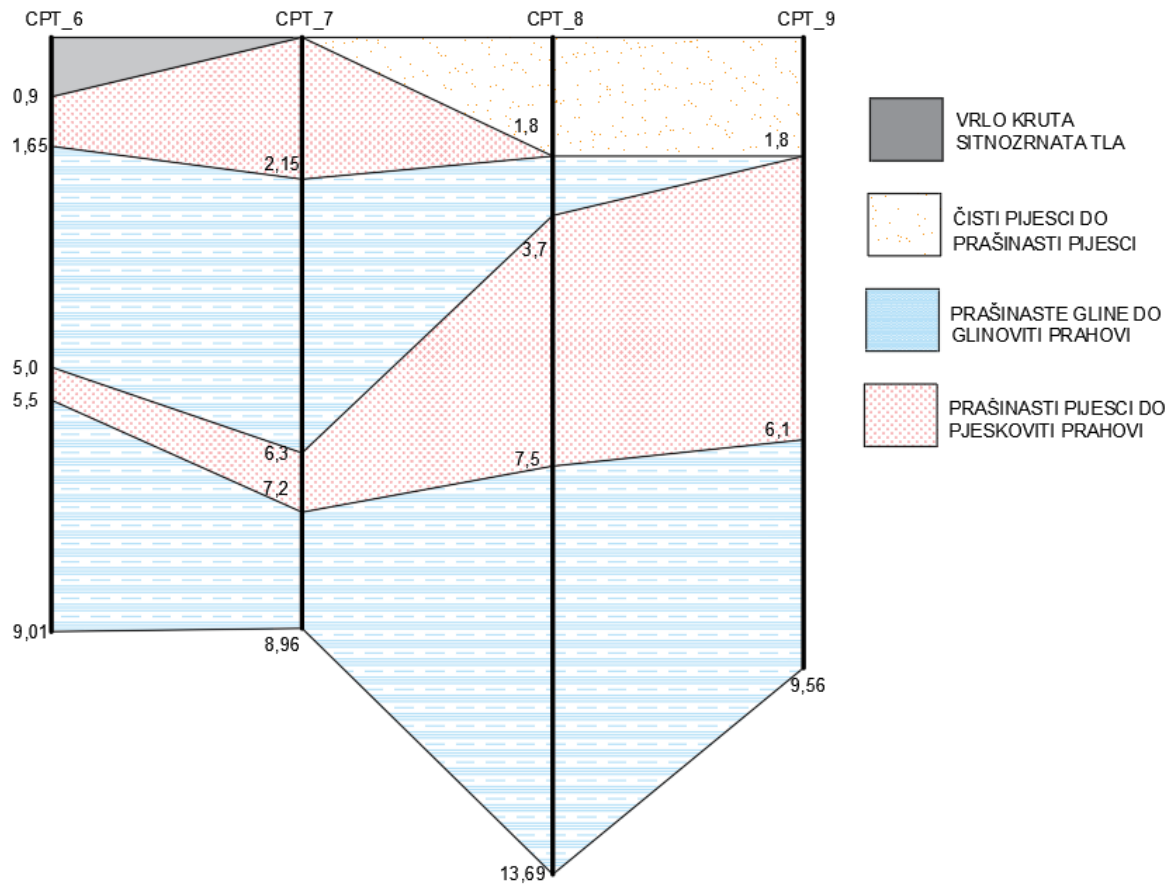
Slika 27. Granulometrijski dijagram uzorka tla iz Bresta Pokupskog

6. Analize evaluacije likvefakcijskog potencijala

Provedenim terenskim ispitivanjima, na temelju rezultata dobivenih CPTU ispitivanjem određen je karakteristični geotehnički profil tla. Profil tla prikazan na slici 28. i 29. određen je prema klasifikacijskom dijagramu kojeg je razvio Robertson 1990. godine. Zasebno za svaku bušotinu u kojoj je provedeno CPTU ispitivanje određeni su slojevi tla. Usporedbom rezultata laboratorijskih ispitivanja i slojeva određenih klasifikacijskim dijagramom iz CPTU rezultata, potvrđen je profil tla na pilot području te je napravljen 3D model tla prikazan na slici 30.

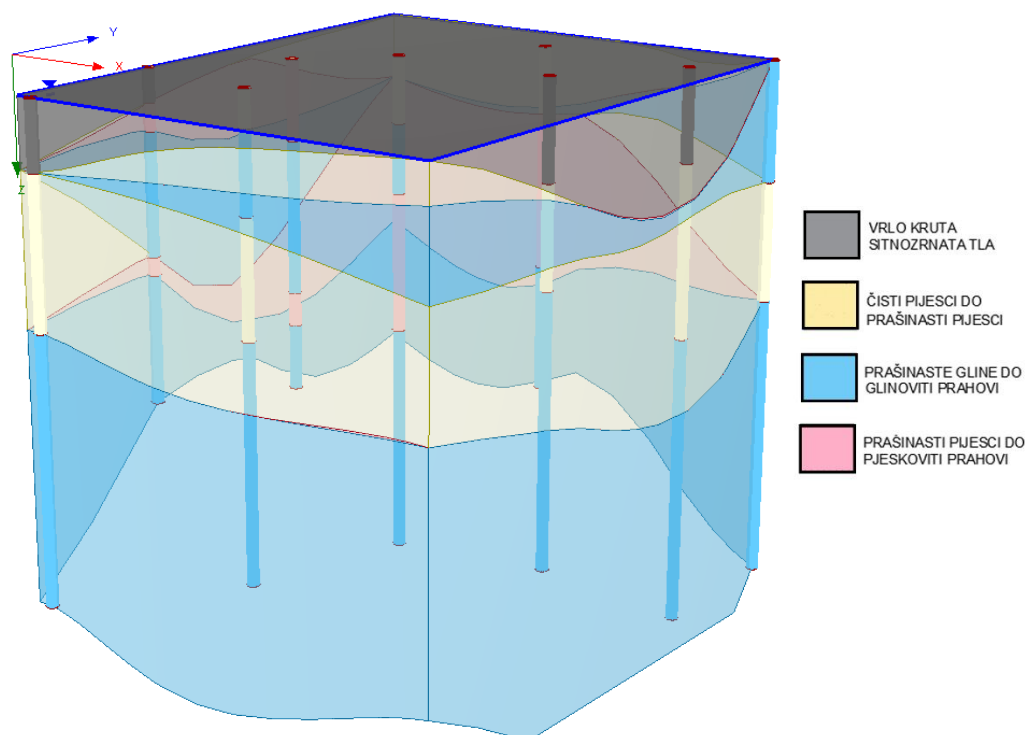


Slika 28. Shematski prikaz rasporeda slojeva dobivenih prema rezultatima CPTU ispitivanja za profil tla u polju (profil A)

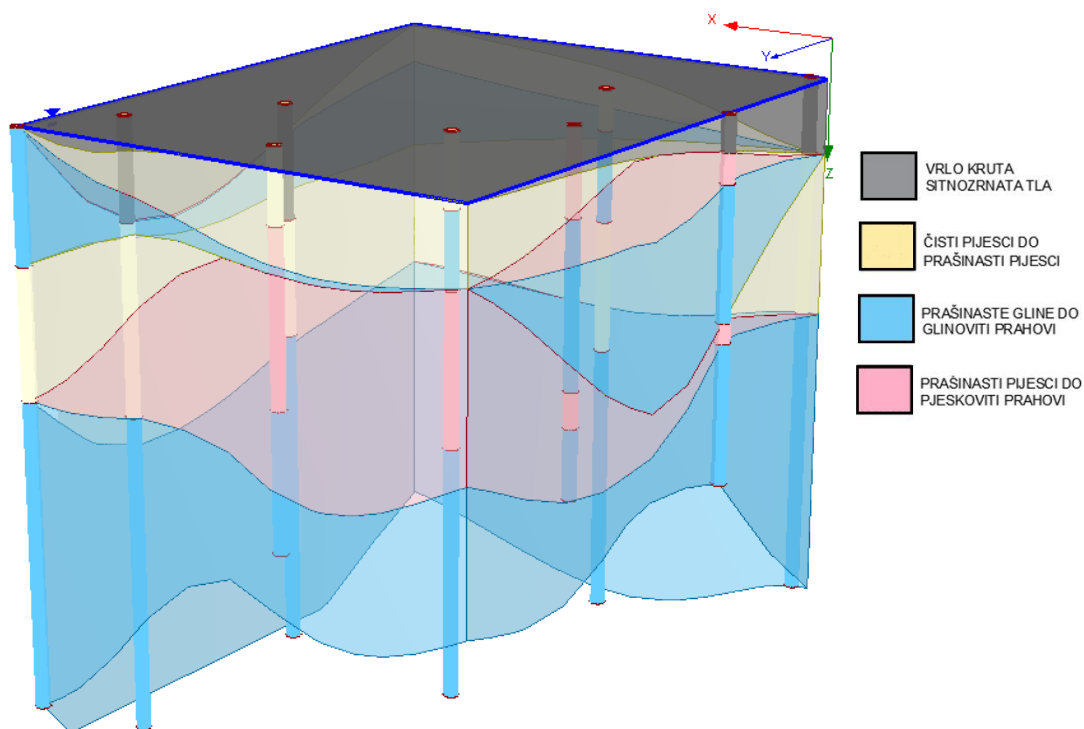


Slika 29. Shematski prikaz rasporeda slojeva dobivenih prema rezultatima CPTU ispitivanja za profil tla uz cestu (profil B)

a)



b)



Slika 30. 3D model tla pilot područja a) profil tla u polju (profil A); b) profil tla uz cestu (profil B)[28]

6.1. Ocjena likvefakcijskog potencijala u Phytom programskom okruženju

Jedan od ciljeva provođenja geotehničkih ispitivanja, uz određivanje uslojenosti tla i fizikalno – mehaničkih karakteristika tla, je i evaluacija likvefakcijskog potencijala. Kako je prethodno navedeno, u praksi se najčešće koriste postupci određivanja potencijala zasnovani na korelacijama rezultata terenskih ispitivanja. Budući da tlo koje je jednom likvefiralo nije nužno steklo dovoljnu otpornost na likvefakciju, moguća je ponovna pojava prilikom sljedećeg potresa. Kako bi se procijenila vjerojatnost pojave likvefakcije na Zavodu za geotehniku, Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu razvijen je kod u Phytom programskom okruženju. Budući da je ocjena likvefakcijskog potencijala zasnovana na rezultatima CPTU ispitivanja, kao ulazni podatci koriste se otpor na šiljku sonde q_t , nekorigirana vrijednost trenja po plaštu sonde f_s te porni tlak u_2 .

Na osnovu ulaznih podataka klasifikacija tla, razvijenim kodom, vrši se prema Robertsonovom klasifikacijskom dijagramu iz 2016. godine. Tlo se klasificira u 3 kategorije: glina ('clay like'), pijesak ('sand like') i kao prijelazno tlo ('transitional') pri čemu svaka od kategorija ima dodatnu oznaku dilatativnog ili kontraktivnog ponašanja tla. Nakon što je izvršena klasifikacija tla kreće se u određivanje CSR-a i CRR-a. CSR određen je prema metodi Seed-a i Idriss-a iz 1971. godine kao što je prikazano u izrazu (14). Dok je CRR određen prema metodi Idriss-a i Boulanger-a iz 2014., izraz (20). Nakon određivanja faktora sigurnosti, koji je omjer dvaju prethodno navedenih koeficijenata CSR-a i CRR-a, moguće je odrediti vjerojatnost likvefakcije prema izrazu (21) kojeg je razvio Juang 2002. godine. Tablica 6. prikazuje sumarnu listu korištenih izraza u kodu.

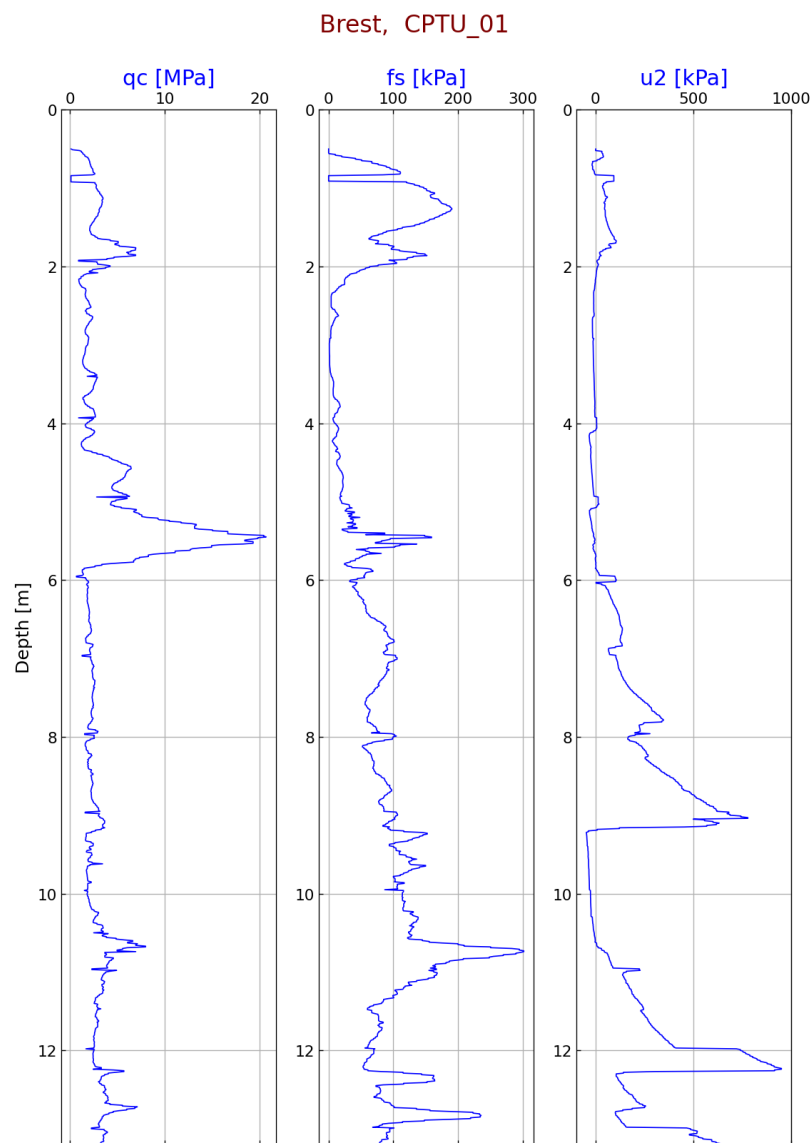
Tablica 6. Sumarna lista korištenih izraza

Koeficijent cikličkog naprezanja	$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma_v'} = 0.65 * \left(\frac{a_{max}}{g} \right) * \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \right) * r_d$	Seed i Idriss (1971)
Koeficijent cikličke otpornosti	$CRR_{7.5} = exp * \left(\left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} \right) + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right)$	Idriss i Boulanger (2014)
Faktor sigurnosti	$FS = \left(\frac{CRR_{7.5}}{CSR} \right) * MSF$	
Vjerojatnost likvefakcije	$P_L = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{F_s}{A} \right)^B \right)}$	Juang (2002)

Prethodno opisani postupak određivanja likvefakcijskog potencijala pomoću razvijenog koda može se podijeliti u tri glavne kategorije:

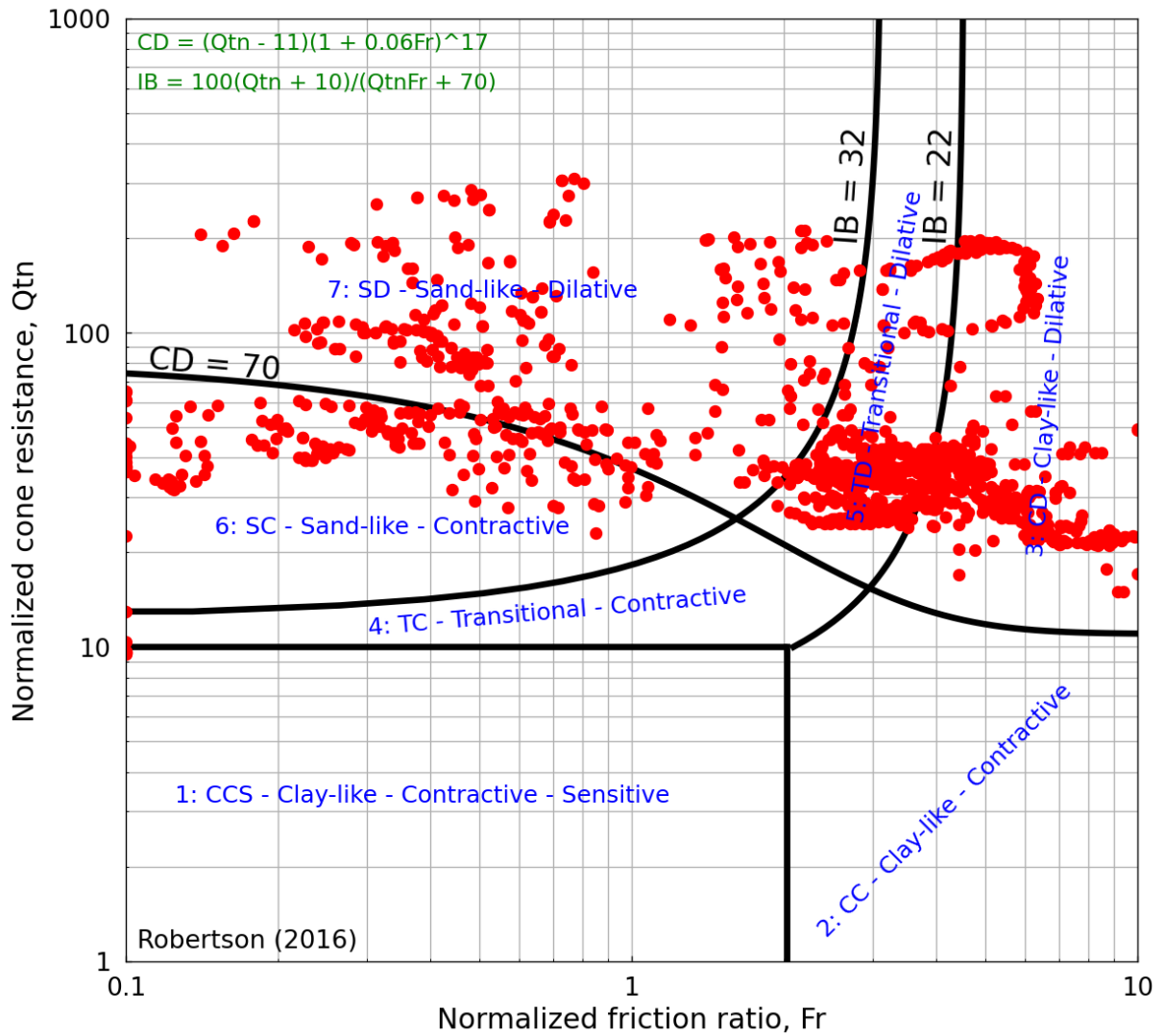
1. Definiranje profila tla na temelju ulaznih podataka (slika 31. i slika 32.)
2. Izračun koeficijenta cikličkog naprezanja (CSR) i koeficijenta cikličke otpornosti (CRR) (slika 33.)
3. Određivanje faktora sigurnosti i vjerojatnosti pojave likvefakcije (slika 34.)

Zbog lakšeg razumijevanja principa rada razvijenog koda u nastavku su prikazani rezultati određivanja likvefakcijskog potencijala za CPTU_1, pri $M=6$, $a_{\max}=0.15g$ te razini vode na površini terena.



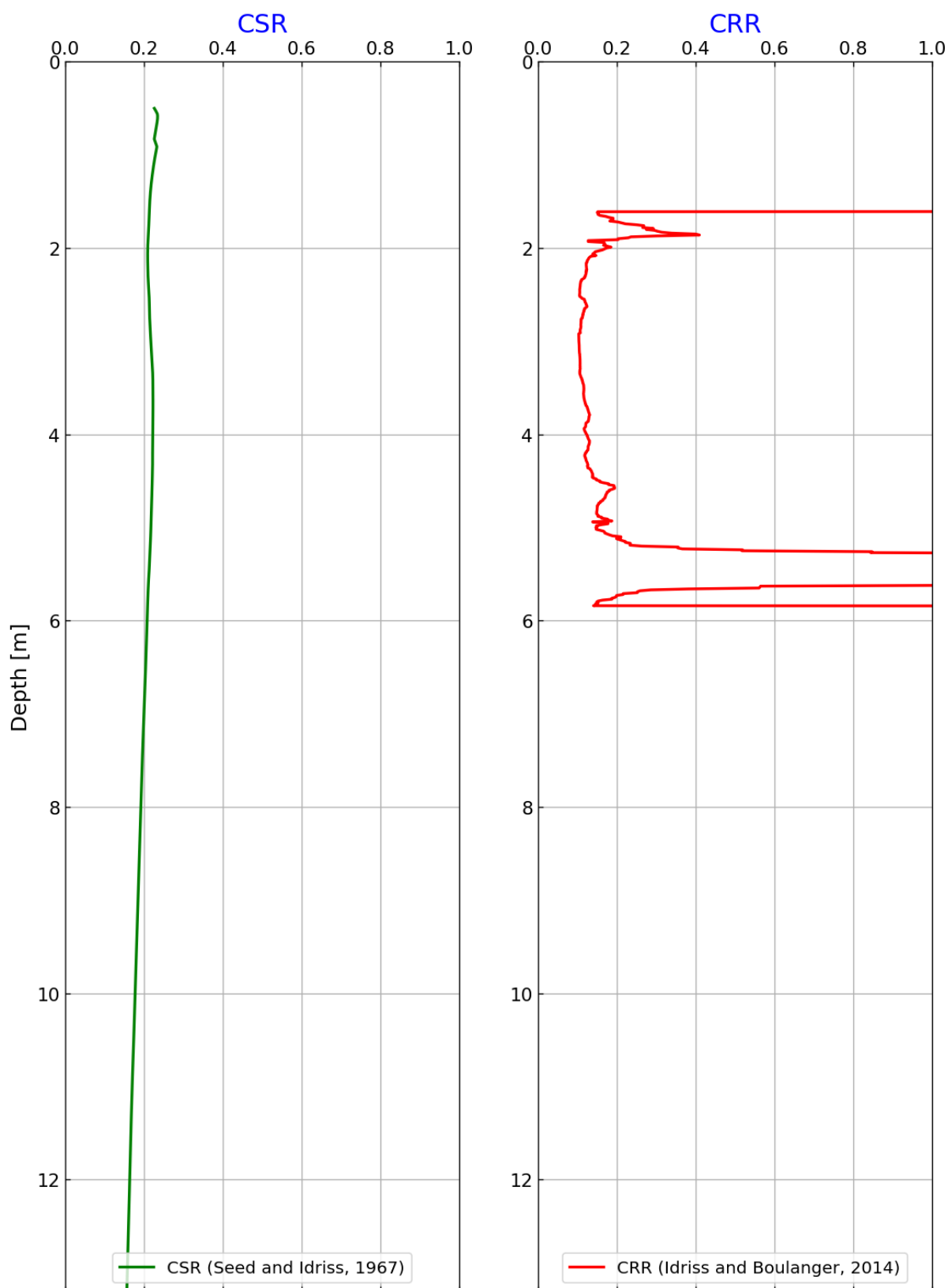
Slika 31. Ulazni podatci, s lijeva na desno: otpor na šiljku sonde q_c , nekorrigirana vrijednost trenja po plaštu sonde f_s te porni tlak u_2

Brest, CPTU_01



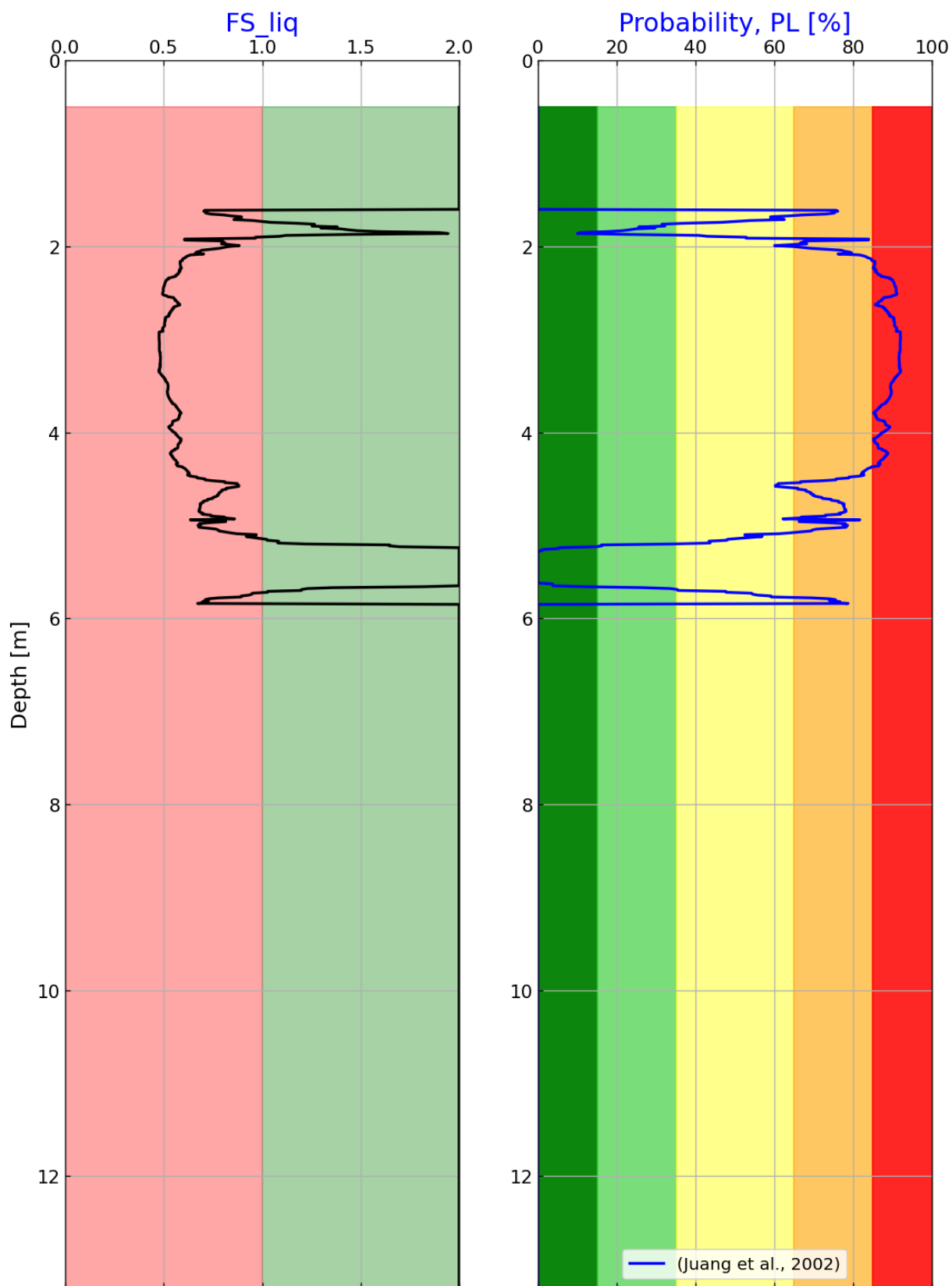
Slika 32. Raspored točaka u modificiranom klasifikacijskom dijagramu, Robertosn (2016. godine)

Brest, CPTU_01, $M=6.0$, $a=0.15g$,



Slika 33. Vrijednost koeficijenta cikličkog naprezanja (CSR) i koeficijenta cikličke otpornosti (CRR)

Brest, CPTU_01, M=6.0, a=0.15g,



Slika 34. Vrijednost faktora sigurnosti (FS) i vjerojatnosti pojave likvefakcije (PL)

U nastavku je prikazan kod razvijen na Zavodu za geotehniku, Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu za potrebe određivanja likvefakcijskog potencijala u Python programskom okruženju.

CPT_GF

```
# -*- coding: utf-8 -*-
```

```
import numpy as np
import pandas as pd
import bibCPT as CPT
```

```
#file = 'cptu.3'
#file1 = file + '.cpt'
#[z, qc, fs, u2] = CPT.read_cpt(file1)
```

```
#file = 'cptu.2'
#file1 = file + '.txt'
#[z, qc, fs, u2] = CPT.read_txt(file1)
```

```
file = 'CPTU_01'
file1 = file + '.xlsx'
[z, qc, fs, u2] = CPT.read_xlsx(file1)
```

```
gwl = 2.00 # ground water level
M = 2.0 # Earthquake magnitude
pga = 0.05 # amax/g = maximum horizontal acceleration (as a
fraction of gravity)
```

```
qc = np.clip(qc, 1e-1, None)
fs = np.clip(fs, 1e-1, None)
```

```
ar = 0.8 # net area ratio
qc = 1000*qc # qc from MPA to kPa
```

```
qt = CPT.calc_qt(qc, ar, u2)

gammaw = 9.81 # unit water weight (kN/m3)
Pa = 101.325 # atmospheric pressure (kPa)
#gamma=11.849+0.109*np.log10(z)+2.595*np.log10(fs)+0.561*np.log10(qt)
gamma = CPT.calc_unit_weight(fs, qt, Pa, gammaw)
gamma = np.clip(gamma, 13, 32)

gamma_predrill = 17
predrill_depth = z[0]

sigv0 = CPT.calc_sigma_v(z, gamma, gamma_predrill)

u0 = CPT.calc_pore_pressure(z, gw1, gammaw)

sigv0c = CPT.calc_sigma_veff(sigv0, u0)

Fr = CPT.calc_Fr_values(fs, qt, sigv0)
Fr = np.clip(Fr, 0.1, 10.0)

[Qtn, Ic, n] = CPT.calc_Qtn_Ic_n_values(qt, sigv0, sigv0c, Fr, Pa)

su = CPT.calc_su(qt, sigv0, Nkt=14)

Bq = CPT.calc_Bq(qt, sigv0, u2, u0)

FC = CPT.calc_fc(Ic)

E = CPT.calc_E(Ic,qt,sigv0)

Ms = CPT.calc_Ms(Ic,qt,sigv0,Qtn)

N60 = CPT.calc_N60(qt, Pa, Ic)

kh = CPT.calc_kh(Ic)
```

```
SBTn = CPT.profile(z, Ic, Qtn, Fr)
```

```
rd = CPT.calc_rd(z, M)
```

```
CSR = CPT.calc_csr(sigv0c, sigv0, pga, rd, gwl, z)
```

```
[m, qc1N, dqc1N, qc1Ncs] = CPT.calc_m_CN_qc1N_dqc1N_qc1Ncs(sigv0c, qt, Pa, FC)
```

```
[Ksigma, Ksigma] = CPT.calc_k_sigma(sigv0c, qc1Ncs, Pa)
```

```
MSF = CPT.calc_msf(M, qc1Ncs)
```

```
CRR_M7p5 = CPT.calc_crr_m7p5_from_qc1ncs_capped(qc1Ncs, gwl, z, Ic, SBTn, FC,  
i_c_limit=3.5, c_0=2.8)
```

```
CRR = CPT.crr_m(Ksigma, MSF, CRR_M7p5)
```

```
FS_unlimited = CRR / CSR
```

```
FS_liq = np.where(FS_unlimited > 2, 2, FS_unlimited)
```

```
PL_unlimited = 1/(1 + (FS_unlimited/1.0)**3.3)*100
```

```
PL = np.where(PL_unlimited < 1, 0, PL_unlimited)
```

```
Slope = 0.0 #S - ground slope as a percentage for 0.2% < S <3.5%
```

```
[LD, VD] = CPT.calc_LD_VD(z, FS_liq, qc1Ncs, Slope, )
```

```
w_fig = 11
```

```
h_fig = 16
```

```
ttl = 'Brest, ' + file
```

```
ttl1 = 'Brest, ' + file + ', M=' + str("%.1f" % M) + ', a=' + str("%.2f" % pga) + 'g,'
```

```
CPT.graph_data(w_fig, h_fig, z, qc, fs, u2, ttl)
CPT.graph_chart(Qtn, Fr, ttl)
CPT.graph_profile(w_fig, h_fig, z, SBTn, ttl)
CPT.graph_Ic_su(w_fig, h_fig, z, Ic, su, ttl)
CPT.graph_gamma_FC(w_fig, h_fig, z, gamma, FC, ttl)
CPT.graph_N60_E(w_fig, h_fig, z, N60, E, ttl)
CPT.graph_kh_Ms(w_fig, h_fig, z, kh, Ms, ttl)

CPT.graph_CSR_CRR(w_fig, h_fig, z, CSR, CRR, ttl1)
CPT.graph_FS_PL(w_fig, h_fig, z, FS_liq, PL, ttl1)
CPT.graph_LD_VD(w_fig, h_fig, z, LD, VD, ttl1)

CPT.graph_FS_liq(w_fig, h_fig, z, FS_liq, SBTn, ttl1)
CPT.graph_profile_PL(w_fig, h_fig, z, SBTn, PL, ttl1)

izlaz=np.column_stack((z, SBTn, PL,FS_liq))
writer = pd.ExcelWriter('PL.xlsx')
izlaz1 = pd.DataFrame(izlaz, columns=['d [m]', 'SBTn','PL', 'FS_liq'])
izlaz1.to_excel(writer,'Sheet1',index=False)
writer.save()
```

6.2. Analize osjetljivosti likvefakcijskog potencijala o ulaznim parametrima

Prilikom ocjene likvefakcijskog potencijala kao ulazni parametri korištene su vrijednosti otpora na šiljku sonde q_c , nekorigirana vrijednost trenja po plaštu sonde f_s te porni tlak u_2 . Budući da je literaturnim pregledom utvrđeno da na vjerojatnost pojave likvefakcije utječu vrijednosti magnituda, akceleracija i razine podzemne vode provedena je varijacija svake od prethodno spomenutih varijabli, dok su ostale dvije održavane konstantnima. S obzirom da na vrijednost likvefakcijskog potencijala utječe i razina podzemne vode, provedene su i analize sa spušenom razinom vode za 2 m za profil A u polju. Za profil B uz prometnicu provedena je samo analiza s razinom podzemne vode na površini jer se promjenom razine vode mijenjala i klasifikacija tla, pa su određeni likvefabilni slojevi postali nelikvefabilni. Analiza varijacije je provedena u cilju ocjene utjecaja pojedinog parametra na vjerojatnost pojave likvefakcije. Varijacija je izvršena za svih 9 CPTU ispitnih lokacija

zasebno. Tablica 7. prikazuje varijacije akceleracija u ovisnosti o magnitudi za razinu podzemne vode na površini terena ($d_w = 0$ m), te razinu podzemne vode 2 m ispod površine terena ($d_w = 2$ m).

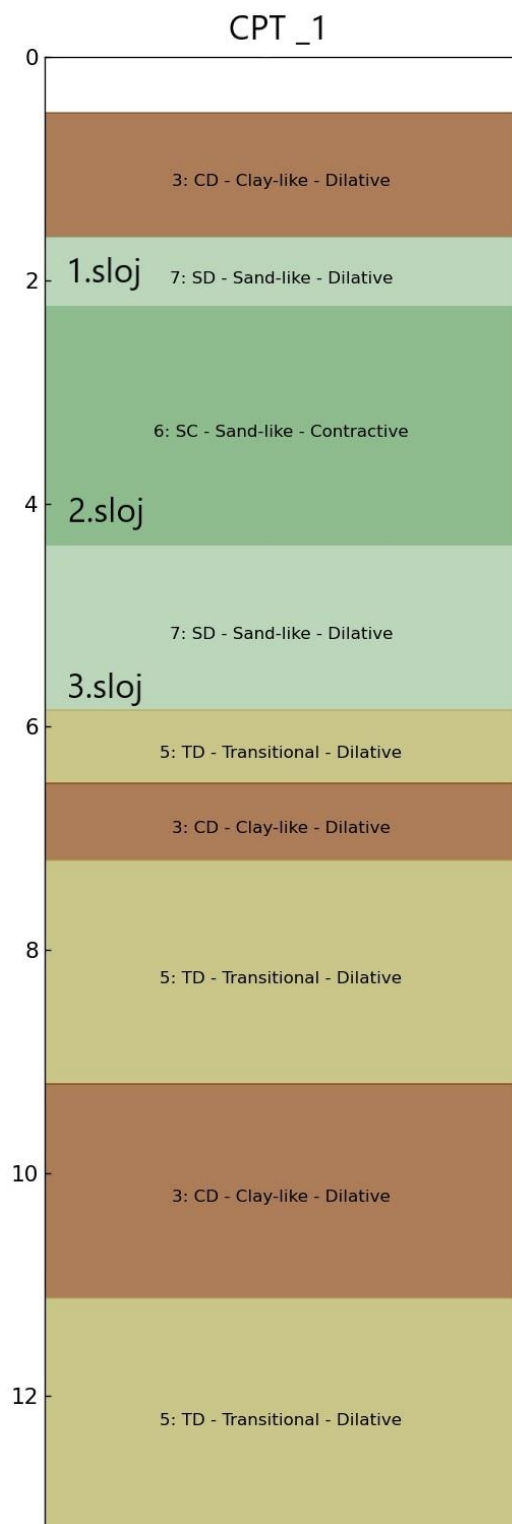
Tablica 7. Varijacija ulaznih parametara pri analizi za razinu podzemne vode $d_w=0$ m i $d_w=2$ m

$d_w = 0$ m	M = 2	M = 3	M = 4	M = 5	M = 6	M = 7
$d_w = 2$ m						
a_{max}	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40

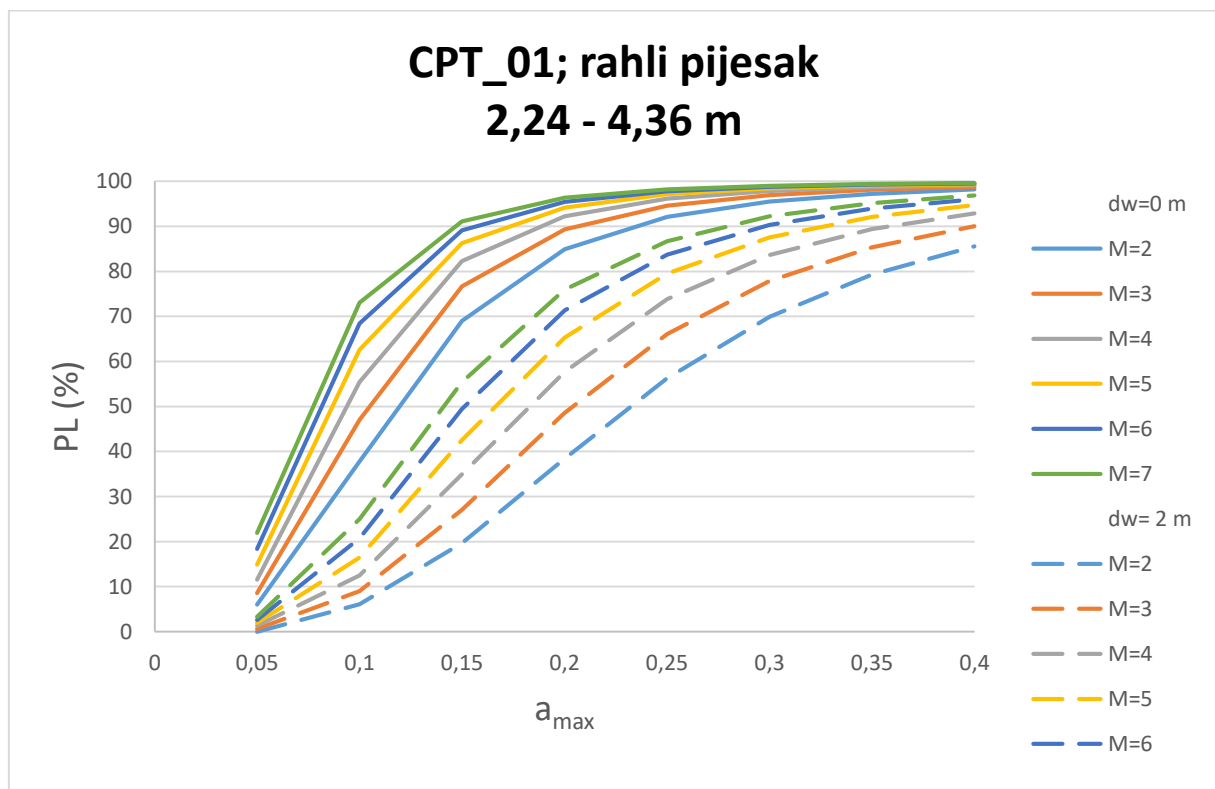
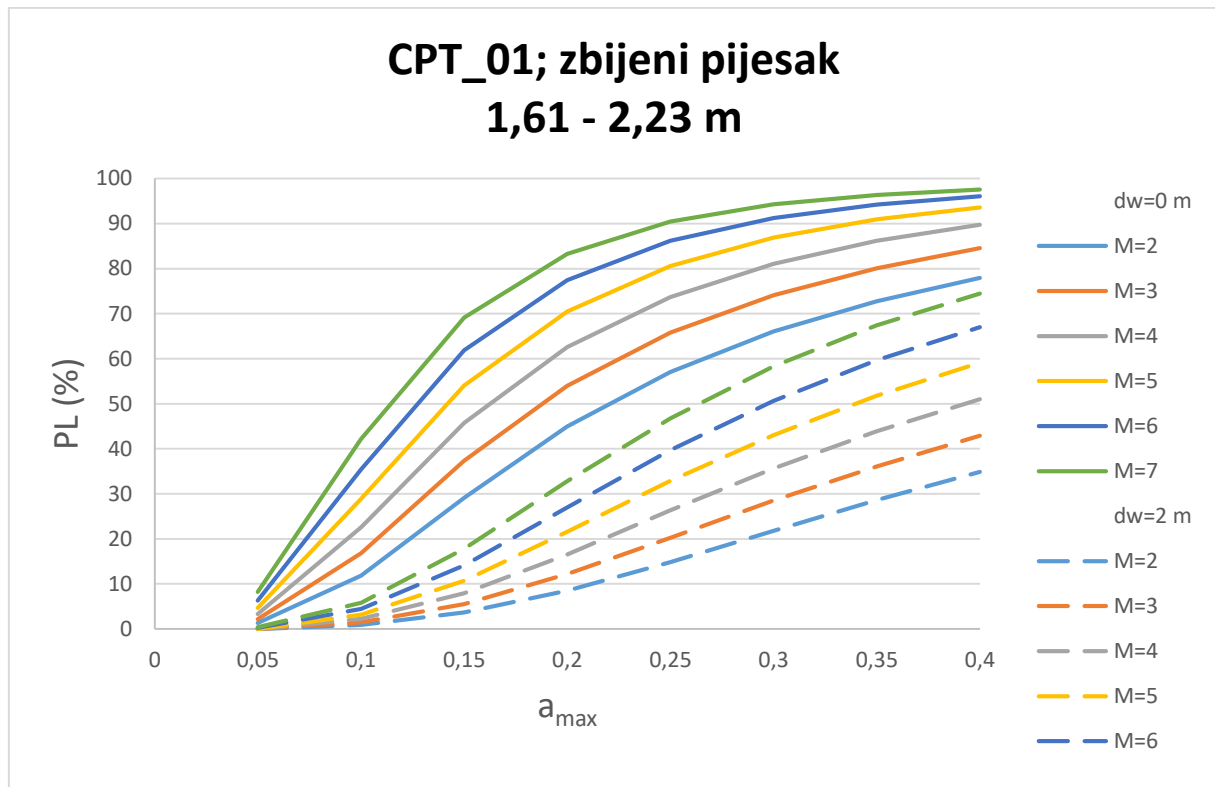
Rezultati analiza likvefakcijskog potencijala prikazani su u obliku dijagrama, kod kojih je na apsici prikazana vrijednost maksimalnog vršnog ubrzanja, dok je na ordinati vjerojatnost pojave likvefakcije. Vrijednost magnitude prikazana je linijama u dijagramu. Puna linija prikazuje vjerojatnost pojave likvefakcije za razinu podzemne vode na površini, dok isprekidana linija predstavlja vjerojatnost pojave u trenutku kada je podzemna voda na razini 2 m ispod površine terena. Za svaku ispitnu lokaciju napravljena je zasebna analiza. Budući da se rahli i zbijeni slojevi pijeska različito ponašaju pod djelovanjem potresnog opterećenja, rezultati vjerojatnosti pojave za ova dva sloja prikazani su odvojeno. U nastavku rada prikazani su dobiveni dijagrami vjerojatnosti pojave likvefakcije. Dijagrami su dobiveni uprosječavanjem rezultata vjerojatnosti pojave likvefakcije za svaki rahli i zbijeni sloj pijeska. Uprosječavanje je rađeno u Excel-u metodom srednjih vrijednosti. Srednje vrijednosti određene su za svaku prethodno navedenu varijaciju parametara kao što je prikazano u tablici 7.

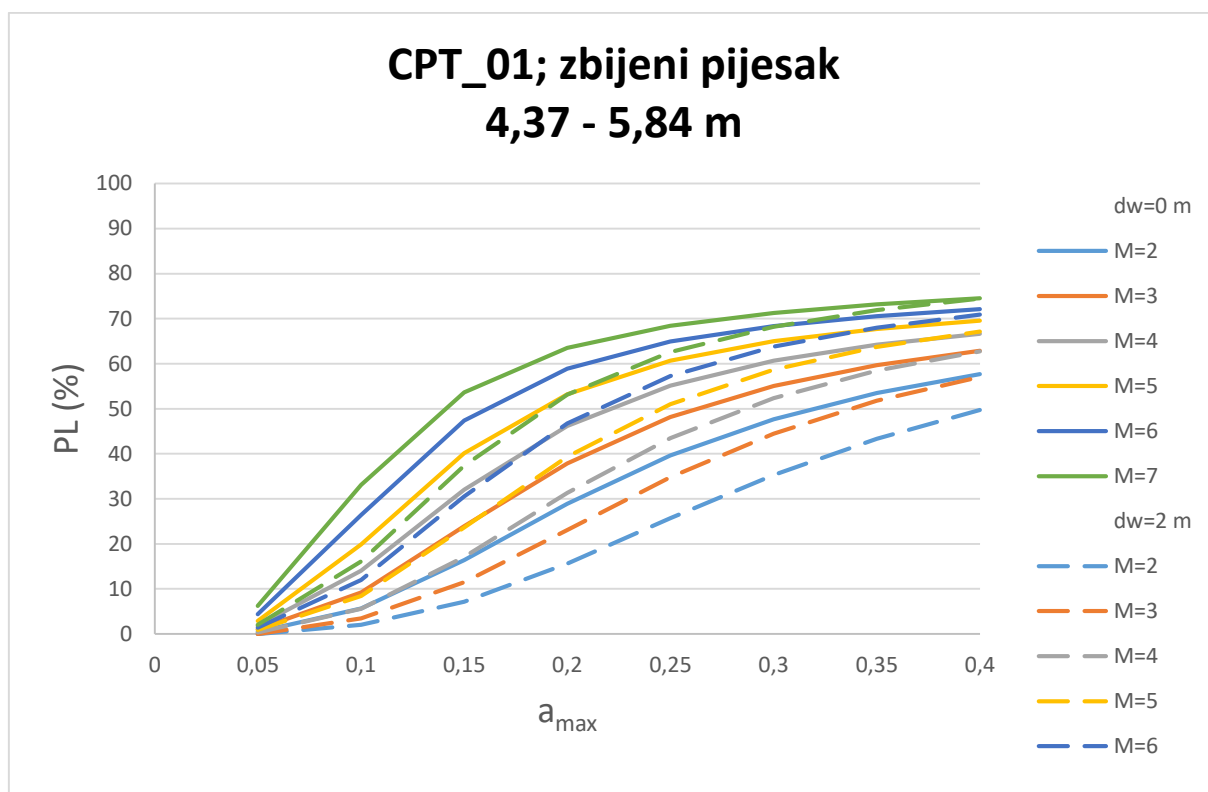
6.3. Rezultati analize osjetljivosti likvefakcijskog potencijala

CPT_1



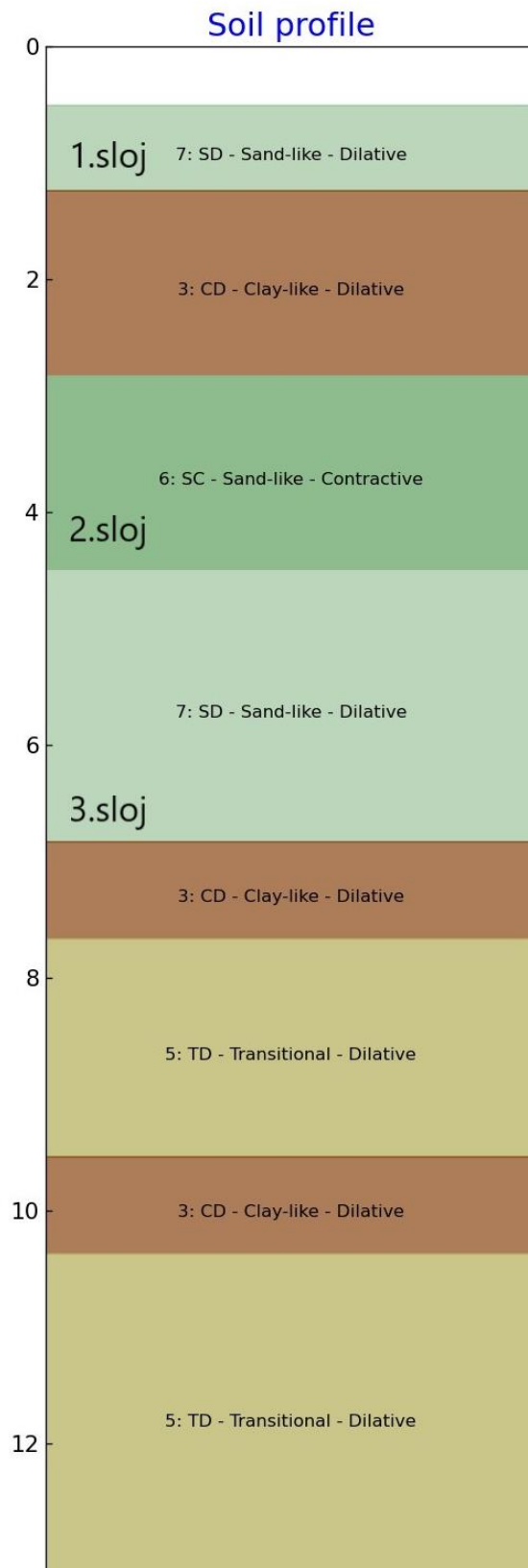
Slika 35. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_1



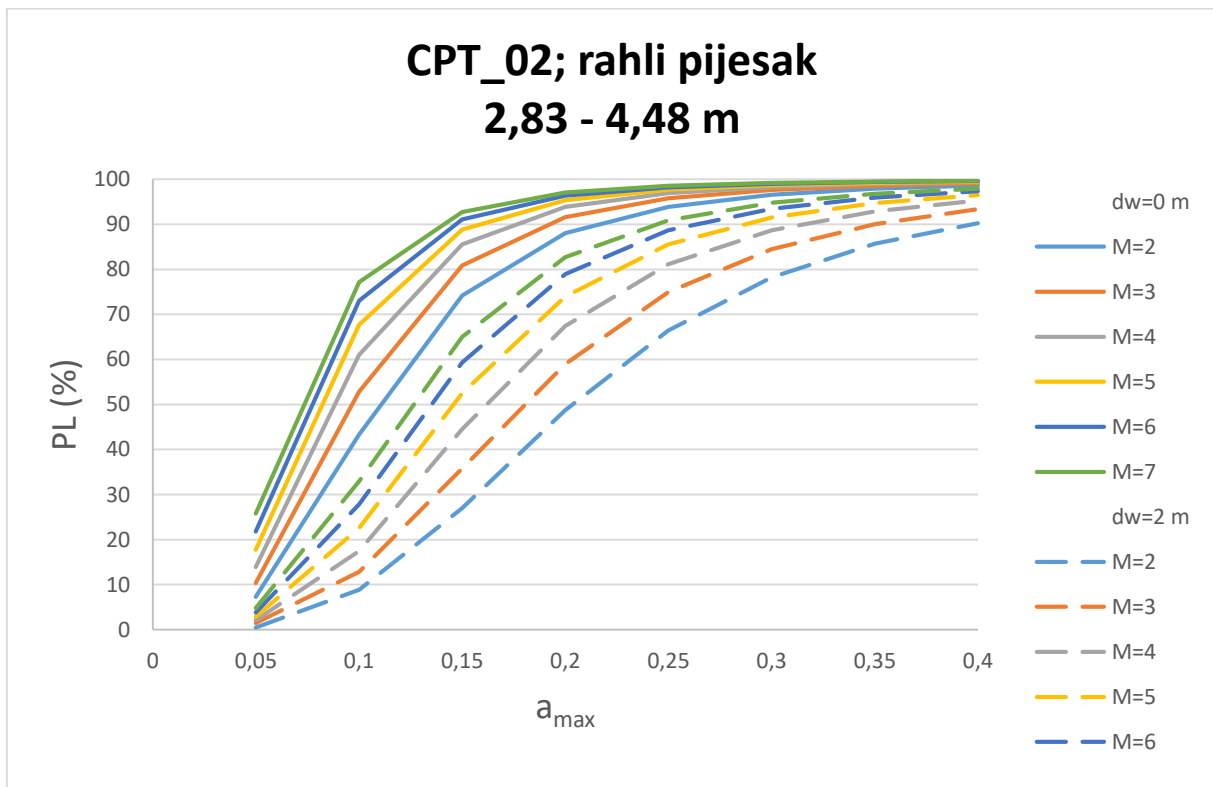
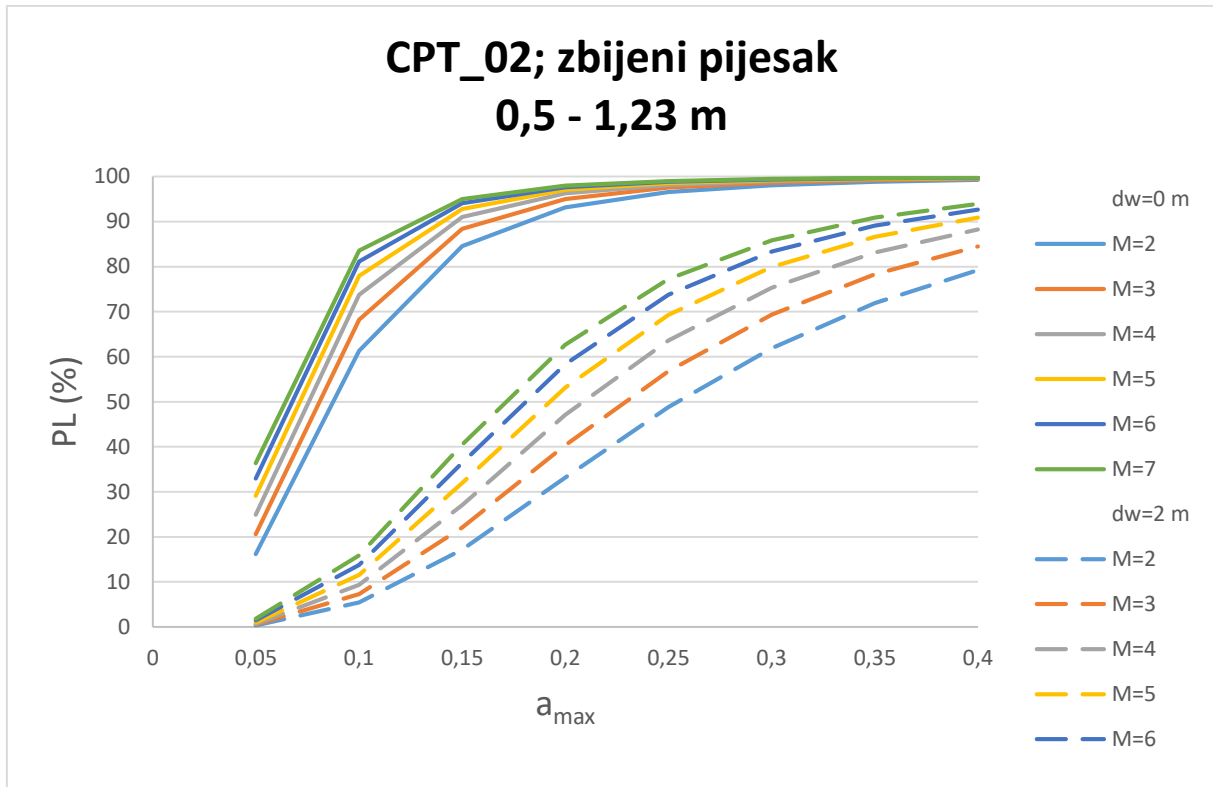


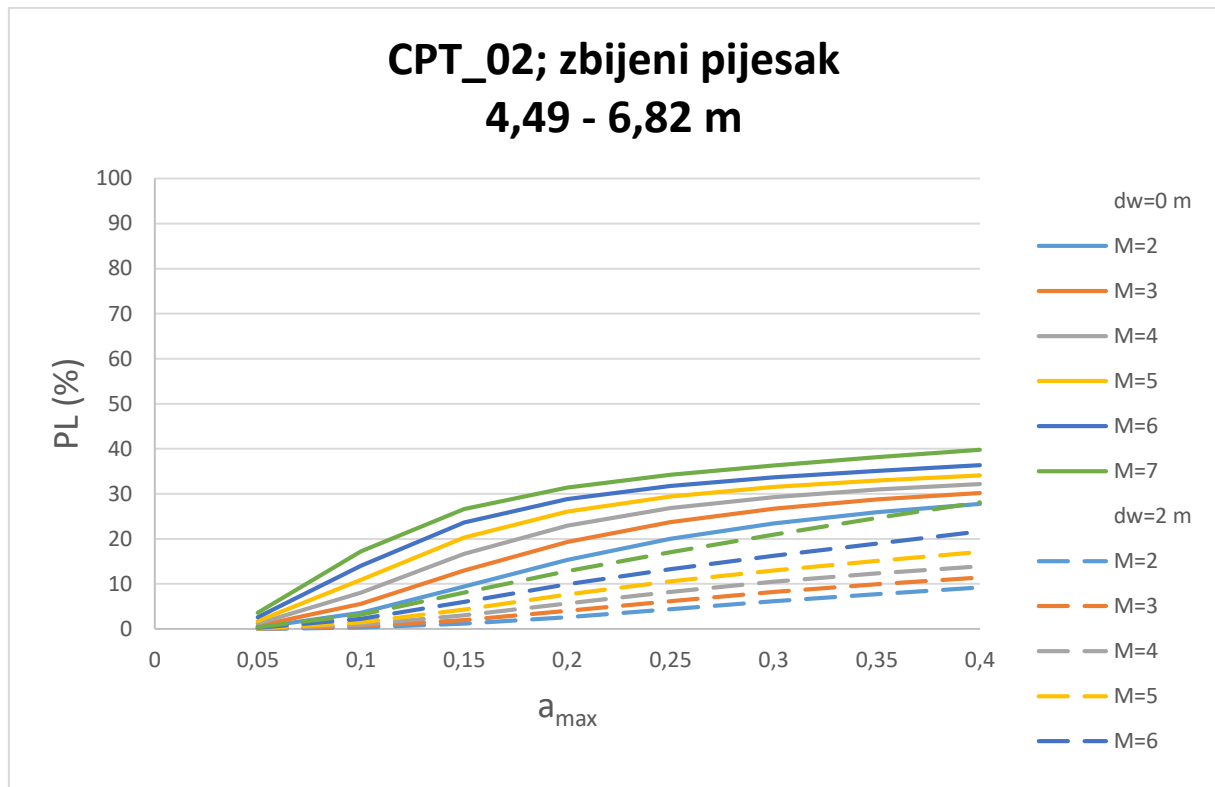
Slika 36. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_1

CPT_2



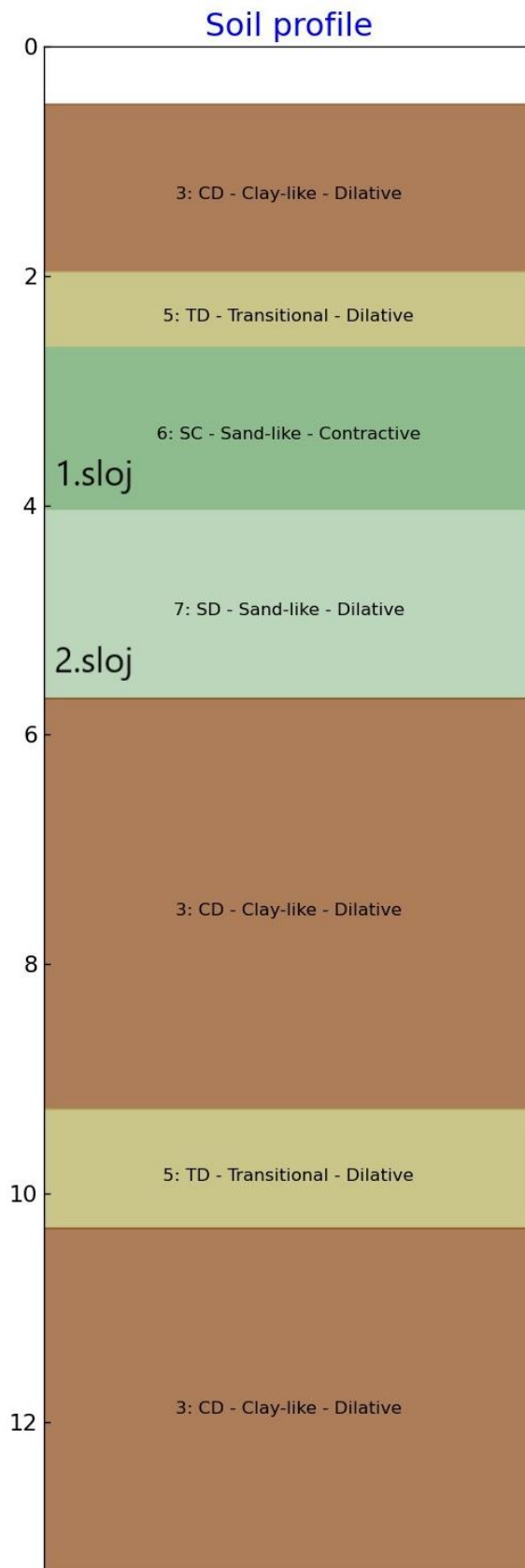
Slika 37. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_2



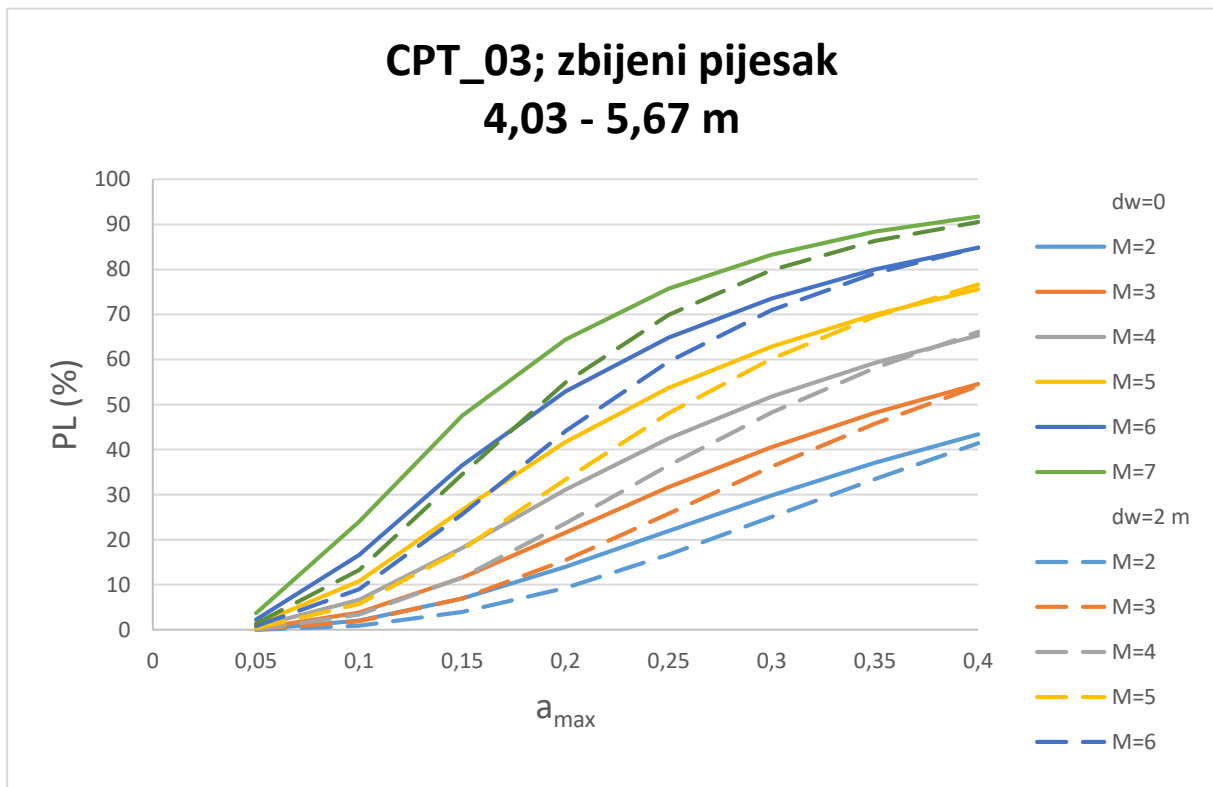
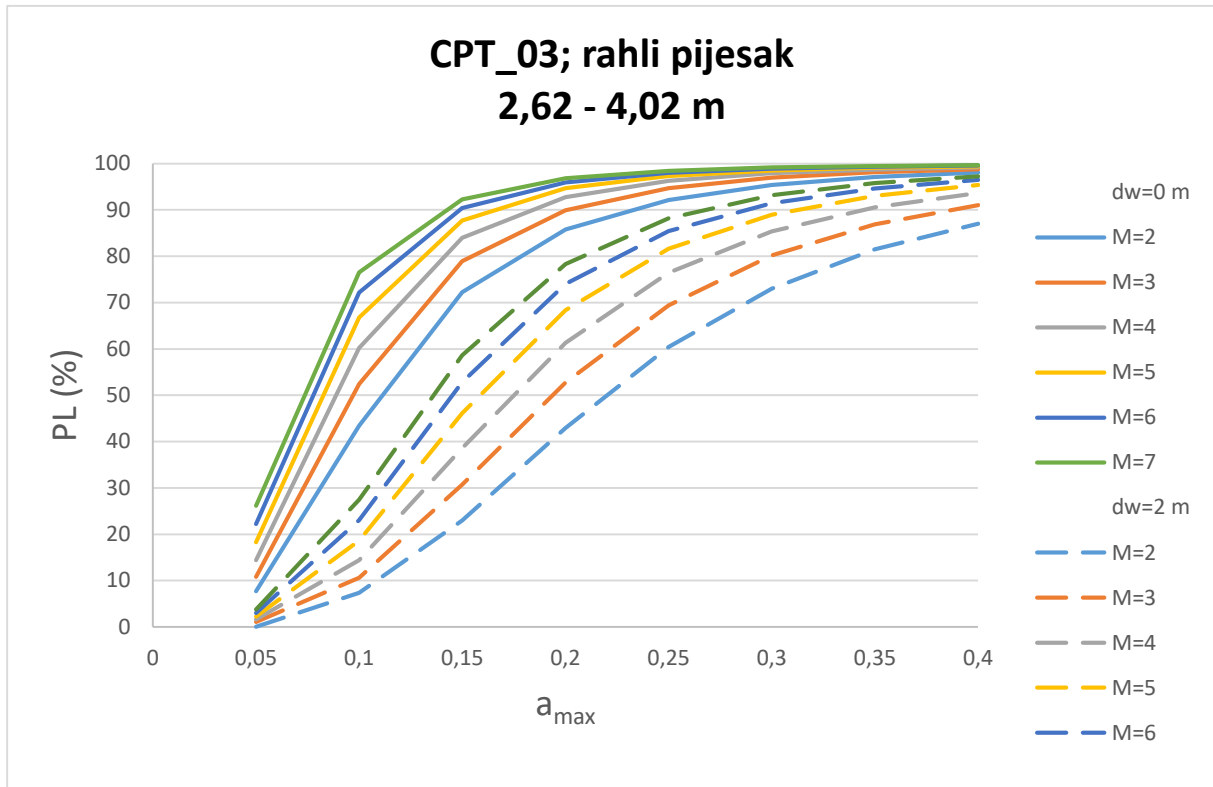


Slika 38. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_2

CPT_3

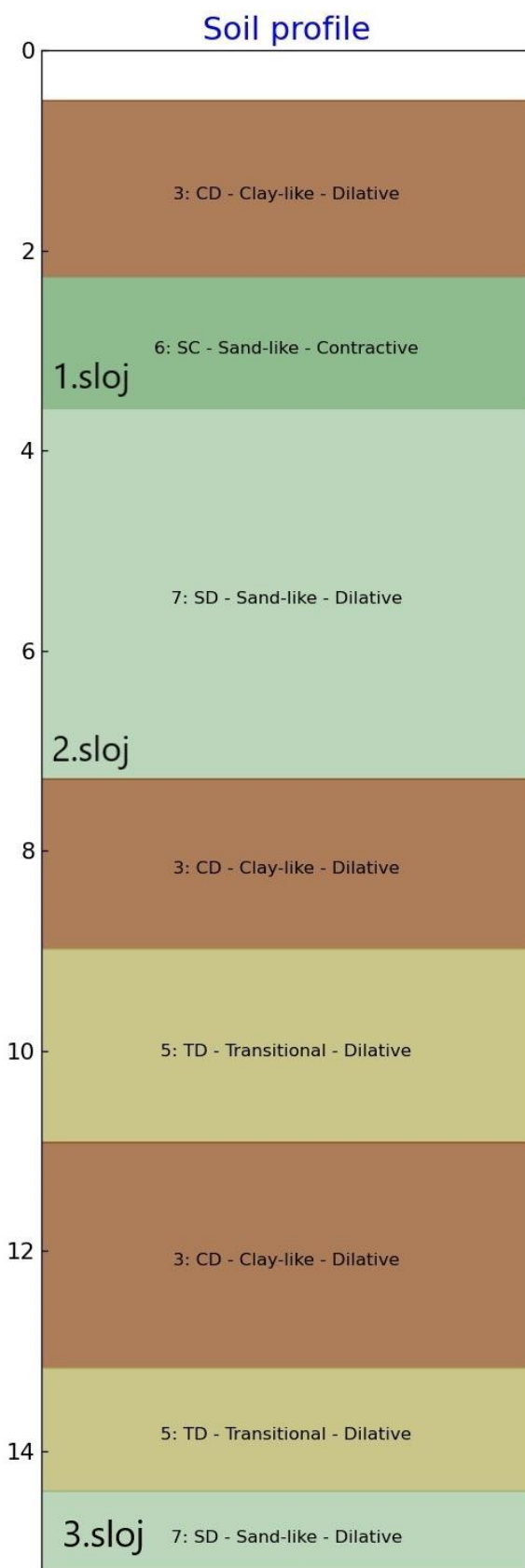


Slika 39. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_3

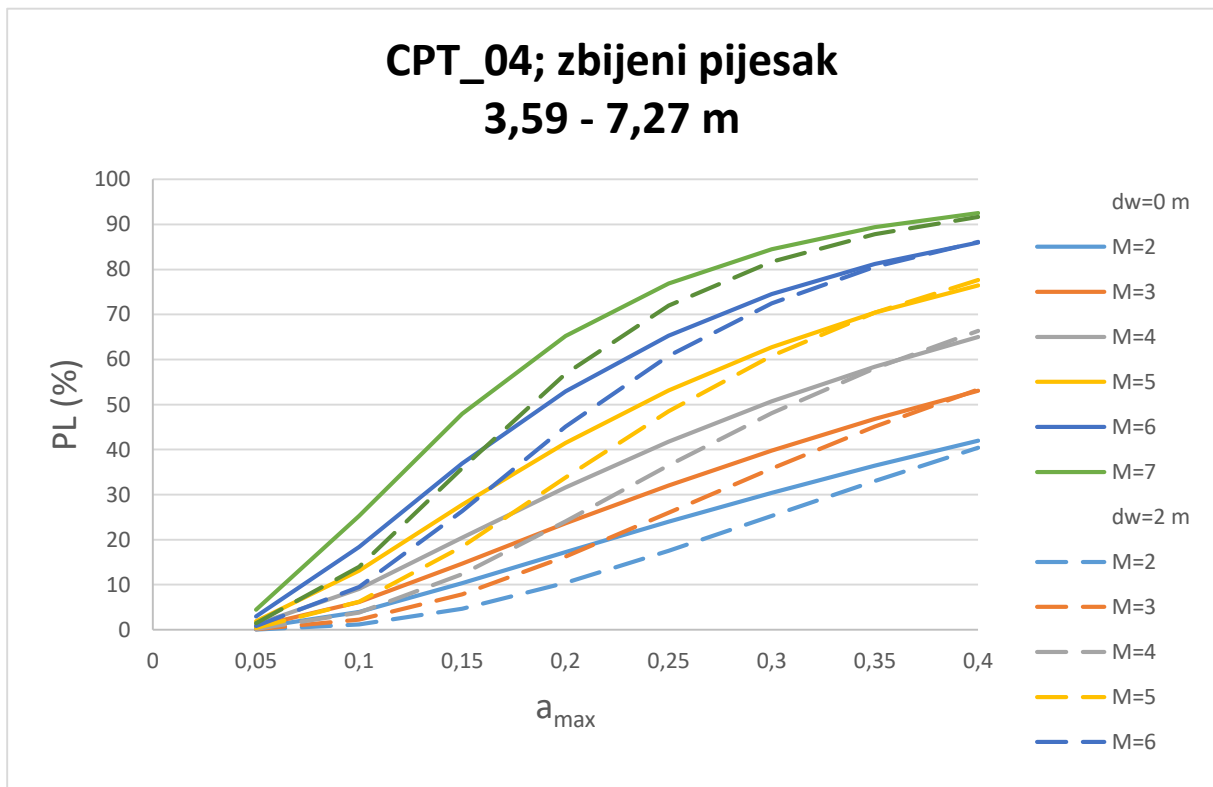
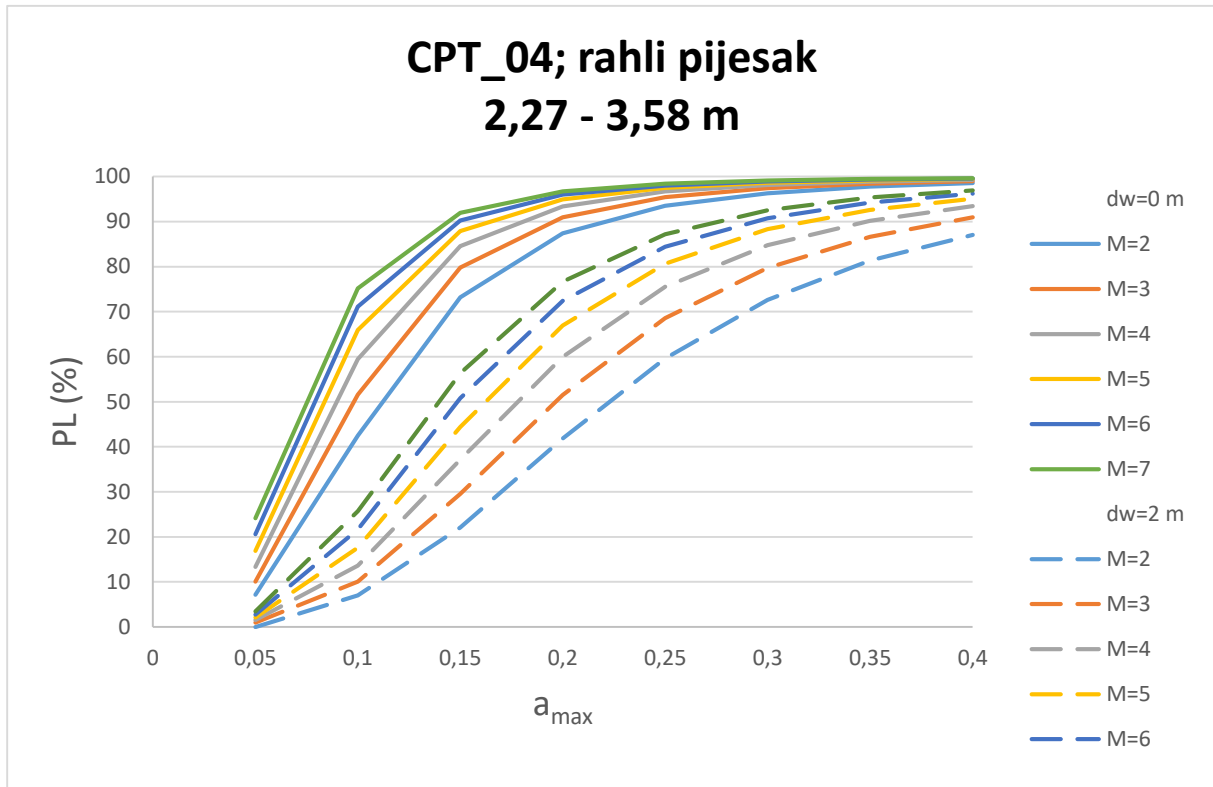


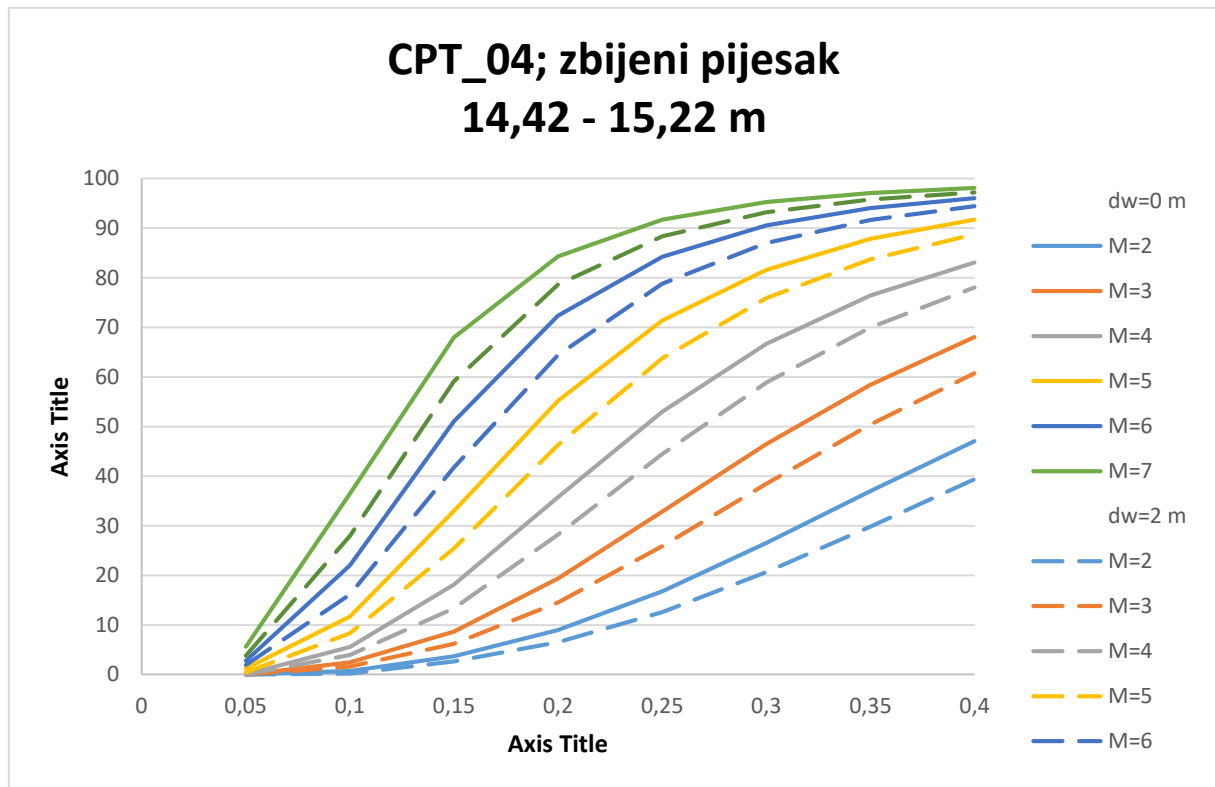
Slika 40. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_3

CPT_4



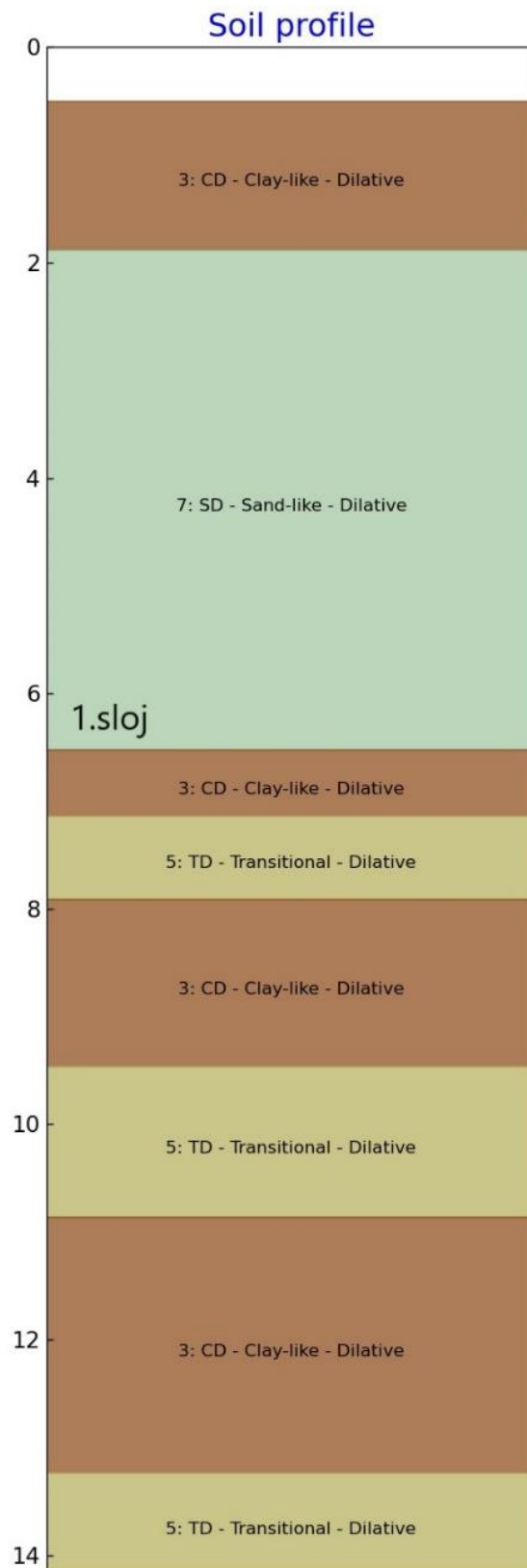
Slika 41. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_4



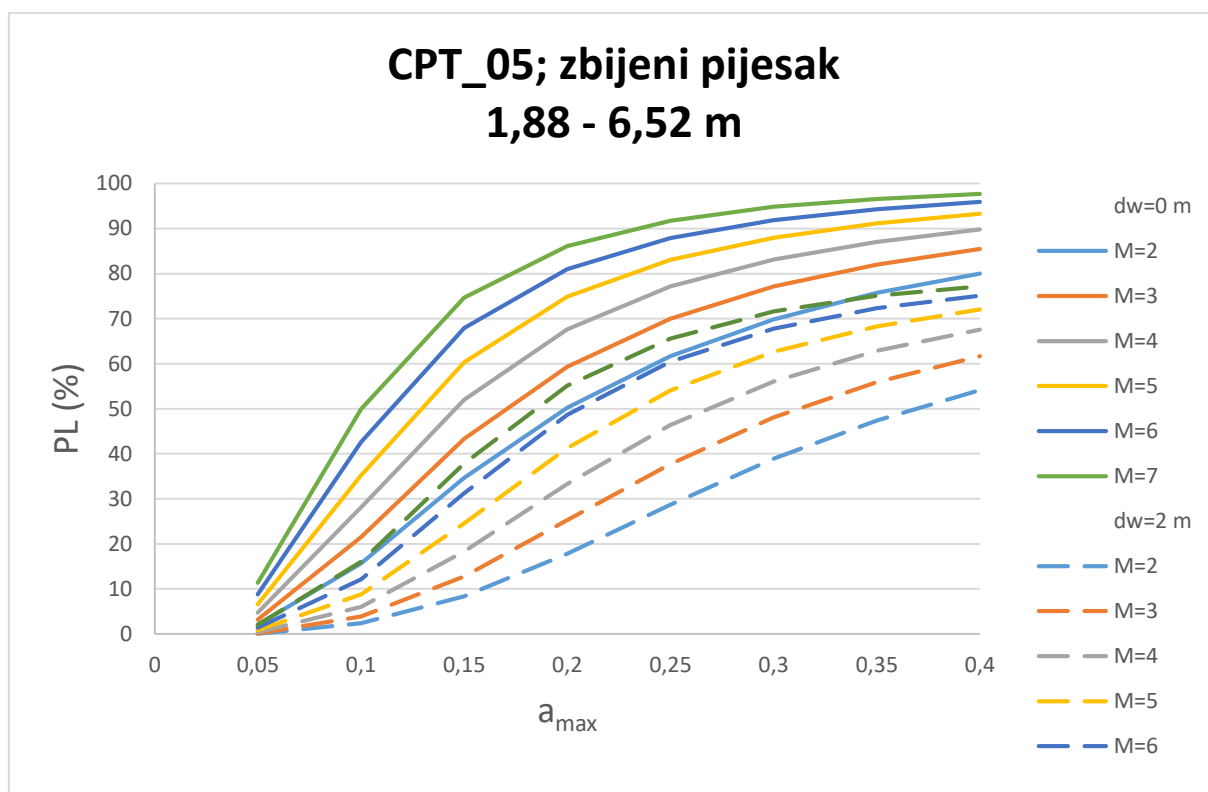


Slika 42. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_4

CPT_5

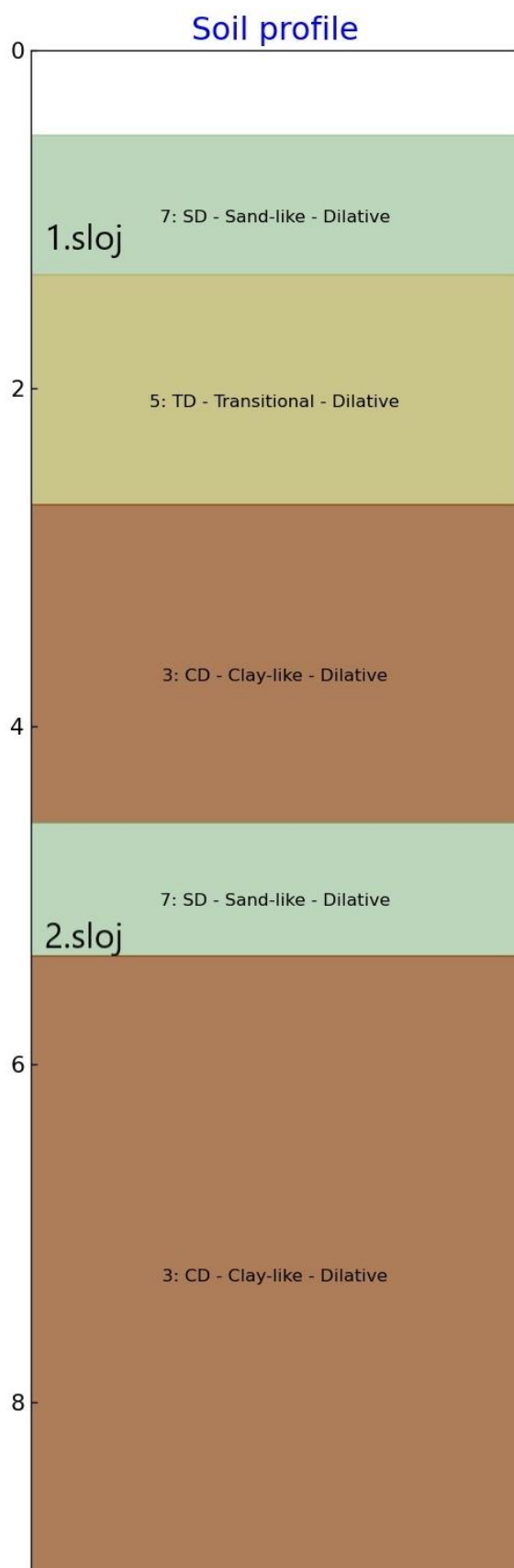


Slika 43. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_5

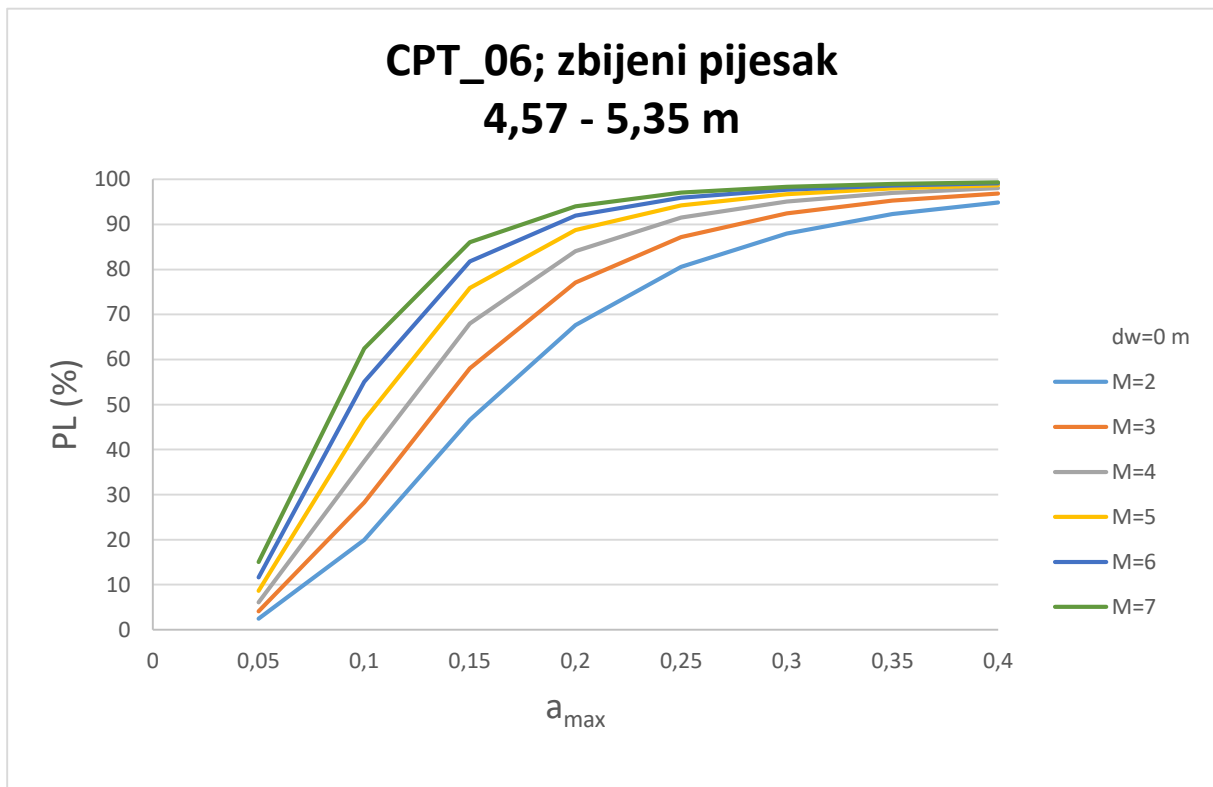
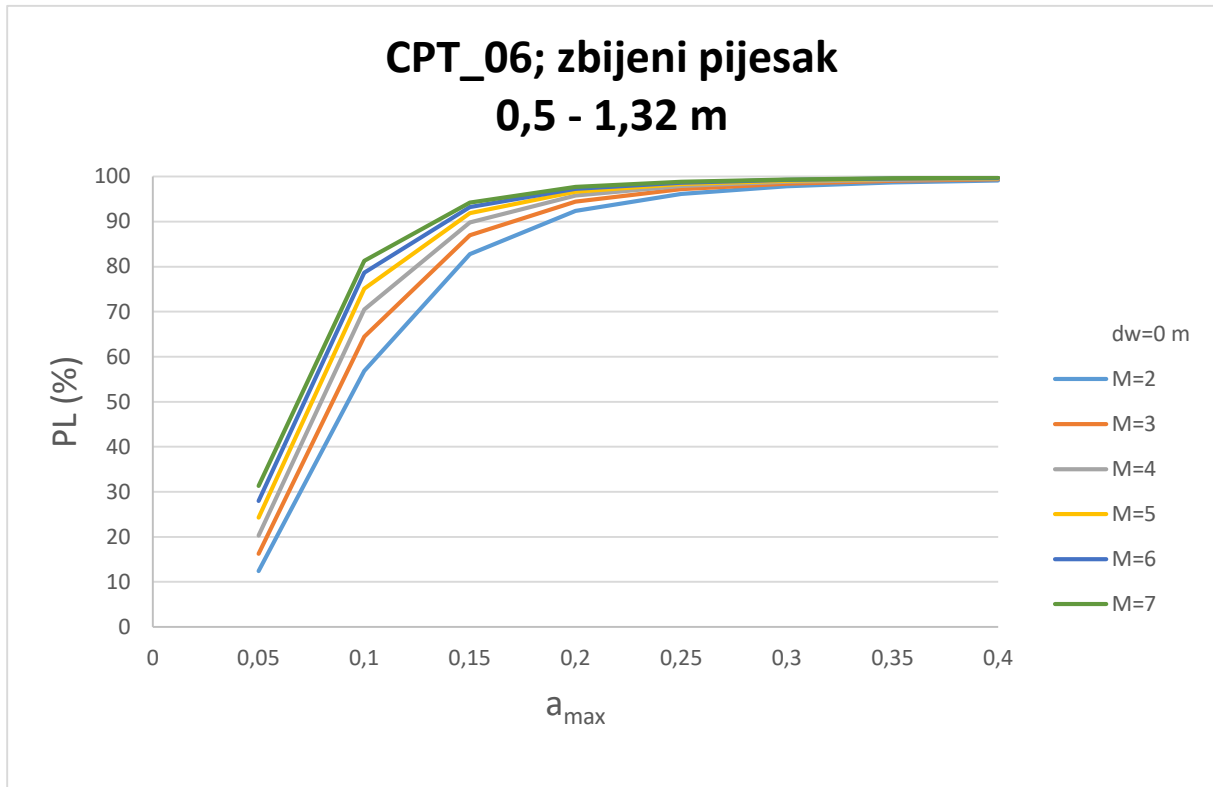


Slika 44. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_5

CPT_6

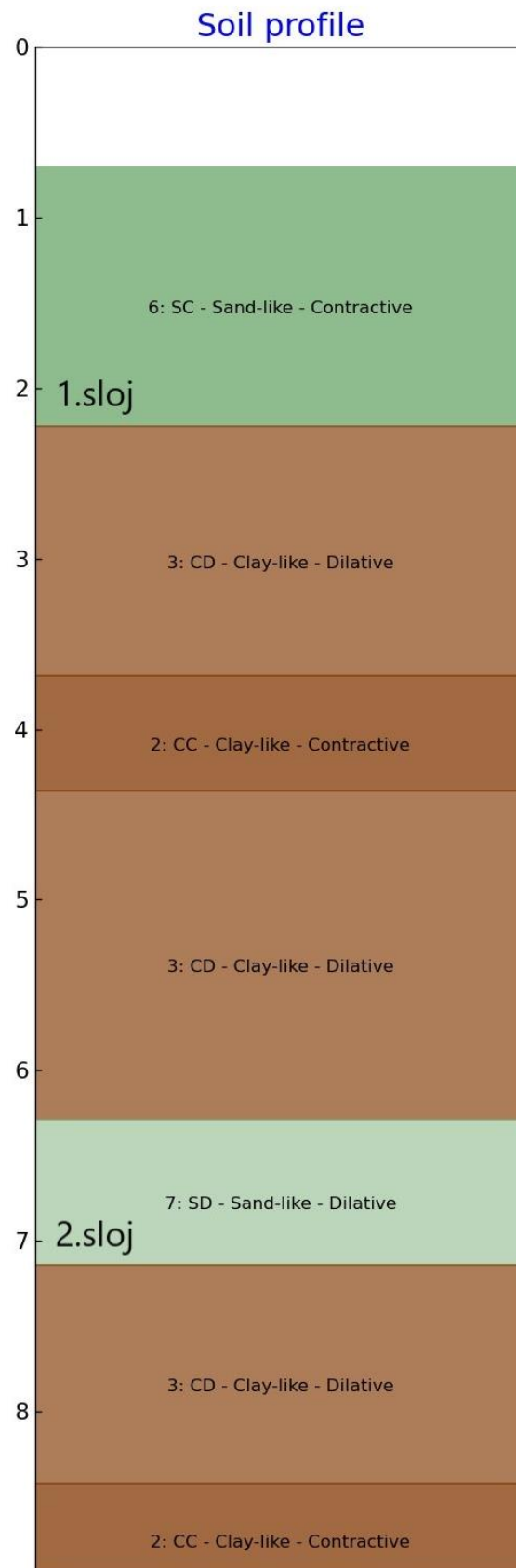


Slika 45. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_6

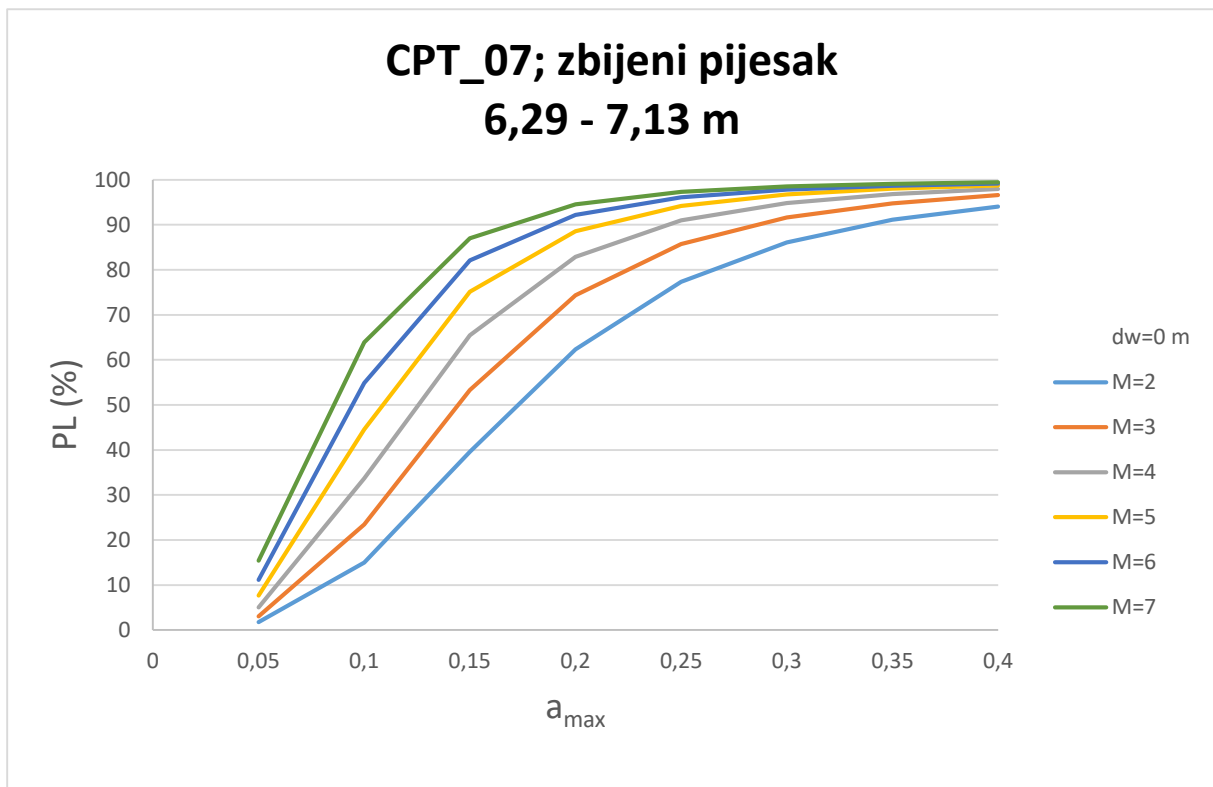
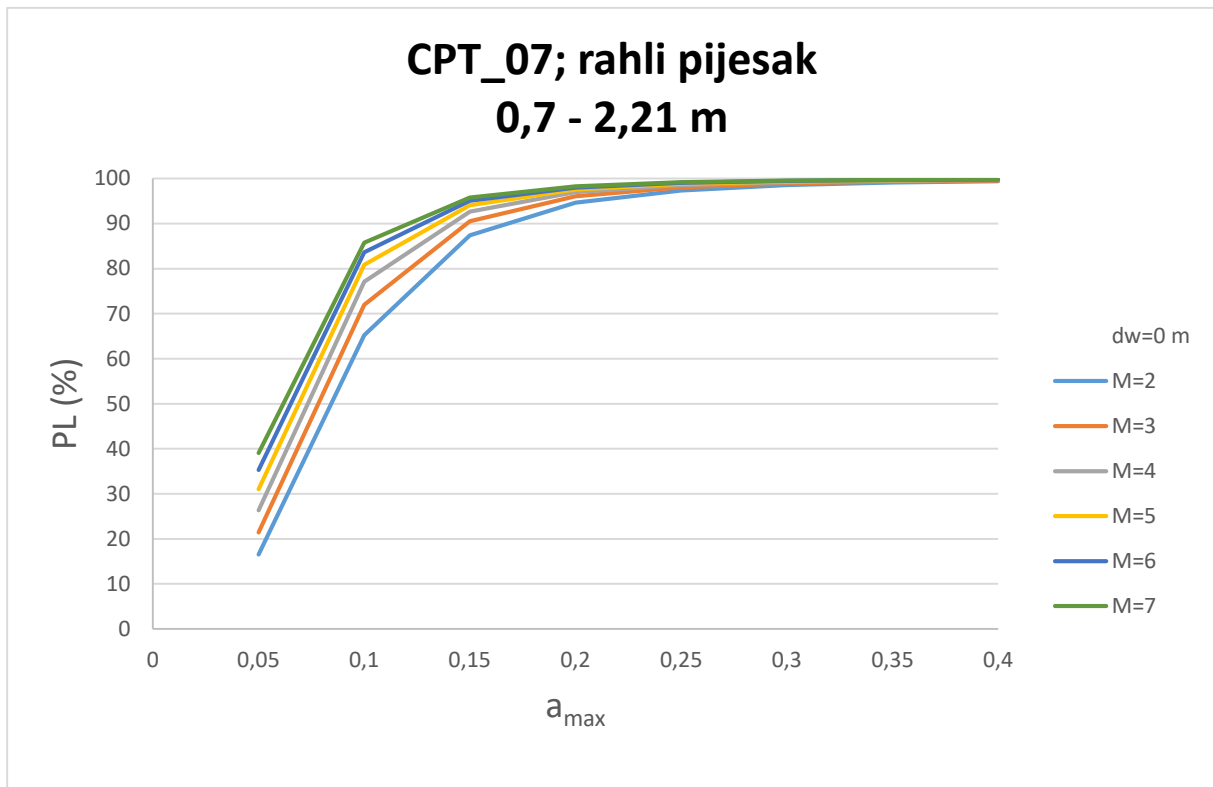


Slika 46. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_6

CPT_7

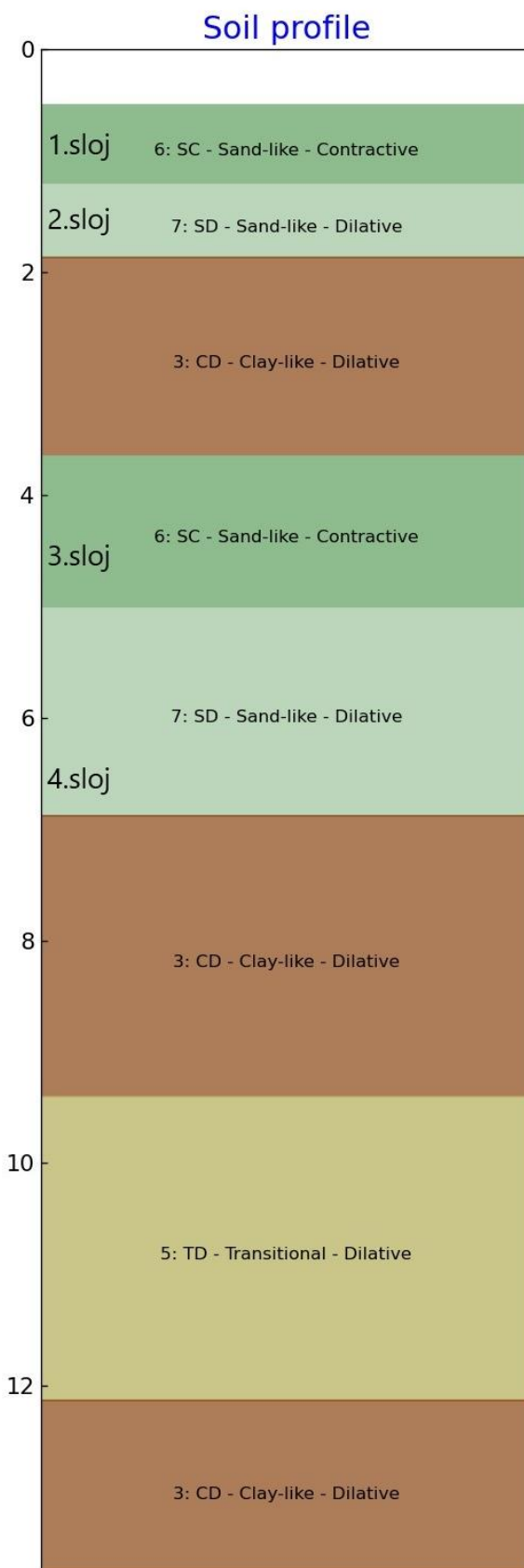


Slika 47. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_7

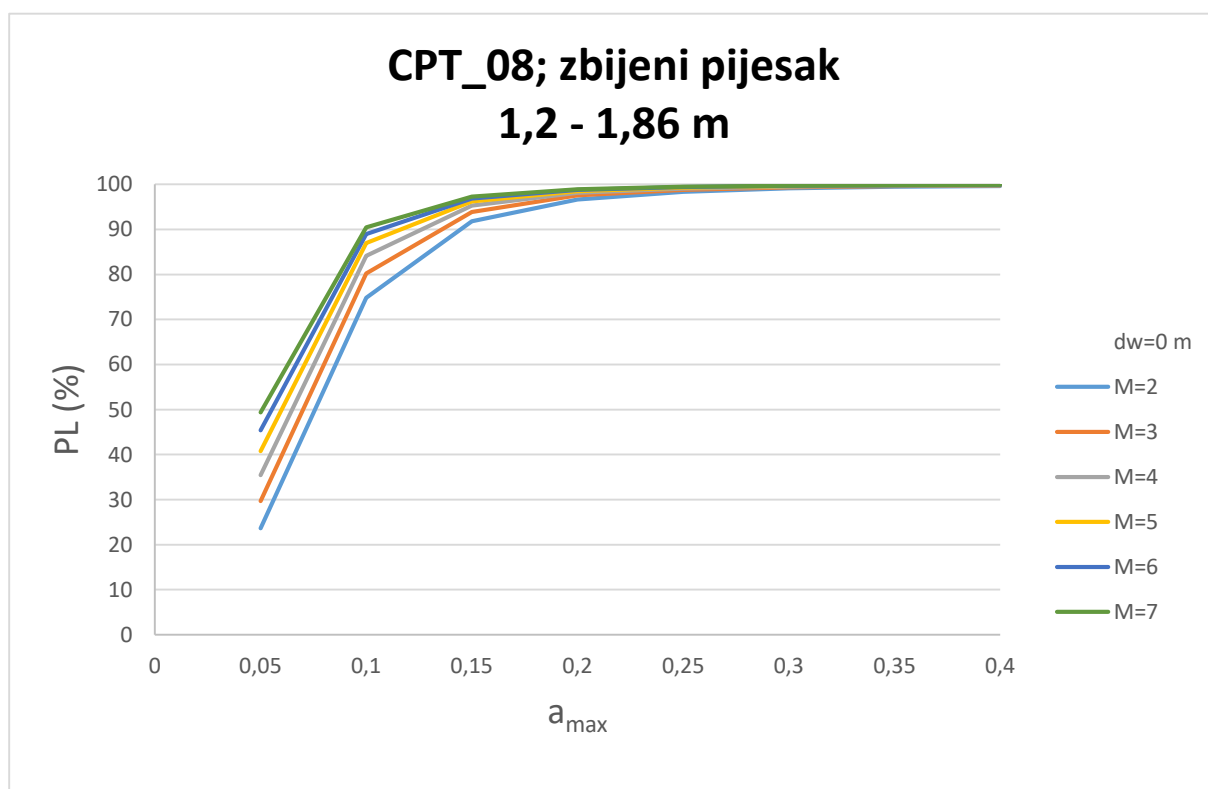
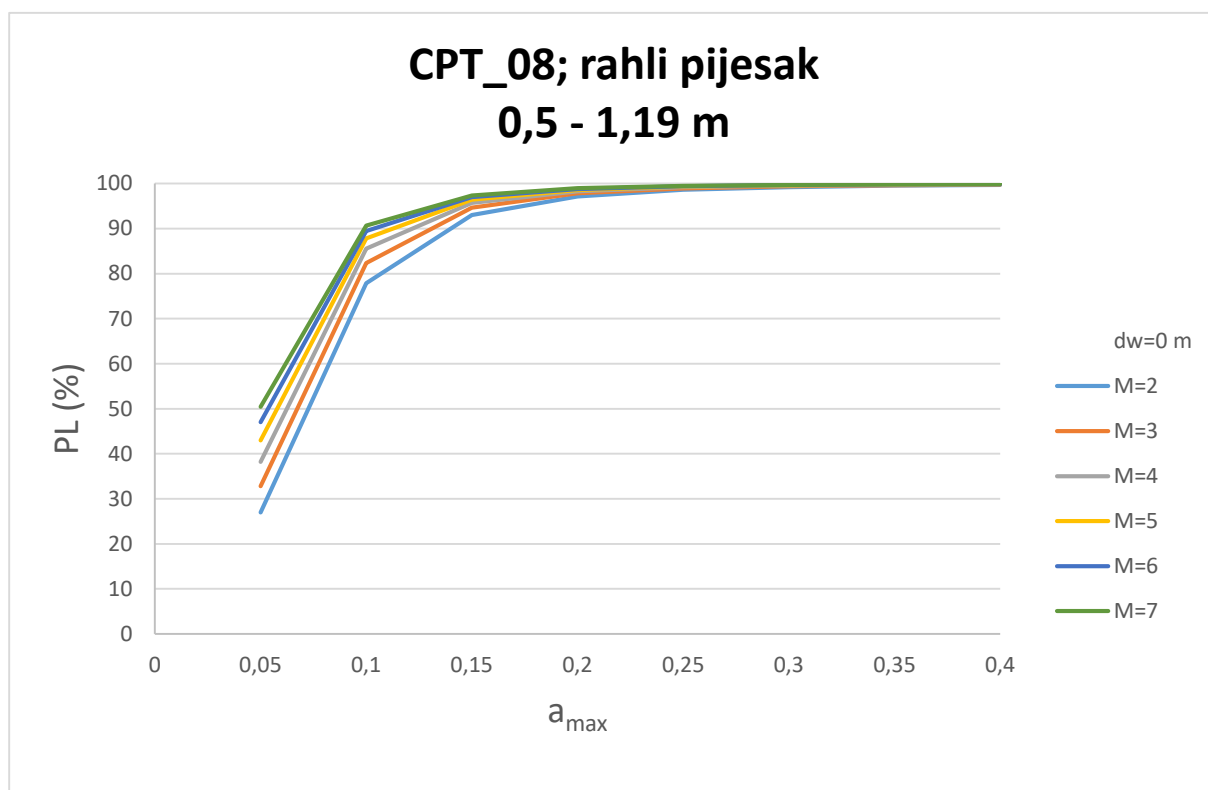


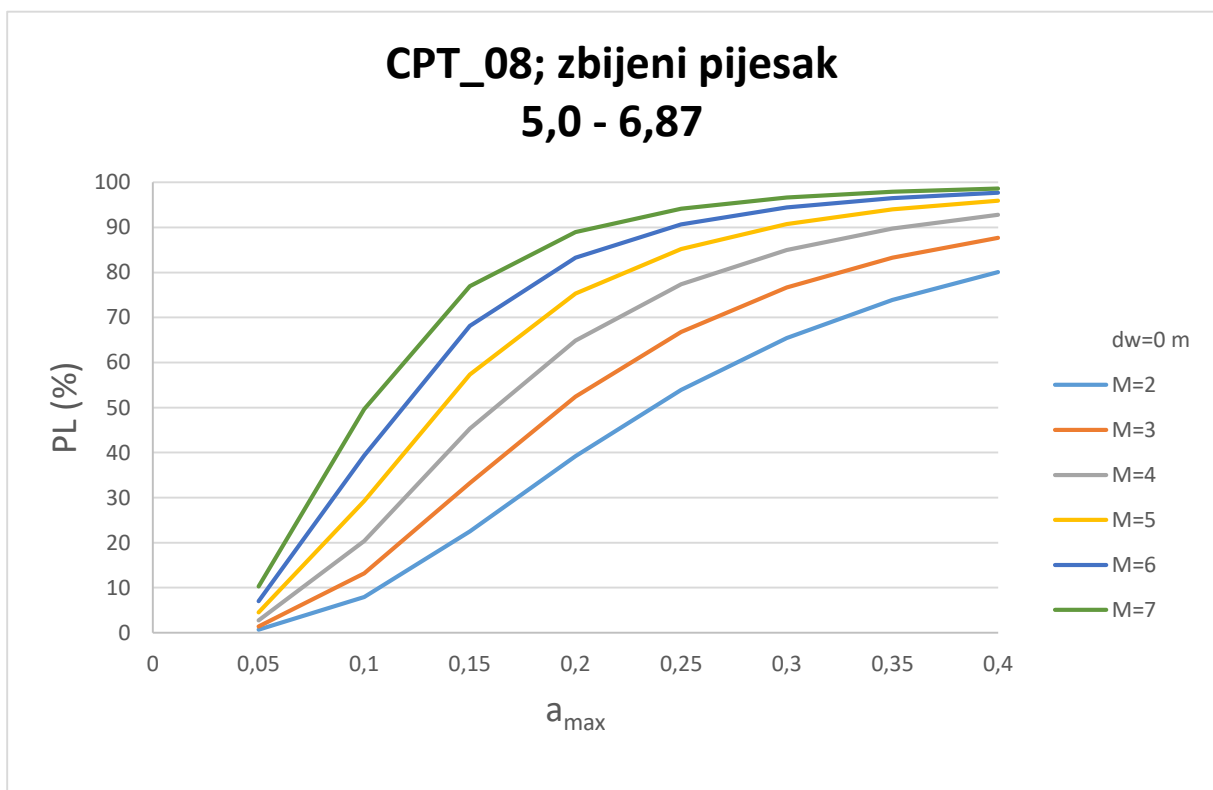
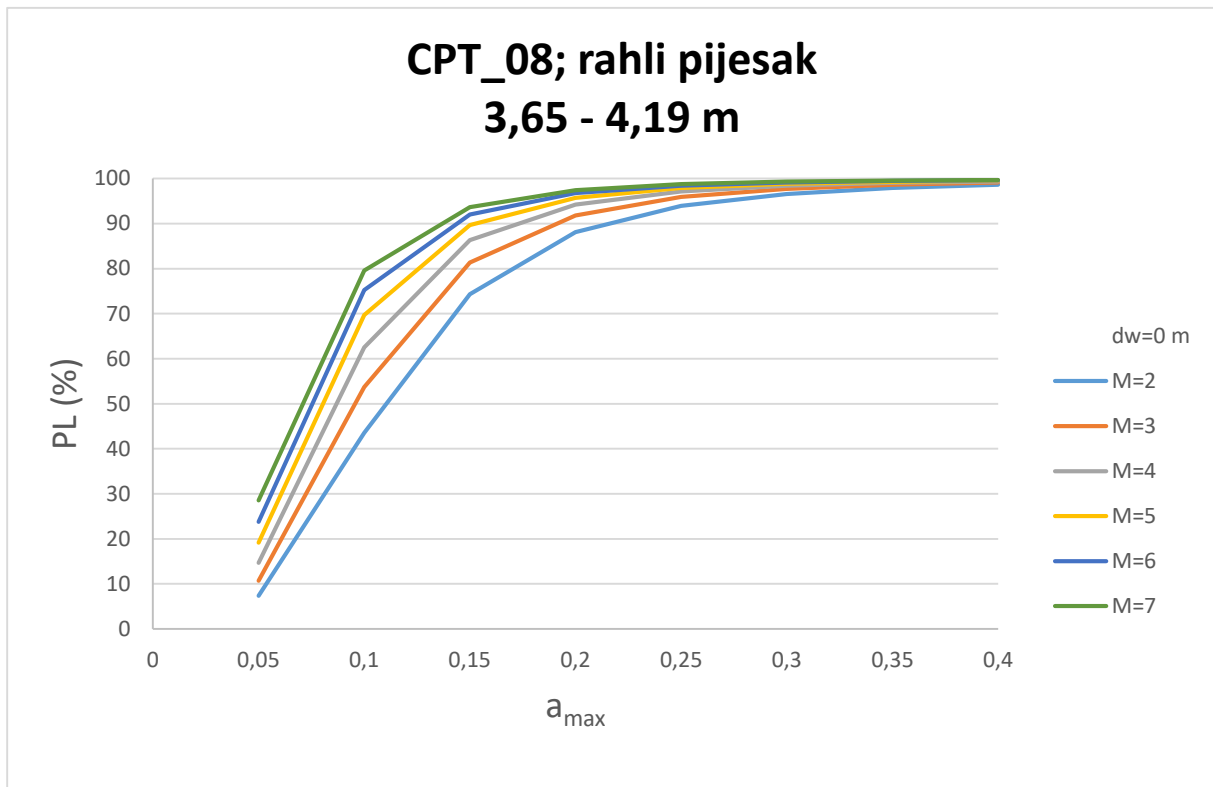
Slika 48. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_7

CPT_8



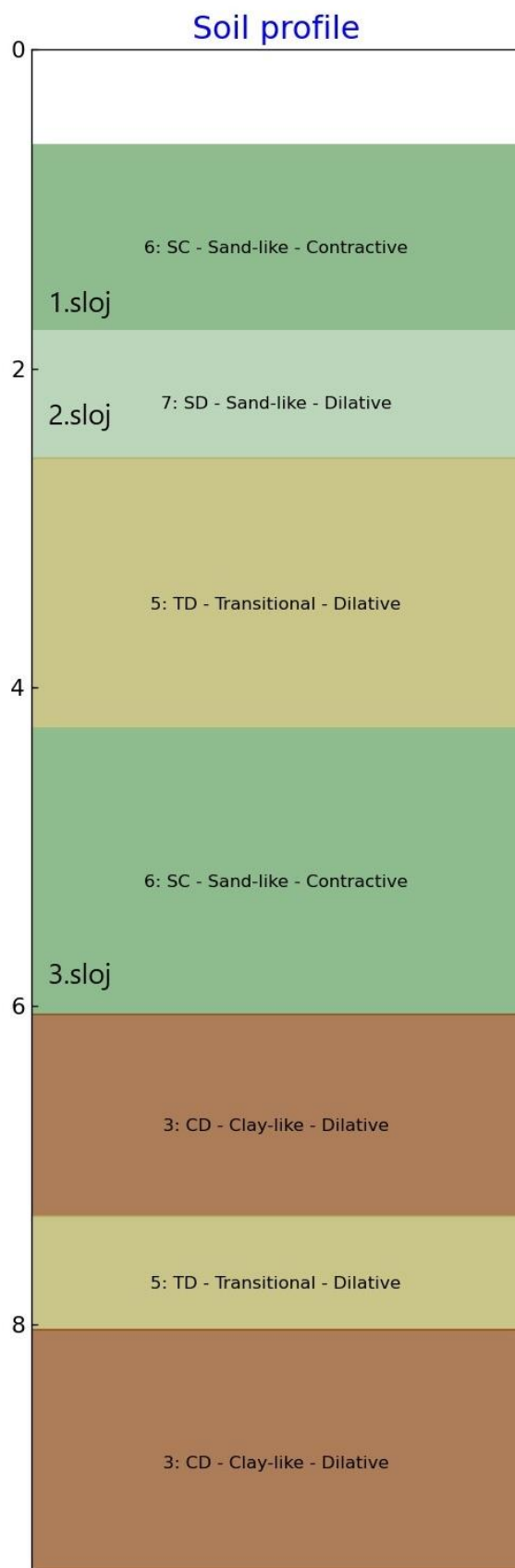
Slika 49. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_8



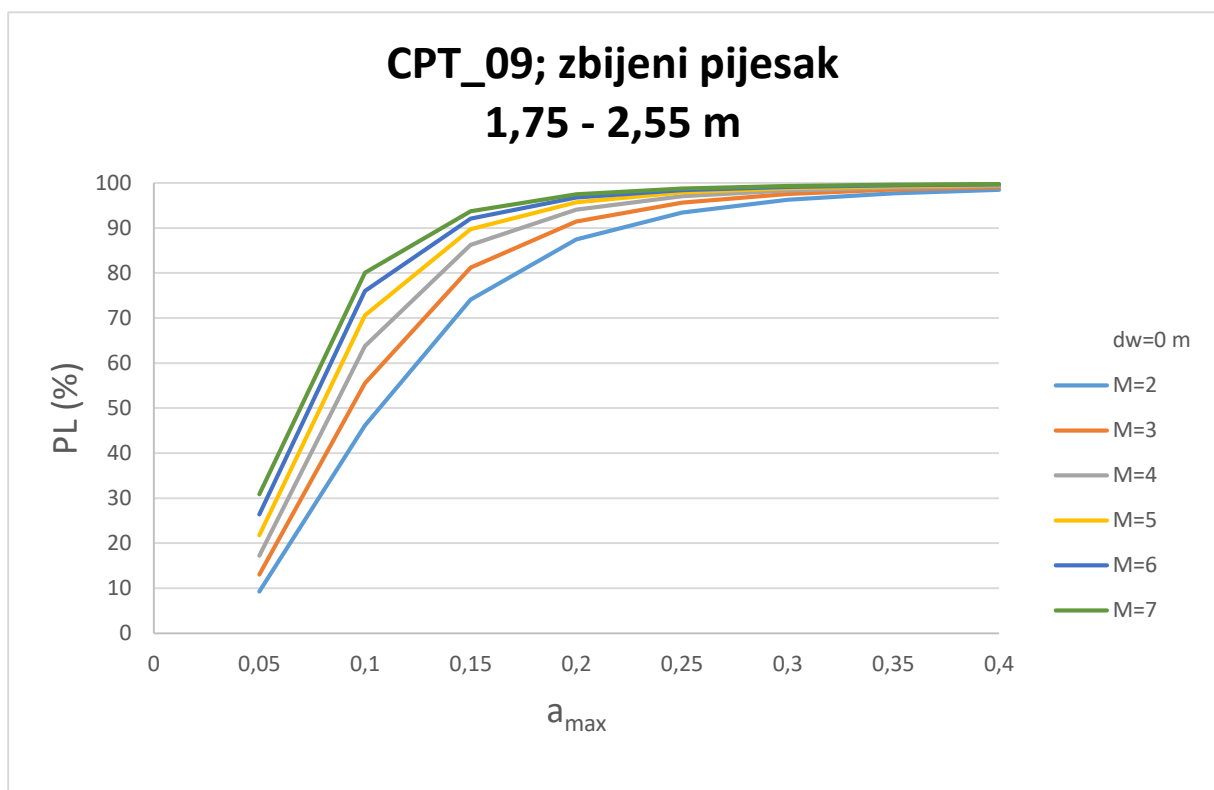
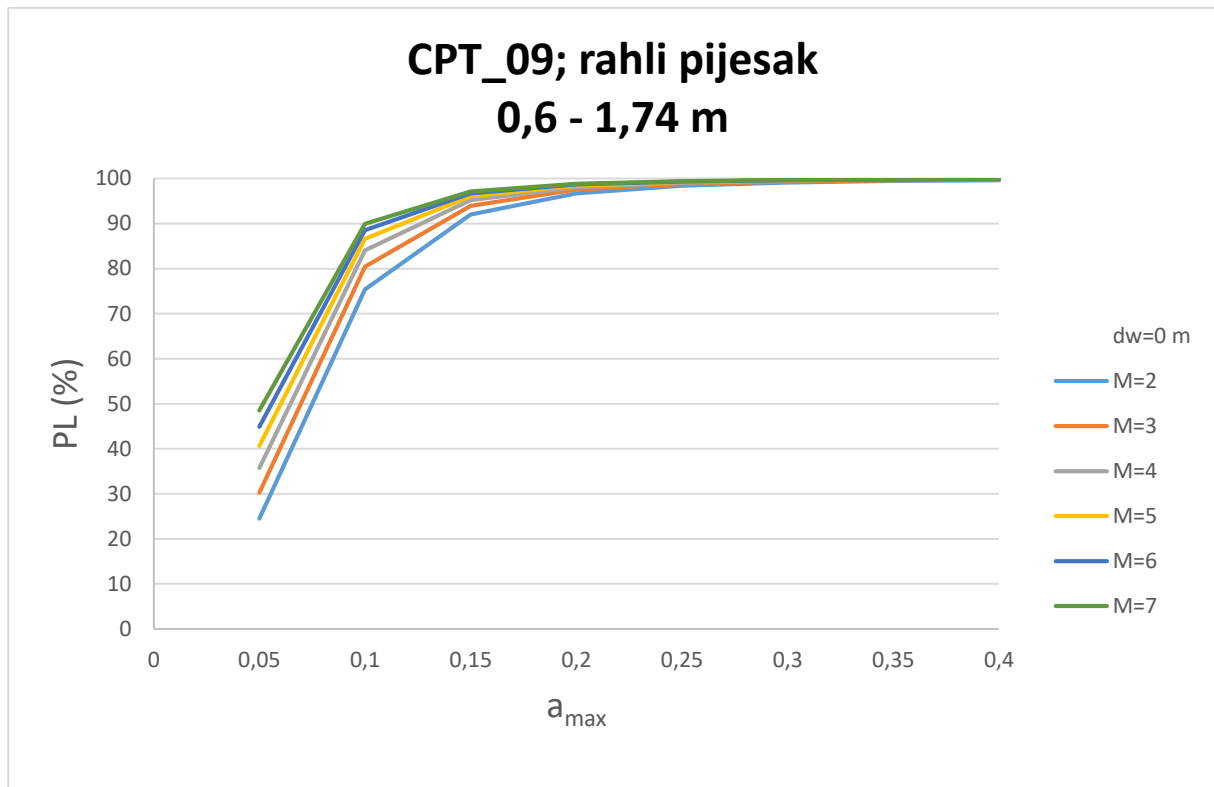


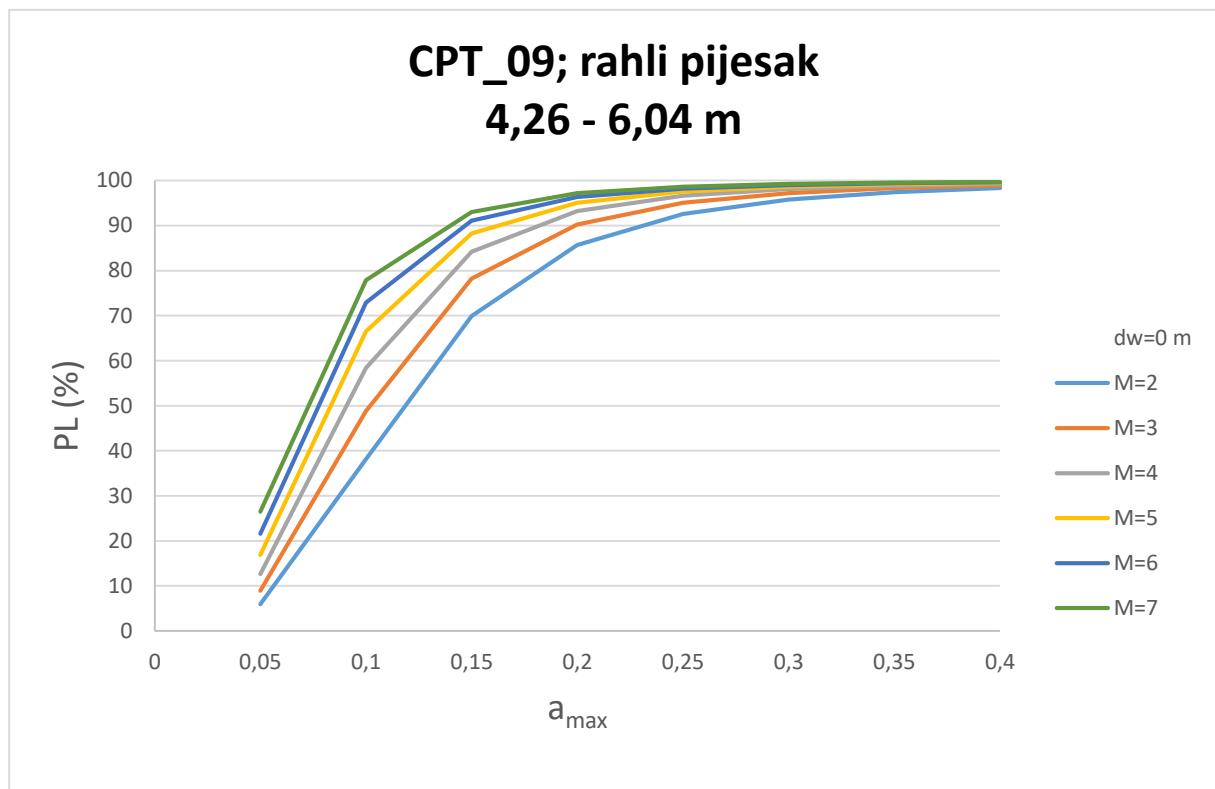
Slika 50. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_8

CPT_9



Slika 51. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_9





Slika 52. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_9

Dobiveni rezultati, omogućuju uvid u vjerojatnost ponovne pojave likvefakcije na području tla koje je već likvefiralo. Analiza vjerojatnosti provedena je za 2 niza CPTU ispitivanja.

Za niz ispitivanja u polju provedena su ispitivanja za 5 ispitnih lokacija. Gotovo u svim profilima tla dobivenim na ispitnim lokacijama, iznad i ispod slojeva pijeska nalazio se sloj gline, odnosno proslojaka vrlo zbijenog tla, glina i prašine. Osim u generalnoj razlici u vrsti materijala u kojem je došlo do likvefakcije, u samim slojevima pijeska veću tendenciju likvefiranju imali su rahli slojevi pijeska. Prema Robertsonovoj klasifikaciji iz 2016. godine, rahli slojevi pijeska ponašaju se 'kontraktivno', što bi značilo da pri cikličkom opterećenju imaju tendenciju zbijanja što uzrokuje povećanje pornih pritisaka. S druge strane, zbijeni pijesci se ponašaju 'dilativno', odnosno imaju tendenciju rahljenja. Uvidom u rezultate utvrđeno je da rahli pijesci pri površinskom ubrzanju većem od 0.25g imaju vjerojatnosti likvefakcije veće od 90%. Također, utvrđeno je da depoziti zbijenog pijeska na manjim dubinama imaju veću vjerojatnost pojave likvefakcije od zbijenih pijesaka na većim dubinama. Za niz ispitnih lokacija u polju provedena je i analiza pri kojoj je razina podzemne vode spuštana 2 m ispod površine terena. Tom analizom utvrđeno je da smanjenje razine podzemne vode u rahlim pijescima pri manjim akceleracijama (do cca. 0.25g) za sve

vrijednosti magnitude, značajno utječe na sniženje vjerojatnosti pojave likvefakcije. Pri većim akceleracijama (cca 0.35g i 0.40g) i magnitudama (M=6 te M=7) vjerojatnost je približno jednaka za razinu podzemne vode na površini te na razini 2 m ispod površine.

Za niz ispitivanja uz prometnicu provedena su ispitivanja za 4 ispitne lokacije. Analize su provedene za razinu podzemne vode na površini terena. Iz karakterističnih profila tla vidljivo je da se, za razliku od profila u polju, pijesak nalazi na površini terena. Ispod sloja pijeska nalaze se slojevi gline s proslojkom pijeska. Uvidom u rezultate ocjene likvefakcijskog potencijala utvrđeno je da je vjerojatnost pojave likvefakcije za zbijene pijeske u blizini površine terena pri akceleracijama većim od 0.20g premašila 90%. Za zbijene pijeske na većim dubinama, koji se nalaze između slojeva glina uočena je manja sposobnost likvefiranja. Slično pravilo, uočeno je i u rahlim pijescima. Naime, na plitkim dubinama vjerojatnost likvefakcije u rahlim pijescima je pri vršnim ubrzanjima većim od 0.15g premašila 90%, dok se pri većim dubinama ta vjerojatnost postiže pri ubrzanju većem od 0.20g.

Generalno, provedbom analiza na svim ispitnim lokacijama, te usporedbom dobivenih rezultata, zaključeno je da na povećanje vjerojatnosti pojave likvefakcije u najmanjoj mjeri, ali ne zanemarivo, utječe povećanje magnitude potresa. S druge strane, značajno povećanje je uočeno povećanjem akceleracije, dok je sniženje razine podzemne vode utjecalo na smanjenje vjerojatnosti likvefakcije.

7. Zaključak

Potresom koji se dogodio na području Sisačko – moslavačke županije, potvrđena je važnost geotehnike pri projektiranju i izvedbi građevinskih struktura. Razni koseizmički učinci koji su ostavili umjeren trag u krajoliku, ukazali su na potrebu provođenja istražnih geotehničkih radova. Osim određivanja karakterističnog profila tla i geotehničkih karakteristika tog tla, prilikom projektiranja važno je uzeti u obzir i utjecaj potresnog djelovanja. S obzirom na seizmičku aktivnost područja Hrvatske, u cilju dugoročnog osiguranja sigurnosti, kako građevnih struktura tako i života stanovnika, nužno je voditi računa o mogućnosti pojave likvefakcije.

Ovim radom napravljena je analiza vjerojatnosti pojave likvefakcije na području koje je prethodno doživjelo ovaj fenomen. Cilj istraživanja bio je odrediti kako varijacija pojedinog parametra odabranih modela ocjene likvefakcijskog potencijala utječe na procjenu vjerojatnosti pojave likvefakcije. Kao ulazni podaci analize, korišteni su rezultati CPTU terenskog ispitivanja tla s kojim su omogućeni kontinuirani rezultati po dubini i relativno brza provedba. Potvrđeno je da je vjerojatnost pojave likvefakcije u takvom tlu i dalje vrlo visoka te da tlo nije steklo otpornost na ponovnu pojavu. Također, zaključeno je da povećanje vrijednosti vršnog horizontalnog ubrzanja tla ima znantno veći utjecaj na povećanje vjerojatnosti u odnosu na magnitudu potresa, dok sniženje razine podzemne vode rezultira smanjenom vjerojatnošću.

Evaluacija likvefakcijskog potencijala u post-potresnom periodu omogućava prilagodbu gradnje lokalnim uvjetima tla i djelovanjima koja mogu zadesiti konstrukciju tijekom njenog životnog vijeka. Optimizacijom varijantnih rješenja projektiranja na osnovu rezultata analiza vjerojatnosti pojave likvefakcije uvelike se mogu smanjiti troškovi i povećati kvaliteta izvedbe.

Literatura

- [1] Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno - matematički fakultet, Geofizički odsjek, *Seizmološki pojmovnik*. Dostupno: https://www.pmf.unizg.hr/geof/popularizacija_geofizike/seizmoloski_pojmovnik# [Pristupljeno: 3. travnja, 2021.]
- [2] Ivić M., Mikulić V., Prašnikar G., Špika K., Paneuropska seizmička aktivnost u 2015. godini, *Ekscentar - List studenata Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu*, 2016.; br. 19: 78 – 82
- [3] Tondi E., Blumetti A. M., Čičak M., Manna P. D., Galli P., Invernizzi C., Mazzoli S., Piccardi L., Valentini G., Vittori E., Volatili T., 'Conjugate' coseismic surface faulting related with the 29 December 2020, Mw 6.4, Petrinja earthquake (Sisak – Moslavina, Croatia), *Nature – Scientific reports*. Dostupno: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-88378-2> [Pristupljeno: 15. travnja, 2021.]
- [4] Lai C. G., Bozzoni F., De Marco M. C., Zuccolo E., Bandera S., Mazzocchi G., GIS database of the historical liquefaction occurrences in Europe and European empirical correlations to predict the liquefaction occurrence starting from the main seismological information, *Liquefact.eu*. Dostupno: <http://www.liquefact.eu/wp-content/uploads/2020/03/D2.4.pdf> [Pristupljeno: 15. travnja, 2021.]
- [5] Idriss I. M., Boulanger R. W., *Soil Liquefaction during earthquakes*, Oakland, California, USA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI); 2008.
- [6] M. Tuttle & Associates, Earthquake – Induced Liquefaction of the New Madrid Seismic Zone, *Mptuttle*. Dostupno: <http://mptuttle.com/newmadrid3.html> [Pristupljeno: 4. travnja, 2021.]
- [7] Bardet J. P., Advances in Analysis of Soil Liquefaction during Earthquakes, *Earthquake & Engineering Seismology*, 2003.; 81(B): 1175 – 1201
- [8] Kovačević M. S., Kaćunić Jurić D., Penetracijski pokusi, predavanje iz kolegija Terenska ispitivanja i opažanja: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2020./2021.
- [9] Kovačević M. S., Kaćunić Jurić D., Statički penetracijski pokus, auditorne vježbe iz kolegija Terenska ispitivanja i opažanja: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2020./2021.
- [10] Robertson P., Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update, *Canadian Geotechnical Journal*, 2016. Dostupno: <https://www.cpt-robertson.com/PublicationsPDF/Robertson%20Updated%20SBT%20CGJ%202016.pdf> [Pristupljeno: 9. lipnja, 2021.]

- [11] Kovačević M. S., Bačić M., Librić L., Žužul P., Gavin K. & Cormac Reale, (2020): "A novel algorithm for vertical soil layering by utilizing the CPT data", 6th International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2020), 20 – 22 May 2020., Pula, Hrvatska
- [12] Seed H. B., Idriss I. M., Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1971.; 97(9): 1249 – 1274
- [13] Robertson P., Wride C. E., Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT. *Proc. NCEER Work-shop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, 1997., Report NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research
- [14] Unutmaz B., Primjena metode konačnih razlika u određivanju utjecaja statičkog posmičnog naprezanja na likvefakciju tla, *Građevinar*, 2019.; 71 (12): 1143 – 1151
- [15] Klibbe P. R., The Determination of Factor of Safety against Liquefaction and Post – Liquefaction Settlement, *Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*. Dostupno: <https://www.issmge.org/publications/publication/the-determination-of-factor-of-safety-against-liquefaction-and-post-liquefaction-settlement> [Pristupljeno: 21. svibnja, 2021.]
- [16] Idriss I. M., Boulanger R. W., *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*, Department of civil environmental engineering college of engineering, University of California at Davis, 2014.
- [17] Idriss I. M., Boulanger R. W., Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes, 7. - 9. siječnja 2004., Berkeley, California, USA, Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE, 32-56
- [18] Shengen Z., Evaluation of the liquefaction of sand by static cone penetration test, 1980. Dostupno: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/7_vol3_156.pdf [Pristupljeno: 28. svibnja, 2021.]
- [19] Robertson P., Wride C. E., Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, 1998.; vol. 35: 442 – 459
- [20] GEOLOGISMIKI.GR 2018., CLiq v.3.0. – CPT soil liquefaction software. Dostupno: <https://geologismiki.gr/products/cliq/#downloadtrial>
- [21] Juang H. C., Jiang T., Andrus D. R., Assessing Probability – based Methods for Liquefaction Potential Evaluation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002., 128: 580 – 589
- [22] Moss R. E. S., Seed R. B., Kayen R. E., Stewart J.P., Kiureghin A., Cetin O. K., CPT – Based Probabilistic and Deterministic Assessment of In Situ Seismic Soil Liquefaction Potential, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006., 132 (8): 1032 – 1051

- [23] Marković B., Bišćan M., Viduka E. H., Kos R., Kovačić G., Jelavić V., Zahvat: Izmjena zahvata sustava odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda grada Petrinje, *Elaborat zaštite okoliša*, 2019.
- [24] Karta Hrvatske. Dostupno: <https://karta-hrvatske.com.hr/> [Pristupljeno: 7. lipnja, 2021.]
- [25] Gašparović I., Tolić I., Španjol Ž., Rosavec R., i dr., Izvješće o stanju okoliša Sisačko-moslavačke županije 2011. – 2014., *Ires ekologija i Ekološke finalizacije j.d.o.o.*, 2015.
- [26] Karta potresnih područja Republike Hrvatske, Geofizički odsjek, Prirodoslovno - matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Dostupno: <http://seizkarta.gfz.hr/> [Pristupljeno: 9. lipnja, 2021.]
- [27] Interactive Map, M 6.4 – 2 km WSW of Petrinja, Croatia, U.S. Geological Survey (USGS). Dostupno: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000d3zh/map> [Pristupljeno: 15. lipnja, 2021.]
- [28] Rocscience Inc. 2008-2020., Settle3 – Settlement and Consolidation Analysis. Dostupno: <https://www.rocscience.com/software/settle3>

Popis slika

Slika 1. Povijesni prikaz pojave likvefakcije u Europi: a) karta rasprostranjenosti; b) graf učestalosti [4]	2
Slika 2. Shematski prikaz nastanka pješčanih vulkana (prema Simsu i Garvinu, 1995.) [6].....	3
Slika 3. Manifestacija likvefakcije u polju u Topolovcu: a) izbijanje pijeska na površinu b) vidljive površinske pukotine u polju kraj rijeke.....	4
Slika 4. Oštećenja građevinskih struktura uzrokovanih likvefakcijom: a) slom nasipa; b) slom prometnice u Novoj Drenčini; c) oštećenje podrumskog zida kao posljedica likvefakcije	5
Slika 5. Grafički prikaz metodologije istraživanja.....	8
Slika 6. CPT sonda: a) shematski prikaz CPT sonde; b) veličine CPT sonde (s lijeva: 2 cm ² , 10 cm ² , 15 cm ² i 40 cm ²)	9
Slika 7. Primjer rezultata dobivenih CPTU pokusom	10
Slika 8. a) Ne-normalizirani klasifikacijski dijagram, Robertson (1986); b) normalizirani klasifikacijski dijagram, Robertson (1990)[9]; c) modificirani klasifikacijski dijagram, Robertson (2016)[10]	12
Slika 9. Dijagrami određivanja maksimalnog posmičnog naprezanja i koeficijenta redukcije naprezanja [5].....	16
Slika 10. Posmična naprezanja tijekom potresa [11]	17
Slika 11. Određivanje CRR-a metodom Robertson & Wride (1997)[18].....	19
Slika 12. Određivanje CRR-a metodom Robertson & Wride (1998) [19].....	20
Slika 13. Određivanje CRR-a metodom Idriss i Boulanger (2004) [19].....	21
Slika 14. Određivanje CRR-a prema Idriss-u i Boulanger-u (2014) [19]	22
Slika 15. Brest Pokupski [23].....	24
Slika 16. Vršno seizmičko ubrzanje tla odabranog pilot područja [25]	25
Slika 17. Konture seizmičkog ubrzanja za petrinjski potres [27].....	25
Slika 18. Depoziti pijeska u Brestu Pokupskom	27
Slika 19. Likvefakcija u dvorištu jednog kućanstava u Brestu Pokupskom	28
Slika 20. Zona obuhvata na lokaciji Bresta Pokupskog	28
Slika 21. Provedeni istražni radovi na lokaciji Bresta Pokupskog.....	29
Slika 22. Geotech AB – penetrometer 220.....	30
Slika 23. Sanduci s izvađenim uzorcima tla a) bušotina B1; b) bušotina B2; c) bušotina B3 .	33
Slika 24. Karakteristični geotehnički profil tla na mjestu bušotine B1	34
Slika 25. Karakteristični geotehnički profil tla na mjestu bušotine B2.....	35

Slika 26. Karakteristični geotehnički profil tla na mjestu bušotine B3.....	36
Slika 27. Granulometrijski dijagram uzorka tla iz Bresta Pokupskog	37
Slika 28. Shematski prikaz rasporeda slojeva dobivenih prema rezultatima CPTU ispitivanja za profil tla u polju (profil A).....	38
Slika 29. Shematski prikaz rasporeda slojeva dobivenih prema rezultatima CPTU ispitivanja za profil tla uz cestu (profil B)	39
Slika 30. 3D model tla pilot područja a) profil tla u polju (profil A); b) profil tla uz cestu (profil B)[26]	40
Slika 31. Ulazni podatci, s lijeva na desno: otpor na šiljku sonde q_c , nekorrigirana vrijednost trenja po plaštu sonde f_s te porni tlak u_2	42
Slika 32. Raspored točaka u modificiranom klasifikacijskom dijagramu, Robertosn (2016)..	43
Slika 33. Vrijednost koeficijenta cikličkog napreznja (CSR) i koeficijenta cikličke otpornosti (CRR)	44
Slika 34. Vrijednost faktora sigurnosti (FS) i vjerojatnosti pojave likvefakcije (PL).....	45
Slika 35. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_1	51
Slika 36. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_1	53
Slika 37. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_2	54
Slika 38. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_2	56
Slika 39. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_3	57
Slika 40. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_3	58
Slika 41. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_4	59
Slika 42. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_4	61
Slika 43. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_5	62
Slika 44. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_5	63
Slika 45. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_6	64
Slika 46. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_6	65
Slika 47. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_7	66
Slika 48. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_7	67
Slika 49. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_8	68
Slika 50. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_8	70
Slika 51. Profil tla na ispitnoj lokaciji CPT_9	71
Slika 52. Dijagram vjerojatnosti pojave likvefakcije na ispitnoj lokaciji CPT_9	73

Popis tablica

Tablica 1. Predložena SBT klasifikacija prema Robertsonovim klasifikacijskim dijagramima iz 1986. i 1990. godine [11]	13
Tablica 2. Predložena SBT klasifikacija prema modificiranom Robertsonovom klasifikacijskom dijagramu iz 2016. godine [10].....	13
Tablica 3. Parametri A i B za različite vrste terenskih ispitivanja [20]	23
Tablica 4. Tehnički podaci korištenih CPTU sondi	31
Tablica 5. Rezultati laboratorijskih istražnih radova.....	37
Tablica 6. Sumarna lista korištenih izraza	41
Tablica 7. Varijacija ulaznih parametara pri analizi za razinu podzemne vode $d_w=0$ m i $d_w=2$ m.....	50

Sažetak

Autori: Ivana Jurić, Ivana Zovko

Naslov: Evaluacija likvefakcijskog potencijala tla primjenom metode statičkog penetracijskog pokusa

Pojava likvefakcije u zasićenim pješčanim depozitima uzrokuje oštećenja konstrukcija tijekom potresa. Rahli pijesak ima tendenciju zbijanja što u uvjetima ograničenog dreniranja rezultira porastom poreznog tlaka te posljedično smanjenjem efektivnih naprezanja, što dovodi do gubitka čvrstoće i deformacija tla. Kako bi se procijenila mogućnost pojave likvefakcije, u ovom radu provedene su parametarske analize evaluacije likvefakcijskog potencijala pomoću koda u Python programskom okruženju. Parametarske analize omogućavaju bolji uvid u osjetljivost modela evaluacije likvefakcijskog potencijala o veličini pojedinog parametra, uključivo karakteristike samog potresa te geotehničke uvjete u tlu. Zbog potrebe brze provedbe terenskih istražnih radova u seizmički aktivnom periodu odabrana je metoda statičkog penetracijskog pokusa (CPTU) kojim su dobiveni ulazni parametri za analize, kontinuirani po dubini tla. Metodologija rada uključuje pregled stanja područja te uspostavu detaljnog plana istraživanja, terenske i laboratorijske istražne radove te kabinetska istraživanja. U početnom dijelu rada prikazan je razvoj postojećih modela ocjene likvefakcijskog potencijala baziranih na CPTU ispitivanju. Odabrano pilot područje je Brest Pokupski, u kojem je nakon potresa u Petrinji bila izražena likvefakcija. Usporedbom rezultata provedenih ispitivanja za područje Bresta Pokupskog zaključeno je da povećanje vrijednosti vršnog horizontalnog ubrzanja tla ima znatno veći utjecaj na povećanje vjerojatnosti u odnosu na magnitudu potresa, dok sniženje razine podzemne vode rezultira smanjenjem vjerojatnosti pojave likvefakcije.

Ključne riječi: likvefakcija, potencijal likvefakcije, statički penetracijski pokus (CPTU), površinsko ubrzanje tla, magnituda

Summary

Authors: Ivana Jurić, Ivana Zovko

Title: Evaluation of liquefaction potential of soils using cone penetration test

One of causes of damage to structures during earthquakes is the occurrence of liquefaction in saturated sand deposits. Loose sand has a tendency to contract which in conditions of limited drainage causes increase in pore pressure, consequently reducing effective stresses, which leads to loss of soil strength and deformations. In order to assess the possibility of liquefaction, in this study, parametric analyzes of the evaluation of the liquefaction potential were performed using code in the Python programming environment. Parametric analyzes provide a better insight into the sensitivity of the model for evaluating the liquefaction potential on the size of an individual parameter, including the characteristics of the earthquake itself and the geotechnical conditions in the soil. Due to the need for rapid implementation of field research work in the seismically active period, the method of cone penetration test (CPTU) was selected, which enabled acquisition of the input parameters for analysis, continuously along the depth of the soil. The methodology of this study includes an state-of-the-art literature overview and establishment of a detailed research plan, field and laboratory investigation work and cabinet research. The historical development of models for evaluation of liquefaction potential based on CPTU results is presented in the first part. The selected pilot area is Brest Pokupski, where liquefaction occurred after the earthquake in Petrinja. Comparing the results of tests conducted for the Brest Pokupski area, it was concluded that increasing the value of peak horizontal soil acceleration has a significantly greater impact on increasing the probability relative to the magnitude of the earthquake, while lowering groundwater levels results in reduced probability of liquefaction.

Key words: liquefaction, liquefaction potential, cone penetration test (CPTU), peak ground surface acceleration, magnitude