

# Likvefakcijski potencijal nekoherentnog tla

---

**Dragojević, Boris**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:443844>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Boris Dragojević

**LIKVEFAKCIJSKI POTENCIJAL  
NEKOHERENTNOG TLA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Boris Dragojević

**LIKVEFAKCIJSKI POTENCIJAL  
NEKOHERENTNOG TLA**

DIPLOMSKI RAD

izv. prof. dr. sc. Lovorka Librić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Boris Dragojević

**LIQUEFACTION POTENTIAL OF  
COHESIONLESS SOILS**

MASTER THESIS

izv. prof. dr. sc. Lovorka Librić

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA



Ja :

Boris Dragojević

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Likvefakcijski potencijal nekoherentnog tla

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

18.9.2024.

Potpis:

Boris Dragojević



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

Boris Dragojević

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Likvefakcijski potencijal nekoherentnog tla

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

izv. prof. dr. sc. Lovorke Librić

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

26.9.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

18. 9. 2024.

Potpis:

Boris Dragojević

## ZAHVALE

Ovim putem iskrene zahvale idu roditeljima (majci Jadranki i ocu Petru) koji su bili podrška tijekom cijelog perioda studiranja. Bez njihove pomoći i nekih savjeta prolazak kroz ovaj izazovni put bio bi teži.

Također, izdvojio bih zahvalu samome sebi što sam kao individua kroz godine studiranja uspio pravovaljano reagirati (obzirom na godine) na određene neočekivane situacije, nevezane nužno uz fakultet. To je izrazito bitno obzirom da je to razdoblje, razdoblje izgradnje nas kao mladih neovisnih osoba. Na to je svakako utjecala i disciplina koju fakultet traži od studenta, određene osobine od roditelja i vršnjaka koje sam uspio poprimiti ili naučiti ali i osobni karakter koji sam uspio izgraditi.

Zahvala ide i svim kolegama koje su mi pomogli tijekom studija i dali savjet za bilo koji zadatak, program ili ispit jer je ta pomoć značila.

Također, zahvala ide i svim osobama van fakulteta koje su me upoznale tijekom studija i bile mi motivacija i podrška na svoj način.



## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisano je na koji način se može interpretirati likvefabilnost tla preko terenskih ispitivanja koja su najčešća u praksi – standardni penetracijski pokus, statički penetracijski pokus te seizmičke metode.

U početnom dijelu dan je teoretski pregled o pojmovima vezanim uz potres i potrese u Hrvatskoj.

Nakon toga, objašnjena je uloga geotehnike kao discipline u potresnom inženjerstvu.

Nadalje, dan je pregled svih relevantnih korelacija kojima se može interpretirati likvefabilnost tla sa konačnim ciljem dobivanja faktora sigurnosti na likvefakciju ili vjerojatnosti pojave likvefakcije za neko tlo.

Također, primjerom provedenim na terenu za CPT i geotehničkim profilom tla za Vs pokazano je koje zone tla mogu biti više, a koje manje podložne likvefakciji.

Na kraju, opisano je kako koji parametar može utjecati na promjenu likvefakcijskog potencijala tla.

**Ključne riječi:** potres; likvefakcija; faktor sigurnosti; vjerojatnost pojave likvefakcije; modeliranje u programu Settle3; terenska ispitivanja.

## SUMMARY

This master thesis describes how soil liquefaction can be interpreted through the most common field tests in practice - Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT) and seismic methods.

The initial part provides a theoretical overview of concepts related to earthquakes and seismic activity in Croatia.

Following this, the role of geotechnics as a discipline in earthquake engineering is explained.

Subsequently, an overview of all relevant correlations that can be used to interpret soil liquefaction is given, with the ultimate goal of determining the factor of safety against liquefaction or the probability of liquefaction occurrence for a given soil.

Additionally, an example conducted in the field using CPT and the geotechnical soil profile for shear wave velocity ( $V_s$ ) shows which soil zones are more or less susceptible to liquefaction.

Finally, the thesis describes how each parameter can influence the change in the soil's liquefaction potential.

**Key words:** earthquake; liquefaction; factor of safety; probability of liquefaction occurrence; modeling in Settle3 software; field testing.

## SADRŽAJ

ZAHVALE .....	i
SAŽETAK .....	ii
SUMMARY .....	iii
SADRŽAJ .....	iv
1. UVOD .....	1
2. METODE I TEHNIKE RADA .....	1
3. POTRESI U HRVATSKOJ.....	2
3.1. Seizmologija i nastanak potresa.....	2
3.1.1. Seizmologija i potresi u Hrvatskoj.....	6
• Seizmičnost petrinjskog područja.....	9
4. ULOGA GEOTEHNIKE U POTRESNOM INŽENJERSTVU.....	12
5. OPĆENITO O LIKVEFAKCIJI.....	16
5.1. Izvor podataka za likvefakciju .....	17
5.2. Primjeri likvefakcije.....	19
6. INTERPRETACIJA POTENCIJALA LIKVEFAKCIJE - ODREĐIVANJE POMOĆU STANDARDNOG PENETRACIJSKOG TESTA, STATIČKOG PENETRACIJSKOG TESTA I BRZINE POSMIČNIH VALOVA.....	21
6.1. Uvod.....	21
6.2. Likvefakcijski potencijal – interpretacija rezultata .....	22
6.2.1. Faktor sigurnosti FS.....	22
6.2.1.1. Koeficijent cikličkog naprezanja CSR.....	22
• Faktor redukcije naprezanja, $r_d$ .....	23
6.2.1.2. Koeficijent korekcije magnitude, MSF.....	26
6.2.2. Standardni penetracijski pokus (SPT) – korelacije na osnovu rezultata pokusa.	28
6.2.2.1. Uvodno o SPT - u.....	28
6.2.2.2. Korekcijski faktor SPT-N .....	29
• Faktor pritiska nadsloja, $C_N$ .....	30
• Korekcijski faktor efikasnosti energije nakovnja/čekića, $C_E$ .....	31

• Korekcijski faktor promjera bušotine, $C_B$ .....	31
• Korekcijski faktor duljine šipke, $C_R$ .....	32
• Youd i dr. (2001.) (Izvor: [30]) .....	32
• Cetin i dr. (2001.) (Izvor: [37]) .....	32
• Korekcijski faktor za uzorkivač, $C_S$ .....	33
6.2.2.3. Koeficijent cikličke otpornosti, $CRR$ .....	34
6.2.2.4. Relativna gustoća, $D_R$ .....	39
• Korekcija sitnih čestica.....	40
6.2.2.5. Koeficijent korekcije nadsloja, $K\sigma$ .....	41
6.2.2.6. Koeficijent korekcije zbog posmičnog naprezanja (koeficijent korekcije nagiba tla), $K\alpha$ .....	43
6.2.3. Statički penetracijski pokus (CPT) – korelacije na osnovu rezultata pokusa.....	44
6.2.3.1. Uvodno o CPT – u.....	44
6.2.3.2. CPT – postojeće korelacije za procjenu likvefakcijskog potencijala.....	44
6.2.4. Brzina posmičnih valova ( $V_s$ ) – korelacije na osnovu rezultata pokusa.....	50
6.2.4.1. Uvodno o brzini posmičnih valova i seizmičkim metodama pomoću kojih se ti valovi mjere.....	50
6.2.4.2. $V_s$ – postojeće korelacije za procjenu likvefakcijskog potencijala .....	50
<b>7. MODELIRANJE U PROGRAMU SETTLE3 ZA PRIMJER BRESTA POKUPSKOG (SISAČKO – MOSLAVAČKA ŽUPANIJA).....</b>	<b>54</b>
7.1. Uvod.....	54
7.1.1. Pretpostavke prilikom korištenja programa .....	54
7.2. Primjer – procjena likvefakcije za lokaciju Brest Pokupski .....	55
7.2.1. Značajke lokacije u trenutku provedbe istražnih radova i lokacije istražnih radova .....	55
7.2.2. Profil tla na predmetnoj lokaciji.....	57
7.2.3. Analiza za statički penetracijski test - CPT.....	58
7.2.3.1. Rezultati.....	58
7.2.3.2. Zaključak.....	59
7.2.4. Analiza za standardni penetracijski test - SPT.....	61
7.2.4.1. Rezultati.....	63
7.2.4.2. Zaključak.....	64
7.2.5. Analiza za brzinu seizmičkih valova - $V_s$ .....	66
7.2.5.1. Rezultati.....	67

---

7.2.5.2. Zaključak.....	68
<b>8. ZAKLJUČAK - USPOREDBA RAZLIČITIH METODA ZA ODREĐIVANJE FAKTORA SIGURNOSTI I VJEROJATNOSTI POJAVE LIKVEFAKCIJE .....</b>	<b>69</b>
8.1. Faktor sigurnosti, FS – determinističke metode .....	69
8.1.1. Koeficijent korekcije magnitude, MSF.....	69
8.1.2. Koeficijent korekcije nadsloja, $K\sigma$ .....	69
8.1.3. Koeficijent korekcije zbog posmičnog naprezanja, $K\alpha$ .....	70
8.1.4. Koeficijent cikličkog naprezanja, CSR.....	70
8.1.5. Koeficijent cikličke otpornosti, CRR.....	70
8.2. Vjerojatnost pojave likvefakcije, $P_L$ – probabilističke metode.....	71
8.3. Općenito.....	72
<b>9. POPIS LITERATURE.....</b>	<b>73</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>78</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>80</b>

## 1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada je procjena likvefakcijskog potencijala tla putem rezultata iz terenskih ispitivanja (SPT, CPT i Vs). Cilj je za određeno tlo procijeniti koliki je faktor sigurnosti, odnosno kolika je vjerojatnost pojave likvefakcije.

Motivacija za odabir ove teme bili su razorni potresi koji su pogodili petrinjsko i sisačko područje prije nekoliko godina, a iz aspekta geotehnike ova tema ima posebnu dimenziju. Likvefabilnost tla često je zanemarena karakteristika do njene pojave. Međutim, uslijed pojave takvog ponašanja tla, moguća je velika materijalna i ljudska šteta.

Stoga, inženjer građevinarstva u području geotehnike treba imati znanja o ovakvim pojavama kako bi mogao pravovremeno reagirati i pristupiti nekim mjerama sanacije ili općenitog poboljšanja tla.

## 2. METODE I TEHNIKE RADA

U ovom diplomskom radu korištena je eksperimentalna metoda istraživanja, koja je uobičajena u geotehnici. Osnova za pisanje rada su bile metode i korelacije koje su brojni znanstvenici i inženjeri u proteklih 50-ak godina dali na raspolaganje znanosti u vidu procjene likvefakcijskog potencijala tla. Ovim radom je dan pregled svih važnih korelacija i potvrđene su te interpretirane neke zakonitosti.

Također, izradom reprezentativnog modela primjenjena je metoda modeliranja. Za podatke o SPT – u i CPT – u provedeni na području Sisačko – Moslavačke županije dan je primjer u programu Settle3 i pregled na koji način se to tlo ponaša u vidu likvefakcije, odnosno koliki su faktor sigurnosti i vjerojatnost pojave likvefakcije za dobivene rezultate sa navedenog područja.

### 3. POTRESI U HRVATSKOJ

U početku poglavlja govorit će se o najvažnijim pojmovima vezanima uz potres, dok će u njegovom nastavku biti govora o samim potresima u Hrvatskoj.

#### 3.1. Seizmologija i nastanak potresa

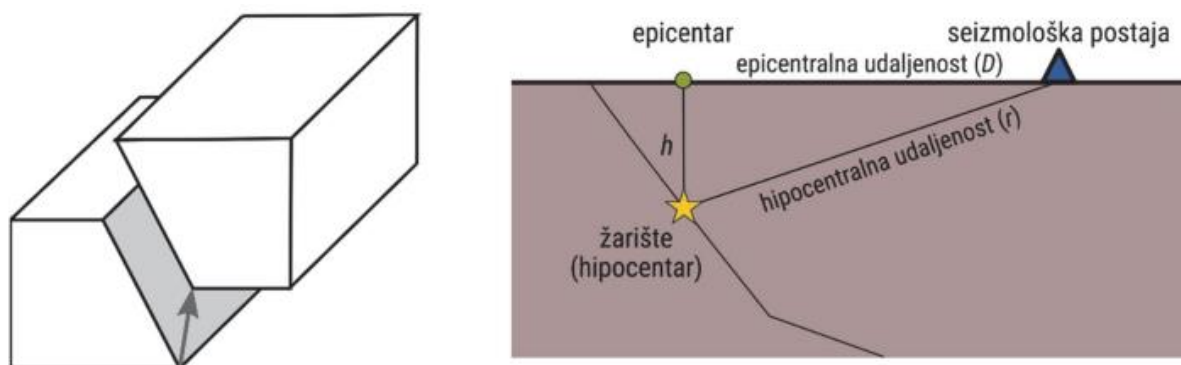
Kako bi se potres mogao definirati, potrebno je definirati neke pojmove važne za njegovo razumijevanje.

Seizmologija je, kako je navedeno u izvoru [1], geofizička disciplina koja proučava nastajanje potresa, rasprostiranje seizmičkih valova, njihov učinak na površini Zemlje i samu građu Zemlje. Nadalje, ona se bavi procesima koje mogu prouzročiti pojavu potresa, procesima koji se odvijaju tijekom samog potresa i pojavama koje ostaju kao posljedica potresa.

Potresi, nadalje, nastaju naglim oslobađanjem velike količine nakupljene elastične potencijalne energije. Njihov većinski uzročnik [2] (više od 90%) je djelovanje tektonskih sila i takvi potresi se nazivaju tektonskim potresima. Osim njih, postoje još i vulkanski (7%), urušni (3%) i impaktni potresi (uzrokovani udarom meteorita) te umjetni potresi (uzrokovani nuklearnim eksplozijama i sl.).

Žarište potresa ili hipocentar je točka na rasjednoj plohi u kojoj je došlo do početnog sloma u stijenskoj masi, naglog oslobađanja dotad nakupljene energije i od koje se dalje nastavlja pomak po paraklazi, sve do trenutka dok je akumulirana energija u pretpotresnom razdoblju dovoljna da prekorači posmičnu čvrstoću stijene. Epicentar je, pak točka koja se nalazi na površini Zemlje, na vertikali iznad hipocentra. Opisano je vidljivo na slijedećoj slici.





Slika 1. Skica rasjeda: siva ploha označava rasjednu plohu između dva rasjedna krila: iznad plohe je krovinsko, a ispod plohe podinsko rasjedno krilo, a strelica označava smjer gibanja tj. pomak po samom rasjedu (lijevo). Skica odnosa hipocentra, epicentra i seizmološke postaje (desno) (Izvor: [1])

Sljedeći pojmovi su važni i iz aspekta procjene potencijala livefakcije.

Magnituda potresa  $M$  je broj (mjera) koji može opisati količinu oslobođene energije potresa, a temelji se na izmjerenoj najvećoj amplitudi pomaka seizmičkog vala. Nju je u seizmologiju kao takvu uveo Charles F. Richter 1935. godine, zbog čega je i u neformalnom govoru često ostao naziv „magnituda po Richteru“. Matematički je opisana u Izrazu 1:

$$M = \log \frac{A}{T} + F(D, h) + C \quad (1)$$

gdje su:

$A$  – najveća zabilježena amplituda vala,

$T$  - dominantni period vala u kojem je ta amplituda postignuta,

$F$  - korekcija kao kalibracijska funkcija u ovisnosti o udaljenosti epicentra potresa od postaje  $D$  i dubini žarišta  $h$ , te

$C$  - konstanta.

Intenzitet potresa predstavlja skup učinaka djelovanja potresa na Zemljinoj površini koji se klasificira u stupnjeve. U njega je uključen opis ponašanja građevina i štete na objektima u tijeku i nakon podrhtavanja tla te promjene u krajoliku i reljefu i čovjekov doživljaj trešnje.

Magnituda i intenzitet mogu se međusobno egzaktno povezati u izrazu (Izvor: [3]) :

$$\frac{M}{3,18} + \frac{\log h}{1,72} + \frac{l_0}{3,63} = 1 \quad (2)$$

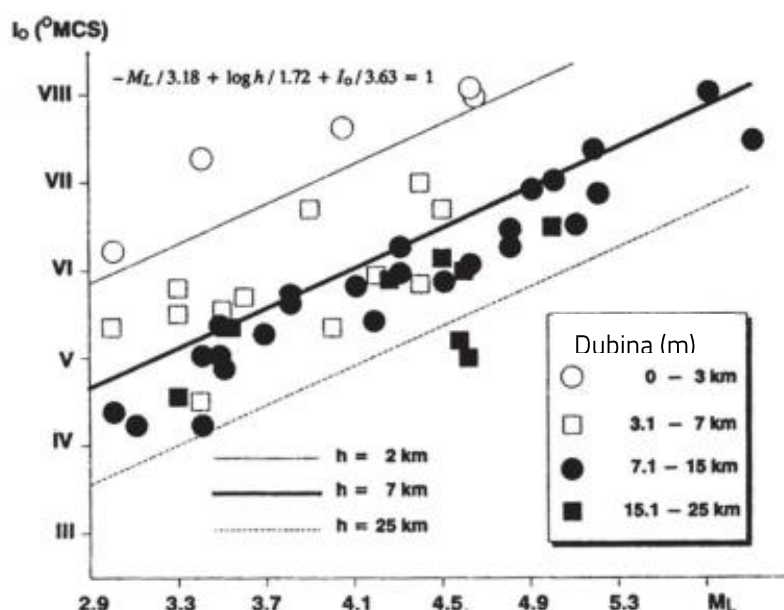
Gdje su:

M - magnituda,

h - dubina žarišta

$I_0$  - intenzitet u epicentru potresa

Valja napomenuti kako se za područje Hrvatske ovaj izraz često koristi. Na idućoj slici vidljiv je dijagram koji je opisan izrazom 2 (Slika 2.).



Slika 2. Dijagram ovisnosti intenziteta o magnitudi potresa. Za istu vrijednost magnituda a različitu dubinu, intenzitet potresa može poprimiti različite vrijednosti (Izvor: [3])

Na osi apscisa je vidljiv pojam  $M_L$  – to je lokalna magnituda. Lokalna magnituda je nešto konkretniji pojam od same magnituda i koristi se za manje, lokalne potrese. Također, često korišteni pojam je  $M_w$  – momentna magnituda. Ona se uobičajeno koristi da veće i udaljenije potrese.

Na dijagramu sa Slike 2. moguće je uočiti da za veće vrijednosti stupnjeva intenziteta bit će zabilježena i veća magnituda po Richterovoj skali. Osim toga, primjetno je da je na većim dubinama intenzitet potresa manji, za istu vrijednost magnituda.

Osim magnituda, spomenit će se još jedan bitan pojam, a to je seizmički hazard. Seizmički hazard iliti potresna opasnost predstavlja ono svojstvo potresa koje može uzrokovati štetu (ta šteta se može manifestirati kao ljudske žrtve, oštećenja/rušenja građevina, ekonomske i financijske posljedice itd.). Predstavlja iznos nekog odabranog parametra koji opisuje

potresno djelovanje i čija će se vrijednost  $s$  unaprijed odabranom vjerojatnosti prekoračiti tijekom promatranog referentnog razdoblja.

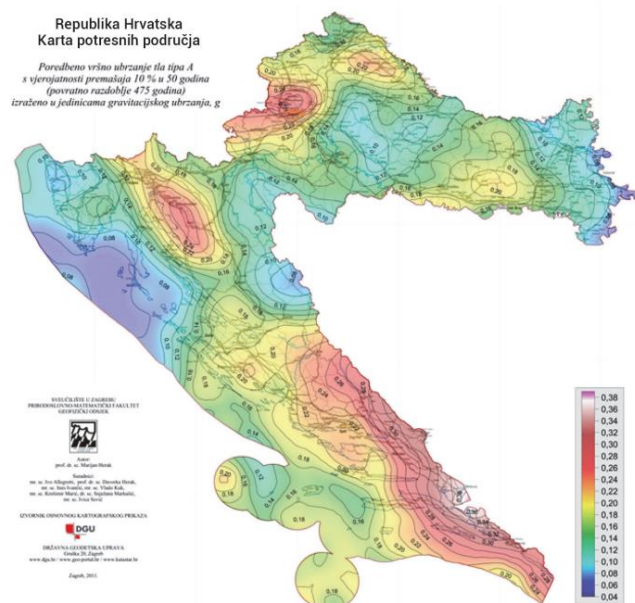
Seizmički hazard može se procijeniti na deterministički i probabilistički način, a jedan od izraza koji ga opisuje je dan u nastavku:

$$p = 100 \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{T_{pov}} \right)^{t_{ref}} \right] \quad (3)$$

U izrazu (3)  $p$  predstavlja vjerojatnost prekoračenja neke vrijednosti u postocima,  $T_{pov}$  povratno razdoblje potresa u godinama, tj. prosječni interval između dva prekoračenja vrijednosti  $a_g$  (horizontalnog ubrzanja tla) u  $m/s^2$ , a  $t_{ref}$  referentno vremensko razdoblje u godinama.

Iz izraza, jednostavnom provjerom može se dobiti da za referentno razdoblje od 50 godina i vjerojatnost prekoračenja od 10 %, povratno razdoblje  $T_{pov}$  iznosi 475 godina. Obično se za područja gdje je potresna opasnost osrednja ili velika uzima upravo ta vrijednost povratnog razdoblja kao referentna vrijednost, dok se za važne projekte i strateške građevine mogu uzeti puno veće vrijednosti povratnog razdoblja (npr. 10000 godina).

Važan parametar za projektiranje je, dakle, uz najčešće pretpostavljeno povratno razdoblje od 475 godina, parametar  $a_g$ . On, osim o  $T_{pov}$ , ponajviše ovisi i o značajkama lokacije, pa se uvelike razlikuje u ovisnosti koja je promatrana lokacija, što se vidi na Slici 3 (primjer Hrvatske).



Slika 3. Karta potresnih područja Republike Hrvatske za povratno razdoblje  $T_{pov} = 475$  god. (Izvor: [4])

Iz Slike 3. može se uočiti da su najveće vrijednosti horizontalnog seizmičkog ubrzanja  $a_g$  izražene na području Medvednice, oko Ploča i Dubrovnika te duž planine Dinara, te područje Kvarnera između Senja i Rijeke. Najmanja potresna opasnost je na području Istre, istočne i zapadne Slavonije, području Korduna i istočnog dijela Like.

### 3.1.1. Seizmologija i potresi u Hrvatskoj

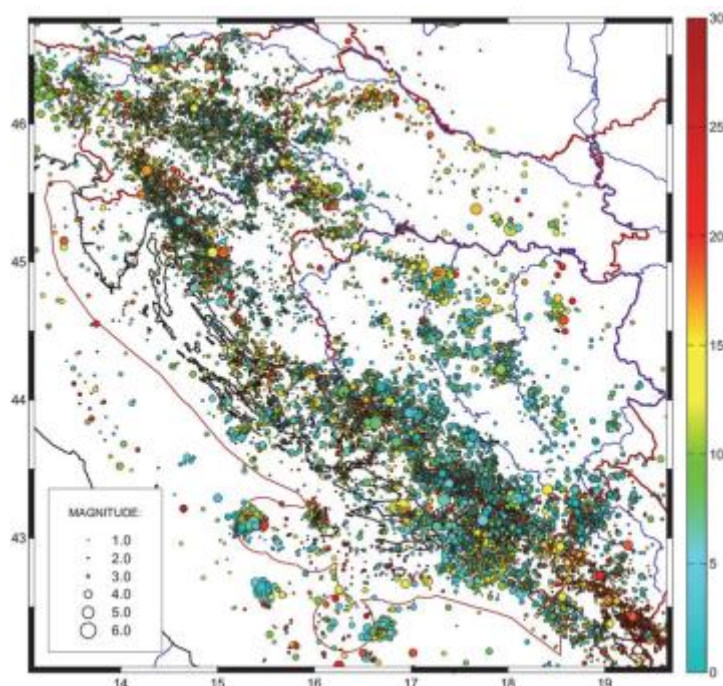
Potresnu (seizmičku) aktivnost u Hrvatskoj sustavno bilježe i prate Seizmološka služba i Geofizički zavod Prirodoslovno – matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Obzirom kako lokalitetom područje Republike Hrvatske pripada i Sredozemlju, tako i zbog konvergentnog kretanja Afričke prema Euroazijskoj ploči ujedno pripada seizmički najaktivnijem dijelu Europe. Konkretno, za područje Hrvatske primjetno je kretanje stabilnog dijela Jadranske mikroploče u odnosu na Euroazijsku ploču, brzinom do 5 mm/god, procijenjenu GPS-om (vidljivo na Slici 4.).



Slika 4. Geodinamička skica područja središnjega i istočnoga Sredozemlja i brzine konvergentnih kretanja Afričke (Nubijske), Anatolijske i Jadranske mikroploče (označena horizontalnim crtama) prema Euroazijskoj ploči (Izvor: [5])

Potresi u Hrvatskoj bilježe se i pohranjuju u Hrvatskom katalogu potresa, gdje podaci o potresima kreću još u 4. st. pr. Kr. Prvi nepouzdana podaci o zabilježenom potresu na tlu Hrvatske potječu iz 306. godine, a do kraja 2019. godine prikupljeno je osnovnih podataka

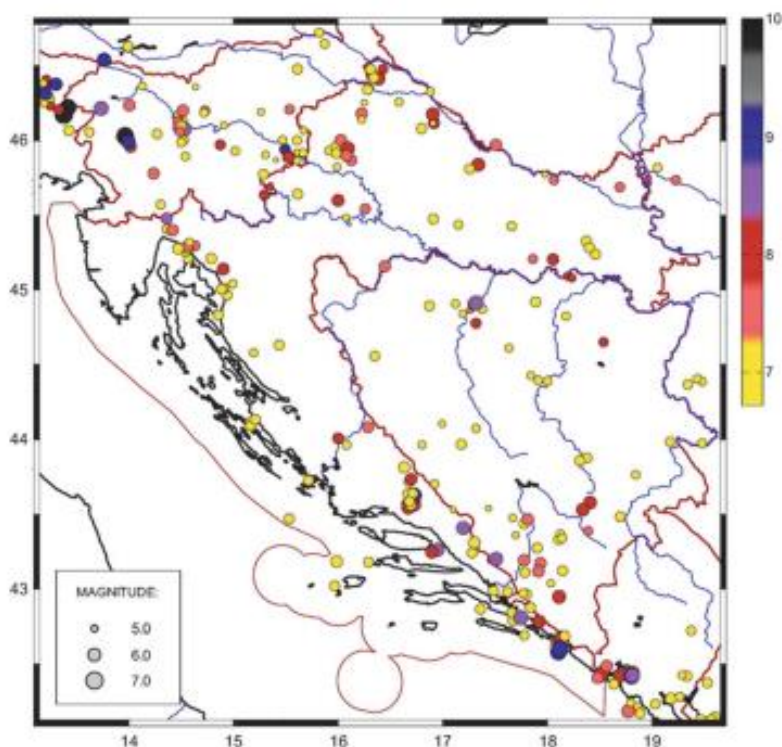
za više od 135000 potresa. Posebno, na sljedećoj slici dan je prikaz svih epicentara potresa za razdoblje 1908. – 2019 sa magnitudom većom od 1.



Slika 5. Zabilježeni potresi u Hrvatskoj sa epicentrima u i oko nje za magnitudu veću od 1  
(Izvor: [5])

Po Slici 5., lako je moguće razlučiti koja područja su više potresno aktivna, a koja manje. Jasno je da tu po potresnoj aktivnosti prednjači dinarsko, zagrebačko i kvarnersko područje. Valja za uočiti i da slika pokazuje dobru podudarnost i sa Slikom 3., jer se područja epicentara gotovo preklapaju sa područjima najvećeg horizontalnog seizmičkog ubrzanja.

Posebno, na Slici 6. moguće je vidjeti epicentre svih potresa s intenzitetom većim od VII °MCS (1500. – 2019.).



Slika 6. Zabilježeni potresi u Hrvatskoj sa epicentrima u i oko nje za intenzitet veći od VII °MCS (Izvor: [5])

Ovdje se može dati usporedba karte potresnih područja sa Slike 3. i zabilježenih potresa magnitude veće od 1 u period 1908. – 2019. sa Slike 5. Naime, unatoč tome što bi se na prvu dalo zaključiti da je zagrebačko, petrinjsko, kvarnersko te dalmatinsko – dinarsko a posebno dubrovačko područje posebno izloženo potresima, to ne mora značiti da se isključivo u tim područjima pojavljuju jači potresi (magnitude 8°MCS). Dokaz toga su vidljive žute i crvene "točke" na Slici 6. za slavonsko područje.

Nadalje, slijedeća tablica (Tablica 1.) povijesno prikazuje pregled najznačajnijih potresa u hrvatskoj povijesti do 2019. godine, gdje dio potresa označen zvjezdicom označava potrese čija magnituda nije dobivena izravno, već intenziteta.

Tablica 1. Najjači potresi po magnitudi na tlu Hrvatske, povijesni tablični pregled (Izvor: [1])

Datum	Mjesto	$M_L$	$I_0(^{\circ}MCS)$
6. travnja 1667.	Dubrovnik	7,1*	IX-X
2. srpnja 1898.	Trilj	6,7*	IX
13. travnja 1850.	Ston	6,4*	VIII-IX
1. ožujka 1870.	Klana	5,5*	VIII-IX
29. prosinca 1942.	Imotski	6,2	VIII i VIII-IX
7. i 11. Siječnja 1962.	Makarska	5,9 i 6,1	VIII
9. studenog 1880.	Zagreb	6,2*	VIII
5. rujna 1996.	Ston – Slano	6,0	VIII
8. listopada 1909.	Pokuplje	5,8	VIII
12. ožujka 1916.	Vinodol	5,8	VIII
13. travnja 1964.	Dilj Gora	5,7	VIII
27. ožujka 1938.	Bilogora	5,6	VIII
30. ožujka 1738.	Međimurje	5,1*	VIII

\*Povijesni potresi – magnituda je procijenjena iz intenziteta.

Tu se svakako (po magnitudi i intenzitetu) izdvajaju poznati dubrovački potres iz 1667. ali i primjerice zagrebački iz 1880.

Zbog posebnosti ovog rada, dat će se nekoliko riječi i o seizmičnosti petrinjskog područja na kojem su provedena ispitivanja koja su služila za kasnije interpretacije i analize u proračunima.

- Seizmičnost petrinjskog područja

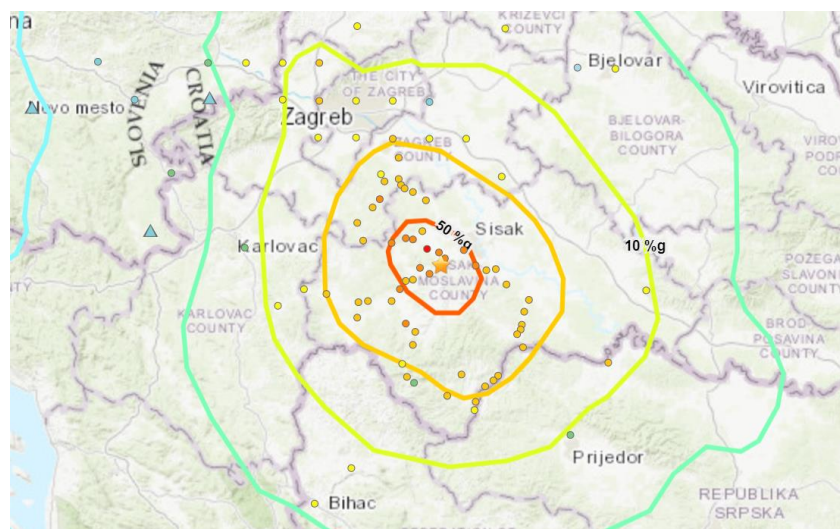
Petrinjsko – sisačko područje od velike je važnosti, naročito glede seizmičnosti promatranja mogućih potresnih pobuda. Petrinjsko područje, kao i zagrebačko, izloženo je gibanju Afričke tektonske ploče prema Euroazijskoj ploči [6].

Ovo područje je kroz posljednjih više od 100 godina pogodilo nekoliko jačih potresa, pa se mogu i nabrojiti. Najpoznatiji je potres iz 1909. godine u blizini Pokupskog magnitude 6,0. Isti potres je značajan po tome što je nakon njega naš slavni fizičar Andrija Mohorovičić ustvrdio postojanje diskontinuiteta brzina na granici kore i plašta unutar Zemlje, koji je po njemu nazvan Mohorovičićev diskontinuitet [7]. Osim navedenog, može se istaknuti i potres s epicentrom u Banja Luci iz 1969. magnitude 6,6 po Richerovoj ljestvici, karakterističnog po tome što pripada istom sustavu rasjeda kao i petrinjsko područje [8]. Sljedeća slika prikazuje razmjere potresa iz 1909. [9].



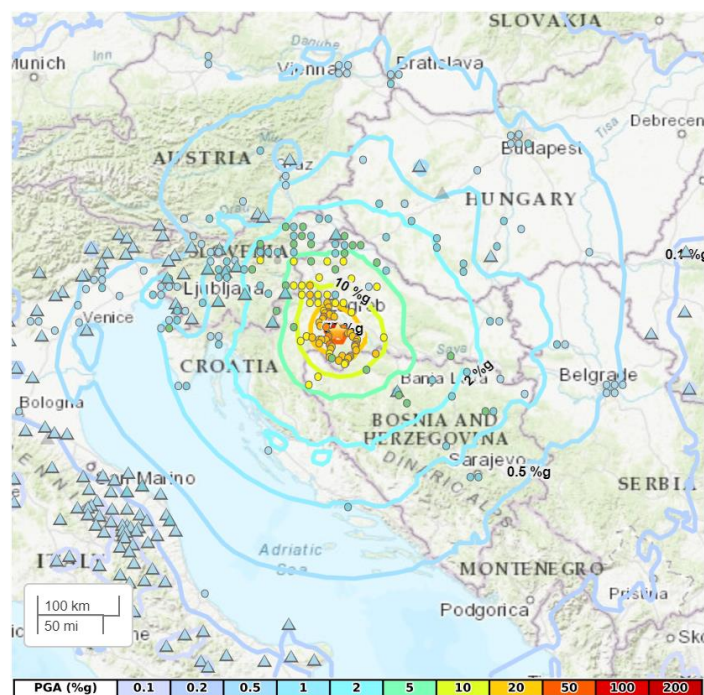
Slika 7. Razmjeri potresa iz 1909. na javnoj infrastrukturi petrinjskog područja (Izvor: [9])

Umjereno jak potres dogodio se s epicentrom u mjestu Strašnik kod Petrinje 28.12.2020., magnitude  $M_L = 5,0$ . On je jedan od niza predudarnih, „forershock” potresa prije glavnog potresa idući dan, 29.12. iste godine [6]. Taj potres bio je jače magnitude  $M_L = 6,2$  i odnio je 7 života. Na sljedeće dvije slike (Slika 14., Slika 15.) moguće je vidjeti kartu trešnje (shake map) petrinjskog potresa. Također, na slikama se može vidjeti unutar koje zone je najveći utjecaj potresa, odnosno u kojoj zoni je koliki pototak akceleracije „g” prisutan kao horizontalno ubrzanje tla.



Slika 8. Shake map za petrinjski potres (1) (Izvor: [10])





Slika 9. Shake map za petrinjski potres (2) (Izvor: [10])

Ovaj potres, osim nažalost ljudskih žrtava, za sobom je ostavio veliku štetu. Zabilježeno je da je u širem epicentralnom području došlo do brojnih popratnih naknadnih negativnih efekata iz aspekta geotehnike, kao što su slomovi tla, ponajviše klizišta, izboj pijeska, urušne vrtače i pukotine na prometnicama.

Ovakve pojave intenzivirale su se poslije potresne pobude zbog posebnih uvjeta u tlu, kako iz pogleda zasićenosti, sadržaja sitnih čestica tako i iz aspekta određenog tipa tla koji prevladava u donjim proslojcima ovih krajeva. O tome će biti riječi u sljedećim poglavljima.

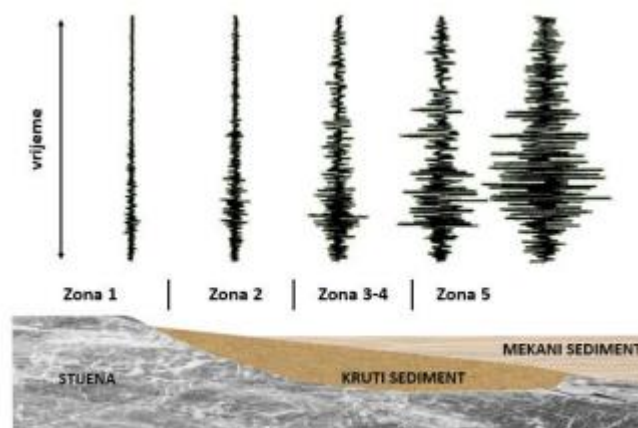
#### 4. ULOGA GEOTEHNIKE U POTRESNOM INŽENJERSTVU

Likvefabilnost tla može biti jedan od glavnih uzročnika za mnoge hazarde na geotehničkim konstrukcijama uslijed potresa. Šteta se može pojaviti na temeljnim konstrukcijama (plitkim temeljima ili pilotima), nasipima ili drugim geotehničkim konstrukcijama.

Kako bi se dobile mehaničke karakteristike tla na terenu koje su neophodne za projektiranje konstrukcija otpornih na potresna i ostala djelovanja, potrebni su terenski istražni radovi. Stoga, neki od zadataka geotehnike u seizmičkom inženjerstvu su (Izvor: [11]):

- 1) Određivanje profila temeljnog tla, što uključuje:
  - i. Određivanje amplifikacije i modifikacije spektra odziva (za dobivanje odziva lokalnog tla pri širenju seizmičkih valova od osnovne stijene do površine terena)

Amplifikacija seizmičkog odziva jest povećanje seizmičke pobude na samoj površini terena koja je posljedica razlike u impedanciji između površinskih slojeva tla i osnovne stijene (što jest otpor titranju čestica tla). Na amplifikaciju seizmičke pobude dominantno utječu debljina sedimentata, razina podzemne vode i čvrstoća, što predstavlja lokalno – geološke uvjete u tlu. Utjecaj čvrstoće vidljiv je na slici 3., sa koje se da zaključiti da u mekšim sedimentima ovaj parametar poprima veće vrijednosti, dok su u stijenama te vrijednosti značajno manje.



Slika 10. Amplifikacija seizmičke pobude u ovisnosti o lokalnim uvjetima u tlu (Izvor: [11])

Za određivanje ovog parametra potrebno je poznavati brzinu posmičnih valova karakterističnih slojeva, gustoće tla različitih slojeva te nelinearnih odnosa modula posmika i prigušenja s posmičnom deformacijom.

## ii. Određivanje mogućnosti pojave likvefakcije i prekomjernih slijeganja

## 2) Ocjena globalne stabilnosti promatrane lokacije, što uključuje:

- i. Pojavu aktivnih rasjeda
- ii. Pojavu nestabilnih padina (klizišta)

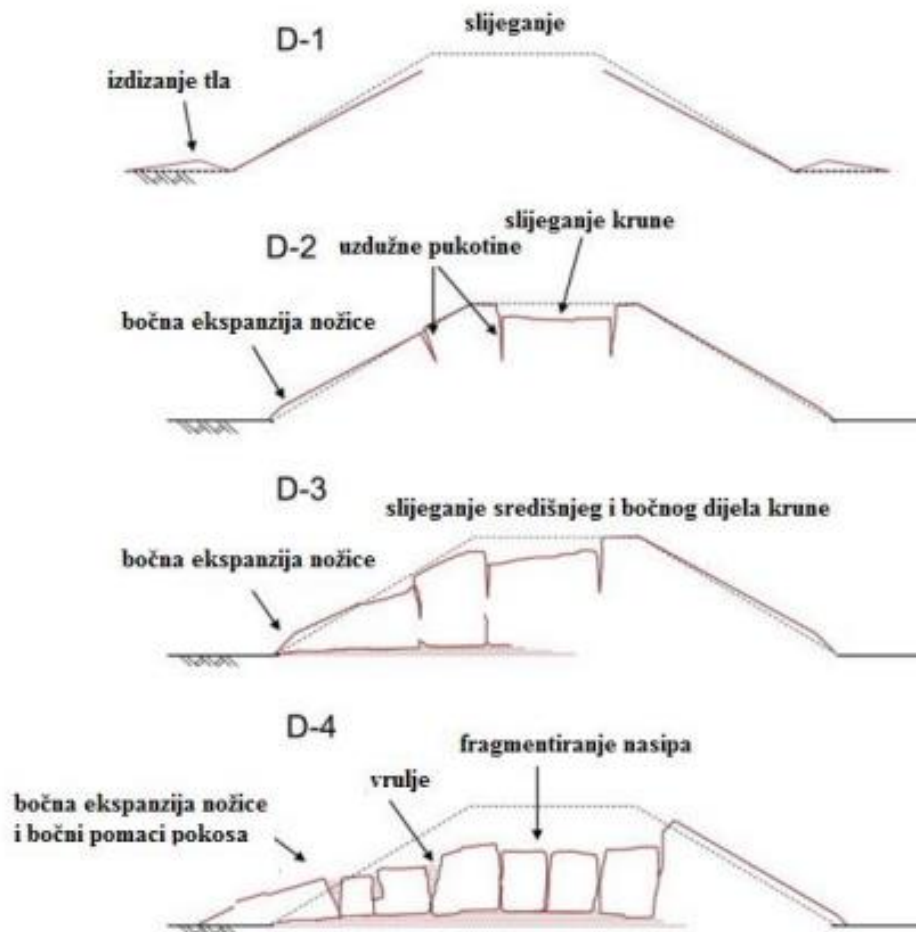
Veliki izazov inženjerima predstavljaju klimatske promjene. Naime, u pogledu stabilnosti kosina, to postaje sve veći problem jer je u posljednjih nekoliko desetaka godina izražen trend dugih sušnih perioda iza kojih dolazi period kratkotrajne, ali intenzivne kiše. Ta pojava izrazito negativno utječe na lokalnu stabilnost, jer duži sušni periodi utječu na pojavu većeg broja vlačnih pukotina (manja je vlačna čvrstoća), dok s druge strane intenzivni kišni period dovodi do naglog smanjenja posmične čvrstoće zbog direktnog smanjenja efektivnog naprezanja. Ako u takvim uvjetima neko područje pogodi potres, razmjeri štete mogu biti puno veći nego očekivani.

## 3) Određivanje utjecaja potresa na promjenu naprezanja u tlu

- i. određivanje kakav je utjecaj pritisaka od tla na geotehničke konstrukcije (temeljne, potporne, nasute, ukopane)

Ponašanje temeljnih konstrukcija u uvjetima potresa ovisi o više čimbenika: vrsta temelja, karakter opterećenja potresa, vrsta tla i uvjeti u tlu. Primjerice, kod suhih sitnozrnih tala, uslijed višestrukih opterećenja od potresa, može doći do smanjenja volumena tla što izravno uzrokuje prekomjerna slijeganja temeljne konstrukcije. S druge strane, u slučaju saturiranih pijesaka moguća je pojava likvefakcije koja uzrokuje značajna slijeganja temeljnog tla nakon disipacije pornog tlaka, a do ove pojave može doći i naknadno.

Kod nasutih konstrukcija ili brana uslijed potresnog opterećenja moguća je pojava dvije vrste oštećenja: uzdužne pukotine na vrhu brane i slijeganje krune. Ponašanje nasute konstrukcije po fazama uslijed potresa dobro opisuje i slijedeća slika (Slika 11.).



Slika 11. Ponašanje karakterističnog riječnog nasipa uslijed cikličkog djelovanja potresnog opterećenja po fazama (Izvor: [11])

Iz Slike 11., jasno se može uočiti prvotno sljeganje krune uz bočno uzdizanje tla, potom progresija uzdužnih pukotina na i oko krune do konačne fragmentacije profila nasipa uz bočne pomake i bočnu ekspanziju nožice.

Osim navedenih, važnu ulogu ima i seizmička mikrozonacija. Kako je navedeno u Izvoru [12]; „ Mikrozoniranje je izdvajanje područja istih ili sličnih svojstava, na kartama detaljnijeg mjerila, koje omogućuje lokalno razlikovanje specifičnog utjecaja ili razmatranog kriterija izdvajanja. Mikrozoniranje geohazarda služi racionalnom gospodarenju prostorom s ovog aspekta, te omogućuje usmjeravanje razvitka prema područjima manjeg rizika, ili osigurava da će se u rizičnijim područjima poduzeti odgovarajuće inženjerske mjere za postizanje zadovoljavajuće sigurnosti ljudi i imovine.“ Mikrozoniranje je izuzetno važno za razumijevanje uvjeta potresa u odnosu na karakteristike tla obzirom na različitu geološku pozadinu i daje bolji i sveobuhvatniji pristup problemu. Jedan od prigodnih primjera mikrozoniranja je mikrozoniranje Grada Dubrovnika nakon tamošnjeg potresa 1979., gdje se oštećenja konstrukcije dosta dobro podudaraju sa debljinom temeljnog nasipa u odnosu na osnovnu stijenu (odnosno izolirajuće postojće nasipa), što je moguće vidjeti na Slici 12.



Slika 12. Mikrozonacija Starog grada u Dubrovniku (Izvor: [12])

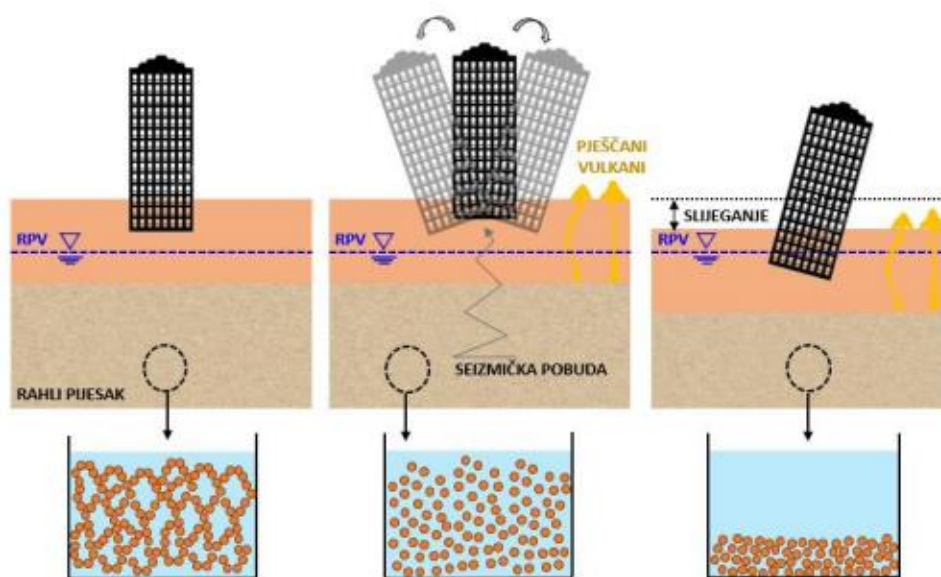
## 5. OPĆENITO O LIKVEFAKCIJI

Likvefakcija (kasnolat. *liquefactio*: topljenje [13]) predstavlja poseban segment u geotehnici i potresnom inženjerstvu. Kako je navedeno (Izvor: [14]), likvefakcija tla prirodni je fenomen, karakterističan za vodom zasićene zrnate materijale, obično tijekom jačih potresa. Ona označava da zrnata tla, poglavito pijesci, u seizmičkim uvjetima gube svoju prvotnu posmičnu čvrstoću i pretvaraju se u „gustu tekućinu“. Zbog djelovanja potresa kao jakog i brzog cikličkog opterećenja, tlo nema mogućnost dreniranja vode i u takvim uvjetima ono prelazi u nedrenirano stanje koje karakteriziraju povećani porni tlakovi zbog onemogućene promjene volumena.

Da bi se likvefakcija mogla odviti, ugrubo rečeno, moraju biti ispunjena dva uvjeta:

- 1) Tlo mora biti od materijala koje je podložno likvefakciji. Takav materijal je rahli i čisti pijesak, dok prisutnost ostalih materijala smanjuje likvefakcijski potencijal. Također, materijal tla mora biti zasićen podzemnom vodom.
- 2) Mora postojati potres odgovarajuće magnitude sa pretpostavljenim vršnim seizmičkim ubrzanjem.

Ilustrativno i shematski, prikaz likvefakcije dan je na Slici 13.



Slika 13. Ilustrativni prikaz pojave likvefakcije u tri karakteristične faze uslijed potresnog opterećenja (Izvor: [14])

Ovaj primjer je dan uz uvjet da je promatrano tlo potpuno zasićeno, tj. razina podzemne vode nalazi se iznad promatranog proslojka tla. U slučaju rahlog pijeska, postojat će manja kohezivna sila među česticama, a cijeli preostali volumen ispunjavat će voda.

Kada se pojavi seizmička pobuda tj. potres, kohezivna sila među česticama uobičajeno nije dovoljno velika pa se čestice međusobno preraspodjeljuju. Sila od potresa može biti dovoljno jaka da one bivaju raspršene, odnosno tlo se počinje ponašati kao „gusta tekućina“. Kako u tlu zbog potresa vladaju nedrenirani uvjeti, svo opterećenje od ovog opterećenja preuzima voda te se u tlu generiraju dodatni porni tlakovi. U tom trenutku nema promjene volumena tla jer nema dovoljno vremena za konsolidaciju većine vode iz tla (obično se može raditi o nekoliko sekundi ili minuta). Stoga, uz poznavanje osnova mehanike tla, lako je zaključiti da će doći do urušavanja tla jer vrijednost pornih tlakova može lako prekoračiti vrijednost čvrstoće tla. Fizikalno se to manifestira kao već spomenuta „gusta tekućina“. Također, zbog velikih pritisaka vode, na površini se mogu pojavljivati tzv. „pješčani vulkani“, odnosno dio nekoherentnog tla može izbiti i na samu površinu. Zbog ovakvih pojava, može doći do naginjanja ili prevrtanja temeljnih sustava građevina što bazno utječe na stabilnost cijelog objekta.

Na kraju, pri završetku potresa i u vremenu nakon potresa, čestice nekoherentnog tla se preraspodjeljuju u gušću strukturu. Zbog toga, evidentno je slijeganje tog sloja tla. Posljedica toga može biti potonuće, naginjanje i/ili prevrtanje objekata na površini.

Da se zaključiti da je likvefakciju kao pojavu smislenije promatrati u slabo koherentnim ili nekoherentnim tlima, upravo zbog prirode ponašanja takvih tala za vrijeme potresa.

### 5.1. Izvor podataka za likvefakciju

Podaci za procjenu opasnosti od likvefakcije tla (fenomena u kojem zasićeno tlo gubi krutost i ponaša se poput tekućine pod djelovanjem naglog opterećenja, kao što je potres) obično se dobivaju iz nekoliko ključnih izvora:

1. Geološke i geotehničke studije (Izvor: [15]):
  - Bušotine i uzorci tla: Uzorkovanje tla kroz bušotine na određenim lokacijama. Uzorci tla se analiziraju kako bi se odredile fizikalne i mehaničke karakteristike tla, poput granulometrijskog sastava, gustoće, zasićenosti vodom, te koeficijenta konsolidacije.
  - Standardni penetracijski test (SPT): Ovaj test uključuje zabijanje šipke u tlo pomoću nakovnja/čekića određenom snagom, i mjerenje broja udaraca potrebnih za zabijanje šipke na određenu dubinu. Rezultati SPT-a koriste se za procjenu potencijala likvefakcije tla.

- Statički penetracijski test (CPT): Sličan SPT-u, ali koristi konusni šiljak koji se gura u tlo uz kontinuirano mjerenje otpora na šiljku. Ovaj test daje detaljnije podatke o profilu tla i njegovoj sposobnosti da dođe u stanje likvefakcije.
2. Seizmička istraživanja (Izvor: [16]):
- Seizmički valovi: Mjerenje brzine širenja seizmičkih valova (posebno posmičnih S-valova) kroz tlo, što pomaže u procjeni krutosti tla i njegovog potencijala za likvefakciju.
  - Geofizička istraživanja: Razne metode poput seizmičke refleksije ili refrakcije, georadara i drugih tehnika za procjenu podzemnih slojeva i karakteristika tla.
3. Hidrogeološki podaci (Izvor: [15]):
- Razina podzemnih voda: Podaci o dubini i fluktuacijama razine podzemnih voda važni su jer likvefakcija uglavnom pogađa zasićene slojeve tla.
4. Povijesni podaci i modeli:
- Povijesni događaji: Analiza prethodnih potresa i njihove posljedice u vidu likvefakcije, zajedno s postojećim bazama podataka o događajima likvefakcije
  - Empirijski modeli i formule: Korištenje postojećih empirijskih metoda i modela, poput Seed-Idrissovih procedura, za procjenu rizika od likvefakcije na osnovi dobivenih podataka.

Kombinacija ovih podataka i metoda omogućuje preciznu procjenu rizika od likvefakcije na određenoj lokaciji, što je ključno za dizajn i sigurnost građevinskih objekata u seizmički aktivnim područjima.



## 5.2. Primjeri likvefakcije

U nastavku su slikama dani primjeri pojave likvefakcije i rezultati štete koje ona čini u svijetu i Hrvatskoj.



Slika 14. Ilustrativni prikaz pojave likvefakcije u tri karakteristične faze uslijed potresnog opterećenja (Izvor: [14])

Na Slici 14. prikazano je kako slijeganje uslijed pojave likvefakcije može uzrokovati slijeganje automobila na prometnicama.



Slika 15. Urušne vrtače u Meččanima nakon niza potresa 2020. (Izvor: [17])

Na Slici 15. vidljiva je pojava tzv. "urušnih vrtača" koje su bile učestala pojava nakon potresa u Petrinjskom području 2020., a uzrok im je bila likvefabilnost samog tla.

## 6. INTERPRETACIJA POTENCIJALA LIKVEFAKCIJE - ODREĐIVANJE POMOĆU STANDARDNOG PENETRACIJSKOG TESTA, STATIČKOG PENETRACIJSKOG TESTA I BRZINE POSMIČNIH VALOVA

### 6.1. Uvod

Kako bi se odredio likvefakcijski potencijal nekog materijala, mogu se koristiti razna laboratorijska ispitivanja. Tada se tlo treba dovesti u cikličko nedrenirano ponašanje, gdje se mogu dobiti podaci o parametrima tla potrebnima za složene numeričke modele u efektivnim naprezanjima. Ti pokusi nazivaju se ciklički nedrenirani ili drenirani pokus sa kontroliranim posmičnim naprezanjem ili kontroliranom posmičnom deformacijom. Međutim, ovakvi složeni numerički modeli nemaju široku namjenu u praksi, pa je obično slučaj pribjeći nekakvom jednostavnijem rješenju rutinskog određivanja likvefabilnosti tla pomoću in – situ ispitivanja kao što su CPT ili SPT, ili empirijski tzv. likvefakcijski dijagrami.

Kao rješenje ovakvog problema, moguće je izbjeći gradnju na likvefabilnom tlu. Međutim, danas postoje brojne varijante poboljšanja i ojačanja tla kako bi se likvefakcijski potencijal kao negativna značajka tla uvelike smanjila. To mogu biti adekvatno zbijanje tla, dreniranje tla ili izvedba šljunčanih stupnjaka (Izvor: [11]).

CPT (statički penetracijski test) i SPT (standardni penetracijski test) su dva najčešće korištena pokusa za dobivanje likvefakcijskih karakteristika tla (odnosno korelacija) (Izvor: [18]). Prvotno se SPT koristio za razvoj raznih korelacija za procjenu likvefakcije, međutim CPT ima određene prednosti koje su ga učinile primarnim alatom za opis neke lokacije u određenim geološkim uvjetima i za procjenu likvefakcije. Osim dva spomenuta, koristili su se još neki pokusi, poput testa brzine posmičnih valova (Vs), Becker penetracijskog testa (BPT) ili velikog penetracijskog testa (LPT), međutim primat u praksi su zauzela prva dva spomenuta.

Značaj korištenja CPT – a i SPT – a je porastao nakon potresa u prošlom desetljeću, kao što su potresi u okolini grada Canterbury u Novom Zelandu 2010.-2011. ili potres Tohoku magnitude 9,0 iz 2011. u Japanu (Izvor: [18]).

Kako bi se lakše moglo interpretirati rezultate terenskih istraživanja, u nastavku je dano kratko poglavlje o potresima i osnovnim pojmovima potrebnima za razumijevanje i interpretaciju pojave potresa.

## 6.2. Likvefakcijski potencijal – interpretacija rezultata

Da bi se likvefakcija u nekom tlu mogla ocijeniti ili procijeniti, koriste se (dominantno) „in situ“ terenska ispitivanja. Terenska ispitivanja koja se najčešće koriste, kako je već spomenuto u poglavlju 5.1. su standardni penetracijski test (SPT) i statički penetracijski test (CPT). Osim njih, iz rezultata terenskih istraživanja razmatrat će se i brzina posmičnih valova ( $V_s$ ).

### 6.2.1. Faktor sigurnosti FS

Općenito, mogućnost pojave likvefakcije odnosno njen potencijal dobiva se usporedbom dva faktora: opterećenje od potresa (CSR) i otpor likvefakcije (CRR). Taj odnos se može prikazati pomoću faktora sigurnosti (Izraz 4):

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

gdje su:

$CRR_{7.5}$  – koeficijent cikličke otpornosti za magnitudu potresa od 7.5

CSR – koeficijent cikličkog naprezanja

MSF – koeficijent korekcije magnitude

$K_{\sigma}$  – korekcijski faktor pritiska nadsloja

$K_{\alpha}$  – korekcijski faktor nagiba tla

Napomena: svi faktori su bezdimenzionalne veličine.

U nastavku će biti objašnjen svaki pojedini faktor izraza 4.

#### 6.2.1.1. Koeficijent cikličkog naprezanja CSR

Koeficijent cikličkog naprezanja, CSR, definiran je kao prosječno posmično cikličko naprezanje  $\tau_{av}$  (*cikličko* – ono koje se ponavlja u određenim razmacima, ciklusima (Izvor: [19])), generirano na horizontalnoj površini slojeva uslijed povećanja vertikalnih posmičnih valova podijeljeno sa početnim vertikalnim efektivnim naprežanjem,  $\sigma'_v$  (Izvor: [20]). Ponderiranjem (*ponderiranje* – postupak kojim se određuje odgovarajuća vrijednost pojedinih veličina prilikom izračunavanja srednje vrijednosti (Izvor: [21]) pojedinih rezultata laboratorijskih ispitivanja, utvrđeno je da je prosječna vrijednost ekvivalentnog uniformnog

naprezanja na negdje oko 65% maksimalnog posmičnog naprezanja. Stoga izraz za CSR se definira kao (Izraz 5):

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d, \quad (5)$$

gdje su:

$a_{max}$  – maksimalno horizontalno ubrzanje tla [ $m/s^2$ ]

$g$  – gravitacijsko ubrzanje tla [ $m/s^2$ ]

$\sigma_v$  – ukupno naprezanje nadsloja na dubini  $z$  [kPa]

$\sigma'_v$  – efektivno naprezanje nadsloja na dubini  $z$  [kPa]

$r_d$  – faktor redukcije naprezanja [-]

U nastavku će biti objašnjen način dobivanja faktora  $r_d$ .

- Faktor redukcije naprezanja,  $r_d$

Faktor redukcije naprezanja,  $r_d$ , koristi se za određivanje najvećeg posmičnog naprezanja za različite dubine u tlu. Obično je 1 na površini terena, a prema dubini se smanjuje.

Sljedeće korelacije se koriste za određivanje faktora  $r_d$ :

- NCEER (1997.)
- Idriss (1999.)
- Kayen (1992.)
- Cetin i dr. (2004.)
- Liao i Whitman (1986.)

Valja napomenuti da je proračun faktora  $r_d$  isti za korelacije koje koriste SPT, CPT ili Vs.

- NCEER (1997.) (Izvor: [22])

$$r_d = 1.0 - 0.00765z, \text{ za } z \leq 9.15 \text{ m} \quad (6)$$

- Idriss (1999.) (Izvor: [23])

$$\ln(r_d) = \alpha(z) + \beta(z)M_w \quad (7)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right),$$

gdje su:

$z$  – dubina u metrima  $\leq 34$  m,

$M_w$  – magnituda potresa.

Napomena:

Za dubine veće od 34 m;  $r_d = 0.5$ .

- Kayen (1992.)(Izvor: [24])

$$r_d = 1.0 - 0.012z, \quad (8)$$

gdje je :

$z$  – dubina u metrima.

- Cetin i dr. (2004.)(Izvor: [25])

$$r_d(z, M_w, a_{max}, V_{s,12m}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.999M_w + 0.0525V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201e^{0.341(-d+0.0785V_{s,12m}^*+7.586)}}\right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.999M_w + 0.0525V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201e^{0.341(0.0785V_{s,12m}^*+7.586)}}\right]} \pm \sigma_{\epsilon_{r_d}}$$

Za  $z < 20$  m

$$r_d(z, M_w, a_{max}, V_{s,12m}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.999M_w + 0.0525V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201e^{0.341(-d+0.0785V_{s,12m}^*+7.586)}}\right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.999M_w + 0.0525V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201e^{0.341(0.0785V_{s,12m}^*+7.586)}}\right]} - 0.0046(z - 20) \pm \sigma_{\epsilon_{r_d}} \quad (9)$$

Za  $z \geq 20$  m

$$\sigma_{\epsilon_{r_d}}(z) = 0.0198 * z^{0.85}, \text{ za } z < 12 \text{ m}$$

$$\sigma_{\epsilon_{r_d}}(z) = 0.0198 * 12^{0.85}, \text{ za } z \geq 12 \text{ m}$$

gdje su:

$\sigma_{\epsilon_{r_d}}$  – standardna devijacija (pretpostavlja se kao 0)

$z$  – dubina u metrima

$a_{\max}$  – maksimalno horizontalno ubrzanje tla

$V_{s,12\text{ m}}^*$  – brzina posmičnih valova na terenu iznad gornjih 12 metara

Napomene:

- Ako je teško procijeniti krutost, za  $V_{s,12\text{ m}}^*$  se uzima 150 – 200 m/s.
- Za jako meka tla sa  $V_{s,12\text{ m}}^*$  manjom od 120 m/s, uzima se granična vrijednost od 120 m/s u proračunima.
- Za vrlo kurta tla sa  $V_{s,12\text{ m}}^*$  većom od 250 m/s uzima se granična vrijednost od 250 m/s u proračunima.

- Liao i Whitman (1986.b)(Izvor: [26])

$$r_d = 1.0 - 0.00765z, \text{ za } z \leq 9.15 \text{ m}$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z, \text{ za } 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}$$

(10)

gdje je:

$z$  – dubina ispod površine terena u metrima

## 6.2.1.2. Koeficijent korekcije magnitude, MSF

U slučaju da magnitude potresa nije 7.5, vrijednosti CRR potrebno je korigirati po odgovarajućoj magnitudi. Stoga je dano nekoliko mogućih korekcija:

- Tokimatsu i Seed (1987.)
- Idriss (1999.)
- Idriss i Boulanger (2014.) – samo za SPT i CPT
- Andrus i Stokoe (1997.)
- Youd i Noble (1997.) – samo za SPT
- Cetin (2004.)
- Idriss (NCEER)

Valja napomenuti da korekcija od Idriss i Boulanger (2014.) je primjenjiva samo za CPT i SPT, dok korekcija od Youd i Noble (1997.) je primjenjiva samo za SPT.

- Tokimatsu i Seed (1987.) (Izvor: [27])

$$MSF = 2.5 - 0.2M \quad (11)$$

gdje je:

M – izmjerena magnituda potresa

- Idriss (1999.) (Izvor: [23])

$$MSF = 6.9e^{\left(\frac{-M}{4}\right)} - 0.058 \leq 1.8 \quad (12)$$

- Idriss (1999.) (Izvor: [23])

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left( 8.64e^{\left(\frac{-M}{4}\right)} - 1.325 \right) \quad (13)$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left( \frac{q_{C1Ncs}}{180} \right)^3 \leq 2.2$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left( \frac{(N_1)_{60CS}}{31.5} \right)^2 \leq 2.2$$



- Andrus i Stokoe (1997.) (Izvor: [28])

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{-3.3} \quad (14)$$

- Youd i Noble (1997.) (Izvor: [29])

Slijedeće vrijednosti MSF ovise o vjerojatnosti pojave likvefakcije, za što postoji posebna jednadžba.

$$\ln\left(\frac{P_L}{1 - P_L}\right) = -7.0351 + 2.1738M_w - 0.2678(N_1)_{60cs} + 3.0265\ln(CRR)$$

$$\text{za } P_L < 20\%, MSF = \frac{10^{3.81}}{M^{4.53}} \text{ za } M_w < 7$$

$$\text{za } P_L < 32\%, MSF = \frac{10^{3.74}}{M^{4.33}} \text{ za } M_w < 7 \quad (15)$$

$$\text{za } P_L < 50\%, MSF = \frac{10^{4.21}}{M^{4.81}} \text{ za } M_w < 7.75$$

$$\text{za } M_w \geq 7.5 \quad MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}}$$

- Cetin (2004.) (Izvor: [25])

$$MSF = \left(\frac{7.5}{M_w}\right)^{2.217} \quad (16)$$

- Idriss (2004.) (Izvor: [30])

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}} \quad (17)$$

## 6.2.2. Standardni penetracijski pokus (SPT) – korelacije na osnovu rezultata pokusa

### 6.2.2.1. Uvodno o SPT - u

U ovom kratkom poglavlju bit će dan kratki pregled postupka i rezultata standardnog penetracijskog pokusa.

Oprema pomoću koje se SPT izvodi su bušače šipke, dvodijelni cilindar, uteg i nakovanj.

Standardni penetracijski pokus, kao jedan od jednostavnijih, ostao je u širokoj primjeni od svojih početaka do danas (Izvor: [31]). Pokus se odvija na način da se uteg mase 63.5 kg pusti da padne na nakovanj sa standardne visine od 76.2 cm. Nakovanj na taj način zabija uzorkivač u tlo. Nakovanj je pričvršćen na bušače šipke, koje su pak povezane za standardnim uzorkivačem u dnu bušotine. Zabijanje se provodi dok uzorkivač ne prodre u tlo 45 centimetara. Mjeri se broj udaraca na svakih 15 cm od ukupnih 45 cm, od čega se broj udaraca za prvu trećinu odbacuje. Konačni rezultat pokusa je broj udaraca za druge dvije trećine dubine od 45 cm, broj N.

Uobičajeno je za očekivati da će porastom broja N biti veća i čvrstoća tla. Zbog toga su naknadno razvijene razne korelacije koje su dale procjenu krutosti ili čvrstoće za ispitivana tla.

Prednost ovog pokusa je ta što neka krupnozrna teško nije jednostavno ispitati u laboratoriju stoga je u takvim slučajevima ovakav postupak neophodan. Unatoč tome, uzorak tla koji dolazi u laboratorij je poremećen, a i sam postupak nije primjenjiv za meke gline i prahove.

Kako bi se odredio potencijal likvefakcije pomoću rezultata SPT-a, potrebno je definirati više pojmova:

- korekcijski faktor SPT-N
- koeficijent cikličke otpornosti (CRR)
- relativna gustoća ( $D_R$ )
- sadržaj sitnih čestica
- faktor korekcije nadsloja
- faktor redukcije posmičnog naprezanja

## 6.2.2.2. Korekcijski faktor SPT-N

Prije nego se izračuna vrijednost koeficijenta cikličke otpornosti CRR, vrijednost N iz SPT – a mora biti korigirana za više parametara: pritisak nadsloja, dužina šipke, nestandardnost uzorka, promjer bušotine, efikasnost udarne energije nakovnja. Svi navedeni faktori sadržani su u koeficijentu  $(N_1)_{60}$ .

Stoga, sama korekcija u izrazima izgleda kao u izrazima 18 i 19 (Izvor: [32]):

$$N_{60} = N C_R C_S C_B C_E$$

$$N_{60} = N_{izmjereno} \frac{E_f}{60} \quad (18)$$

$$(N_1)_{60} = N_{60} C_N \quad (19)$$

gdje su:

N – broj udaraca SPT – a

$N_{60}$  – vrijednost SPT -a normalizirana za 60% energetske učinkovitosti sustava (odnos stvarne i teorijske energije koju uteg predaje bušaćim šipkama)

$(N_1)_{60}$  – vrijednost SPT-a korigirana na efektivno vertikalno naprezanje od  $p = 100 \text{ atmPa}$  (korekcija utjecaja nadsloja tla)

$C_N$  – korekcijski faktor pritiska nadsloja

$C_R$  – korekcijski faktor duljine šipke

$C_S$  – korekcijski faktor za uzorkivač

$C_B$  – korekcijski faktor promjera bušotine, te

$C_E$  – korekcijski faktor efikasnosti energije nakovnja (čekića)

U nastavku će biti dani izrazi za svaki od navedenih koeficijenata.

- Faktor pritiska nadsloja,  $C_N$

Faktor pritiska nadsloja  $N$  poprima vrijednost  $N_1$  za istu dubinu mjerenja pokusa ako je efektivno naprezanje nadsloja 1 atmosfera (101 kPa).

Za ovaj koeficijent dostupne su sljedeće korelacije:

- Liao i Whitman (1986.a)
- Bazaraa (1967.)
- Idriss i Boulanger (2004.)
- Peck (1974.)
- Kayen i dr. (1992.)

- Liao and Whitman (1986.) (Izvor: [33])

$$C_N = \left( \frac{p_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,5} \quad (20)$$

- Bazaraa (1967.) (Izvor: [34])

$$C_N = \frac{4}{1+2\sigma'_{vo}}; \text{ za } \sigma'_{vo} \leq 1.5$$

$$C_N = \frac{4}{3.25 + 0.5\sigma'_{vo}}; \text{ za } \sigma'_{vo} > 1.5 \quad (21)$$

$$C_N \leq 2.0, \sigma'_{vo} [\text{ksf}]$$

Napomena: ksf je mjerna jedinica koja se češće koristi u SAD – u, a doslovni prijevod je *kips per square foot*, što zapravo iznosi oko 47,9 kPa.

- Idriss i Boulanger (2004.) (Izvor: [35])

$$C_N = \left( \frac{p_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.784-0.0768\sqrt{(N_1)_{60}}} \leq 1.7$$

$$(N_1)_{60} \leq 46 \quad (22)$$

- Peck, Hansen i Thorburn (1974.) (Izvor: [36])

$$C_N = 0.77 \log \left( \frac{2000}{\sigma'_{vo}} \right)$$

$$\sigma'_{vo} \leq 282 \text{ kPa} \quad (23)$$

- Kayen i dr. (1992.) (Izvor: [24])

$$C_N = \frac{2.2}{1.2 + \frac{\sigma'_{vo}}{p_a}} \leq 1.7 \quad (24)$$

- Korekcijski faktor efikasnosti energije nakovnja/čekića,  $C_E$

Efikasnost energije iz nakovnja (utega, čekića) računa se pomoću mjerenog odnosa:

$$C_E = \frac{ER_m}{60} \quad (25)$$

Vrijednost ovog koeficijenta varira od 0.5 do 1.3 (Skempton, 1986.). Primjere koeficijenta  $C_E$  moguće je vidjeti u Tablici 2.

Tablica 2. Vrijednost koeficijenta  $C_E$  u odnosu na tip nakovnja

Tip nakovnja/čekića	$C_E$
"Donut"/krafna nakovaj	0.5 – 1.0
Sigurnosni nakovanj	0.7 – 1.2
Automatski nakovanj	0.8 – 1.3

- Korekcijski faktor promjera bušotine,  $C_B$

Skempton (1986.) daje vrijednosti ovog faktora u odnosu na promjer bušotine (Tablica 3.):

Tablica 3. Vrijednost koeficijenta  $C_B$  u odnosu na promjer bušotine

Promjer bušotine (mm)	$C_B$
65 - 115	1.0
150	1.05
200	1.15

- Korekcijski faktor duljine šipke,  $C_R$

Korekcijski faktor duljine (bušače) šipke govori o tome kako duljina šipke utječe na prijenos energije na uzorkivač.

Za ovaj faktor dane su dvije korelacije:

- Youd i dr. (2001.)
- Cetin i dr. (2004.)
- Youd i dr. (2001.) (Izvor: [30])

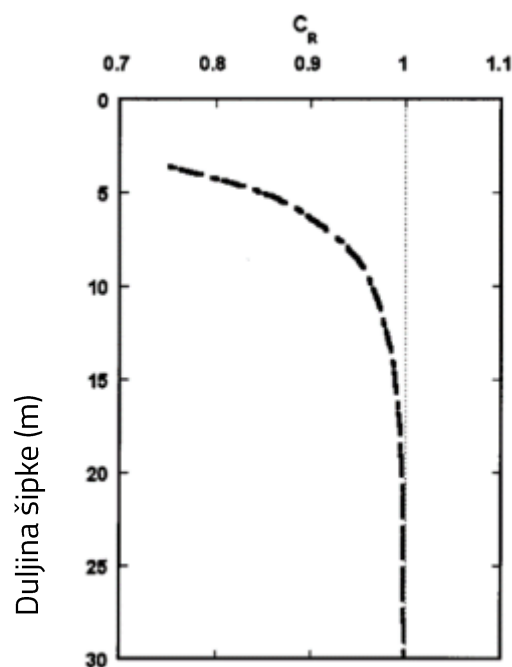
Za različite duljine šipke, Youd i ostali dali su vrijednosti korekcijskog faktora u odnosu na duljinu štapa (Tablica 4).

Tablica 4. Vrijednost koeficijenta  $C_R$  u odnosu na duljinu bušače šipke

Duljina šipke (m)	$C_R$
<3	0.75
3 - 4	0.80
4 - 6	0.85
6 - 10	0.95
10 - 30	1.00

- Cetin i dr. (2001.) (Izvor: [37])

Cetin je dao preporučene vrijednosti koeficijenta  $C_R$  (za dijagram na Slici 16). Duljina šipke se odnosi na duljinu od nakovnja do vrha uzorkivača). Može se uočiti da Cetin pretpostavlja duljinu od 1.2 m za stršenje (izbočenje) šipke pa je ova vrijednost dodana dubini prije nego je sam korekcijski factor proračunat.

Slika 16. Preporučene vrijednosti koeficijenta  $C_R$  (Izvor: [37])

Da se zamijetiti da vrijednosti koeficijenta  $C_R$  konvergiraju prema vrijednosti 1 kako se povećava duljina šipke (slični rezultati kao i kod Youd-a). Ovaj korekcijski faktor primjenjuje se u slučajevima kada uzorkivač u razdvojenoj cijevi ima prostora za prstenaste umetke, međutim ti umetci nisu korišteni.

Uobičajeno, za standardni uzorkivač s umetkom, korekcijski faktor iznosi 1.0.

- Korekcijski faktor za uzorkivač,  $C_S$

Ovaj korekcijski faktor primjenjuje se u slučajevima kada uzorkivač u razdvojenoj cijevi ima prostora za prstenaste umetke, međutim ti umetci nisu korišteni.

Uobičajeno, za standardni uzorkivač s umetkom, korekcijski faktor iznosi 1.0.

Za uzorkivače bez umetka, korekcijski faktor  $C_S$  varira između 1.0 i 1.3. Vrijede slijedeća pravila (Tablica 5):

Tablica 5. Vrijednost koeficijenta  $C_S$  u odnosu na vrijednost  $N_{1,60}$ 

$C_S$	Uvjet
1.1	$N_{1,60} \leq 10$
$1 + \frac{N_{1,60}}{100}$	$10 \leq N_{1,60} \leq 30$
1.3	$N_{1,60} \geq 30$

### 6.2.2.3. Koeficijent cikličke otpornosti, CRR

Koeficijent cikličke otpornosti (CRR) još je jedan od faktora potrebnih za proračun faktora sigurnosti u odnosu na mogućnost likvefakcije. CRR predstavlja najveće cikličko naprezanje (CSR) pod kojim tlo može podnijeti likvefakciju.

Proračun koeficijenta CRR, korigirano za magnitudu, dan je slijedećim izrazom:

$$CRR = CRR_{7,5}MSF \quad (26)$$

Slijedeće su metode proračuna koeficijenta CRR:

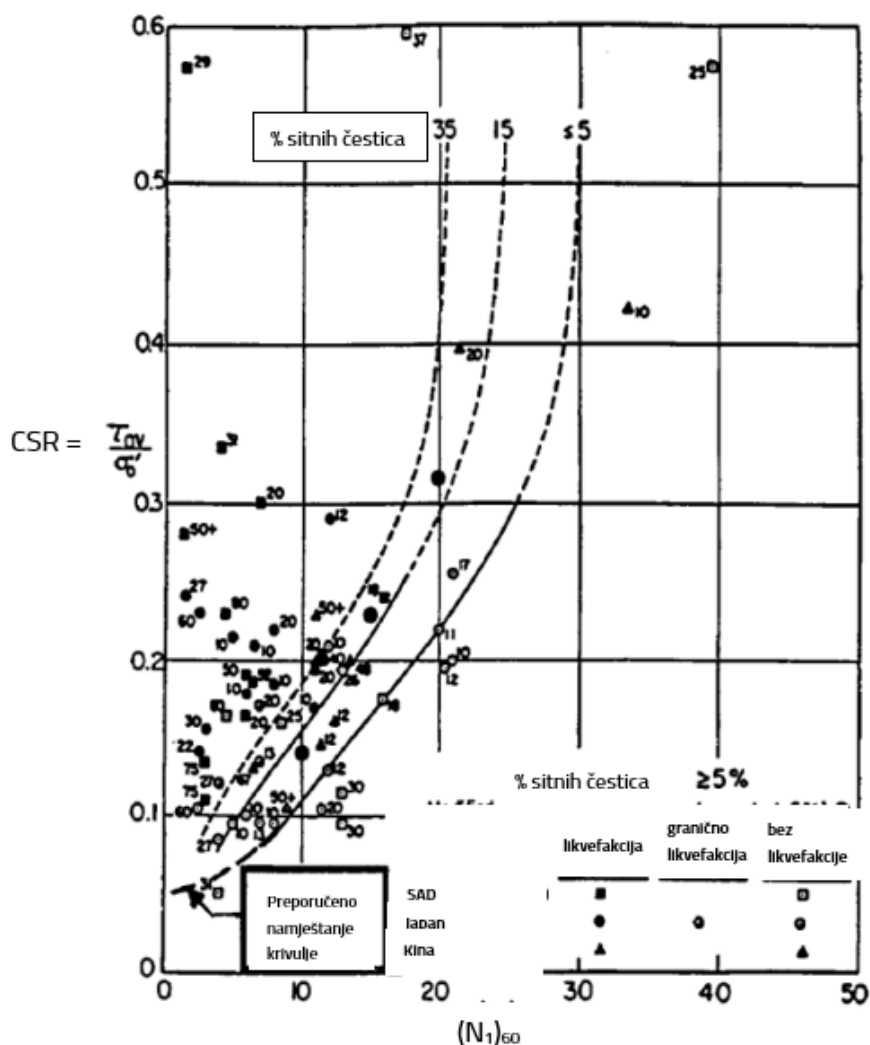
- Seed i dr. (1984.)
- NCEER (1997.)
- Idriss i Boulanger (2004.)
- Cetin i dr. (2004.) deterministički
- Japanese Bridge Code (JRA 1990.)
- Cetin i dr. (2004.) probabilistički
- Liao i dr. (1988.) probabilistički
- Youd i Noble (2001.) probabilistički

U nastavku su navedene ili ukratko opisane svaka metoda pojedinačno.



- Seed i dr. (1984.)

Na Slici 17. grafički je prikazana metoda određivanja koeficijenta cikličke otpornosti koju su predložili Seed i dr.

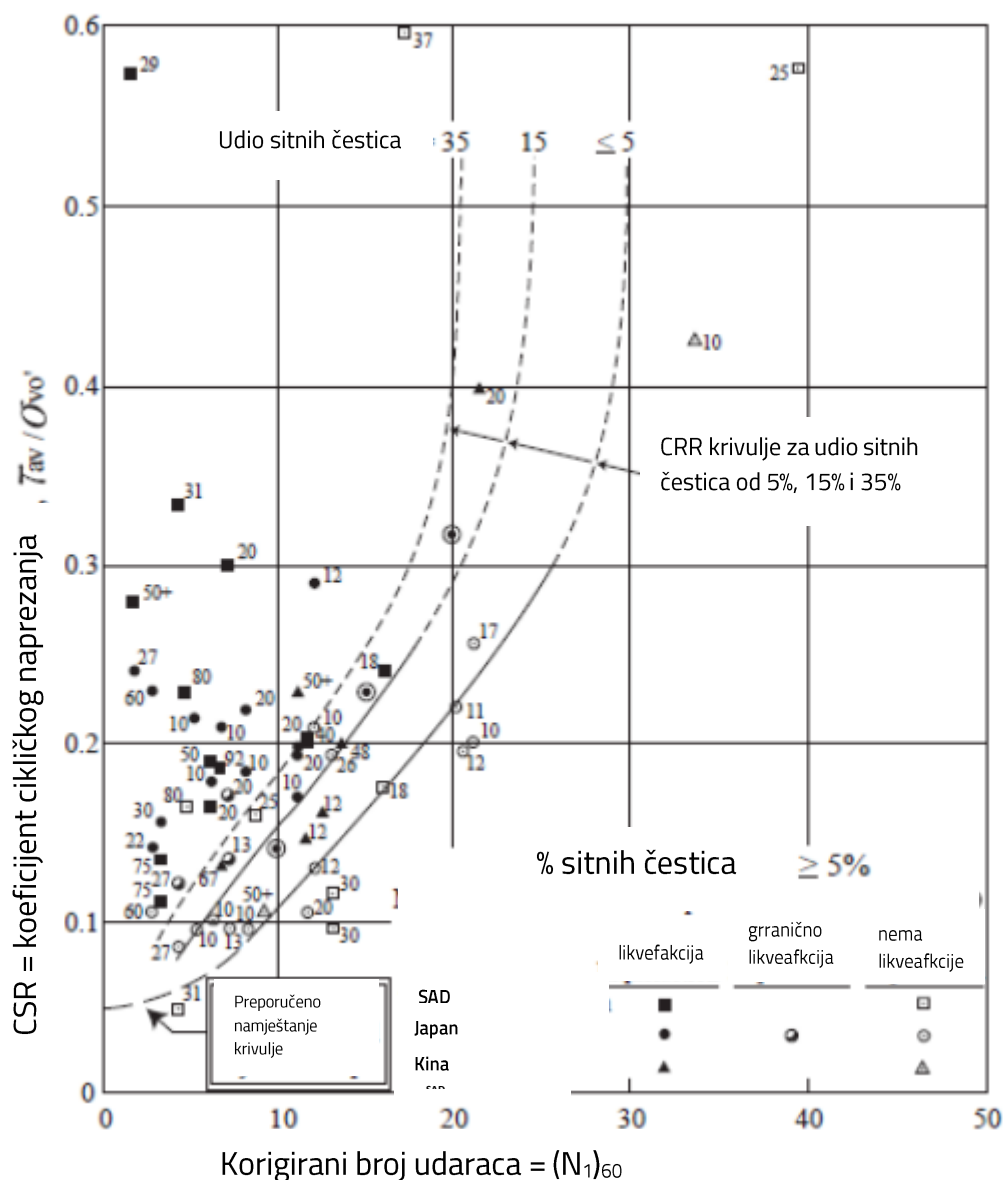


Slika 17. Granična krivulja likvefakcije – korelacija za  $(N_1)_{60}$  vrijednosti i CRR ( $M = 7.5$ )  
(Izvor: [38])

Krivulja na Slici 17. daje empirijske vrijednosti koeficijenta CRR za podatke iz SAD-a, Japana i Kine. Na osi apscise je korigirana vrijednost broja udara SPT-a  $(N_1)_{60}$ , a na osi ordinate vrijednost CSR (koeficijenta cikličkog naprezanja). Može se uočiti da povećanjem udara SPT-a raste vrijednost CSR poglavito ako je udio sitnih čestica veći od 35%. Porastom CSR automatski raste i mogući CRR.

- NCEER (1997.)

Ova krivulja se zasniva na krivulji od Seed (1984.), a predložili su je Youd i Idriss (2001.).



Slika 18. Pojednostavljena bazna krivulja preporučena za proračun CRR-a iz podataka o SPT – u sa empirijskim podacima o likvefakciji (Izvor: [22])

Iz ovih podataka vidljiv je sličan trend kao i u prethodnoj krivulji, stoga su komentari na ovu krivulju analogni prošloj.

Ovaj izraz ima slijedeći oblik:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (27)$$

gdje je:

$(N_1)_{60cs}$  - vrijednost SPT-a korigirana na efektivno vertikalno naprezanje od  $p = 100 \text{ atmPa}$  (korekcija utjecaja nadsloja tla) za čisti pijesak ("clean sand")

- Idriss i Boulanger (2004.) (Izvor: [35])

$$CRR_{7.5, \sigma=1} = e^{\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8} \quad (28)$$

Ova korelacija dana je izrazom sa eksponentom te se isto može primjetiti ovisnost o broju udaraca SPT-a.

- Cetin i dr. (2004.) – deterministička metoda (Izvor: [25])

Cetin je predložio izraz koji uzima u obzir vjerojatnost pojave likvefakcije, a korekciju sitnih čestica je ubacio u sam izraz.

$$CRR((N_1)_{60}, M_w, \sigma'_v, FC, P_L) = e^{\left[ \frac{(N_1)_{60}(1+0.004FC) - 29.53 \ln(M_w) - 3.70 \ln\left(\frac{\sigma'_v}{Pa}\right) + 0.005FC + 16.85 + 2.70\phi^{-1}(P_L)}{13.32} \right]} \quad (29)$$

- Japanska „Bridge Code“ (1990.) (Izvor: [39])

Ova metoda zasniva se na  $N$  vrijednosti čistog pijeska, kao i na distribuciji veličine čestica.

Napomena da je u jednadžbi  $\sigma'_v$  u  $\text{kg/cm}^2$ .

$$CRR_{M=7.5, \sigma=1} = 0.0882 \sqrt{\frac{(N_1)_{60cs}}{\sigma'_v + 0.7}} + 0.255 \log\left(\frac{0.35}{D_{50}}\right) + R_3,$$

za  $0.05 \text{ mm} \leq D_{50} < 2 \text{ mm}$

$$CRR_{M=7.5, \sigma=1} = 0.082 \sqrt{\frac{(N_1)_{60cs}}{\sigma'_v + 0.7}} - 0.05,$$

za  $0.6 \text{ mm} \leq D_{50} < 2 \text{ mm}$

(30)

$R_3 =$  za  $FC < 40\%$  i  $R_3 = 0.004FC - 0.16$  za  $FC \geq 40\%$

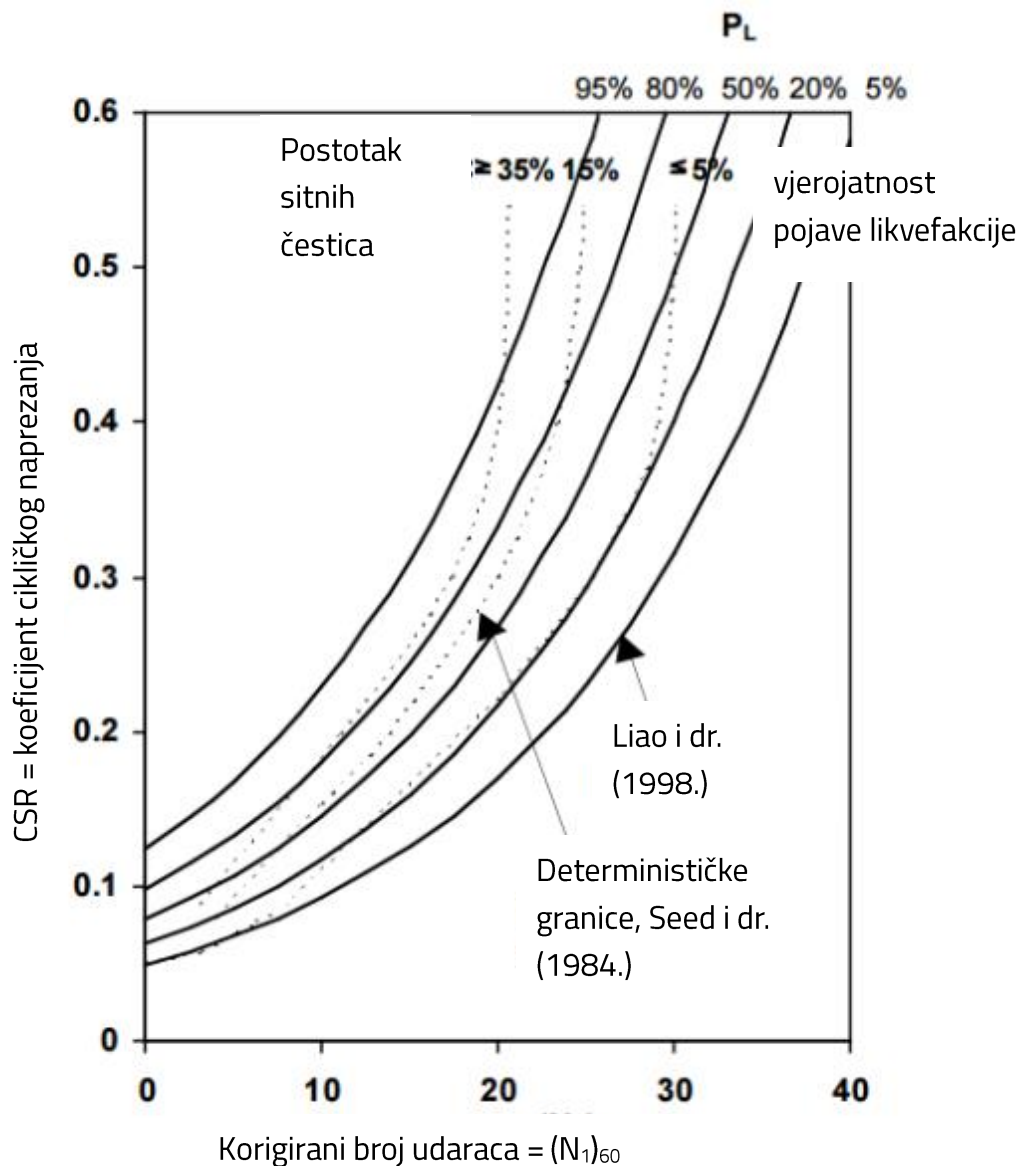
- Cetin i dr. (2004.) – probabilistička metoda (Izvor: [25])

Slično kao i u determinističkoj analizi, Cetin i dr. (2004.), korekcija sitnih čestica je u probabilističkoj analizi prebačena izravno u izraz za vjerojatnost pojave likvefakcije. Stoga se da zamijetiti gotovo identičan izraz sa determinističkom analizom iz iste godine:

$$P_L((N_1)_{60}, CSR_{eq}, M_w, \sigma'_v, FC) = \Phi \left( \frac{(N_1)_{60}(1 + 0.004FC) - 13.32 \ln(CSR_{eq}) - 29.53 \ln(M_w) - 3.70 \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0.05FC + 16.85}{2.7} \right) \quad (31)$$

- Liao i dr. (1998.) – probabilistička metoda

Dijagram koji opisuje ovu metodu dan je na Slici 19.



Slika 19. Mogućnost pojave likvefakcije preko podataka iz SPT - a, probabilistički (Izvor: [40])

Iz dijagrama na slici 8. grafički je povezano više pojmova – CSR,  $(N_1)_{60}$ ,  $P_L$ . Da se uočiti da ova metoda daje rubno jako male vrijednosti vjerojatnosti pojave likvefakcije za manji koeficijent cikličkog naprezanja ili nešto veći broj udaraca iz SPT-a.

6.2.2.4. Relativna gustoća,  $D_R$ 

Relativna gustoća,  $D_R$ , korištena je u proračunu faktora korekcije nadsloja,  $C_N$ . Metode za dobivanje faktora su:

- Skempton (1986.)
- Ishihara (1976.)
- Tatsuoka i dr. (1980.)
- Idriss i Boulanger (2003.)
- Ishihara, Yasuda i Yokota (1981.)

U nastavku su prikazani izračuni za svaku od metoda.

- Skempton (1986.) (Izvor: [41])

$$N_{1,60} = 41 * D_R^2 \quad (32)$$

- Ishihara (1977.) (Izvor: [42])

$$D_R = 0,9 * (N_{1,60} + 14 + 6.51 \log_{10} FC) \quad (33)$$

- Tatsuoka i dr. (1980.) (Izvor: [43])

$$D_R = 0,9 * (N_{1,60} + 14 + 6.51 \log_{10} FC) \quad (34)$$

- Idriss i Boulanger (2003.) (Izvor: [44])

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{1,60}}{46}} \quad (35)$$

- Ishihara, Yasuda i Yokota (1981.) (Izvor: [45])

$$D_R = 0.0676\sqrt{N_{1,60}} + 0.085 \log_{10} \left( \frac{0.5}{D_{50}} \right) \quad (36)$$

Da se zaključiti da korekcija zbog relativne gustoće ovisi o udarcima iz SPT-a i granulometrijskom sastavu (udjelu sitnih čestica i sito za postotak prolaza od 50%).

- Korekcija sitnih čestica

Metode za procjenu korekcije sitnih čestica su:

- Idriss i Boulanger (2008.)
- Youd i dr. (2001.)
- Cetin i dr. (2004.)

U nastavku su dani izračuni za svaku od navedenih metoda.

- Idriss i Boulanger (2008.) (Izvor: [46])

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

$$\Delta(N_1)_{60} = e^{\left(1.63 + \frac{9.7}{FC+0.01} - \left(\frac{15.7}{FC+0.01}\right)^2\right)} \quad (37)$$

- Youd i dr. (2001.) (Izvor: [30])

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60}$$

$$\alpha = 0 \text{ za } FC \leq 5 \%$$

$$\alpha = e^{\left(1.76 - \left(\frac{190}{FC^2}\right)\right)} \text{ za } 5 \% \leq FC \leq 35 \%$$

$$\alpha = 5.0 \text{ za } FC \geq 35 \% \quad (38)$$

$$\beta = 1.0 \text{ za } FC \leq 5 \%$$

$$\beta = \left(0.99 - \left(\frac{FC^{1.5}}{1000}\right)\right) \text{ za } 5 \% < FC < 35 \%$$

$$\beta = 1.2 \text{ za } FC \geq 35 \%$$

- Cetin i dr. (2004.) (Izvor: [37])

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} C_{FINES}$$

$$C_{FINES} = (1 + 0.0004FC) + 0.05 \left(\frac{FC}{N_{1,60}}\right) \text{ za } 5 \% \leq FC \leq 35 \% \quad (39)$$

Po izrazima se da zaključiti da korekcija sitnih čestica ponajviše ovisi o njenoj samoj količini u uzorku te korigiranom broju udaraca SPT-a.

6.2.2.5. Koeficijent korekcije nadsloja,  $K_\sigma$ 

CRR se može korigirati zbog opterećenja nadsloja. Vrijednost koeficijenta CRR za pijesak ovisi o efektivnim naprezanjima nadsloja; otpornost na likvefakciju se povećava povećanjem tlačnih naprezanja u tlu.

Tri su metode za dobivanje ovog koeficijenta iz SPT-a:

- Hynes i Olsen (1999.)
- Idriss i Boulanger (2008.)
- Cetin i dr. (2004.)

U nastavku su dani izračuni za svaku od navedenih metoda.

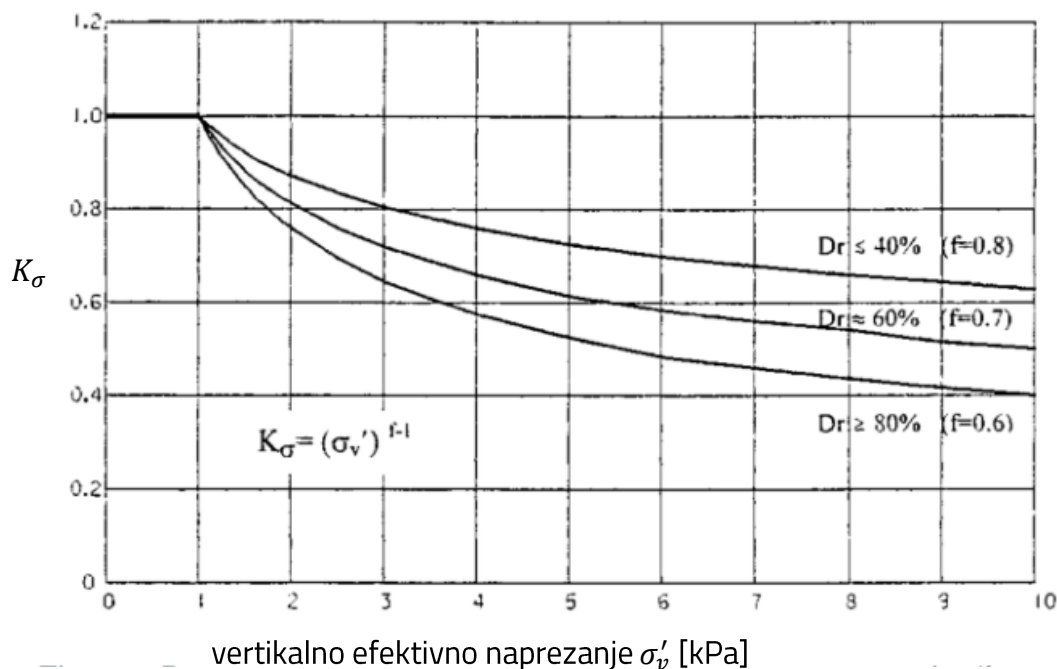
- Hynes i Olsen (1999.) (Izvor: [47])

$$K_\sigma = \left( \frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right)^{(f-1)} \quad (40)$$

$f = 0.6 - 0.7$  za  $40\% < D_R < 60\%$

$f = 0.7 - 0.8$  za  $60\% < D_R < 80\%$

Parametar  $f$  je funkcija rubnih uvjeta, a na sljedećoj slici dane su konzervativnije vrijednosti za čiste i muljevite pijeske i šljunke. Grafički prikaz izraza vidljiv je na slici 20.



Slika 20. Vrijednosti  $K_\sigma$  u inženjerskoj praksi (Izvor: [40])

- Idriss i Boulanger (2008.) (Izvor: [46])

Ova metoda ima sličnu primjenu kao ona istih autora iz 2004., osim što je gornja granica za  $K$  viša.

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln \left( \frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right) \leq 1.1$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{(18.9 - 17.3D_R)} \leq 0.3$$

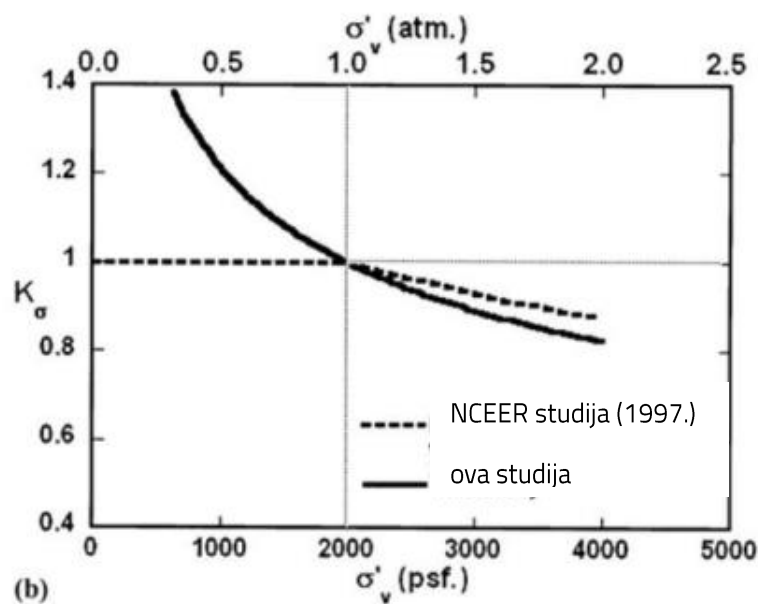
(41)

$D_R$  se može procijeniti iz broja udaraca SPT-a:

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60cs}}{C_d}}$$

Gdje vrijednost relativne gustoće ne smije prijeći 100%.

Na slijedećoj slici prikazane su preporučene vrijednosti.



Slika 21. Vrijednosti  $K_{\sigma}$  po preporukama NCEER (za  $n=0.7$  i  $DR < 60\%$ ) (Izvor: [46])

Iz svega se da zaključiti da korekcija nadsloja ovisi o početnom efektivnom naprezanju od samog nadsloja, atmosferskom pritisku i relativnoj gustoći. Vrijednosti koeficijenta  $K_{\alpha}$  pokazuju negativni prirast (padaju) s povećanjem efektivnog naprezanja od nadsloja i s povećanjem atmosferskog pritiska.



6.2.2.6. Koeficijent korekcije zbog posmičnog naprezanja (koeficijent korekcije nagiba tla),

$$K_{\alpha}$$

$K_{\alpha}$  jest statički korekcijski faktor posmičnog naprezanja, korišten za korekciju CRR vrijednosti u uvjetima statičkih posmičnih naprezanja. Izraze za ovaj faktor dali su Idriss i Baulanger (2003.) (Izvor: [44]).

$$K_{\alpha} = a + b \exp\left(\frac{\xi_R}{c}\right)$$

$$a = 1267 + 636\alpha^2 - 634 \exp(\alpha) - 632 \exp(-\alpha)$$

$$b = \exp[-1.11 + 12.3\alpha^2 + 1.31 \ln(\alpha + 0.0001)]$$

$$c = 0.138 + 0.126\alpha + 2.52\alpha^3$$

$$\xi_R = \frac{2.2p_{\alpha}}{Q - \ln\left(\frac{100p'}{p_{\alpha}}\right)} - D_R$$

$$\alpha \leq 0.35$$

$$-0.6 \leq \xi_R \leq 0$$

(42)

gdje su:

$D_R$  - relativna gustoća

$p'$  - srednje efektivno normalno naprezanje

$Q$  – empirijska konstanta koja određuje vrijednost  $p'$  ( $Q = 10$  za feldspat minerale, 8 za vapnenac i 5.5 za kredu)

$P_{\alpha}$  – atmosferski pritisak

$\alpha$  – tangens kuta nagiba

Dakle, za korekciju zbog posmičnog naprezanja da se zaključiti da ovisi o više faktora, kao što su relativna gustoća, mineralni sastav te srednje normalno naprezanje na promatranoj dubini.

### 6.2.3. Statički penetracijski pokus (CPT) – korelacije na osnovu rezultata pokusa

#### 6.2.3.1. Uvodno o CPT – u

Statički penetracijski pokus (CPT) izvodi se kontinuiranim utiskivanjem posebne električne sonde u tlo. Sonda je promjera 35.7 mm, površine poprečnog presjeka 10 cm<sup>2</sup>, a utiskivanje se vrši pomoću šipki istog promjera brzinom od 20 mm/s. Pri dnu sonda je konusno oblikovana sa šiljkom prema dolje (vršni kut konusa sonde je 60°).

Statičkim penetracijskim pokusom mjeri se otpor na šiljku, označen kao  $q_c$ . Izražen je kao:

$$q_c = \frac{\text{ukupna aksijalna sila}}{\text{površina poprečnog presjeka}} \quad (43)$$

U slučaju da se u pokusu mjeri i porni tlak, vrijednost  $q_c$  potrebno je korigirati za vrijednost pornog tlaka i tada se od  $q_c$  oduzima ta vrijednost. Oznaka za otpor na šiljku u tom slučaju je  $q_r$ .

Osim otpora na šiljku, ovim pokusom mjeri se i trenje po plaštu, čija je oznaka  $f_s$ .

$$f_s = \frac{\text{ukupna sila trenja}}{\text{površina plašta}} \quad (44)$$

Korigirana vrijednost, na analogan način dobivena kao i za otpor na šiljku, označava se kao  $f_r$ .

Velika prednost ovog pokusa je mogućnost kontinuiranog mjerenja po dubini. Međutim, za pojedine situacije treba razmotriti isplativost njegove uporabe jer je relativno skup, nije primjenjiv za meka tla ili jako krupnozrna te ne postoji mogućnost vađenja uzoraka kao u slučaju kod SPT-a (Izvor: [31]).

#### 6.2.3.2. CPT – postojeće korelacije za procjenu likvefakcijskog potencijala

Kako bi se odredio potencijal likvefakcije pomoću rezultata CPT-a, koristi se više metoda:

- Robertson i Wride (1997.)
- Modificirani Robertson i Wride (1998.)
- Boulanger i Idriss (2004.)
- Boulanger i Idriss (2014.)
- Moss i dr. (2006.) – deterministički
- Moss i dr. (2006.) – probabilistički

Koeficijenti  $MSF$  i  $r_d$  imaju identičan proračun kao za SPT. U nastavku su dani postupci proračuna za svaku od navedenih metoda.

- Robertson i Wride (1997.) (Izvor: [48]).

Proračun koeficijenta  $CRR_{7.5}$  sastoji se od sljedećih koraka:

1. Proračun koeficijenta  $I_c$  koristeći metodu iz NCEER izvještaja.
2. Proračun  $q_{c1N}$  koristeći  $n$  vrijednost iz proračuna  $I_c$
3. Proračun  $q_{c1Ncs}$  sa  $K_c$  proračunatim iz NCEER preporuka.  
Dubine za  $q_{c1Ncs} \geq 160$  smatraju se nelikvefabilnima.

$$K_c = 1 \text{ za } I_c \leq 1.64 \quad (45)$$

$$K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88 \text{ za } I_c > 1.64$$

$$q_{c1Ncs} = K_c q_{c1N} \quad (46)$$

4. Proračun  $CRR$

$$CRR_{7.5} = 0.833 \left( \frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right) + 0.05 \text{ za } q_{c1Ncs} < 50 \quad (47)$$

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

- 4.1. Proračun  $I_c$

Indeks ponašanja tipa tla,  $I_c$ , proračunat je koristeći sljedeću jednadžbu:

$$I_c = [(3 - \log(Q))^2 + (1.22 - \log(F))^2]^{0.5}, \quad (48)$$

gdje su:

$$F = \left[ \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \right] \cdot 100\% \quad (49)$$

$$Q = \left[ \frac{q_c - \sigma_{v0}}{P_a} \right] \cdot \left[ \left( \frac{P_a}{\sigma_{v0}'} \right)^n \right] \quad (50)$$

Postupak proračuna je iterativan gdje se pretpostavi vrijednost koeficijenta  $n = 1.0$ , te se proračun radi na sljedeći način:

1. Ako je  $n = 1.0$ ,  $Q = \left[ \frac{q_c - \sigma_{v0}}{P_a} \right] \cdot \left[ \left( \frac{P_a}{\sigma_{v0}'} \right)^n \right] \quad (51)$

Sada je potrebno proračunati factor  $I_c$  koristeći izraz 45.

2. Ako je  $I_c > 2.6$ , tlo je glinovito i nije podložno likvefakciji.
3. Ako je  $I_c < 2.6$ , ponovno je potrebno izračunati  $Q$  koristeći  $n = 0.5$  i za taj  $Q$  je potrebno izračunati  $I_c$ .

4. Ako je  $I_c < 2.6$ , tlo se ponaša neplastično i krupnozrno je. Nije potreban daljnji proračun.
5. Ako je  $I_c > 2.6$ , tlo je vjerojatno pjeskovito. Potrebno je proračunati  $q_{c1N}$  koristeći nove izraze, sa  $n = 0.7$  u izrazu za  $C_Q$  (izraz 49 i 50).

$$q_{c1N} = C_Q \left( \frac{q_c}{P_a} \right) \leq 254 \quad (52)$$

$$C_Q = \left( \frac{P_a}{\sigma_{v0}'} \right)^n \leq 1.7 \quad (53)$$

6. Izračunati  $I_c$  za  $q_{c1N}$  iz prethodnog dijela.

- Modificirani Robertson i Wride (1998.) (Izvor: [49])

Postupak ovom metodom je sljedeći:

1. Proračun  $I_c$  iz Robertson i Wride (1998.)
2. Proračun  $q_{c1N}$  koristeći  $n$  vrijednost iz proračuna  $I_c$
3. Proračun  $q_{c1Ncs}$  sa  $K_c$  proračunatim iz Robertson i Wride (1998.).  
Dubine za  $q_{c1Ncs} \geq 160$  smatraju se nelikvefabilnima.

$$K_c = 0 \text{ za } FC \leq 5\%$$

$$K_c = 0.0267(FC - 5) \text{ za } 5 < I_c < 35\% \quad (54)$$

$$K_c = 0.8 \text{ za } FC > 35\%$$

$$\Delta q_{c1N} = \frac{K_c}{1 - K_c} q_{c1N} \quad (55)$$

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (56)$$

4. Proračun CRR iz Robertson i Wride (1997.)

$$CRR_{7.5} = 0.833 \left( \frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right) + 0.05 \text{ za } q_{c1Ncs} < 50 \quad (57)$$

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

Daljnji proračun  $I_c$  analogan je kao i za Robertson i Wride (1997.) uz manje preinake.

- Boulanger i Idriss (2004.)(Izvor: [35])

Postupak je sljedeći:

1. Proračun  $q_{c1N}$  prema Idriss i Boulanger (2004.).
2. Proračun  $K_c$  prema Idriss i Boulanger (2004.).

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1N})^{0.264}}, \text{ za } q_{c1N} \leq 211 \quad (58)$$

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma_{v0}'}{P_a}\right) \leq 1.0 \quad (59)$$

3. Proračun  $q_{c1Ncs}$  prema Idriss i Boulanger (2004.)

$$\Delta q_{c1N} = \left(5.4 + \frac{q_{c1N}}{16}\right) \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right) \quad (60)$$

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (61)$$

4. Proračun CRR po Idriss i Boulanger (2004.)

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_{V0}=1} = \exp\left(\frac{q_{c1Ncs}}{540} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{67}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{80}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{80}\right)^4 - 3\right) \quad (62)$$

Proračun  $q_{c1N}$  je iterativan:

1. Prvo se izračuna  $q_{c1N}$  za pretpostavljeni  $n = 1.0$
2. Ponovno se računa  $q_{c1N}$ , koristeći sljedeći izraz:

$$n = 1.338 - 0.249(q_{c1N})^{0.264} \quad (63)$$

Postupak se provodi do 100. iteracije. Posljednji izračunati  $q_{c1N}$  uzima se u obzir.

- Boulanger i Idriss (2014.)(Izvor: [18])

Postupak je sljedeći:

1. Proračun  $q_{cN} = q_t/P_a$

$$q_t = q_c - u_2(1 - a), \quad (64)$$

gdje je:

$a$  – omjer površine šiljka.

$$q_{cN} = \frac{q_t}{P_a} \quad (65)$$

2. Proračun  $q_{c1Ncs}$  prema Idriss i Boulanger (2008.)(Izvor: [46]). Ovaj proračun je iterativnog karaktera.

$$C_N = \left( \frac{P_a}{\sigma_v'} \right)^m \leq 1.7 \quad (66)$$

$$m = 1.338 - 0.249 (q_{c1Ncs})^{0.264}$$

$$q_{c1N} = C_N q_{cN} \quad (67)$$

$$\Delta q_{c1N} = \left( 11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \exp \left( 1.63 + \frac{9.7}{FC + 2} - \left( \frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right) \quad (68)$$

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (69)$$

3. Proračun  $K_\sigma$  prema Idriss i Boulanger (2014.)(Izvor: [18])

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1N})^{0.264}} \leq 0.3 \quad (70)$$

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left( \frac{\sigma_{v0}'}{P_a} \right) \leq 1.1 \quad (71)$$

4. Proračun CRR po Idriss i Boulanger (2014.)(Izvor: [18])

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_{v0}=1atm} = \exp \left( \frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left( \frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right) \quad (72)$$

Ovaj postupak nije iterativan za razliku od prethodna dva. Međutim, ovdje je potrebno unaprijed znati geometriju šiljka (potrebno je znati parametar  $a$  kao omjer površine šiljka u odnosu na ukupnu površinu).

- Moss i dr. (2006.)(Izvor: [50]) – deterministička metoda

Postupak je sljedeći:

1. Prvo je potrebno proračunati  $q_{c1}$ , sa proračunom  $c$  na sljedeći način:

$$c = f_1 \left( \frac{R_f}{f_3} \right)^{f_2} \quad (73)$$

$$R_f = 100 \left( \frac{f_s}{q_c - \sigma_v} \right)$$

$$f_1 = x_1 q_c^{x_2}$$

$$f_2 = -(y_1 q_c^{y_2} + y_3)$$

$$f_3 = \text{abs}(\log(10 + q_c))^{z_1}$$

gdje su:

$$x_1 = 0.78, x_2 = -0.33, y_1 = -0.32, y_2 = -0.35, y_3 = -0.49, z_1 = 1.21$$

$$q_{c1} = C_q q_c$$

$$C_q = \left( \frac{P_a}{\sigma_v'} \right)^c \leq 1.7$$

2. Proračun CRR po Moss i dr. (2006.), uz pretpostavku da je vjerojatnost pojave likvefakcije 50%.

*CRR*

$$= e^{\frac{q_{c1}^{1.045} + q_{c1}(0.110R_f) + (0.001R_f) + c(1 + 0.850R_f) - 0.848 \ln(M_w) - 0.002 \ln(\sigma_v') - 20.923 + 1.632 \phi^{-1}(P_L)}{7.177}} \quad (74)$$

Ovaj postupak također nije iterativan, međutim zahtijeva određene pretpostavke.

- Moss i dr. (2006.) (Izvor: [50]) – probabilistička metoda

Postupak je sljedeći:

1. Proračun  $q_{c1}$  sa proračunatim  $c$  na identičan način kao u determinističkoj metodi.
2. Proračun  $P_L$  (vjerojatnosti pojave likvefakcije) uz proizvoljno zadani faktor sigurnosti ili proračun CRR na proizvoljno zadanoj vjerojatnosti pojave likvefakcije  $P_L$ . Proračun CRR analogan je postupku u determinističkoj analizi. Proračun vjerojatnosti pojave likvefakcije  $P_L$  dan je u sljedećem izrazu:

$$P_L = \phi^{-1} \left( \frac{q_{c1}^{1.045} + q_{c1}(0.110R_f) + (0.001R_f) + c(1 + 0.850R_f) - 7.177 \ln(CSR) - 0.848 \ln(M_w) - 0.002 \ln(\sigma_v') - 20.923}{7.177} \right)$$

(75)

## 6.2.4. Brzina posmičnih valova ( $V_s$ ) – korelacije na osnovu rezultata pokusa

6.2.4.1. Uvodno o brzini posmičnih valova i seizmičkim metodama pomoću kojih se ti valovi mjere

Seizmičke metode su nerazorne aktivne geofizičke metode kod kojih se mjere promjene nekog parametra u tlu uslijed umjetno izazvanih pojava. One bilježe vrijeme koje je potrebno da val od izvora (generatora) doputuje do prijarnika (geofona) kroz tlo. Geofoni se mogu nalaziti na površini ili u bušotini (Izvor: [51]).

Valove koji se generiraju u tlu možemo podijeliti na prostorne i površinske. Prostorni valovi su longitudinalni i transverzalni, a površinski Rayleighjevi i Love valovi. Transverzalni ili S valovi predstavljaju posmične valove, koji služe u korelacijama za procjenu likvefakcijskog potencijala.

6.2.4.2.  $V_s$  – postojeće korelacije za procjenu likvefakcijskog potencijala

Kao i u slučaju za SPT i CPT, proračun koeficijenata MSF i  $r_d$  identičan je za proračun korelacija koje uzimaju u obzir brzinu posmičnih valova.

Metode proračuna koje se zasnivaju na brzini posmičnih seizmičkih valova su:

- Andrus (2004.)
- NCEER (1997.)
- Juang i dr. (2001.) - probabilistička metoda

Prije samih proračuna, definirat će se veličina  $v_{s1}$ :

$$v_{s1} = v_s \left( \frac{P_a}{\sigma_v'} \right)^{0.25} \quad (76)$$

U nastavku su dani postupci proračuna za svaku od navedenih metoda.

- Andrus (2004.) (Izvor: [52])

Postupak proračuna ovom metodom je sljedeći:

1. Proračun  $v_{s1cs}$  koristeći formulaciju za  $K_{fc}$  iz Juang i dr.
2. Proračun CRR po Andrusu (2004.):

$$CRR_{7.5} = 0.022 \left[ \frac{v_{s1cs}}{100} \right]^2 + 2.8 \left[ \frac{1}{215 - v_{s1cs}} - \frac{1}{215} \right] \quad (77)$$

Također, moguće je u proračun uvrstiti i korekcijske faktore nadsloja od Idrissa i Boulanger (2004.):



$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln \left( \frac{\sigma_{v0}}{P_a} \right) \leq 1.1 \quad (78)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 3.1 \left( \frac{v_{s1cs}}{100} \right)^{1.976}} \leq 0.3 \quad (79)$$

- NCEER (1997.) (Izvor: [22])

Postupak je sljedeći:

1. Proračun CRR po preporukama iz NCEER.

$$CRR = a \left( \frac{v_{s1cs}}{100} \right)^2 + \frac{b}{v_{s1c} - v_{s1}} - \frac{b}{v_{s1c}}, \quad (80)$$

gdje su  $a = 0.03$  i  $b = 0.9$ ; te:

$$v_{s1cs} = 220 \text{ za } FC < 5\%$$

$$v_{s1cs} = 210 \text{ za } FC < 35\%$$

$$v_{s1cs} = 200 \text{ za ostale vrijednosti } FC$$

2. Proračun  $v_{s1cs}$  prema Juang i dr. i proračun  $K_{\sigma}$  ako je potrebno.

- Juang i dr. (2001.) - probablistička metoda (Izvor: [53])

Proračun ovom metodom slijedi u nastavku:

1. Proračun  $v_{s1cs}$ .

$$v_{s1cs} = K_{fc} v_{s1} \quad (81)$$

gdje su:

$$K_{fc} = 1 \text{ za } FC \leq 5\%$$

$$K_{fc} = 1 + T(FC - 5) \text{ za } 5 < FC < 35\%$$

$$K_{fc} = 1 + 30T \text{ za } FC \geq 35\%$$

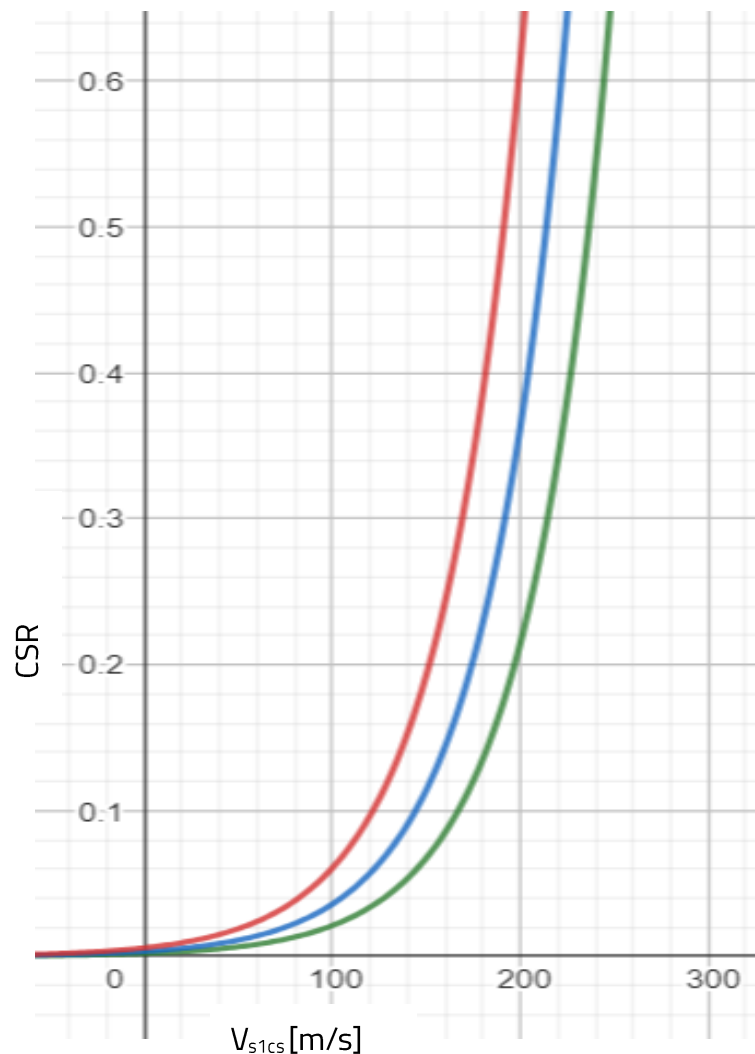
$$T = 0.009 - 0.0109 \left( \frac{v_{s1}}{100} \right) + 0.0038 \left( \frac{v_{s1}}{100} \right)^2, \quad (82)$$

2. Proračun koeficijenta  $P_L$  pomoću faktora sigurnosti koje definira korisnik, ili proračun CRR pomoću vjerojatnosti pojave likvefakcije koje definira korisnik.

$$\ln \left[ \frac{P_L}{1 - P_L} \right] = 14.8967 - 0.0611v_{s1cs} + 2.6418 \ln(CSR) \quad (83)$$

U slučaju da je proračunat koeficijent  $P_L$ , nije potreban daljnji proračun. U slučaju da je proračunat faktor sigurnosti preko CRR-a, onda je potrebno dodatno proračunati  $K_\sigma$ .

Radi lakšeg razumijevanja ovog izraza izrađen je grafikon na temelju Izraza 83, vidljiv na Slici 22.



Slika 22. Dijagram promjene CSR-a u odnosu na normaliziranu brzinu posmičnih valova za 3 moguće vjerojatnosti pojave likvefakcije

Na Slici 22., crvenom bojom označen je dijagram za  $P_L = 80\%$ , plavom za  $P_L = 50\%$  a zelenom za  $P_L = 20\%$ . Da se zaključiti da je vjerojatnost pojave likvefakcije veća time što je veći i CSR. Analogne dijagrame dobivalo se i u prethodnim poglavljima (npr. kod CPT-a).

## 7. MODELIRANJE U PROGRAMU SETTLE3 ZA PRIMJER BRESTA POKUPSKOG (SISAČKO – MOSLAVAČKA ŽUPANIJA)

### 7.1. Uvod

Settle3 je program američke tvrtke Rocscience koji nudi trodimenzionalna rješenja za analize vertikalne konsolidacije, nasipa ili površinskog opterećenja. Program kombinira jednostavnost jednodimenzionalnih analiza sa snagom i vizualnim mogućnostima sofisticiranih trodimenzionalnih programa [54].

#### 7.1.1. Pretpostavke prilikom korištenja programa

Postoji nekoliko pretpostavki koje treba uzeti u obzir prilikom korištenja ovog programa:

- Settle3 proračunava trodimenzionalna naprezanja uzrokovana površinskim opterećenjem. Tome unatoč, deformacije i porni tlakovi su proračunati u jednoj dimenziji, pretpostavljajući da se mogu pojaviti isključivo jedino pomaci u jednom smjeru. Također, parametri materijala su okarakterizirani u jednoj dimenziji, što je u skladu sa geotehničkom praksom.
- U načinu rada horizontalni slojevi tla (eng. *Horizontal Soil Layers mode*), svi slojevi tla pretpostavljeni su horizontalno i u kontinuitetu (bez prekida). Nije moguće upisati niti unijeti nehorizontalni sloj u geometriju tla. U načinu rada višestrukih bušotina (eng. *Boreholes mode*), nehorizontalni proslojci se mogu definirati. Površina tla zadana je kao horizontalna, ali može biti izmodelirana kao nehorizontalna ako se uključi mogućnost „Non – Horizontal Ground Surface option“.
- Kako je zadano, opterećenja pri zadavanju su savitljiva, pa naprezanja na površini izravno ispod opterećenja predstavljaju konstantne vrijednosti. Međutim, pomaci nisu konstantni. Kruto opterećenje također može biti dodijeljeno, ali je ograničenih mogućnosti u ovom programu.
- Zadana površina tla je pri razini 0. Prema gore visina raste, a tlačna naprezanja su pozitivna.

## 7.2. Primjer – procjena likvefakcije za lokaciju Brest Pokupski

Kako bi se prethodne korelacije pokazale na primjeru, napravljena je analiza za jedno CPTU ispitivanje (CPTU-08) prilikom provedbe istražnih radova.

### 7.2.1. Značajke lokacije u trenutku provedbe istražnih radova i lokacije istražnih radova

Mjesto Brest Pokupski je, kao i brojna druga mjesta u županiji, bilo pogođeno potresom. Poseban fenomen koji se pojavio je likvefakcija i likvefabilnost materijala. Zbog toga su provedeni istražni radovi (CPT, SPT i MASW – multikanalna analiza površinskih valova) kako bi se mogli donijeti određeni zaključci o ponašanju ovih materijala i pravovremeno, odnosno pravovaljano reagirati na moguće pojave u budućnosti.

Na Slici 23. prikazana je zona obuhvata na lokaciji Brest Pokupski, a na Slici 24. primjer pojave likvefabilnosti na samoj lokaciji (izbacivanje pijeska na površinu).

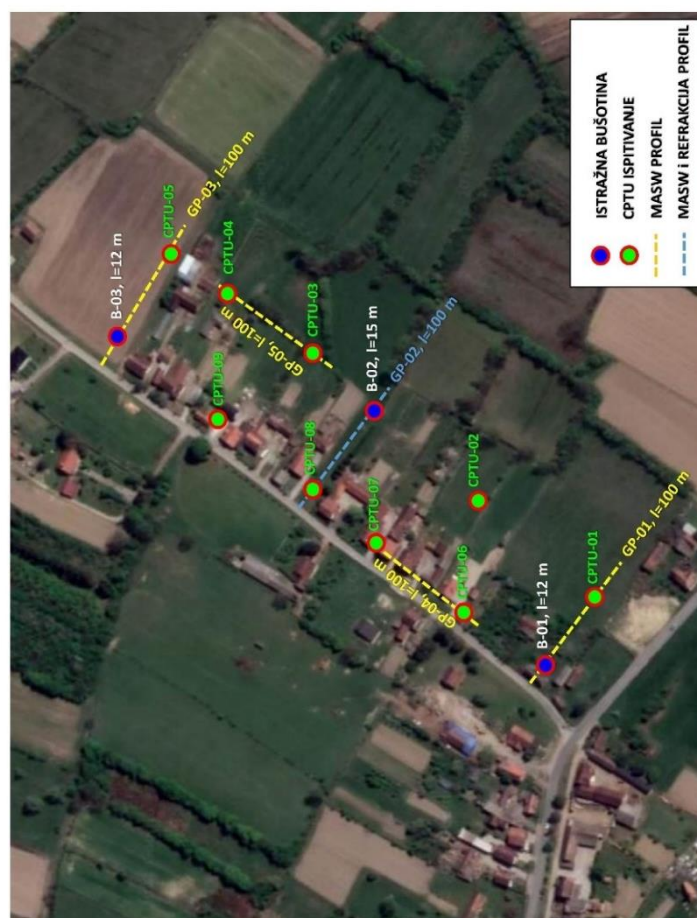


Slika 23. Zona obuhvata na lokaciji Brest Pokupski



Slika 24. Pojava likvefakcije na terenu u Brestu Pokupskom (izdizanje pijeska na površinu kao klasični pokazatelj likvefabilnosti tla)

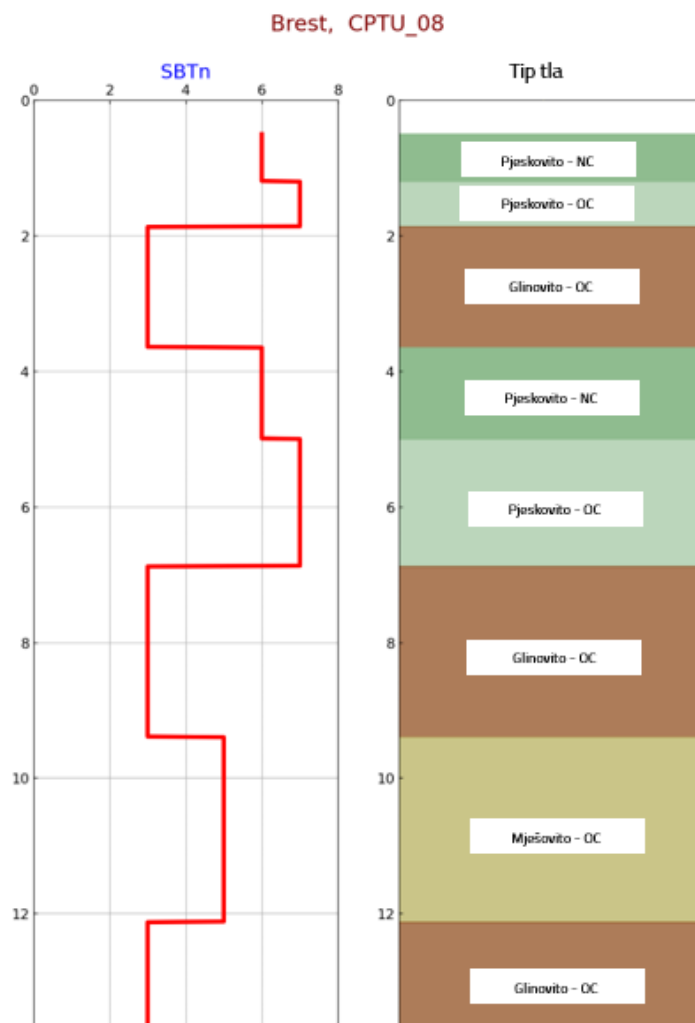
Na sljedećoj slici prikazane su lokacije istražnih radova, istražne bušotine, CPTU istraživanja te geotehnički profili tla.



Slika 25. Provedeni istražni radovi na lokaciji Brest Pokupski

## 7.2.2. Profil tla na predmetnoj lokaciji

SBT – “soil behaviour type” (tip ponašanja tla) jedan je od načina klasifikacije tla gdje se pomoću rezultata iz CPT-a (normaliziranog otpora na šiljku i koeficijenta trenja). Dobiveni profil tla uz SBT na promatranoj lokaciji za statički penetracijski test CPTU-08 sa nazivima slojeva tla prikazan je na sljedećoj slici. Na slici NC označava kontraktivno tlo (normalno konsolidirano), dok dilatativno tlo je označeno oznakom OC (“overly consolidated” - prekonsolidirano).



Slika 26. SBT i profil tla za CPTU-08

Slojevi tla su po SBT-u klasificirani na sljedeći način:

Prvi sloj je humus dubine 0,5 m, drugi pjeskovito kontraktivno normalno konsolidirano tlo dubine 0,7 m, treći pjeskovito dilatativno prekonsolidirano tlo dubine 0,7 m, četvrti glinovito dilatativno prekonsolidirano tlo dubine 1,8 m, peti pjeskovito kontraktivno normalno konsolidirano tlo dubine 1,3 m, šesti pjeskovito dilatativno prekonsolidirano tlo dubine 1,8 m,

sedmi glinovito dilatirano prekonsolidirano tlo dubine 2,5 m, osmi mješovito dilatirano prekonsolidirano tlo dubine 2,8 m te na dnu profila je glinovito dilatirano prekonsolidirano tlo dubine 2,9 m. Ukupna promatrana dubina je 15 m.

Kontraktivna tla imaju zapreminsku težinu od  $18 \text{ kN/m}^3$ , a dilatirana  $19 \text{ kN/m}^3$ .

Dubina podzemne vode je 0 m.

Za horizontalno ubrzanje tla pretpostavljena je vrijednost po karti seizmičkog ubrzanja tla od  $a_g = 0,15 \text{ g}$ . Magnituda potresa je zadana na lokalno predvidivih 6.0.

### 7.2.3. Analiza za statički penetracijski test - CPT

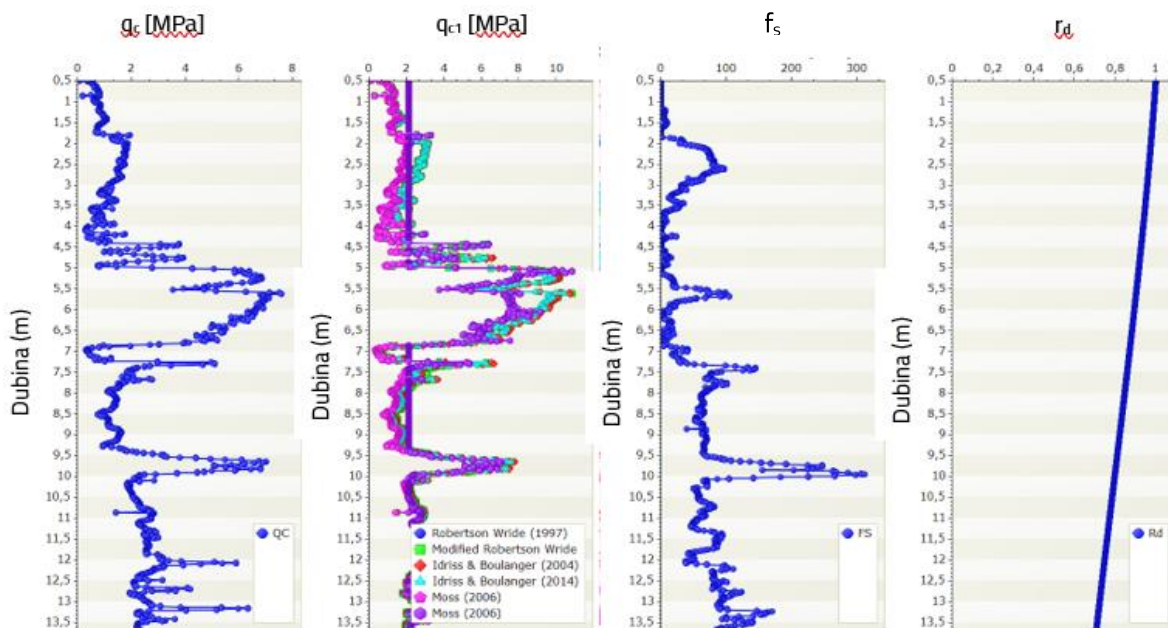
Obzirom kako su dani podaci provedenog statičkog penetracijskog testa (CPT – a), prvo će se provesti analiza u programu za CPT.

Za ulazne podatke korišteni su podaci dobiveni na terenu iz ispitivanja CPTU-08.

#### 7.2.3.1. Rezultati

Na sljedećim slikama dan je grafički prikaz rezultata.

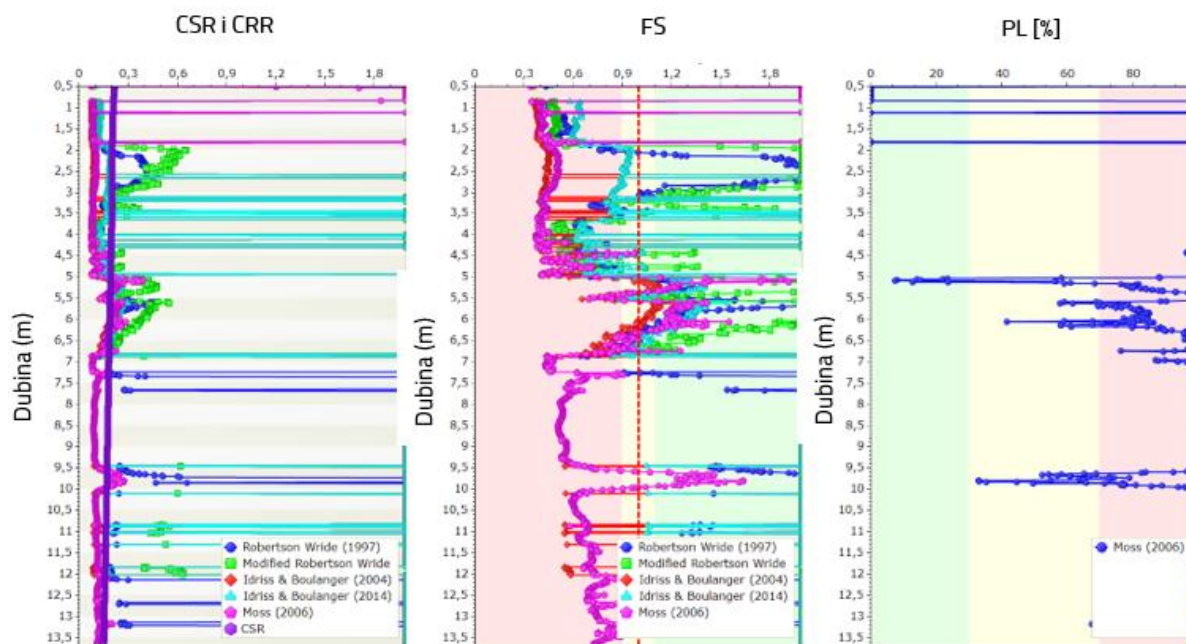
Na Slici 27. dane su rezultati ispitivanja za  $q_c$  (otpor na šiljku), korelacijama dobiveni rezultati za  $q_{c1}$  (korigirani otpor na šiljku za specifičnu dubinu u tlu),  $f_s$  (trenje po plaštu) te  $r_d$  (koeficijent redukcije naprezanja) po dubini.



Slika 27. Grafički prikaz rezultata za CPTU-08 u programu Settle3 –  $q_c$ ,  $q_{c1}$ ,  $f_s$  i  $r_d$



Na Slici 28. dane su vrijednosti CSR i CRR za razne korelacije, FS faktor sigurnosti i vjerojatnost pojave likvefakcije PL u odnosu na dubinu.



Slika 28. Grafički prikaz rezultata za CPTU-08 u programu Settle3 – CSR i CRR, FS i PL

### 7.2.3.2. Zaključak

Promatrajući rezultate grafičkog prikaza na Slici 27. i Slici 28. moguće je donijeti slijedeće zaključke.

Otpor na šiljku  $q_c$  [Mpa] pokazuje značajno veće vrijednosti u području pjeskovitog dijela između 5. i 7. metra dubine, te pokazuje trend rasta sa dubinom.

Korigirani otpor na šiljku  $q_{c1}$  [Mpa] pokazuje sličan trend kao i  $q_c$  za sve provedene metode proračuna, međutim valja istaknuti neke pojedinosti.

Idriss i Boulanger (2014.) pokazuju nešto veće vršne rezultate u zonama pijeska. Također, da se istaknuti da probabilistička metoda Moss (2006.) daje nešto manje rezultate otpora na šiljku u gornjoj zoni, dok u donjoj zoni daje nešto veće rezultate u odnosu na sve ostale analize. Sve analize daju slične trendove, u zoni pijeska je otpor veći, dok u ostalim zonama pokazuje manje vrijednosti ili nagle skokove (primjer je prijelaz slojeva iz glovito u mješovito gdje se jasno vidi veliki skok u otporu, za sve analize).

Trenje po plaštu pokazuje trend povećanja vrijednosti sa dubinom, uz vršni „peak“ koji može biti rezultat prelaska u drugu granicu slojeva (kao i u slučaju sa otporom na šiljku). U gornjim

zonama pokazuju se značajno manje vrijednosti (izrazito variraju od 0 do 100 kPa) u odnosu na donje zone pijeska (stabilnije vrijednosti na sigurnih 70 kPa ili više).

Koeficijent redukcije naprezanja pokazuje monotono smanjenje prema dnu, od gornjih 1 do oko 0,6 na dnu.

Nadalje, promatrajući koeficijent cikličkog naprezanja i koeficijent cikličke otpornosti može se zamijetiti slijedeće.

Koeficijent cikličkog naprezanja CSR pokazuje trend monotonog smanjenja prema dnu, od gornjih oko 0,2 do donjih oko 0,15. Time se pokazuje da ovaj koeficijent ne pokazuje promjene u ovisnosti o promjenama u tlu u kojem se ispitivanje provodi.

S druge strane, koeficijent cikličke otpornosti CRR za sve metode daje nemonotonost u rezultatima. Da se primijetiti da za Modificiranu Robertson i Wride metodu primjetni su manji skokovi u rezultatima, kao što je to vidljivo i za metodu Moss (2006.). Ostale metode jako su osjetljive na bilo kakve promjene u tlu (primjerice granicu slojeva).

Uspoređujući CSR i CRR da bi se dobio faktor sigurnosti, jasno se da naslutiti da zbog velikih skokova u rezultatima za CRR, većina proračuna pokazuje i skokove u dijagramu za faktor sigurnosti (što možda ne prikazuje realno stanje). Stoga, krivulja koja bi najbolje opisala likvefablnost na ovoj lokaciji je ona po Moss-u (2006.), iako daje konzervativnije rezultate u odnosu na ostale metode.

Probabilističkom analizom Moss (2006.) može se uočiti dosta izvjesna pojava da je vjerojatnost pojave likvefakcije ugrubo veća time što je faktor sigurnosti manji, i obratno. Međutim, u prijelazima slojeva te u gornjoj zoni pijeska može se uočiti veliki rasap rezultata vjerojatnosti pojave likvefakcije manje od 100%. Također, unatoč tome što je u određenim zonama faktor sigurnosti u determinističkoj metodi za Moss (2006.) veći od 1, vjerojatnost pojave likvefrakcije nije puno pala i generalno naginje na 100% pa se da zaključiti da ova metoda daje pouzdanije rezultate (unatoč tome što je tlo u samo nekim zonama ugrubo na strani sigurnosti, i dalje postoji velika vjerojatnost pojave likvefakcije).

#### 7.2.4. Analiza za standardni penetracijski test - SPT

Obzirom kako je na predmetnoj lokaciji proveden statički penetracijski test, nisu postojale vrijednosti udaraca za statički penetracijski test kako bi se provela analiza u programu te je te vrijednosti bilo potrebno procijeniti.

Procjena udaraca SPT-a iz otpora na šiljku za CPT izvodi se pomoću korelacija. Sve korelacije traže izravan odnos broja udaraca SPT-a i otpora na šiljku,  $N$  i  $q_c$ . Taj odnos izravno varira ovisno o vrsti tla.

Korelacije koje su se koristile za procjenu broja udaraca SPT-a iz otpora na šiljku u ovom radu su Acka, N. (2003.) i Sudjatkiko, E. T. (2022.) (Izvor: [55]).

Prva je prikazana na Tablici 6. a za drugu je u literaturi zaključeno da se za ekspanzivne gline može uzeti vrijednost od  $q_c/N = 0.225$ .

Tablica 6. Vrijednost kvocijenta  $q_c / N$  za korelaciju prema Acka, N. (2003.)

Tip tla	Preporučena korelacija, $q_c / N$
Glina i prašinasta	0.35
Pjeskovita glina i prašinasti pijesak	0.2
Pjeskoviti prah	0.35
Sitni pijesak	0.6
Pijesak	1.0

Prema te dvije korelacije, podjelom cijelog profila na odsječke od 0,5 m, uprosječivanjem vrijednosti otpora na šiljku za svaki odsječak te svrstavajući svaki odsječak u odgovarajući tip tla, dobiveni su sljedeći procijenjeni rezultati za SPT, vidljivi na Tablici 7.:

Tablica 7. Procjena broja udaraca SPT-a iz CPTU-08

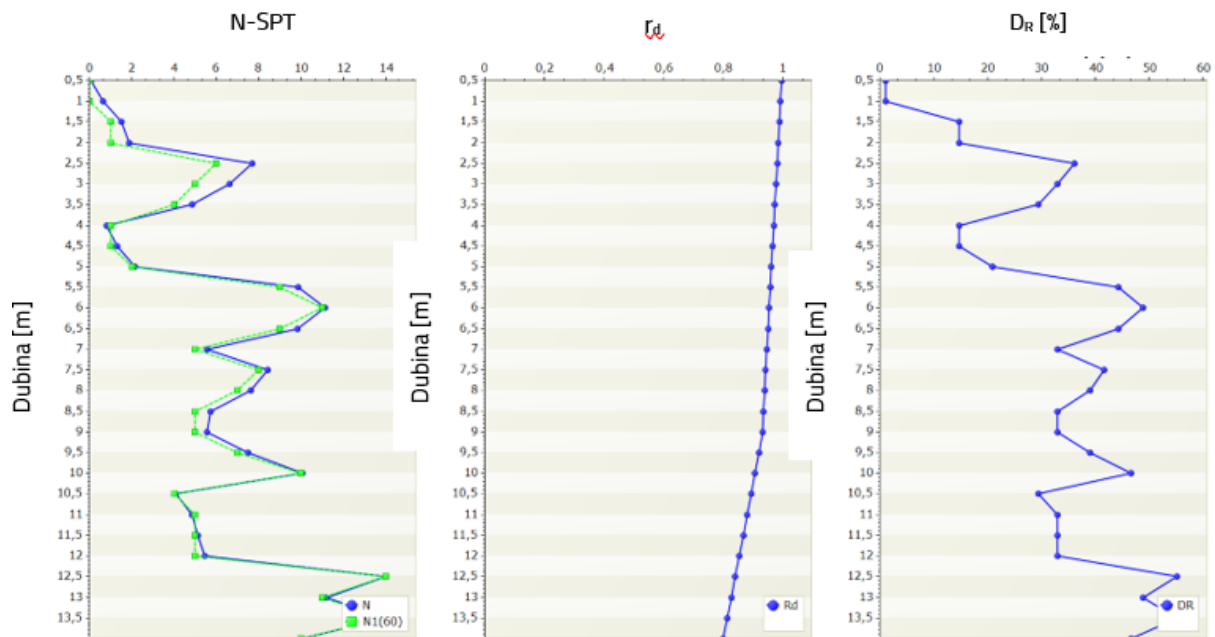
d[m]	$q_{c,srednje}$ [Mpa]	Tip tla	N	Korištena korelacija, $q_c/N$
0,5	0,072	Pjeskoviti NC	0,07	1
1	0,646	Pjeskoviti NC	0,65	1
1,5	0,895	Pjeskoviti OC	1,49	0,6
2	1,114	Pjeskoviti OC	1,86	0,6
2,5	1,732	Glinoviti OC	7,70	0,225
3	1,488	Glinoviti OC	6,61	0,225
3,5	1,094	Glinoviti OC	4,86	0,225
4	0,811	Pjeskoviti NC	0,81	1
4,5	1,295	Pjeskoviti NC	1,29	1
5	2,143	Pjeskoviti NC	2,14	1
5,5	5,916	Pjeskoviti OC	9,86	0,6
6	6,684	Pjeskoviti OC	11,14	0,6
6,5	5,899	Pjeskoviti OC	9,83	0,6
7	3,336	Pjeskoviti OC	5,56	0,6
7,5	1,899	Glinoviti OC	8,44	0,225
8	1,715	Glinoviti OC	7,62	0,225
8,5	1,284	Glinoviti OC	5,71	0,225
9	1,247	Glinoviti OC	5,54	0,225
9,5	1,683	Glinoviti OC	7,48	0,225
10	5,041	Mješoviti OC	10,08	0,5
10,5	2,046	Mješoviti OC	4,09	0,5
11	2,425	Mješoviti OC	4,85	0,5
11,5	2,563	Mješoviti OC	5,13	0,5
12	2,723	Mješoviti OC	5,45	0,5
12,5	3,154	Glinoviti OC	14,02	0,225
13	2,524	Glinoviti OC	11,22	0,225
13,5	3,162	Glinoviti OC	14,05	0,225
14	2,249	Glinoviti OC	10,00	0,225

Vrijednosti dobivene korelacijama za N-SPT unešene su u program.

### 7.2.4.1. Rezultati

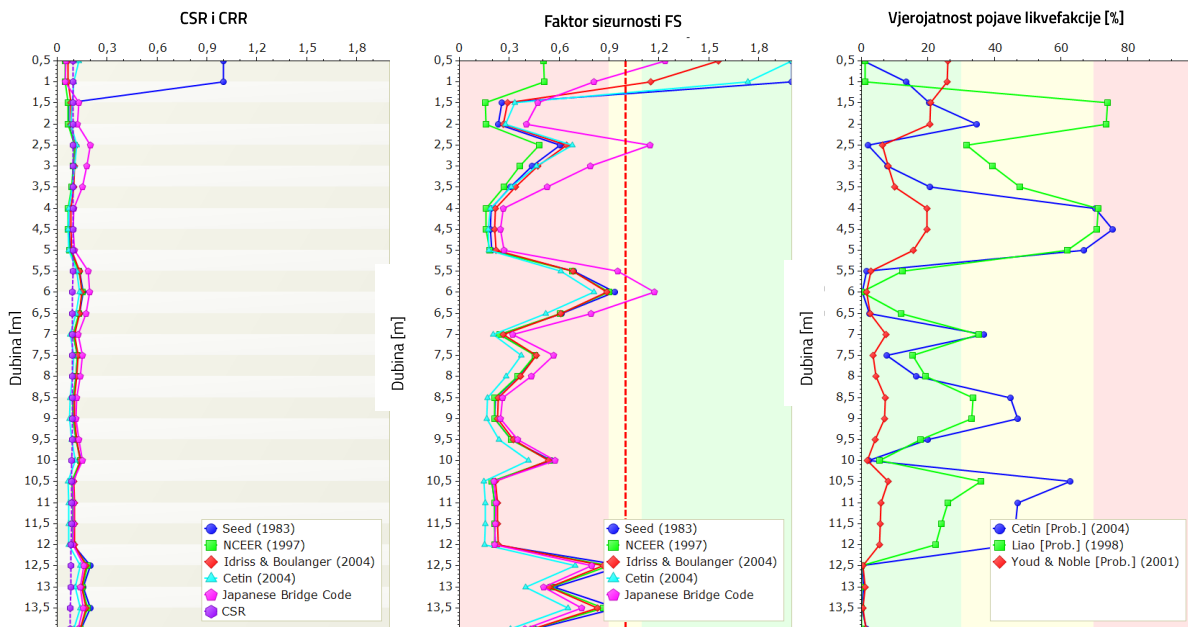
Na sljedećim slikama dan je grafički prikaz rezultata.

Na Slici 29. dane su vrijednosti broja udaraca SPT – a, koeficijent  $r_d$  (koeficijent redukcije naprezanja) i relativna gustoća  $D_R$  u odnosu na dubinu.



Slika 29. Grafički prikaz rezultata za CPTU-08 prema korelacijama za SPT u programu Settle3 – SPT N i korigirani SPT  $(N_1)_{60}$ ,  $r_d$  i  $D_R$ [%]

Na Slici 30. dane su vrijednosti CSR i CRR, faktor sigurnosti i vjerojatnost likvefakcije u odnosu na dubinu.



Slika 30. Grafički prikaz rezultata za CPTU-08 prema korelacijama za SPT u programu Settle3 – CSR i CRR, FS i  $P_L$  [%]

#### 7.2.4.2. Zaključak

Promatrajući rezultate grafičkog prikaza na slici 30. moguće je donijeti slijedeće zaključke. Korigirana vrijednost SPT-a u odnosu na standardnu daje nešto manje vrijednosti od nekorigirane kroz gotovo cijeli model. Možemo reći da je rezultat toga korekcija i zbog nadsloja i zbog efikasnosti prijenosa energije na bušaću šipku. Koeficijent redukcije naprezanja  $r_d$  ne pokazuje ovisnost promjena rezultata iz SPT-a, nego isključivo monotoni negativni trend prema dubini konvergirajući od vrijednosti 1 prema 0,8 (kao i u slučaju za CPT). Relativna gustoća pokazuje izravnu ovisnost o rezultatima iz SPT-a te je vidljiv jednaki trend ponašanja u dijagramu kao i za SPT, čime se može izravno zaključiti da veći broj udaraca SPT-a znači i veća relativna gustoća u promatranom sloju tla.

Nadalje, promatrajući koeficijent cikličkog naprezanja i koeficijent cikličke otpornosti sa slike 31, mogu se uočiti značajne razlike u međusobnim rezultatima.

Koeficijent redukcije naprezanja CSR ne pokazuje značajna odstupanja po dubini te je moguće zamijetiti gotovo konstantnu vrijednost tog koeficijenta po dubini. Zanimljivije je

promatrati promjenu koeficijenta CRR (koeficijenta otpornosti) za kojeg su dane razne korelacije i u ovom programu 5 različitih rezultata.

Seed (1983.) daje nešto bolje rezultate za CSR, pogotovo u gornjem sloju, međutim u ostatku modela ne pokazuje značajna odstupanja u odnosu na ostale metode.

NCEER (1997.) daje konzervativnije rezultate u gornjem sloju, a Cetin (2004.) u donjem.

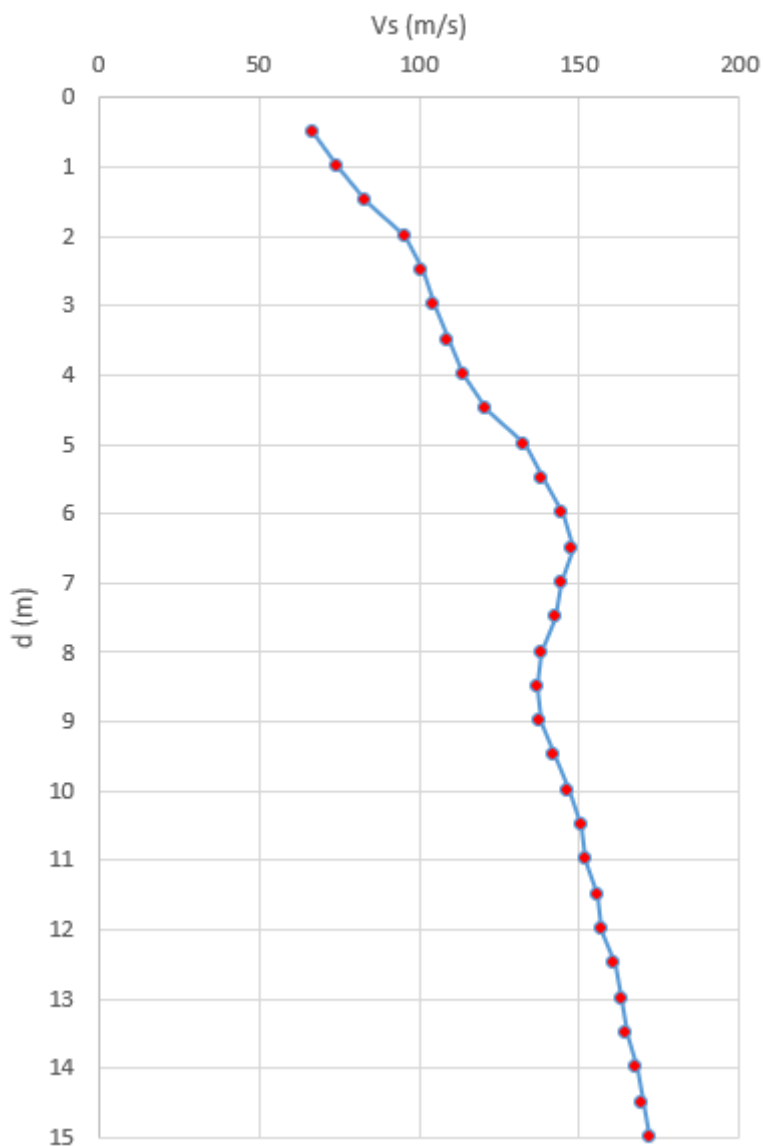
Japanese Bridge Code daje najveće skokove u rezultatima za CSR te u sloju pijeska faktor sigurnosti čak prelazi 1.

Sve metode daju približno iste trendove (veći FS u sloju pijeska, dok su ostali slojevi relativno „loši“) pa se može uočiti određeno poklapanje sa određivanjem faktora sigurnosti putem CPT-a.

Što se probabilističkih analiza tiče, lako se da uočiti da u zonama gdje je faktor sigurnosti manji, vjerojatnost pojave likvefakcije je znatno veća ili obratno. To pravilo, u načelu prate sve 3 korištene metode (Cetin(2004.), Liao (1998.) i Youd i Noble (2001.)). Međutim, kod prve dvije spomenute metode mogu se uočiti nešto konzervativnije vrijednosti u rubnim situacijama (ako je FS izrazito male vrijednosti  $P_L$  je znatno veći, a obratno  $P_L$  je znatno manji). Za razliku od toga, u trećoj metodi (Youd i Noble) niti u jednom trenutku nema toliko velikih „peak“ – ova i umjereniji su skokovi na dijagramu vjerojatnosti pojave likvefakcije.

### 7.2.5. Analiza za brzinu seizmičkih valova - Vs

Na istoj lokaciji je, osim provedbe CPTU postupka, provedeno MASW ispitivanje (multikanalna analiza površinskih valova) pomoću koje je dobiven profil brzina po dubini. Isti je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 31. Profil brzina po dubini za GP-02

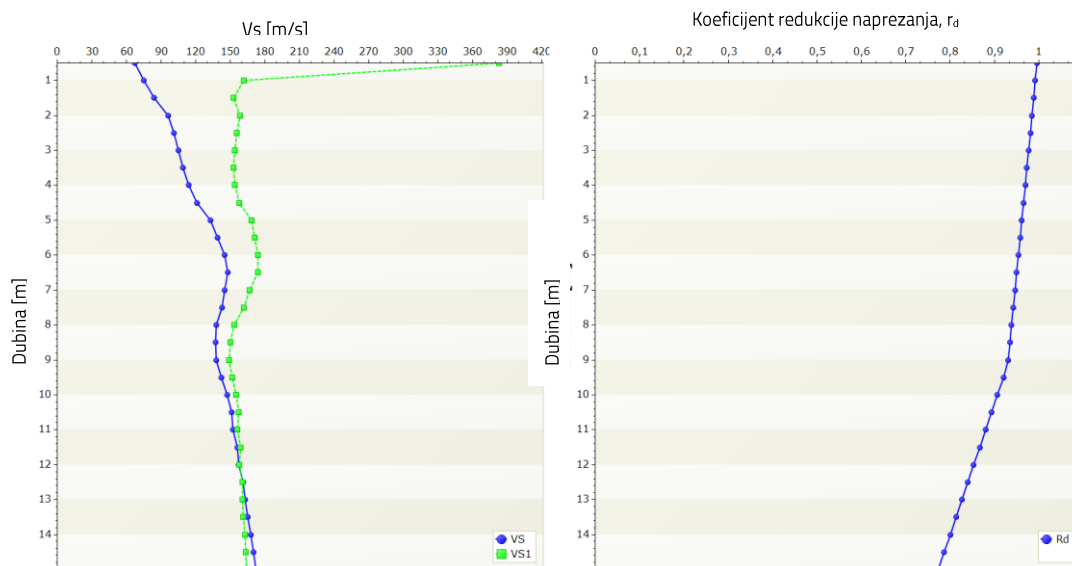
Vrijednosti brzina dobivene na terenu izravno su unešene u program Settle3 za provjeru likvefablnosti na taj način.



### 7.2.5.1. Rezultati

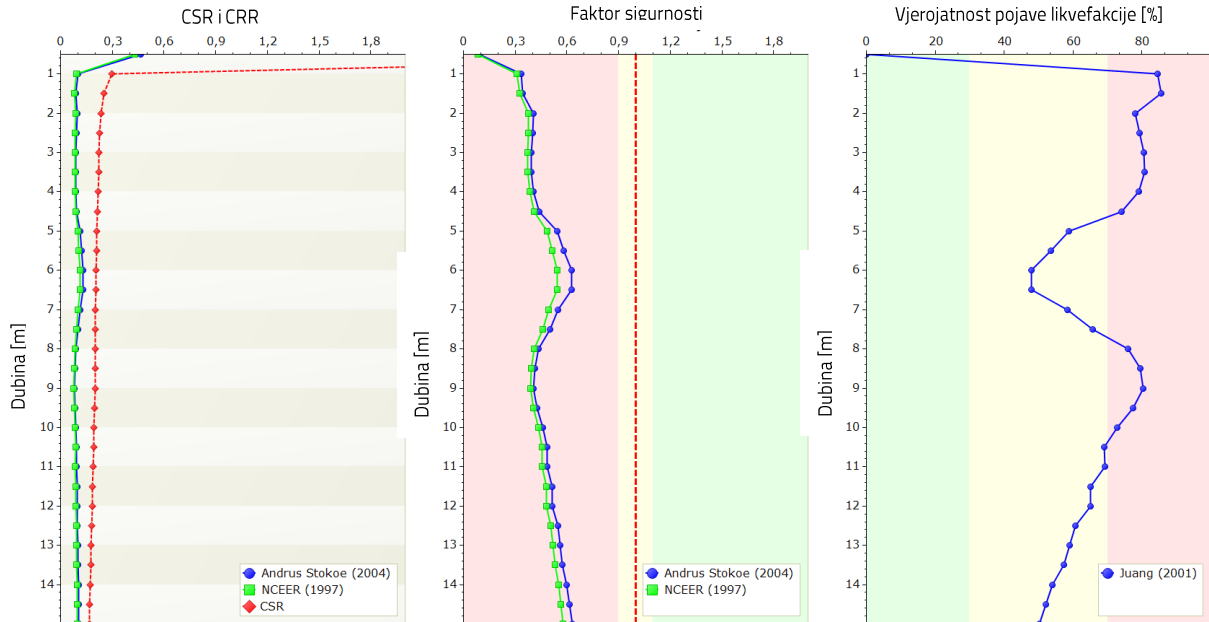
Na sljedećim slikama dan je grafički prikaz rezultata.

Na Slici 32. dane su vrijednosti promjene brzine posmičnih valova  $V_s$  [m/s] i  $V_{s1}$  [m/s] te koeficijent redukcije naprezanja  $r_d$  u odnosu na dubinu.



Slika 32. Grafički prikaz rezultata za GP-02 prema rezultatima za  $V_s$  u programu Settle3 –  $V_s$  i  $V_{s1}$ ,  $r_d$

Na Slici 33. dane su vrijednosti promjene koeficijenta cikličkog naprezanja CSR i koeficijenta cikličke otpornosti CRR, faktora sigurnosti I vjerojatnosti pojave likvefakcije u odnosu na dubinu.



Slika 33. Grafički prikaz rezultata za GP-02 prema korelacijama za  $V_s$  u programu Settle3 – CSR i CRR, FS i  $P_L$  [%]

### 7.2.5.2. Zaključak

Iz dijagrama sa Slike 32. da se zaključiti da se brzina seizmičkih valova povećava sa dubinom (trend), međutim pokazuje nešto veće vrijednosti u polju gornjeg pijeska. Zbog same korekcije, brzina  $V_{s1}$  pokazuje nešto veće vrijednosti u gornjoj zoni, dok se u donjoj zoni gotovo približila vrijednosti  $V_s$ .

Iz dijagrama sa Slike 33. možemo primjetiti identičan trend za koeficijent cikličkog naprezanja kao i za prethodna dva ispitivanja. Ovdje je značajno primjetiti da u cijeloj zoni CRR ne prelazi vrijednost CSR, stoga je faktor sigurnosti na cijelom potezu modela manji od 1. Unatoč tome, pokazuje određeni trend rasta po dubini, što je slučaj kao i kod prethodnih ispitivanja. Vjerojatnost pojave likvefakcije stoga se smanjuje po dubini, ali je značajno manja i u gornjoj zoni već spomenutog pijeska.

## 8. ZAKLJUČAK - USPOREDBA RAZLIČITIH METODA ZA ODREĐIVANJE FAKTORA SIGURNOSTI I VJEROJATNOSTI POJAVE LIKVEFAKCIJE

### 8.1. Faktor sigurnosti, FS – determinističke metode

Izraz za faktor sigurnosti dan je u poglavlju 6., potpoglavlju 6.2.1.

U navedenom izrazu, neki koeficijenti nisu ovisni o metodi, odnosno terenskom istraživanju koje je ishodilo podatke za iznešene korelacije iz prethodnog poglavlja. S druge strane, neki koeficijenti su izravno ovisni o podacima s terena koje određeni pokus donosi, stoga mogu uveliko varirati u ovisnosti o tome koja metoda se primjenjuje.

#### 8.1.1. Koeficijent korekcije magnitude, MSF

Iz svega dosad opisanog, jasno se da za zaključiti da koeficijent korekcije magnitude ne ovisi o odabranoj metodi proračuna, već gotovo isključivo o magnitudi ili lokalnoj magnitudi. Postoji izuzetak sa jednom korelacijom (Idriss (2004.)) ali je u istoj korelaciji dan izračun MSF i ako se korelacija provodi preko SPT – a (pa imamo  $(N_1)_{60CS}$ ) ili preko CPT – a (pa imamo  $q_{c1NCS}$ ).

#### 8.1.2. Koeficijent korekcije nadsloja, $K_\sigma$

Proračun koeficijenta korekcije nadsloja ovisi o pokusu koji je korišten da bi se došlo do rezultata.

Stoga, u slučaju SPT – a koriste se metode Hynes i Olsen (1999.), Idriss i Boulanger (2008.) i Cetin i dr. (2004.). U prvoj korelaciji vidljiva je ovisnost faktora o odnosu vertikalnog efektivnog naprežanja i atmosferskog pritiska te relativne gustoće, a u drugoj se relativna gustoća može procijeniti izravno iz udaraca SPT -a.

Općenito, da se zaključiti da vrijednost koeficijenta korekcije nadsloja pokazuje negativan trend sa povećanjem efektivnog vertikalnog naprežanja, a općenito je manji ako je gustoća čestica veća. Pri tome, može se uočiti da obje korelacije daju sličan trend te nema značajnijih razlika u završnom proračunu.

Ako uzimamo podatke iz CPT – a, stvar je vrlo slična, samo što se u izrazu umjesto normalizirane vrijednosti udaraca SPT – a pojavljuje normalizirani otpor na šiljku, oboje za čisti pijesak. Međutim, ovdje je svaka korelacija dala neka svoja ograničenja za primjenu ovog faktora, pa primjerice kod Boulanger i Idriss (2004.) ograničenje je 1.0, dok je u Boulanger i Idriss (2014.) 1.1.

Umjesto koeficijenta  $K_{\sigma}$  u dvije korelacije (Robertson i Wride (1997.) i modificirani Robertson i Wride (1998.)) za proračun koeficijenta cikličke otpornosti uveden je pojam  $K_c$  koji pokazuje promjenu sa promjenom udjela sitnih čestica, a utječe na promjenu normaliziranog otpora na šiljku.

### **8.1.3. Koeficijent korekcije zbog posmičnog naprezanja, $K_{\alpha}$**

Ovaj faktor služi, kako je već rečeno, za korekciju koeficijenta cikličke otpornosti CRR u statičkim uvjetima posmičnih naprezanja. Za proračune koji se zasnivaju na SPT – u postoji jedna korelacija – Idriss i Boulanger (2003.). Po njoj se da zaključiti da promjena ovog koeficijenta ovisi o relativnoj gustoći, promjeni efektivnog naprezanja i mineralnom sastavu sredine.

### **8.1.4. Koeficijent cikličkog naprezanja, CSR**

Glavni faktor o kojem ovisi cikličko naprezanje jest  $r_d$ , faktor redukcije naprezanja (osim o horizontalnom ubrzanju tla i vertikalnom efektivnom naprezanju). Korelacije poput NCEER (1997.), Kayen (1992.) i Liao i Whitman (1986.) pokazuju funkcijsku ovisnost isključivo o dubini, Idriss (1999.) pokazuje ovisnost i o momentnoj magnitudi. Od ovih korelacija jedino Idriss (1999.) daje logaritamsku ovisnost redukcije naprezanja o dubini, dok ostale metode daju isključivo linearnu ovisnost.

Cetin i dr. (2004.) dali su posebnu funkcijsku ovisnost o dubini, momentnoj magnitudi, maksimalnom horizontalnom ubrzanju i brzini posmičnih valova.

Općenito, sve dobivene krivulje daju monotoni trend.

### **8.1.5. Koeficijent cikličke otpornosti, CRR**

Za koeficijent cikličke otpornosti postoji najviše korelacija jer je on ujedno i faktor koji daje najveći značaj promjeni faktora sigurnosti kao takvom.

U slučaju da koristimo podatke iz standardnog penetracijskog pokusa (SPT-a), za determinističku analizu na raspolaganju nam je 5 metoda (ujedno i 5 istih koje su korištene u programu Settle3).

Korelacije pokazuju direktnu vezu sa udjelom sitnih čestica, vertikalnim efektivnim naprežanjem (općenito direktno sa koeficijentom cikličkog naprežanja, jer je ciklička otpornost zapravo najveće cikličko naprežanje koje tlo može podnijeti prije pojave likvefakcije). Također, obzirom da se korelacije zasnivaju na rezultatima SPT – a, vidljiva je ovisnost i o udarcima iz pokusa. Sve korelacije daju slične formulacije izraza, odnosno slične trendove: povećanjem udaraca iz SPT – a povećava se koeficijent cikličke otpornosti. Također, za veći udio sitnih čestica koeficijent cikličke otpornosti je veći. Međutim, kako je već bilo pokazano i na primjeru, NCEER (1997.) i Japanese Bridge Code korelacije daju bolje rezultate u područjima kvalitetnijeg tla za razliku od Seed (1983.) na kojoj je zasnovana. Ostale korelacije daju manje skokove i manje ekstremitete na realnom primjeru te su krivulje promjene CRR koeficijenta po dubini „glatke“. To se izrazito vidi kod Idriss i Boulanger (2004.) i Cetin (2004.) korelacija koje daju nešto složenije, ali i sofisticiranije izraze u proračunima (primjerice Cetin (2004.)) dana je kao funkcija u ovisnosti o vjerojatnosti pojave likvefakcije.

U slučaju da koristimo rezultate iz CPT – a, sve korelacije daju iterativan postupak u nekoliko koraka, putem proračuna normaliziranog otpora na šiljku i drugih faktora koji ovise o vertikalnom efektivnom naprežanju ili čak vjerojatnosti pojave likvefakcije (deterministička analiza Moss (2006.)).

U slučaju se se proračun radi preko brzine posmičnih valova postoje dvije determinističke metode koje proračun koeficijenta otpornosti zasnivaju na brzini posmičnih valova čistog pijeska ( $v_{s1cs}$ ). Druga korelacija (NCEER (1997.)) je primjenjiva ako imamo podatke o sadržaju sitnih čestica jer se na taj način direktno procjenjuje brzina  $v_{s1cs}$ .

## 8.2. Vjerojatnost pojave likvefakcije, $P_L$ – probabilističke metode

Uvodno valja napomenuti da ne postoji značajan broj razvijenih metoda putem vjerojatnosti pojave likvefakcije (probabilističkih metoda), neovisno radi li se o podacima iz SPT – a, CPT – a ili  $V_s$  – a. Unatoč tome, ove metode mogu dati bolji uvid u mogućnost potencijalnog hazarda jer probabilističke metode na „manje grublji“ način opisuju moguće rubne situacije – u slučaju da je faktor sigurnosti manji od 1, vjerojatnost pojave likvefakcije ne mora biti značajno velika, može biti i ispod 50%. U slučaju da je faktor sigurnosti puno veći od 1, vjerojatnost pojave likvefakcije i dalje postoji, samo je puno manja. Na taj način se likvefabilnost tla puno bolje može uzeti u obzir u odnosu na determinističke metode. Analogna usporedba može biti i kod proračuna stabilnosti kosina, gdje se na analogan način mogu dobiti vjerojatnosti klizanja za pripadajuće afktore sigurnosti na klizanje.

Valja napomenuti da su neke spomenute probabilističke metode nastale direktno modifikacijom determinističke metode od istog autora.

U slučaju standardnog penetracijskog testa (SPT-a), postoje 3 probabilističke metode proračuna  $P_L$ . Primjetno je da se vjerojatnost pojave likvefakcije povećava sa većim udjelom sitnih čestica, ali i ako je broj udaraca iz SPT – a manji (tlo je slabije čvrstoće). Youd i Noble (2001.) daju „glatke“ rezultate u odnosu na ostale dvije korelacije te manje ekstremnije vrijednosti.

U slučaju CPT-a, postoji jedna korelacija od istog determinističkog izvora, Moss (2006.). Korelacija daje opipljivije rezultate u srednjim zonama kada je faktor sigurnosti oko 1 u odnosu na determinističke analize. Međutim, unatoč tome u području manjih i većih faktora sigurnosti pokazuje ekstremitete za  $P_L$ . Kao takva, analiza daje najkonzervativnije rezultate ako se uspoređuje sa ostala dva terenska ispitivanja.

Kod proračuna vjerojatnosti pojave likvefakcije kada je izvor brzina posmičnih S valova, postoji jedna metoda (Juang i dr.). Ona pokazuje logaritamsku ovisnost količine sitnih čestica, brzine posmičnih valova čistog pijeska i koeficijenta cikličkog naprezanja. Pokazano je da za isti udio sitnih čestica, veća je vjerojatnost pojave likvefakcije za veći koeficijent cikličkog naprezanja.

Općenito je potvrđeno što je iznešeno i u prethodnim probabilističkim analizama, a to je da se  $P_L$  povećava sa većim udjelom sitnih čestica (gornji sloj prekonsolidiranog pijeska u sva tri slučaja daje manju vjerojatnost pojave likvefakcije).

### 8.3. Općenito

Ovim analizama potvrđena su prethodna znanja iz geotehnike u smislu mogućnosti pojave likvefakcije. Pijesci kao takvi jesu podložni likvefakciji, ali mogu pokazati znatno manju vjerojatnost likvefabilnosti ako su prekonsolidirani. Također, da se zaključiti da su probabilističke analize dale najbolji uvid u to koje zone su podložnije likvefakciji kao takvoj, a koje nisu.

---

## 9. POPIS LITERATURE

- [1] U. M, T. M, C. M, A. J, N. M-Š i L. S, Potresno inženjerstvo - Obnova zidanih zgrada, Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021..
- [2] R. Mccaffrey, Earthquakes and crustal deformation, 2011..
- [3] M. Herak, The magnitude - intensity - focal depth relation for the earthquakes in the wider Dinara region, 1989..
- [4] G. o. P. - . a. S. u. Zagrebu, »Karta potresnih područja Republike Hrvatske,« [Mrežno]. Available: <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>. [Pokušaj pristupa 6. 6. 2024.].
- [5] I. H. D. H. M. L. H. M. M. T. B. Dasović, »O potresima u Hrvatskoj,« *Vijesti Hrvatskog geološkog društva*, pp. 4-27, 2020.
- [6] M. vukovski, Hrvatski geološki institut, [Mrežno]. Available: <https://www.hgi-cgs.hr/potres-u-petrinji-preliminarno-izvjesce/>. [Pokušaj pristupa 31. 05. 2024.].
- [7] [Mrežno]. Available: <http://www.gfz.hr/sobe/diskontinuitet.htm>. [Pokušaj pristupa 31. 05. 2024.].
- [8] [Mrežno]. Available: <https://www.vecernji.hr/vijesti/petrinju-i-banju-luku-rusili-su-potresi-iz-istog-rasjednog-sustava-1458130>. [Pokušaj pristupa 31. 05. 2024.].
- [9] 28. 12. 2020.. [Mrežno]. Available: <https://www.24sata.hr/news/u-30-godina-cetiriteska-potresa-pogodila-su-zagreb-i-pokupsko-736661>. [Pokušaj pristupa 2024. 05. 31.].
- [10] USGS. [Mrežno]. Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000d3zh/shakemap/pga?source=us&code=us6000d3zh>. [Pokušaj pristupa 31. 05. 2024.].
- [11] M. I. T. K. M.-S. Bačić, »Geotehnika kao nezaobilazan segment potresnog inženjerstva,« *Građevinar*, pp. 923 - 936, 16. 11. 2020..
- [12] M. I. T. K. M. S. Bačić, »Geotehnika kao nezaobilazan segment potresnog inženjerstva,« *Građevinar*, 2020..

- 
- [13] »Hrvatska enciklopedija,« [Mrežno]. Available: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/likvefakcija>.
- [14] Geotech, »Likvefakcija tla,« Geotech, [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/likvefakcija-tla/>. [Pokušaj pristupa 12. 08. 2024.].
- [15] B. M. Das, Principles of Geotechnical Engineering.
- [16] K. i. S. H. B. Tokimatsu, »Seismic Design for Liquefaction-Induced Ground Deformation«.
- [17] »direktno.hr,« direktno, 04. 04. 2021.. [Mrežno]. Available: <https://direktno.hr/domovina/video-foto-urusne-ponikve-u-mecencanima-dobro-su-poznata-pojava-a-prije-potresa-ih-je-bilo-40-tak-228472/>. [Pokušaj pristupa 31. 05. 2024.].
- [18] R. W. Boulanger i I. M. Idriss, CPT and SPT based liquefaction triggering procedures, Davis, California: Department of civil & environmental engineering, College of engineering, University of California at Davis, 2014..
- [19] »Hrvatski jezični portal,« [Mrežno]. Available: [https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search\\_by\\_id&id=f1xkXBQ%3D](https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=f1xkXBQ%3D). [Pokušaj pristupa 17. 8. 2024.].
- [20] H. B. I. I. M. Seed, »Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential,« *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, svez. 97, pp. 1249 - 1273, 1971..
- [21] »Hrvatska enciklopedija,« [Mrežno]. Available: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/ponderiranje>. [Pokušaj pristupa 17. 8. 2024.].
- [22] NCEER, »Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils,« 1997..
- [23] I. M. Idriss, »An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential in Proceedings,« Federal Highway Administration, 1999..
- [24] R. E. Kayen, J. K. Mitchell, R. B. Seed, A. Lodge i S. i. C. R. Nishio, »Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave - based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data,« *4th Japan - U.S. Workshop on Earthquake - Resistant Des. Of Lifeline Fac. And Countermeasures for Soil Liquefaction*, pp. 177 - 204, 1992..



- 
- [25] K. O. i. d. Cetin, »SPT - based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential,« *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1314 - 1340, 2004..
- [26] S. S. C. W. R. V. Liao, »Overburden Correction Factors for SPT in Sand,« *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 373 - 377, 1986..
- [27] K. i. S. H. B. Tokimatsu, »Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking,« *J. Geotechnical Eng.*, pp. 861-878, 1987..
- [28] R. Andrus i K. H. Stokoe, »Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity,« u *Proceedings of NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, 1997..
- [29] T. L. i. N. S. K. Youd, »Liquefaction Criteria Bsed on Statistical and Probabilistic Analyses,« *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, pp. 201-205, 31. 12. 1997..
- [30] T. L. i. d. Youd, »Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1966 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils,« *Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, pp. 817 - 833.
- [31] P. W. C. B. R. D. J. Myne, »Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT),« u *Manual on Subsurface Investigations*, Washington DC, Federal Highway Administration, 2001., pp. 100-103,105-108.
- [32] Rocscience, »Settle3D Liquefaction Theory Manual,« Rocscience, 2023..
- [33] S. Liao i R. Whitman, »Overburden Correction Factors for SPT in Sand,« *Journal of Geotecnnical Engineering*, pp. 373 - 377, 1986..
- [34] A. Bazaraa, *Use of the standard penetration test for estimating settlements of shallow foundations on sand*, Champaign - Urbana: Department of Civil Engineering, University of Illinois, 1967..
- [35] R. i. I. I. Boulanger, »State normalization of penetration resistances and the effect of overburden stress on liquefaction resistance,« u *11th Intl. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd Intl. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, 2004..
- [36] R. B. Peck i W. E. i. T. T. H. Hanson, »Foundation engineering Pub,« John Wiley, New York, 1974..

- [37] C. K. O. i. dr., »SPT - based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential,« *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1314 - 1340, 2004..
- [38] H. B. Seed i K. H. L. F. C. R. M. Tokimatsu, »The Influencec of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations,« University of California at Berkeley, Berkeley, 1984..
- [39] K. a. Y. M. Ishihara, »Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes,« u *Specification for Highway Bridges: Part V- Seismic Design*, Tokio, Japan Road Association, 1992., pp. 173 - 188.
- [40] S. S. C. V. D. W. R. V. Liao, »Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability,« *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 389 - 409, 1988.
- [41] A. W. Skempton, »Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation,« *Geotechnique*, pp. 425 - 447, 1986..
- [42] K. Ishihara, »Simple method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits During Earthquakes,« *Soils and Foundations*, pp. 1-17, 9. 1977..
- [43] F. I. T. Y. S. H. M. I. T. K. M. Tatsuoka, »Standard penetration tests and soil liquefaction potential evaluation,« pp. 95-111, 1980..
- [44] I. M. i. B. R. W. Idriss, »Estimating  $K_a$  for use in evaluating cyclic resistance of sloping ground,« u *Proc. 8th US Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction*, Buffalo, N.Y., 2003..
- [45] K. S. K. a. Y. Y. Ishihara, »Pore Water Pressures Measured in Sand Deposits During an Earthquake,« *Soils and Foundations*, svez. 21, br. 4, pp. 85 - 100, 1981..
- [46] I. B. R. W. Idriss, »Soil Liquefaction during earthquakes,« Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 2008..
- [47] M. E. i. O. R. S. Hynes, »Influence of confining stress on liquefaction resistance,« pp. 145 - 152, 1999..
- [48] P. K. Robertson i C. E. Wride, »Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT,« *NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, 1997..
- [49] P. K. Robertson i W. (. C. E., »Evaluating cyclic liquefaction potential using cone penetration test,« pp. 442 - 459, 1998..

- 
- [50] R. S. E. S. R. B. K. R. E. S. J. P. D. K. A. C. K. O. Moss, »CPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of In Situ Seismic Soil Liquefaction Potential,« *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, svez. 8, br. 132, pp. 1032 - 1051, 2006..
- [51] M.-S. Kovačević, *Terenska ispitivanja i opažanja - Geofizička ispitivanja*, 2024..
- [52] R. D. Andrus, K. H. Stokoe i C. H. Juang, »Guide for Shear-Wave-Based Liquefaction,« *earthquake Spectra*, svez. 20, pp. 285-308.
- [53] C. H. Juang, »Probabilistic Framework for Liquefaction Potential by Shear Wave Velocity,« *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, svez. 127, br. 8, 2001..
- [54] Rocscience, »rocscience.com,« Rocscience, [Mrežno]. Available: <https://www.rocscience.com/help/settle3/tutorials>. [Pokušaj pristupa 6. 6. 2024.].
- [55] E. T. Sudjatmiko, »SPT and CPT Correlation of Expansive Clay in Cikarang, Indonesia,« *Journal of the Civil Engineering Forum*, pp. 245 - 255, 09. 2022..
- [56] I. M. Idriss i R. W. Boulanger, »Estimating  $K_a$  for use in evaluating cyclic resistance of sloping around,« u *Proc. 8th US Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction*, Buffalo, 2003..
- [57] V. RH, »Potres u Hrvatskoj iz prosinca 2020. - Brza procjena šteta i potreba,« Zagreb, 2021..
- [58] Državni zavod za statistiku, 2022.. [Mrežno]. Available: <https://dzs.gov.hr/vijesti/objavljeni-konacni-rezultati-popisa-2021/1270>. [Pokušaj pristupa 31. 05. 2024.].

## POPIS SLIKA

Slika 1. Skica rasjeda: siva ploha označava rasjednu plohu između dva rasjedna krila: iznad plohe je krovinsko, a ispod plohe podinsko rasjedno krilo, a strelica označava smjer gibanja tj. pomak po samom rasjedu (lijevo). Skica odnosa hipocentra, epicentra i seizmološke postaje (desno) (Izvor: [1]).....	3
Slika 2. Dijagram ovisnosti intenziteta o magnitudi potresa. Za istu vrijednost magnitude a različitu dubinu, intenzitet potresa može poprimiti različite vrijednosti (Izvor: [3]) .....	4
Slika 3. Karta potresnih područja Republike Hrvatske za povratno razdoblje $T_{pov} = 475$ god. (Izvor: [4]) .....	5
Slika 4. Geodinamička skica područja središnjega i istočnoga Sredozemlja i brzine konvergentih kretanja Afričke (Nubijske), Anatolijske i Jadranske mikroploče (označena horizontalnim crtama) prema Euroazijskoj ploči (Izvor: [5]) .....	6
Slika 5. Zabilježeni potresi u Hrvatskoj sa epicentrima u i oko nje za magnitudu veću od 1 (Izvor: [5]) .....	7
Slika 6. Zabilježeni potresi u Hrvatskoj sa epicentrima u i oko nje za intenzitet veći od VII °MCS (Izvor: [5]) .....	8
Slika 7. Razmjeri potresa iz 1909. na javnoj infrastrukturi petrinjskog područja (Izvor: [9]) .....	10
Slika 8. Shake map za petrinjski potres (1) (Izvor: [10]) .....	10
Slika 9. Shake map za petrinjski potres (2) (Izvor: [10]) .....	11
Slika 10. Amplifikacija seizmičke pobude u ovisnosti o lokalnim uvjetima u tlu (Izvor: [11]) .....	12
Slika 11. Ponašanje karakterističnog riječnog nasipa uslijed cikličkog djelovanja potresnog opterećenja po fazama (Izvor: [11]) .....	14
Slika 12. Mikrozonacija Starog grada u Dubrovniku (Izvor: [12]).....	15
Slika 13. Ilustrativni prikaz pojave likvefakcije u tri karakteristične faze uslijed potresnog opterećenja (Izvor: [14]) .....	16
Slika 14. Ilustrativni prikaz pojave likvefakcije u tri karakteristične faze uslijed potresnog opterećenja (Izvor: [14]) .....	19
Slika 15. Urušne vrtače u Mečečanima nakon niza potresa 2020. (Izvor: [17]).....	19
Slika 16. Preporučene vrijednosti koeficijenta $C_R$ (Izvor: [37]).....	33
Slika 17. Granična krivulja likvefakcije – korelacija za $(N_1)_{60}$ vrijednosti i CRR ( $M = 7.5$ ) (Izvor: [38]) .....	35
Slika 18. Pojednostavljena bazna krivulja preporučena za proračun CRR-a iz podataka o SPT – u sa empirijskim podacima o likvefakciji (Izvor: [22]).....	36

Slika 19. Mogućnost pojave likvefakcije preko podataka iz SPT - a, probabilistički (Izvor: [40]) .....	38
Slika 20. Vrijednosti $K\sigma$ u inženjerskoj praksi (Izvor: [40]) .....	41
Slika 21. Vrijednosti $K\sigma$ po preporukama NCEER (za $n=0.7$ i $DR < 60\%$ ) (Izvor: [46]).....	42
Slika 22. Dijagram promjene CSR-a u odnosu na normaliziranu brzinu posmičnih valova za 3 moguće vjerojatnosti pojave likvefakcije.....	52
Slika 23. Zona obuhvata na lokaciji Brest Pokupski .....	55
Slika 24. Pojava likvefakcije na terenu u Brestu Pokupskom (izdizanje pijeska na površinu kao klasični pokazatelj likvefabilnosti tla).....	56
Slika 25. Provedeni istražni radovi na lokaciji Brest Pokupski .....	56
Slika 26. SBT i profil tla za CPTU-08 .....	57
Slika 27. Grafički prikaz rezultata za CPTU-08 u programu Settle3 – $q_c$ , $q_{c1}$ , $f_s$ i $r_d$ .....	58
Slika 28. Grafički prikaz rezultata za CPTU-08 u programu Settle3 – CSR i CRR, FS i PL....	59
Slika 29. Grafički prikaz rezultata za CPTU-08 prema korelacijama za SPT u programu Settle3 – SPT N i korigirani SPT ( $N_1$ ) <sub>60</sub> , $r_d$ i $D_R$ [%] .....	63
Slika 30. Grafički prikaz rezultata za CPTU-08 prema korelacijama za SPT u programu Settle3 – CSR i CRR, FS i $P_L$ [%].....	64
Slika 31. Profil brzina po dubini za GP-02 .....	66
Slika 32. Grafički prikaz rezultata za GP-02 prema rezultatima za $V_s$ u programu Settle3 – $V_s$ i $V_{s1}$ , $r_d$ .....	67
Slika 33. Profil brzina po dubini za GP-02 .....	68

---

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Najjači potresi po magnitudi na tlu Hrvatske, povijesni tablični pregled (Izvor: [1]) .....	9
Tablica 2. Vrijednost koeficijenta $C_E$ u odnosu na tip nakovnja.....	31
Tablica 3. Vrijednost koeficijenta $C_B$ u odnosu na promjer bušotine.....	31
Tablica 4. Vrijednost koeficijenta $C_R$ u odnosu na duljinu bušače šipke .....	32
Tablica 5. Vrijednost koeficijenta $C_S$ u odnosu na vrijednost $N_{1,60}$ .....	33
Tablica 6. Vrijednost kvocijenta $q_c / N$ za korelaciju prema Acka, N. (2003.).....	61
Tablica 7. Procjena broja udaraca SPT-a iz CPTU-08.....	62