

Ponašanje umanjenog modela kosine uslijed dinamičkog opterećenja u 1g uvjetima

Drpić, Nikolina

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:394371>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Nikolina Drpić

**Ponašanje umanjenog modela kosine uslijed dinamičkog opterećenja
u 1g uvjetima**

Diplomski rad

Rijeka, 19. rujna 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni
Geotehnika
Dinamika tla

Nikolina Drpić
01105060058

Ponašanje umanjenog modela kosine uslijed dinamičkog opterećenja
u 1g uvjetima

Diplomski rad

Rijeka, 19. rujna 2022.

IZJAVA

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

Nikolina Drpić

U Rijeci, 19. rujna 2022.

Naziv studija: Diplomski studij Građevinarstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja

Voditelj projekta	Prof.dr.sc. Željko Arbanas
Šifra projekta	IP-2018-01-1503
Financijer projekta	Hrvatska zaklada za znanost
Pravna nadležnost	Republika Hrvatska

U Rijeci, 19. rujan 2022.

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Vedran Jagodnik

Naziv studija: Diplomski studij Građevinarstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

Laboratorijska istraživanja statičkog i cikličkog ponašanja tla pri pokretanju klizišta

Voditelj projekta Izv. prof.dr.sc. Vedran Jagodnik

Šifra projekta uniri-tehnic-18-113

Financijer projekta Sveučilište u Rijeci

Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 19. rujan 2022.

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Vedran Jagodnik

ZAHVALE

Ogromno hvala mom mentoru Vedranu Jagodniku na njegovoj posvećenosti, vremenu, razumijevanju i pomoći koju mi je pružio tijekom pisanja diplomskog rada i tijekom cijelog diplomskog studija. Veliko hvala cijeloj mojoj obitelji koja uvijek bodri i podržava moje odabire. Mariu veliko hvala koji me uz svu podršku potaknuo da uopće krenem ovim putem, kao i mojoj „antistres loptici“ Đuri.

SAŽETAK

Potresi su jedna od glavnih pokretača klizišta u svijetu. Prema statističkim podacima o klizištima izazvanim jakim potresima u prošlosti, niz čimbenika može utjecati na rezultate i razmjere klizišta, kao što su priroda potresa (čimbenici koji izazivaju) i geografski, hidrološki i meteorološki uvjeti lokacije klizišta (potencijalni faktori). Ponašanje tla u uvjetima potresa i dalje je predmet opsežnog istraživanja te se ne smije promatrati kao izdvojeni element već kao veća cjelina. Fizikalni modeli često su korišteni u istraživanju klizišta. Omogućuju izravno i točno mjerenje glavnih pokretačkih snaga i značajki temeljnih procesa koji reguliraju klizišta. Fizičko modeliranje se prvenstveno koristi za: istraživanje specifičnih ili općih mehanizama klizišta, potvrditi matematičke formulacije ili numeričke kodove i zaključiti kako bi mogao izgledati scenarij u određenim uvjetima koji bi pokrenuli klizište na stvarnoj in-situ kosini. Jedan od glavnih ciljeva četverogodišnjeg istraživačkog projekta "Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja" na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, bio je razviti platforme koji omogućuju proučavanje fizičkih modela klizišta malih razmjera u statičkim (kiša) i seizmičkim (potres) uvjetima. Glavna ideja ovog diplomskog rada je uspostaviti plan mjerenja ubrzanja u tijelu kosine te analizirati podatke U slučaju kosine koja je izložena potresnom opterećenju. Na temelju mjerenih podataka pokušati utvrditi cikličko ponašanje te usporediti ponašanje tri različite vrste materijala od kojih je kosina izvedena (čisti pijesak, pijesak sa 10% kaolina te pijesak sa 15% kaolina).

Ključne riječi: umanjeni model kosine, dinamičko opterećenje, klizišta uzrokovana potresima

ABSTRACT

Earthquakes are main landslides trigger in the world. According to statistics on earthquake-induced landslides in the past, several factors can influence on the results and scale of landslides, such as the nature of the earthquake (triggering factors) and the geographical, hydrological and meteorological conditions of the location of the landslide (potential factors). Soil behavior under dynamic loading conditions is still the subject of many researches and should not be viewed as an isolated element but as a larger whole. Physical models are often and widely used in landslide research. They enable direct and accurate measurement of the main triggers and features of the fundamental processes that regulate landslides. Physical modeling is used to: investigate general or specific landslide mechanisms, validate mathematical formulations or numerical codes and infer what a scenario might look like under certain conditions that would trigger a landslide on a real in-situ slope. One of the main goals of the four-year research project "Physical modelling of landslide remediation constructions' behavior under static and seismic actions" at the Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka, was to develop platforms that enable the study of small-scale physical landslide model in static (rain) and seismic (earthquake) conditions. The main idea of this thesis is to establish a plan for measuring the acceleration in the body of the slope and to analyze the data in the case of a slope under dynamic load. Based on the measured data, try to determine the cyclic behavior and compare the behavior of three different types of materials from which the slope is made (pure sand, sand with 10% kaolin and sand with 15% kaolin).

Keywords: small scale landslide model, dynamic loading, earthquake-induced landslides

Sadržaj

Popis slika	v
Popis tablica	vii
1 UVOD	1
1.1 Klizišta uzrokovana potresom	2
2 PREGLED LITERATURE	7
2.1 Potresi	7
2.2 Cikličko ponašanje tla i dinamička svojstva tla	11
2.2.1 Vršno ubrzanje tla (PGA)	17
2.3 Metoda skaliranja modela	18
2.4 Metode obrade podataka	19
2.4.1 Korištenje akcelerometra u svrhu određivanja posmičnih napre- zanja i deformacija	19
2.4.2 Butterworth filtar	21
3 METODOLOGIJA ISPITIVANJA PONAŠANJA UMANJENOG MODELA KOSINE	19
3.1 Fizički model umanjenog klizišta	19
3.1.1 Skaliranje modela	19
3.1.2 Opis umanjenog modela	20
3.1.3 Opis pokusa i korištenog materijala	21
3.2 Korišteni mjerni uređaji	25
3.2.1 Akcelerometri Seika BDK3	26
3.2.2 Potresne platforme Quanser STI-III	27
3.2.3 Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M	28
3.3 Analiza podataka	29
4 REZULTATI	31
4.1 Akceleracija, a , brzina, v i pomak d u ovisnosti o vremenu, T	32

4.2	Posmično naprezanje, τ u ovisnosti o vremenu, T za tri promatrane točke u profilu po dubini	32
4.3	Posmične deformacije γ u ovisnosti o vremenu, T na dubini z_2	33
4.4	Ciklička petlja za element tla na dubini z_2	48
5	DISKUSIJA	53
6	ZAKLJUČAK	55
	Literatura	56

Popis slika

1.1	Klizište uzrokovano potresom, 8.rujan 2018.Hokaido, Japan [1]	2
1.2	Klizište Las Colinas uzrokovano potresom, El Salvador 2001 [2]	3
2.1	Struktura Zemlje, [3]	7
2.2	Rasprostranjenost potresnih zona na granicama tektonskih ploča, [4]	8
2.3	Žarište i epicentar [5]	8
2.4	Seizmički valovi: a)Primarni val, b)Sekundarni val, c)Love val, d) Rayleigh val, modificirano prema [6]	9
2.5	Utjecaj seizmičkih valova na različite vrste tla, modificirano prema [7]	10
2.6	Idealizirani ciklus naprezanja tijekom potresa [8]	11
2.7	Odnos indeksa plastičnosti, PI i praga posmične deformacije za ciklički posmični pritisak, $\gamma_{t,v}$ [9]	12
2.8	Idealizirana ciklička petlja, modificirano prema [10]	14
2.9	Površine za izračun koeficijenta prigušenja, modificirano prema [11]	14
2.10	Krivulje redukcije sekantnog posmičnog modula i prigušenja [12, 13]	16
2.11	Primjenjivost metoda mjerenja deformacija u ovisnosti modula posmika G i posmične deformacije γ , modificirano prema [14]	16
2.12	Koncept skaliranja u dva stupnja: a)skaliranje za 1 g uvjete b)skaliranje za centrifugalne uvjete, modificirano prema [15]	18
2.13	Shema profila tla s akcelerometrima, modificirano prema [16]	20
2.14	Dijagram pojačanja Butterworthovih niskopropusnih filtara reda od 1 do 5, s graničnom frekvencijom $\omega_0=1$, [17]	21
3.1	Skaliranje predmetnog modela [18]	20
3.2	Sanduk umanjenog modela	21
3.3	Granulometrijska krivulja ugrađenog materijala (Dravski pijesak, SK10, SK15), [18]	22
3.4	Lokacije akcelerometra i mjerača volumetrijske količine vode u modelu kosine, modificirano prema [18]	24
3.5	Shema umanjenog modela s popratnom mjernom opremom, [18]	25
3.6	Akcelerometar Seika BDK3	27
3.7	Potresne platforme Quanser STI-III [19]	27

3.8	Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M	28
4.1	Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 profila 2-2 za materijal Dravski pijesak	32
4.2	Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 profila 3-3 za materijal Dravski pijesak	33
4.3	Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 profila 2-2 materijala SK10	34
4.4	Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 profila 3-3 materijala SK10	35
4.5	Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 profila 2-2 materijala SK15	36
4.6	Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 profila 3-3 materijala SK15	37
4.7	Posmična naprezanja na profilu 2-2 u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 u materijalu Dravski pijesak	38
4.8	Posmična naprezanja na profilu 3-3 u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 u materijalu Dravski pijesak	39
4.9	Posmična naprezanja na profilu 2-2 u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 u materijalu SK10	40
4.10	Posmična naprezanja na profilu 3-3 u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 u materijalu SK10	41
4.11	Posmična naprezanja na profilu 2-2 u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 u materijalu SK15	42
4.12	Posmična naprezanja na profilu 3-3 u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 u materijalu SK15	43
4.13	Posmična deformacija elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu Dravski pijesak	44
4.14	Posmična deformacija elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu Dravski pijesak	45
4.15	Posmična deformacija elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu SK10	45
4.16	Posmična deformacija elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu SK10	46
4.17	Posmična deformacija elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu SK15	46
4.18	Posmična deformacija elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu SK15	47

4.19	Ciklička petlja elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu Dravski pijesak	48
4.20	Ciklička petlja elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu Dravski pijesak	49
4.21	Ciklička petlja elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu SK10 .	50
4.22	Ciklička petlja elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu SK10 .	50
4.23	Ciklička petlja elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu SK15 .	51
4.24	Ciklička petlja elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu SK15 .	51

Popis tablica

3.1	Skaliranje modela prema [15]	19
3.2	Svojstva ugrađivanog materijala [18]	23
3.3	Popis mjerne opreme u dinamičkom modelu[18]	26
3.4	Karakteristike akcelerometra Seika BDK3[18]	26

1. UVOD

Brojni prirodni događaji, kao što su potresi, uragani, tornada i poplave, prouzrokuju ogromnu štetu diljem svijeta svake godine. Opasnosti povezane s potresima nazivaju se seizmičkim opasnostima. Seizmičkim hazardima pripadaju: potresanje tla, rušenje konstrukcija, likvefakcija, stvaranje klizišta, tsunami, uragani, rušenje potpornih konstrukcija, kolaps vodovodnih, kanalizacijskih, naftnih i drugih životno važnih sustava [20]. Potresi, odnosno seizmička aktivnost, jedni su od najkompleksnijih i najznačajnijih vanjskih djelovanja zbog visoke moći razaranja. Vrlo je važno poznavati i razumijeti karakteristike tla, osobito na mjestima planirane gradnje. Grana geofizike, seizmologija, proučava potrese i njihove posljedice. Prikupljanje podataka o potresima u povijesti rezultiralo je izradom karata s prikazom učestalosti i jačinom potresa što je ukazalo da seizmička aktivnost nije jednoliko raspodijeljena po površini Zemlje, već se veliki broj pojavljuje na granicama tektonskih ploča [21]. Stijene koje čine dio litosfere, stalno se deformiraju. Pri silama gravitacije, kompresije ili ekspanzije, odnosno kada jačina neke od tih sila prekorači granicu posmične čvrstoće stijene, dolazi do pomaka i pucanja u stijenskoj masi što rezultira stvaranjem rasjeda. U trenutku stvaranja rasjedne plohe, nastaje iznenadno otpuštanje deformacijske energije koja se dalje širi u obliku valova. Točka u kojoj počinje pucanje u unutrašnjosti Zemlje naziva se žarište, hipocentar ili fokus, a njegova vertikalna projekcija na površini epicentar. Veličina štete uzrokovane potresom uvelike ovisi o jačini podrhtavanja i odzivu tla. Val je deformacija koja putuje kroz materijal i nastaje kada se materijal deformira pod brzom ili sporo nanesenom silom koja se naglo ukloni. Seizmički valovi koji se šire po površini Zemlje nazivaju se površinski valovi, oni koji se šire unutar Zemlje nazivaju se prostorni valovi. Amplituda ili veličina pomaka, frekvencija i potreban broj ciklusa da uzrokuje pomak, parametri su koji utječu na odziv tla, odnosno građevinskih konstrukcija temeljenih na tom tlu. Seizmičkom pobudom tlo je ciklički opterećeno i stvaraju se posmična naprezanja. Dostizanjem graničnog praga (eng. *threshold*) zbog povećanja amplitude relativne posmične deformacije u dreniranim uvjetima kod saturiranog tla doći će do cikličke degradacije krutosti i čvrstoće odnosno promjene volumena [22]. Potresi su jedna od glavnih pokretača klizišta u svijetu. Klizišta izazvana potresima pokazuju različite karakteristike i posjeduju mnogo kompliciranije uzročne mehanizme u usporedbi s klizištima izazvanim obilnim oborinama.



Slika 1.1: Klizište uzrokovano potresom, 8.rujan 2018.Hokaido, Japan [1]

U listopadu 2018. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci započeo je četverogodišnji istraživački projekt pod nazivom "Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja", koji financira Hrvatska zaklada za znanost. Glavni cilj Projekta je modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u fizičkim modelima skaliranih klizišta u statičkim (klizišta izazvana kišom) i seizmičkim uvjetima (klizišta izazvana potresom) te njihova kombinacija u 1g uvjetima. Primarna zadaća Projekta je usporediti odgovore skaliranih modela kosina izgrađenih od različitih vrsta tla i geometrijskih uvjeta, sa i bez mjera sanacije, izloženih različitim uvjetima opterećenja. Dobiveni rezultati pružiti će korisne podatke koji bi se mogli koristiti za predviđanje ponašanja padina u prirodi te poboljšati postupke projektiranja i odabir odgovarajućih mjera sanacija klizišta.

1.1 Klizišta uzrokovana potresom

Snažni potresi su vrlo česti uzročnici velikog broja klizišta. Štete uzrokovane pojavom klizišta induciranih potresima ponekad su mnogo veće od šteta uzrokovanih samim potresom. Općenito, klizišta izazvana potresima pokazuju različite karakteristike i posjeduju mnogo kompliciranije uzročne mehanizme u usporedbi s klizištima izazvanim obilnim oborinama.



Slika 1.2: Klizište Las Colinas uzrokovano potresom, El Salvador 2001 [2]

Opasnosti povezane s potresima nazivaju se seizmičkim hazardima i dijele se na primarne i sekundarne. Primarnim seizmičkim hazardima pripada izdignuće i potonuće reljefa, rasjedi i tsunami, a sekundarnima slijeganje, likvefakcija, klizišta i odroni. Od kada su zabilježeni prvi zapisi o potresima, štete koje su uzrokovane klizištima izazvanih potresom veće su od šteta izazvanih drugim seizmičkim hazardima zajedno [11].

Pokretanje klizišta kontroliraju dvije glavne skupine parametara: parametri koji se odnose na izvor (magnituda, žarišni mehanizam) i parametri koji se odnose na mjesto na kojem se kosina nalazi (topografija, geologija, hidrologija)[23]. Uslijed potresa, prijenos seizmičkih valova uzrokuje vibracije i podrhtavanje površine tla prilikom kojih dolazi do urušavanja na područjima potencijalnih klizišta odnosno nastaju klizišta izazvana potresom. Djelovanjem seizmičkih sila na kliznu plohu aktivira se klizanje mase tla kada posmične sile trenja više nisu dovoljne da to spriječe.

Mehanizmi kretanja kod klizišta izazvanih potresom dijele se u tri skupine: 1. Isprekidana klizanja i parcijalni odroni (engl. disrupted slides and falls) najčešće na strmim, trošnim, fragmentiranim kosinama heterogene građe s mnogo diskontinuiteta. Zbog velikih brzina klizanja i odrona stvaraju velike štete. 2. Koherentna ili kontinuirana klizanja (engl. coherent slides) na srednje strmim do strmim padinama. Translacija ili rotacija stijenskih blokova ili mase materijala pri manjim brzinama od isprekidanih klizanja. 3. Bočno širenje i tečenje (engl. lateral spreads and flows): pojava kod likveficiranog tla nastala zbog male rezidualne čvrstoće materijala na blagim kosinama pri različitim brzinama [24].

Znanstvenici Higaki et al. [24] analizirali su geomorfologiju, geologiju i vrste kretanja na mjestima klizišta uzrokovanih potresom. Analizom je uspostavljena veza između tipova kretanja, geološke strukture i udaljenosti od epicentra potresa. Potresi magnitude 7 pokreću klizišta 20-30 km udaljena od epicentra, dok ona s magnitudom od 8 na više pokreću klizišta odnosno blokovska klizanja udaljena i preko 100 km, a tečenja i odrone i do 300 km [24].

Istraživanjem provedenim na 300 potresa u SAD-u, zabilježenih između 1958. i 1977. godine dokazano je da je za pokretanje klizišta potrebna minimalna magnituda veličine $M = 4$, [11]. Uz empirijsku povezanost mogućnosti aktivacije klizne plohe i magnitude potresa u obzir se mora uzeti i geotehničko stanje kosina. Ukoliko su veličine posmičnih napreznja na kliznoj plohi blizu veličina posmične čvrstoće tla, u tom će slučaju i veoma slabi potres odnosno malo dinamičko napreznje aktivirati klizište. Povezanost posmične čvrstoće tla i posmičnih napreznja u nekoj kosini govori da je seizmička stabilnost kosina uvjetovana statičkom stabilnosti kosine. Seizmička stabilnost kosine određivati će se iz statičke stabilnosti uz dinamičko napreznje koje mijenja odnos napreznje-deformacija u promatranj kosini [24].

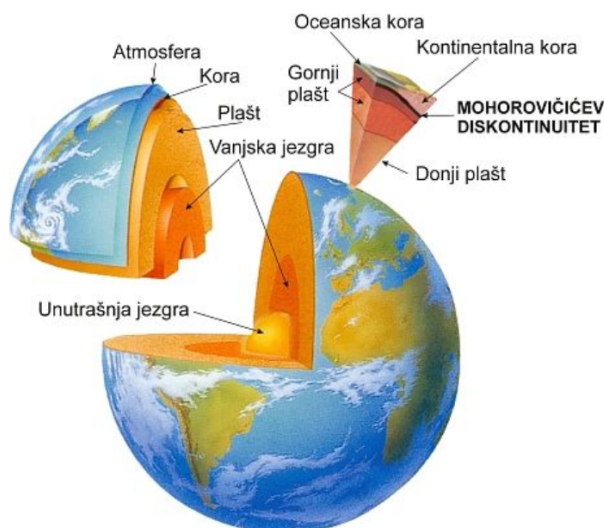
Seizmička nestabilnost dijeli se na inercijske i oslabljujuće nestabilnosti. Inercijske nestabilnosti pojavljuju se prilikom konstantne posmične čvrstoće dok su deformacije izazvane lokalnim i kratkotrajnim dinamčkim napreznjima odnosno potresnom pobudom i veća su od posmične čvrstoće materijala. Oslabljujuće nestabilnosti nastaju na način da se potresnim djelovanjem smanjuju mehanička svojstva materijala i samim time smanjuje otpornost na dinamička napreznja [11]. Odziv kosine na dinamičku pobudu izazvanu potresom ovisiti će o njezinoj geometriji i krutosti materijala, kao i amplitudi i frekvenciji kojima će se širiti valovi u tlu ispod klizne plohe.

2. PREGLED LITERATURE

2.1 Potresi

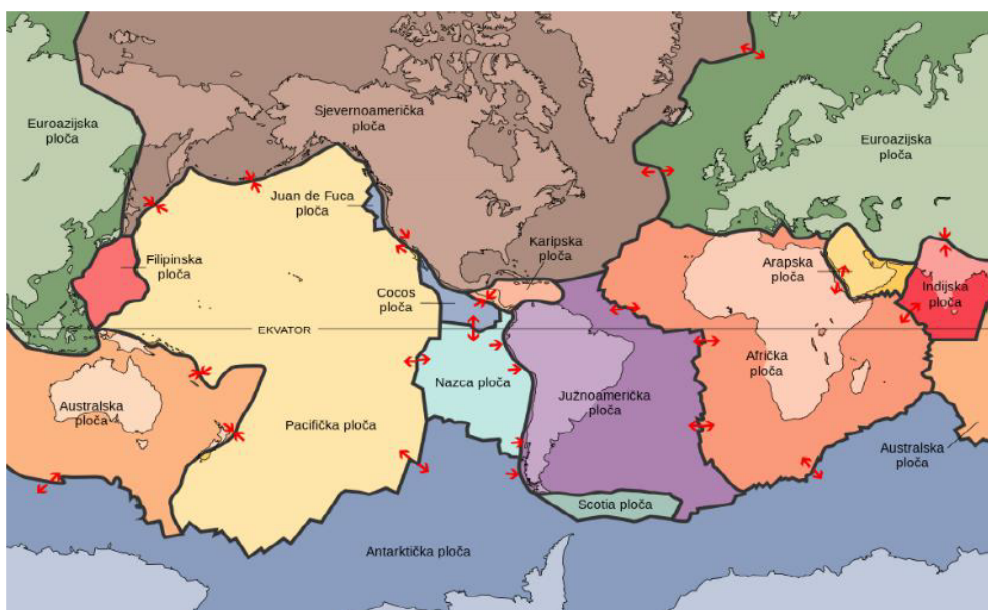
Potres se može najjednostavnije definirati kao iznenadno oslobađanje energije u Zemljinoj kori koja se širi u obliku seizmičkih valova i na površini uzrokuje potresanje tla. Većina potresa posljedica je tektonskih procesa, a manji postotak izazvan je vulkanskim erupcijama, urušavanjem zbog prekomjernih eksploatacija mineralnih sirovina te podzemnim testiranjem nuklearnih eksplozija [11].

Strukturu Zemlje čine tri glavna sloja: kora, plašt i jezgra. Kora i gornji sloj plašta čine litosferu, zonu u kojoj se događaju potresi. Litosferu čine tektonske ploče koje su u stalnom međusobnom gibanju i dijele se na šest velikih kontinentalnih i oko 14 manjih podkontinentalnih. Bitno je napomenuti da granica između kore i plašta koja se zove Mohorovičićev diskontinuitet ima veliki značaj u seizmologiji jer se upravo na tom mjestu lome i odbijaju seizmički valovi [11].



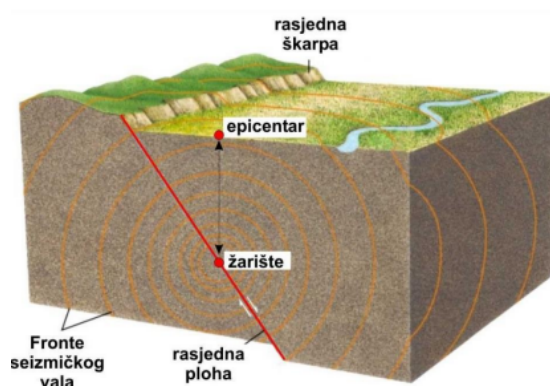
Slika 2.1: Struktura Zemlje, [3]

Tektonske ploče pomiču se duž međusobnih granica. Razlikuju se tri vrste granica kao i tri osnovna načina pomaka: divergentna granica (odvajanje i pomak u suprotnim smjerovima), konvergentna granica (ploče se pomiču jedna prema drugoj) i transformna granica (ploče klize jedna uz drugu). Zbog tih neprestanih relativnih pomaka duž granica tektonskih ploča povećava se posmično naprezanje u materijalu, elastična energija se akumulira dok se ne prekorači posmična čvrstoća stijenske mase litosfere te dolazi do sloma i oslobađanja akumulirane energije [11].



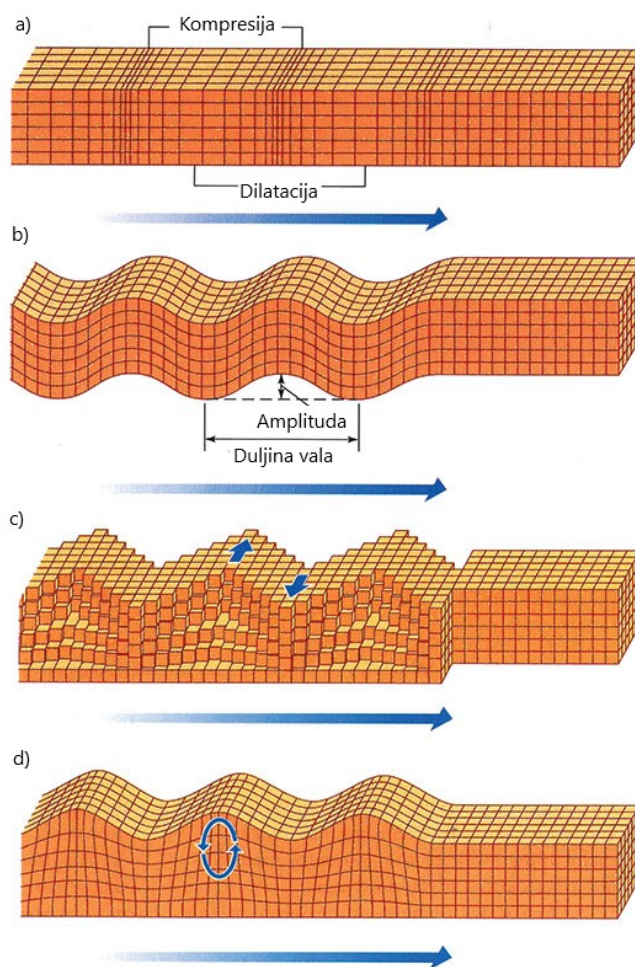
Slika 2.2: Rasprostranjenost potresnih zona na granicama tektonskih ploča, [4]

U trenutku nastanka rasjedne plohe kada je dostignuta granica posmične čvrstoće dolazi do otpuštanja velike i nagle deformacijske energije koja se rasprostire u obliku valova koji su uzrok potresa. Mjesto početka pucanje naziva se fokus, žarište ili hipo-centar, a njegova vertikalna projekcija na površini Zemlje epicentar [25].



Slika 2.3: Žarište i epicentar [5]

Prostorni valovi prostiru se kroz unutrašnjost Zemlje i dijele se na uzdužne ili primarne valove (P-valovi) i sekundarne, poprečne ili posmične (S-valovi). Čestice tla kod P-valova osciliraju u smjeru širenja odnosno javlja se zgušćivanje i razrjeđivanje čestica i induciraju volumetrijske deformacije. Kod pojave S-valova, čestice osciliraju okomito na smjer širenja valova što uzrokuje posmične deformacije materijala kojim prolaze. S obzirom da je krutost tla manja kod posmičnih naprezanja, P-valovi će se kretati brže od S-valova [11].

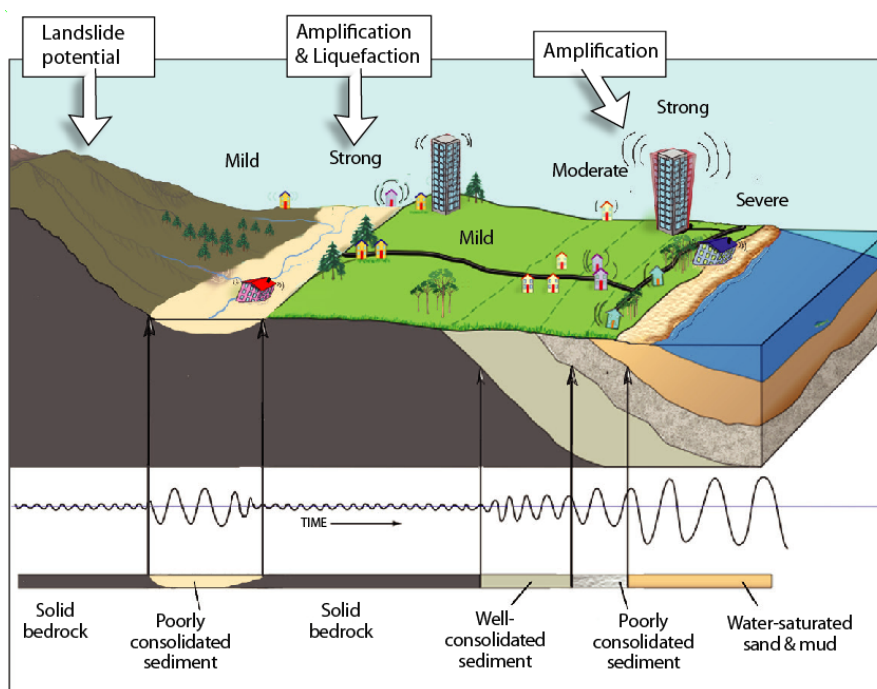


Slika 2.4: Seizmički valovi: a)Primarni val, b)Sekundarni val, c)Love val, d) Rayleigh val, modificirano prema [6]

Kod površinskih valova koji se prostiru površinom Zemlje čestice osciliraju u horizontalnoj ravnini koja je okomita na smjer širenja valova (L-valovi ili Love) i eliptično u ravnini koja je okomita na površinu Zemlje R-valovi ili Rayleigh) [25].

Val je deformacija koja putuje kroz materijal i nastaje kada se materijal deformira pod nekom silom koja se naglo ukloni. Čestice materijala, koji se naglo deformira, se brzo kreću i budući da imaju masu posjeduju sile inercije, a u isto vrijeme, zbog elastičnosti materijala, čestice se žele vratiti u početni položaj, tj. na njih djeluju sile elastičnosti u smjeru početnog položaja.

Brzina širenja valova ovisit će o gustoći i elastičnosti tla i medija. Upravo zbog toga, kod geotehničkih ispitivanja tla, koriste se seizmičke metode koje se bave mjerenjem brzine seizmičkih valova kroz tlo izazvanih umjetnom pobudom kako bi se dobili podaci o dubini slojeva različitih materijala [26].



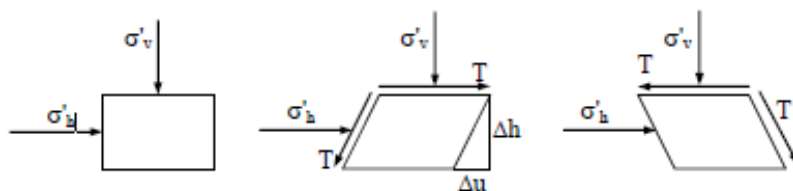
Slika 2.5: Utjecaj seizmičkih valova na različite vrste tla, modificirano prema [7]

2.2 Cikličko ponašanje tla i dinamička svojstva tla

Na prirodu i veličinu štete nastalu potresom uvelike utječe odziv tla na cikličko opterećenje. Odziv tla povezan je s mehaničkim svojstvima tla. Analiza odziva tla na potres kompleksan je zadatak koji zahtijeva involviranost različitih disciplina (inženjerska seizmologija, strukturna geologija, geofizika, geotehničko potresno inženjerstvo). Parametri kao što su amplituda, frekvencija i broj ciklusa koji je potreban da dođe do pomaka imaju najveći utjecaj na odziv tla [27].

Dinamičkim svojstvima tla mogu se opisati i definirati odnos dinamičkih opterećenja i različitih potencijalnih mehanizama koji vode do sloma u pojedinim vrstama tla i stijena. Cikličko opterećenje može se definirati kao periodično djelovanje odnosno opterećenje koje se primijeni, ukloni i ponovno primijeni u relativno brzom i ponavljajućem obliku. Jedan od najprepoznatljivijih primjera cikličkih opterećenja tla događa se uslijed potresa kada je tlo izloženo cikličkim posmičnim naprezanjima pri različitim amplitudama i frekvencijama koje rezultiraju privremenim i trajnim deformacijama [8]. Odziv tla na cikličko opterećenje uglavnom je ovisno o mehaničkim svojstvima tla. Mehanička svojstva povezana s dinamičkim opterećenjem su brzina posmičnih valova V_s , sekantni posmični modul G_s , maksimalni sekantni posmični modul G_{max} , kvocijent prigušenja λ , indeks degradacije δ i Poissonov koeficijent ν . Iako se ova svojstva generalno nazivaju "dinamička svojstva tla", koriste se i u mnogim statičkim problemima stabilnosti tla. Dinamička svojstva tla uveliku utječu na ponašanje i stabilnost tla prilikom potresa [28].

Kod analize odziva tla ili za probleme interakcije temeljne konstrukcije i tla smatra se da je seizmičko horizontalno gibanje uzrokovano vertikalnim širenjem polariziranim horizontalnim posmičnim valovima. U tim uvjetima, element tla unutar profila tla je izložen na cikluse naprezanja slične onima prikazanim na slici 2.6.



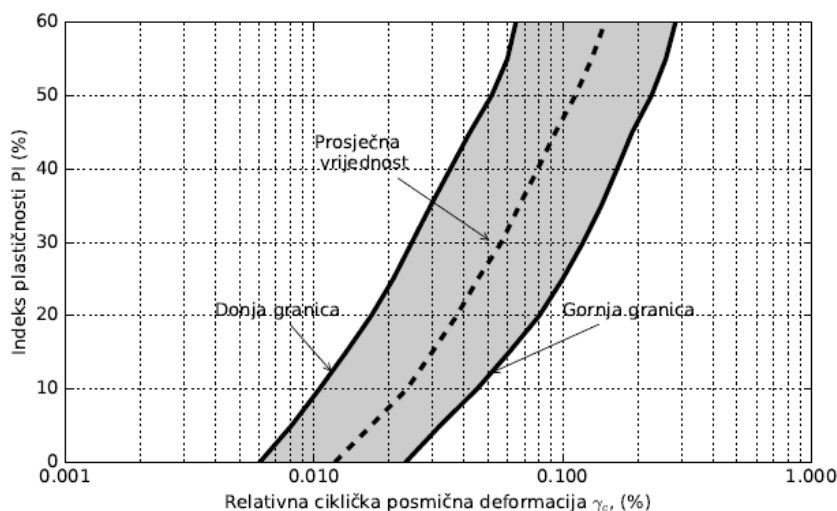
Slika 2.6: Idealizirani ciklus naprezanja tijekom potresa [8]

U početku, u horizontalno slojevitom profilu, element tla je u ravnoteži uslijed vertikalnog efektivnog naprezanja σ'_v i horizontalnog efektivnog naprezanja $\sigma'_v K_0$ gdje je K_0 koeficijent mirnog potiska tla. Prolaskom vala kroz tlo stvara se dodatno posmično naprezanje τ koje uzrokuje posmičnu deformaciju γ koja je definirana izrazom (2.1) [8].

$$\gamma = \frac{\delta u}{\delta h} \quad (2.1)$$

Najvažniji parametri cikličkog opterećenja su ciklička posmična deformacija γ_c i broj ciklusa N . Cikličkim opterećenjem tla dolazi do relativnih pomaka između čestica tla koji mogu biti izraženi kroz posmičnu deformaciju γ koja direktno utječe na promjenu volumenu i samim time na promjenu pornih pritisaka [22].

Vrijednost posmične deformacije koja se naziva prag (eng. *threshold*) ili volumetrijski prag posmične deformacije $\gamma_{t,v}$ i označava granicu do koje u tlu ne dolazi do nikakvih promjena, a nakon koje dolazi do značajnih nepovratnih promjena. Promjena volumena u tlu nastati će kada vrijednost posmične deformacije, γ prijeđe vrijednost volumetrijskog praga posmične deformacije, $\gamma_{t,v}$. Prag, $\gamma_{t,v}$ ovisi o mikrostrukтури tla i u korelaciji je s indeksom plastičnosti, PI , kako je prikazano na slici 2.7.



Slika 2.7: Odnos indeksa plastičnosti, PI i praga posmične deformacije za ciklički porni pritisak, $\gamma_{t,v}$ [9]

Čestice rahlih materijala pri opterećenju imaju tendenciju približiti se jedna drugoj što će rezultirati smanjenjem volumena i ukoliko su pore ispunjene vodom ona će pokušati izaći. Čestice zbijenog materijala pokušavaju ramaknuti prilikom opterećenja što rezultira povećanjem volumena i mogućnosti usisavanja vode odnosno ispunjavanje novonastalih pora vodom. Zbijenost tla određuje se uz pomoć maksimalnog koeficijenta pora (e_{max}) koji označava najrastresitije slaganje čestica tla, koeficijenta pora uzorka (e_0) i minimalnog koeficijenta pora (e_{min}). Relativna zbijenost ima vrijednost od 0 do 1, odnosno od 0% do 100%, a određuje se pomoću izraza (2.2), [npr. 11, 29, 30]:

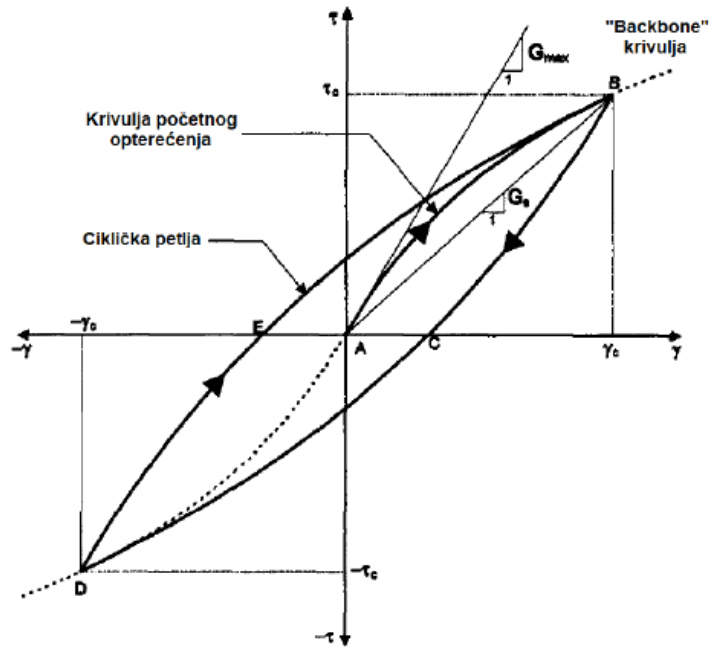
$$I_D = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad (2.2)$$

Gdje je: e_0 -koeficijent pora uzorka, e_{min} -minimalni koeficijent pora i e_{max} -maksimalni koeficijent pora.

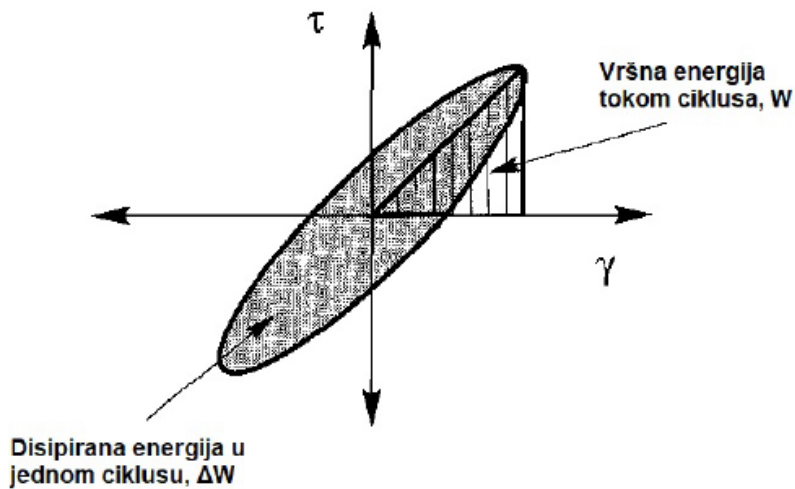
Nekohrentni krupnozrnasti materijal pri opterećenju će se zbiti, odnosno doći će do smanjenja volumena, ali ukoliko se tlo nalazi u nedreniranim uvjetima i pore su ispunjene vodom, dolazi do stvaranja pornog pritiska. Nestlačiva voda u porama preuzima opterećenje na sebe što rezultira nastankom pornog pritiska koji raste s trajanjem cikličkog opterećenja i nemogućnosti brzog sabijanja materijala. Porni pritisci kod pijesaka i prahova počinju disipirati nakon prestanka podrhtavanja tla. Ukoliko efektivna naprezanja postanu jednaka nuli jer su porni pritisci dosegli vrijednost ukupnih naprezanja, dolazi do gubitka posmične čvrstoće i pojave likvefakcije.

Cikličkim petljama prikazuje se cikličko ponašanje tla. Površina i nagib petlje opisuju cikličke osobine tla. Kako se osobine tla mijenjaju kroz cikluse, tako se mijenjaju i cikličke petlje. Slika 2.8 prikazuje idealiziranu petlju prvog ciklusa određenu amplitudom posmičnog naprezanja, amplitudom relativne posmične deformacije γ_c , sekantnim modulom za γ_c i τ_c , maksimalnim početnim sekantnim modulom kada γ_c teži nuli (G_{max}) i površinom petlje [11].

Energija potrošena za vrijeme jednog ciklusa prikazuje se površinom petlje. Slika 2.9 i izraz 2.3 vrijede ukoliko su relativna posmična deformacija i posmično naprezanje jednaki u pozitivnom i negativnom smjeru [11].



Slika 2.8: Idealizirana ciklička petlja, modificarno prema [10]



Slika 2.9: Površine za izračun koeficijenta prigušenja, modificirano prema [11]

Tlo ima sklonost rasipanja energije do kojeg dolazi uslijed prigušenja (en. *damping*), čak i kod veoma malih deformacija. Dvije vrste prugešnja razlikuju se po tome što viskozno prigušenje ovisi o frekvenciji opterećenja, a histerežno prigušenje ne ovisi i glavni je oblik disipacije energije [8].

Ovisno o sekantnom modulu, amplitudi posmične deformacije, prigušenju te maksimalnom sekantnom modulu vrijedi slika 2.10

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (2.3)$$

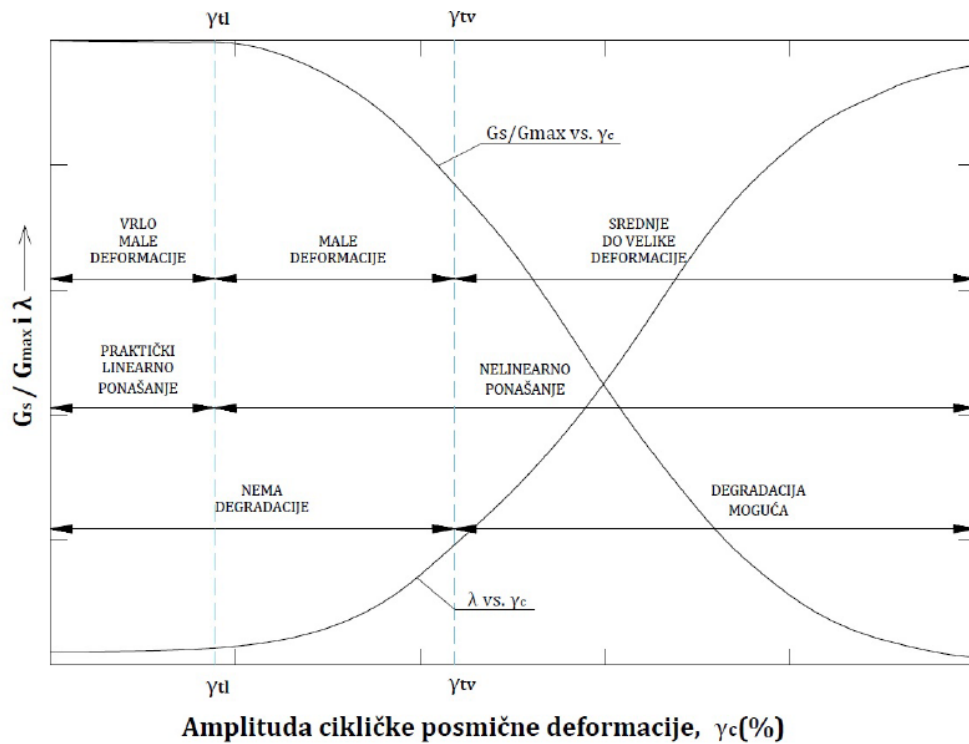
Gdje je:

ΔW - površina petlje,

W - površina trokuta.

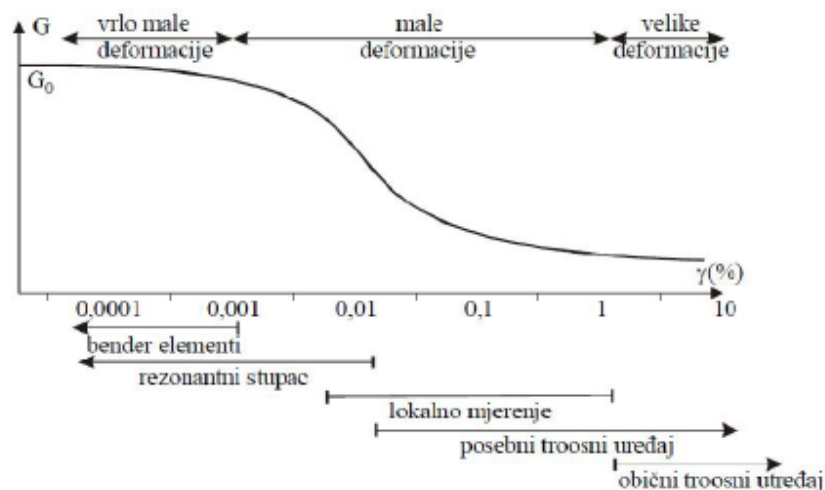
Plastičnost tla utječe na svojstva prigušenja odnosno, za tla visoke plastičnosti karakteristično je da imaju veliki raspon linearno-elastičnog ponašanja i manje prigušenje što uvjetuje rezonanciju koja može utjecati na povećanje seizmičkog vala [31].

Rezonancija je titranje fizikalnoga sustava do kojeg dolazi kada je opterećen vanjskom periodičnom silom kojoj je frekvencija približna karakterističnoj frekvenciji sustava i kada amplituda titranja sustava naraste [32]. Degradacija kod tla visoke plastičnosti nije velika i postoji mala vjerojatnost da će doći do sloma tla uslijed degradacije krutosti i čvrstoće. Saturirana tla vrlo niske plastičnosti kao što su saturirani pijesci pokazuju veliko prigušenje i nelinearno ponašanje pri malim posmičnim deformacijama. Krutost i čvrstoća kod kontinuiranog cikličkog opterećenja značajno padaju i mogućnost pojave rezonancije gotovo je nemoguća. Štetni utjecaj na konstrukcije može imati ako zbog velikog omekšanja tla period seizmičkog opterećenja na površini poraste i predominantni period postane sličan periodu konstrukcije. Uslijed cikličke degradacije pad čvrstoće tla najkritičniji je aspekt odziva tla, od čega je slom zbog likvefakcije najekstremniji. Tla srednje plastičnosti mogu dodatno pojačati seizmičko opterećenje, dok pri kontinuiranom cikličkom opterećenju njihova nosivost može biti smanjena [13].



Slika 2.10: Krivulje redukcije sekantnog posmičnog modula i prigušenja [12, 13]

Određivanje dinamičkih parametara tla provodi se terenskim i laboratorijskim ispitivanjima od kojih je dio usmjeren na mjerenje ponašanja tla pri malim, a drugi pri velikim deformacijama.



Slika 2.11: Primjenjivost metoda mjerenja deformacija u ovisnosti modula posmika G i posmične deformacije γ , modificirano prema [14]

Terenska ispitivanja omogućuju mjerenja svojstava tla na licu mjesta pa na rezultate utječu složeni učinci postojećeg napreznja u tlu kao i kemijski, toplinski i struk-

turni uvjeti. Testovima na terenu mjeri se odziv velikog volumena tla i induciraju se deformacije slične onima koje izazivaju potresi. Isto tako, terenska ispitivanja onemogućuju ispitivanja tla pod drugim stanjima naprezanja i uvjetima u tlu. Niz terenskih ispitivanja mjere svojstva tla pri malim deformacijama i to su: refrakcijska seizmika, spektralna analiza površinskih valova (MASW i SASW), Crosshole metoda, Downhole metoda.. Testovi kao što su standardni penetracijski pokus (SPT), statički penetracijski pokus (CPT), krilna sonda (FVT), Ménardov presiometar (MPMT) i savitljivi dilatometar (FDMT) mjere svojstva tla pri većim deformacijama.

Laboratorijska ispitivanja omogućuju kontrolu i mjerenje naprezanja, deformacija i pornog pritiska, ali poteškoće može stvoriti poremećenost uzorka, posebno kod ispitivanja pri malim deformacijama. Svojstva tla pri malim deformacijama ispituju se mjerenjem rezonantnim stupcem (RCT), DSDSS pokusom (Double Specimen Direct Simple Shear Test), mjerenje bender elementima (BE-Bender Elements), pomoću troosnog uređaja opremljenog dodatnim uređajima (osjetilima) kao što su Hall efekt osjetila, LDT osjetila ili LVDT osjetila [33]. Dinamičke parametre tla pri velikim deformacijama određuje se uz pomoć troosnog uređaja, uređaja za direktno smicanje i uređaja za torzijsko smicanje. Dinamičke parametre tla može se odrediti također iz testova provedenih na umanjenim modelima geotehničkog problema u kombinaciji s potresnim stolovima. Pomoću umanjenih modela mogu se rekonstruirati i proučavati utjecaji i stvarni uvjeti na terenu.

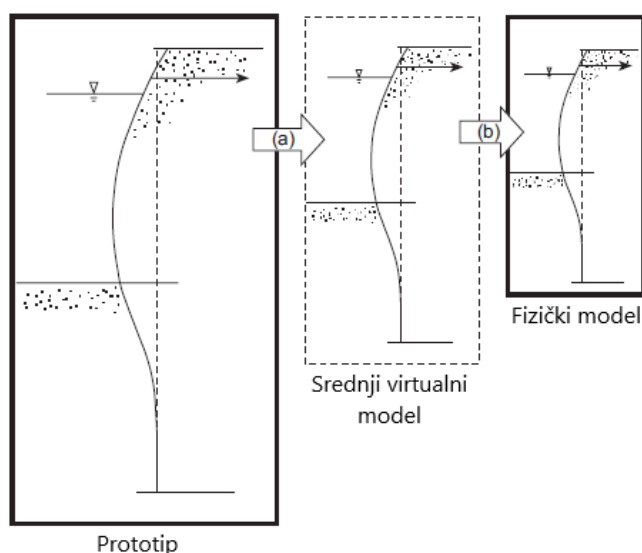
2.2.1 Vršno ubrzanje tla (PGA)

Vršno ubrzanje tla (PGA) maksimalno je ubrzanje tla koje se dogodilo tijekom potresa i jednako je amplitudi najvećeg apsolutnog ubrzanja zabilježenog na akcelerogramu tijekom određenog potresa. Mjerna jedinica vršnog ubrzanja je m/s^2 ili g odnosno jedinici akceleracije sile teže, pa je tako $1 g$ ekvivalentan $9,81 m/s^2$ [34]. Zbog širenja potresnih valova u sva tri smjera, PGA se dijeli na vodoravnu i okomitu komponentu. Horizontalna komponenta PGA obično je veća od one u okomitom smjeru, ali u blizini velikih potresa dolazi i do suprotne situacije. Vršno ubrzanje tla je važan parametar za potresno inženjerstvo, a koristi se i kao mjera inteziteta potresa. Za razliku od Richterove ljestvice, to nije mjera ukupne energije (jačina) potresa, već daje informaciju koliko je ubrzanje tla u određenoj geografskoj točki. Mercallijeva ljestvica, MCS određuje i uspoređuje jakost potresa prema vanjskim znakovima, tj. na temelju podataka o šteti dok se PGA mjeri instrumentima, kao što su akcelerogrami. Konstantnost opasnosti od hazarda pretpostavka je svake seizmičke zone koja se opisuje kao vrijednost referentnog vršnog ubrzanja tla stijenske mase agR (ubrzanje u/na temeljnoj stijeni bez obzira na njenu dubinu zalijeganja), [35].

2.3 Metoda skaliranja modela

Fizičko modeliranje klizišta odnosno korištenje skaliranih modela klizišta u istraživačke svrhe koristi se od 1970. godine i započelo je u Japanu. Glavna svrha fizičkog modeliranja klizišta, u posljednjih 25 godina, bila je istraživanje inicijacije, gibanja i akumulacije brzog toka klizišta uzrokovanog infiltracijom vode u kosinu. Modeliranje klizišta u malom mjerilu našlo je široku primjenu u analizi različitih vrsta klizišta (npr. tokovi, klizišta, padovi i prevrtanja) u različitim materijalima (pjeskoviti, muljeviti i glinoviti materijal) i s različitim rubnim uvjetima i sposobnostima analizirati cijeli spektar mehanizama i procesa, [36].

Metoda skaliranja modela znanstvenika S.Iai et al.[15] omogućuje modeliranje prototipa velikih razmjera izloženog potresu. Metoda se temelji na konceptu dvostupanjskog skaliranja: a) Umanjiti prototip u srednji virtualni model koji koristi odnose skaliranja u 1g uvjetima i b) Umanjiti virtualni model u fizički model koristeći konvencionalne odnose skaliranja u centrifugalnim uvjetima. Kada su preliminarni podaci o odzivu tla nedostupni, često se usvaja pretpostavka da je modul posmika pri maloj deformaciji ($\leq 10^{-6}$) proporcionalan korijenu ograničavajućeg tlaka što dovodi do relacija Tipa II, koje se obično koriste za modele u kojima se koristi pijesak iste gustoće kao i kod prototipa [15].



Slika 2.12: Koncept skaliranja u dva stupnja: a) skaliranje za 1 g uvjete b) skaliranje za centrifugalne uvjete, modificirano prema [15]

2.4 Metode obrade podataka

2.4.1 Korištenje akcelerometra u svrhu određivanja posmičnih naprezanja i deformacija

Inverzne analize podataka akcelerometara s terena ili fizičkih modela za definiranje odziva tla na naprezanje i deformacije veoma su korisne i koriste se jako često u istraživanjima u današnje vrijeme. Dobivanje vrijednosti posmičnih deformacija zahtijeva dvije integracije ubrzanja dobivenih iz akcelerometara te diferencijaciju pomaka u prostoru. Diferencijacija podataka o pomaku u diskretnim točkama provodi se korištenjem različitim numeričkim metodama. Zeghal i Elgamal (1994.) u svojim istraživanjima koristili su po dijelovima linearnu interpolaciju, dok su Davis i Berrill (1998, 2001) koristili Fourierove transformaciju. Točnost bilo koje tehnike inverzne analize za tumačenje prijenosa posmičnih valova temelji se na zapisima akcelerometra i ovisi o razmaku instrumenta u odnosu na duljine valova. Konceptualno, većina numeričkih tehnika trebala bi raditi dobro kada je razmak između instrumenata manji od otprilike jedne osmine najkraće valne duljine ($\lambda_{min}/8$). Na rezultate inverznih analiza utječu sve pogreške u pomacima tla koje su izračunate iz zapisa akcelerometra, uključujući pogreške mjerenja (npr. šum, pomak, faktori kalibracije, propusnosti instrumenta..) i ograničenja obrade signala (npr. filtriranje). Pomaci se izračunavaju dvostrukom integracijom ubrzanja akcelerometra i stoga rezultati mogu biti osjetljivi na pogreške mjerenja akcelerometra. Posmične deformacije mogu biti još osjetljivije na pogreške mjerenja iz razloga što ovise o dobivenim rezultatima pomaka. Različite numeričke tehnike za izračunavanje posmičnih deformacija razlikuju se sa stupnjevima osjetljivosti na moguće pogreške mjerenja i pretpostavke obrade signala. Posmična naprezanja određuju se u središtima svakog elementa (srednje točke između akcelerometara), kao što je prikazano na slici 3. Pretpostavlja se da se ubrzanja linearno razlikuju između akcelerometara. Ubrzanje u čvoru 0, na površini, izjednačava se ubrzanju u čvoru 1 (prvi akcelerometar), odnosno pretpostavlja se da se tlo iznad gornjeg akcelerometra ponaša kao kruto tijelo. Posmično naprezanje na površini je jednako nuli, stoga je posmično naprezanje prva dva elementa tla određeno izrazima (2.4) i (2.5) [16]:

$$\tau_{e,1} = \rho \cdot \frac{z_1}{2} \cdot a_1 \quad (2.4)$$

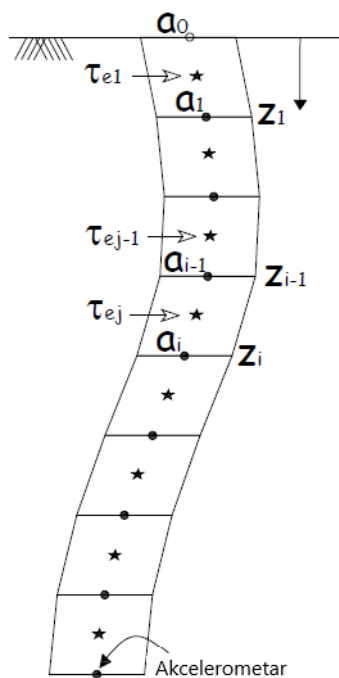
$$\tau_{e,2} = \tau_{e,1} \cdot \rho \cdot \frac{z_1}{2} \cdot a_1 + \rho \cdot \frac{z_2 - z_1}{2} \cdot \frac{3 \cdot a_1 - a_2}{4} \quad (2.5)$$

Posmično naprezanje na sljedećim elementima određuje se kao:

$$\tau_{e,j} = \tau_{e,j-1} + \rho \cdot \frac{z_{i-1} - z_{i-2}}{2} \cdot \frac{3 \cdot a_{i-1} - a_{i-2}}{4} + \rho \cdot \frac{z_i - z_{i-1}}{2} \cdot \frac{3 \cdot a_{i-1} - a_i}{4} \quad (2.6)$$

Gdje je:

- $\tau_{e,j}$ - posmično naprezanje u elementu j
- ρ - gustoća materijala,
- z_i - dubina u točki i ,
- a_i - akceleracija u točki i



Slika 2.13: Shema profila tla s akcelerometrima, modificirano prema [16]

Posmične deformacije izračunavaju se kao razlika pomaka tla u točki iznad i točki ispod promatrane točke, i , podijeljena s visinskom razlikom te dvije točke. U slučaju gdje je visinska razlika jednaka između i i $i - 1$ te i i $i + 1$ posmična deformacija u točki i računa se prema izrazu:

$$\gamma_i = \frac{u_{i-1} - u_{i+1}}{2h} \quad (2.7)$$

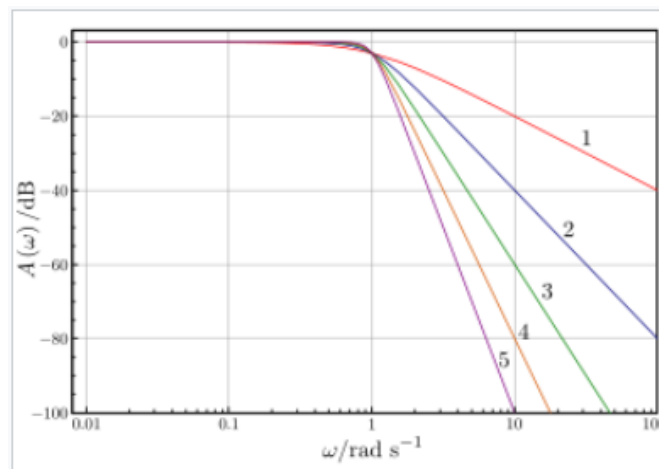
Gdje je:

- γ_i - posmična deformacija u točki i
- u_i - pomak u točki i ,
- h - visinska razlika između i i $i + 1$ odnosno i i $i - 1$

Pomaci se dobivaju dvostrukom integracijom zapisa akcelerometra, nakon filtriranja frekvencija koji nisu unutar propusnog opsega senzora.

2.4.2 Butterworth filtar

Butterworth filtar je vrsta filtra koja se koristi u svrhu obrade podataka i dizajniran je da ima što ravniji frekvencijski odziv u propusnom opsegu. Također se naziva filtar maksimalno ravne magnitude ili izravnjanja. Prvi put ga je, 1930. godine, opisao britanski inženjer i fizičar Stephen Butterworth u svom radu pod naslovom "O teoriji filtarskih pojačala". Dvopolni filtar s omjerom prigušenja od 0,707 je Butterworthov filtar drugog reda. Butterworthovi filtri se koriste u sustavima upravljanja jer nemaju vršne vrijednosti. Zahtjev da se eliminiraju svi vršni efekti iz filtra je konzervativan. Dopuštanje nekih vršnih vrijednosti može biti korisno jer omogućuje ekvivalentno prigušenje s manjim faznim kašnjenjem u nižim frekvencijama [37].



Slika 2.14: Dijagram pojačanja Butterworthovih niskopropusnih filtara reda od 1 do 5, s graničnom frekvencijom $\omega_0=1$, [17]

3. METODOLOGIJA ISPITIVANJA PONAŠANJA UMANJENOG MODELA KOSINE

3.1 Fizički model umanjenog klizišta

3.1.1 Skaliranje modela

U svrhu skaliranja modela korištena je metoda skaliranja znanstvenika S.Iai, T.Tobita i T.Nakahara opisana u poglavlju Metoda skaliranja modela. U ovom slučaju, korišteni su faktori za skaliranje za 1g uvjete i prikazani u Tablici 3.1 [15].

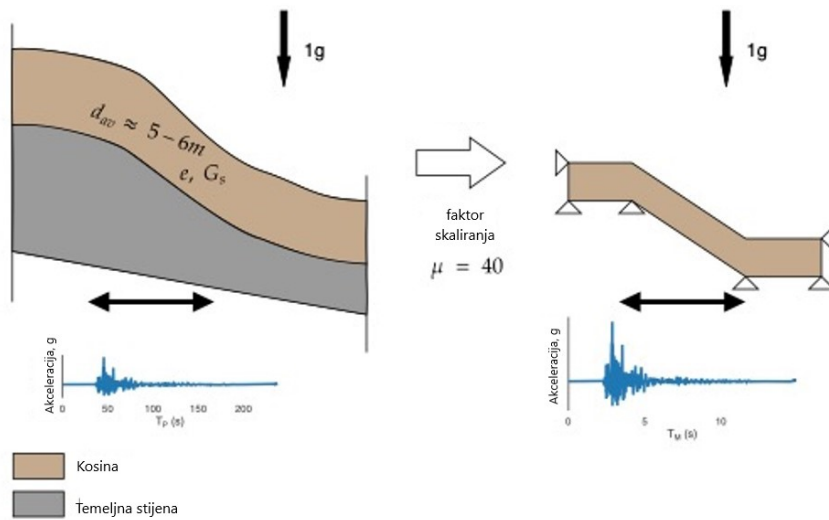
Tablica 3.1: Skaliranje modela prema [15]

Količina	Faktor skaliranja, Tip II*	Iznos
Dužina	μ	40
Vrijeme	$\mu^{0.75}$	15.91
Frekvencija	$\mu^{-0.75}$	0.0635
Naprezanje	$\mu^{0.5}$	6.32
Pomak	$\mu^{1.5}$	252.98
Akceleracija	1	1

* $\mu_e = \mu^{0.5}$ and μ_p

PROTOTIP - POPREČNI PRESJEK

UMANJENI MODEL - POPREČNI PRESJEK



Slika 3.1: Skaliranje predmetnog modela [18]

3.1.2 Opis umanjenog modela

Osnova ovog rada je fizički model umanjenog klizišta. Približna tlocrtna dimenzija sanduka, prikazanog na Slici 3.3, iznosi 1 x 0,5m na kojem je postavljena plastična mreža u svrhu većeg trenja između podloge i materijala. Sanduk je prikladan za ugradnju bilo koje vrste materijala u bilo kojim predefiniranim uvjetima u smislu početne gustoće odnosno relativne zbijenosti i vlažnosti.

Materijal je ugrađivan u sloju od 13 cm, na kosini nagiba 40° . Unutar materijala postavljeni su mjeraci pornog pritiska, akcelerometri i tenziometri. Na površinu kosine postavljene su trake za mjerenje pomaka pomoću optičkog mjernog sustava. Sanduk s materijalom postavljen je na potresnu platformu.



Slika 3.2: Sanduk umanjenog modela

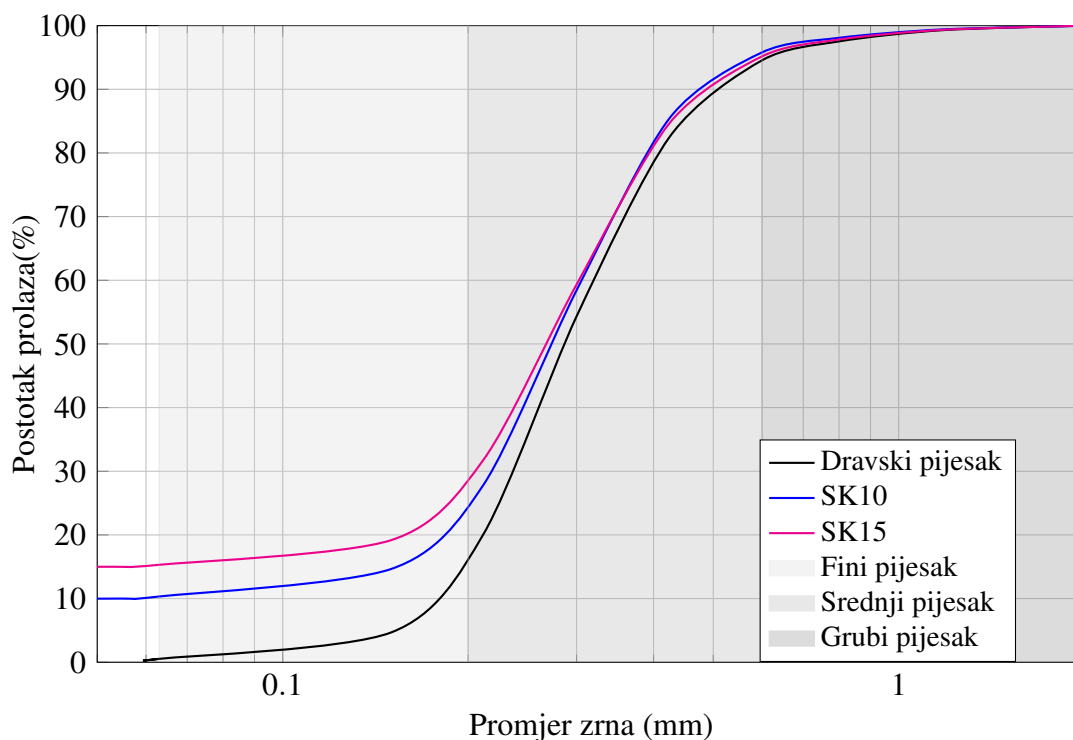
3.1.3 Opis pokusa i korištenog materijala

Ispitivanje je provedeno na tri različita materijala. Kao prvi, osnovni materijal i najjednostavniji, korišten je sitnozrnati pijesak (0–1,0 mm) zbog relativno jednostavnog procesa infiltracije i uzrokovanja sloma. Raspodjela veličine zrna prikazana je na slici 3.3 dok Tablica 3.2 [18] prikazuje osnovna fizikalna svojstva i uvjete na početku ispitivanja.

Druga i treća vrsta tla dobivene su dodavanjem kaolinske gline u čisti pijesak u omjeru 10% odnosno 15% od ukupne težine (u daljnjem tekstu označavaju se kao SK10 odnosno SK15).

Kut trenja i kohezija određeni su u aparatu za izravni posmik pri relativnoj gustoći od 50% za čisti Dravski pijesak i SK10, a za SK15 75%, pri niskim normalnim naprezanjima koja su veoma slična onima prisutnima u modelu.

Materijal je ugrađen metodom podzbijanja predložene od strane Ladda [38] u 6 slojeva pomoću ručnog kompaktora. Kako bi se postigla homogenost materijala u kosini ugrađivan je od nožice kosine prema vrhu. Paralelno s ugradnjom slojeva ugrađeni



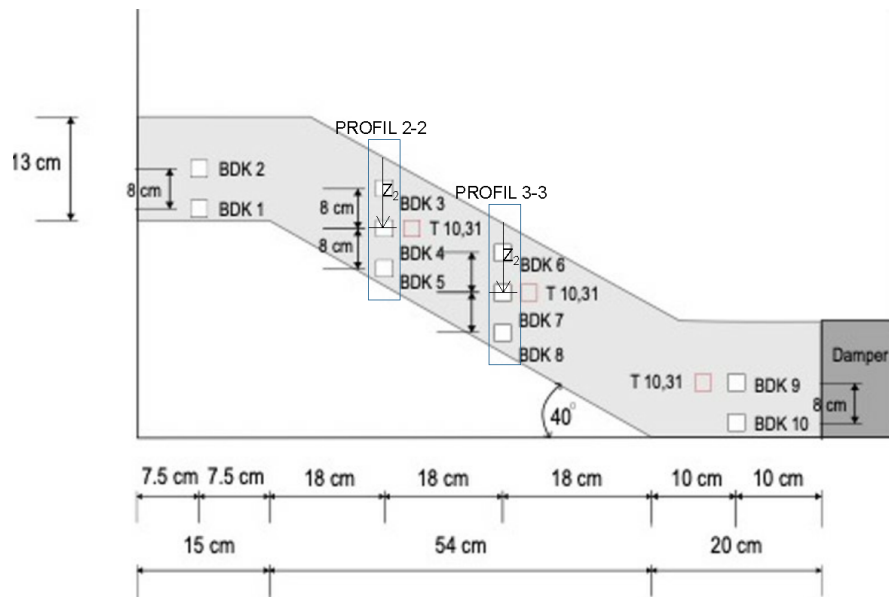
Slika 3.3: Granulometrijska krivulja ugrađenog materijala (Dravski pijesak, SK10, SK15), [18]

su akcelerometri i tenziometri kako je prikazano na Slici 3.4 [18]. Na samoj kosini postavljeno je šest akcelerometara, u dva stupca po tri komada jednakog međusobnog razmaka od 8cm. U gornjem i donjem dijelu kosine postavljena su po dva akcelerometra s međusobnom visinskom razlikom od 8cm. U gornjem dijelu nalazi se jedan stupac koji čini dva akcelerograma i u donjem dijelu drugi stupac, također sačinjen od dva akcelerograma.

Nakon ugradnje odgovarajućeg materijala i opreme, postavljene su kamere, te se pristupilo opterećenju seizmičkim naprezanjima pomoću potresne ploče. Putem softvera potresnoj ploči zadaje se određena amplituda, u ovom slučaju 0,2 cm, i frekvencija. Frekvencija se postepeno pojačava od 0 Hz do 5,5 (5,75) Hz.

Tablica 3.2: Svojstva ugrađivanog materijala [18]

SVOJSTVA MATE- RIJALA	OZNAKA	DRAVSKI PIJESAK	SK10	SK15
Specifična težina	G_s	2.7	2.69	2.67
Suha gustoća	$\rho_d(g/cm^3)$	1.52	1.42	1.51
Totalna gustoća	$\rho_t(g/cm^3)$	1.55	1.5	1.63
Efektivna veličina zrna	D_{10}	0.183	0.054	0.0045
Efektivna veličina zrna	D_{30}	0.237	0.219	0.206
Efektivna veličina zrna	D_{60}	0.32	0.307	0.303
Koeficijent uniform- nosti	C_u	1.749	5.685	-
Koeficijent zakriv- ljenosti	C_c	0.959	2.893	-
Minimalni koefici- jent pora	e_{min}	0.641	0.647	0.544
Maksimalni koefici- jent	e_{max}	0.911	1.121	1.43
Hidraulička provod- ljivost	$k_s(m/s)$	1×10^{-5}	6.78×10^{-6}	3.5×10^{-6}
Kut unutarnjeg tre- nja	$\phi(^{\circ})$	34.9	32	31.8
Kohezija	$c(kPa)$	0	3.2	4.4
Početna poroznost	η_i	0.437	0.469	0.434
Početni koeficijent pora	e_i	0.776	0.884	0.766
Početna relativna zbijenost	Dr_i	0.5	0.5	0.75
Početni sadržaj vode	$\omega(\%)$	2	5.4	8.1

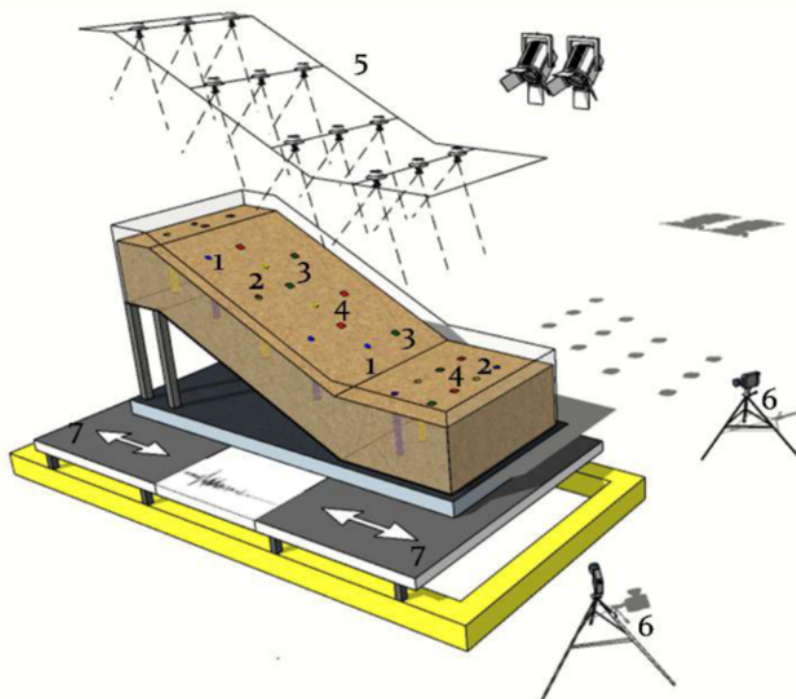


Slika 3.4: Lokacije akcelometra i mjerača volumetrijske količine vode u modelu kosine, modificirano prema [18]

3.2 Korišteni mjerni uređaji

Odabir mjerne opreme i tehnike mjerenja u umanjenom modelu ne razlikuje se bitno od sustava monitoringa na klizištima u prirodi. Uz geodetske i geotehničke senzore u svrhu mjerenja podataka o pornom pritisku i oborinama koristi se i oprema za hidrološki nadzor. Monitoring fizičkih modela omogućuje analizu osjetljivosti kritičnih parametara i eksperimentiranje na osnovu kojih je kasnije lakše donijeti odluku o sustavu promatranja na terenu kao i njegovo poboljšanje. Mjerenja u fizičkim modelima predmet su mogih istraživanja posljednjih godina. Zaključak da je likvefakcija uzrok smicanja, a ne sloma dao je Eckersley [39] ispitivanjem na umanjenom modelu. Spencer i Guymer[40] zaključili su da se, pretpostavljajući ravnotežu otpornih i pokretačkih sila, porni pritisci mogu predviđati preko Coulombovog kriterija čvrstoće korsiteći se umanjenim modelom klizišta na kojem su opazili prekomjerne porne pritiske. Dosađajna mjerenja pokazala su da poroznost i vlažnost materijala može uvelike utjecati na pokretanje klizne plohe te da se značajni porni pritisak javlja kod početnog klizanja i kasnije doprinosi kretanju pokrenute mase materijala [41].

Geotehnički monitoring predmetnog klizišta proveden je pomoću kompleksne mreže različitih vrsta senzora: tenziometri za mjerenje sukcije, akcelerometri BDK3 SEIKA i mjernih traka za mjerenje pomaka. Slika 3.5 prikazuje umanjeni model sa korištenom mjernom opremom čiji se popis nalazi u tablici 3.3[18]. Svi senzori povezani su na *datalogere* koji kontinuirano prate i prikupljaju podatke.



Slika 3.5: Shema umanjenog modela s popratnom mjernom opremom, [18]

Tablica 3.3: Popis mjerne opreme u dinamičkom modelu[18]

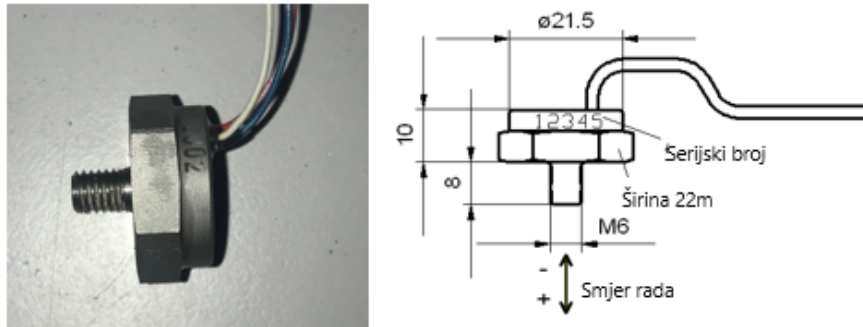
OZNAKA OPREME	DINAMIČKI MODEL
1	Tenziometri
2	Mjerači pornog pritiska
3	Mjerne trake
4	Akcelerometri
5	Simulator oborina
6	High speed kamere
7	Potresni stolovi

3.2.1 Akcelerometri Seika BDK3

Akcelerometri BDK3 visoke su otpornosti na preopterećenja. Ugrađena integrirana elektronika služi za dinamičko mjerenje vibracija i ubrzanja frekvencija u rasponu od 1Hz do nekoliko kHz. Dinamički akcelerometri BDK3 su kapacitivni akcelerometri opružne mase s integriranom senzorskom elektronikom. Rezonantni vrhovi su minimizirani dinamičkim plinskim prigušenjem u primarnom transformatoru. Akcelerometri BDK3 koriste se za mjerenja koja zahtijevaju veliku otpornost na preopterećenje, visoku dugoročnu stabilnost, nisku donju granicu frekvencije, malu težinu i malu potrošnju energije. Primjenjuju se kod: mjerenja na vozilima, strojevima, zgradama i postrojenjima za kontrolu procesa i dijagnozu grešaka, seizmička mjerenja, mjerenja vibracija, dinamičko mjerenje položaja i brzine [42]. U tablici 3.4 dane su specifikacije korištenih akcelerometara.

Tablica 3.4: Karakteristike akcelerometra Seika BDK3[18]

KARAKTERISTIKA	BDK3
Opseg mjerenja	$\pm 3g$ (ca. $\pm 30\text{m/s}^2$)
Rezolucija	$< 10^{-3}g$
Frekvencija	1...300Hz
Osjetljivost pri $U_b = 5V$	cca 150 mV/g
Temperaturni pomak osjetljivosti	$< +6$
Temperaturni pomak nulte točke	$< 0.1 \text{ mV/K}$
Nulti pomak	$2.5 \pm 0.1 \text{ Volt}$
Output	cca 100 Ohm
Linearno odstupanje	$< 1\%$
Transverzalni senzibilitet	$< 1\%$
Otpor mehaničkog preopterećenja u smjeru mjerenja	cca 10000g
Nominalni napon napajanja	$U_{bN} = 5V$



Slika 3.6: Akcelerometar Seika BDK3

3.2.2 Potresne platforme Quanser STI-III

Dinamičko opterećenje fizičkog modela ostvareno je uz pomoć potresne platforme Quanser STI-III pokretane elektromagnetskim motorom. Tlocrtna dimenzija potresne platforme je 625 x 625 mm². Opseg radne frekvencije je od 0 Hz do 20 Hz, a maksimalni pomak platforme u oba smjera iznosi 15 cm. Uz maksimalni teret od 130 kg, platforma dostiže ubrzanje od 1g u oba smjera, a bez tereta ubrzanje od 2,8g u smjeru x i 4,5g u smjeru y. Sustav se sastoji od dvije platforme koje se mogu koristiti zasebno kao u opisanom eksperimentu ili zajednički. Pobude platformi mogu biti jednake ili različite, odnosno omogućuju sinkroni rad ili asinkroni rad [11]. Potresnim platformama upravlja se pomoću softvera LabView kojim je moguće zadavati različite proizvoljne funkcije pobuda ili pak učitavanje potresnih zapisa kao niza podataka ubrzanja u vremenu.



Slika 3.7: Potresne platforme Quanser STI-III [19]

3.2.3 Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M

Za mjerenje pomaka i deformacija sustava uz akcelerometre korišten je optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M za 3D beskontaktno optičko mjerenje. Sustav čine dvije kamere koje omogućuju snimanje do 168 fps (slika po sekundi) rezolucijom 2400x1728 piksela te do 1300 fps rezolucijom 2400x168 piksela. Snimanje mjernih volumena od 25x18 mm² do 230x170 mm² omogućeno je setom leća žarišne duljine 50 mm, a setom žarišne duljine 20 mm snimanje mjernih volumena od 1750 x 1300 mm² do 3800 x 2800 mm² [43].



Slika 3.8: Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M

Kamere snimaju koordinate točaka u ravnini s drugačije pozicije, a kombinacijom snimaka dobivaju se prostorne koordinate točaka. Programski paket GOM Aramis omogućuje upravljanje mjernim sustavom i obradu podataka za dobivanje deformacija i

naprezanja na površini modela te Pontos, koji služi za obradu podataka mjerenja za dobivanje pomaka, brzina i ubrzanja točaka modela.

3.3 Analiza podataka

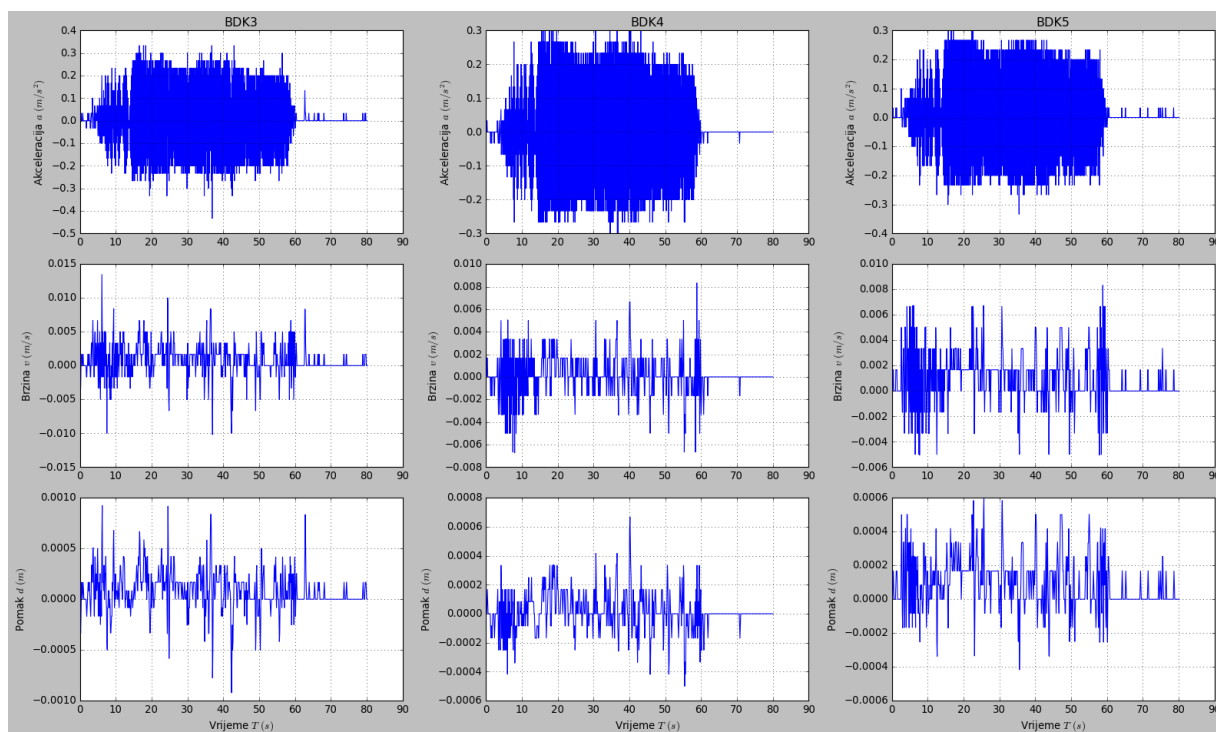
Sirovi podaci dobiveni ispitivanjem fizičkog modela umanjene kosine uslijed dinamičkih opterećenja u 1g uvjetima analizirani su u svrhu dobivanja podataka o cikličkom ponašanju ispitivanog materijala. Podaci su obrađeni u programskom paketu Anaconda (Phyton). Dobiveni su podaci o ubrzanju svakog pojedinog akcelerometra u ovisnosti o vremenu koji su prvi puta integrirani u točki kako bi se dobila vrijednost brzine u promatranoj točki, a drugi puta kako bi se dobio pomak u istoj promatranoj točki. Zbog šumova u podacima ubrzanja, korišten je Butterworth filtar kod izračuna brzina. Pomoću izraza 2.6 iz poglavlja 2.4.1 "Korištenje akcelerometra u svrhu određivanja posmičnih naprezanja i deformacija" napravljen je kod koji računa posmična naprezanja u točkama akcelerometara. Kod za izračun posmične deformacije dobiva se iz izraza prikazanog također u poglavlju 2.4.1 iz izraza 2.7. Podaci o posmičnom naprezanju i posmičnoj deformaciji u kombinaciji s kodom za iscrtavanje petlje dati će prikaz cikličke petlje.

4. REZULTATI

Uz pomoć mjerene opreme dobiveni su traženi rezultati. Sirovi podaci dobiveni iz akcelerograma obradili su se uz pomoć softverskog paketa Anaconda(Python). Integracijom akceleracija u točki dobiveni su pomaci pomoću kojih je dobivena posmična deformacija te ciklička petlja. U ovom poglavlju prikazani su rezultati pokusa na fizičkom modelu umanjenog modela kosine. U model su ugrađena tri različita materijala: čisti Dravski pijesak, Dravski pijesak s dodanom kaolinskom glinom u omjeru 10% od ukupne težine - SK10 i Dravski pijesak s dodanom kaolinskom glinom u omjeru 15% od ukupne težine - SK15. Promatrani rezultati su podaci dobiveni iz akcelerometra iz profila 2-2 i 3-3. Profil 2-2 čine akcelerometri: BDK3, BDK4 i BDK5. Profil 3-3 čine akcelerometri: BDK6, BDK7 i BDK8. Shema postavljanja akcelerometra prikazana je u poglavlju 3.1.3 Opis pokusa i korištenog materijala na slici 3.4. Rezultati su podijeljeni u tri potpoglavlja koji svaki ima prikaz rezultata za sve tri vrste materijala za promatrane profile 2-2 i 3-3: i) Akceleracija, brzina i pomak u ovisnosti o vremenu za svaki akcelerometar ii) Posmično naprezanje u ovisnosti o vremenu za tri promatrane točke u profilu po dubini z_1, z_2 i z_3 iii) Ciklička petlja za element tla na dubini z_2

4.1 Akceleracija, a , brzina, v i pomak d u ovisnosti o vremenu, T

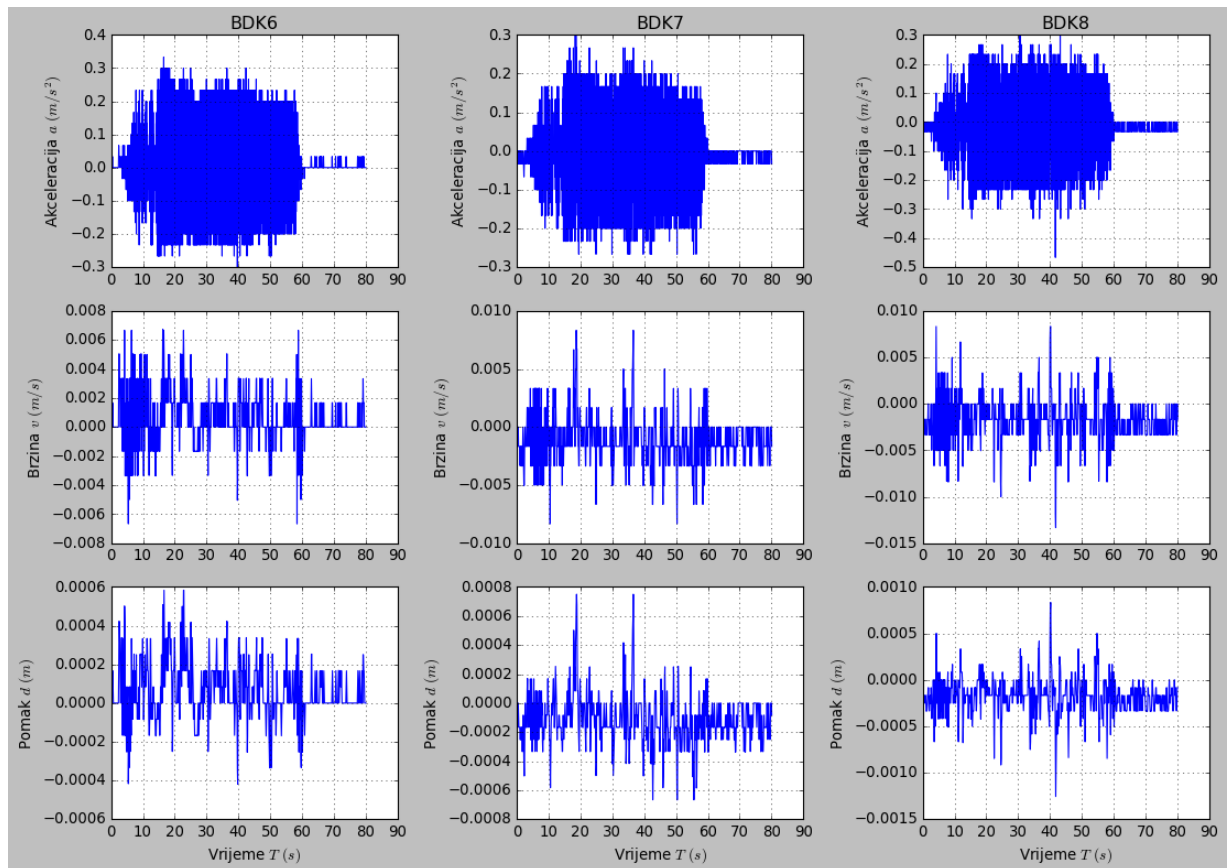
Na slikama od 4.1 do 4.6 grafički su prikazani podaci o akceleraciji, brzini i pomaku u ovisnosti o vremenu za svaki akcelerometar profila 2-2 i profila 3-3. Na slikama 4.1 i 4.2 prikazane su vrijednosti za Dravski pijesak, na slici 4.1 su prikazane vrijednosti akceleracije, brzine i pomaka za profil 2-2, a na slici 4.2 za profil 3-3. Na slikama 4.3 i 4.4 prikazane su vrijednosti akceleracije, brzine i pomaka za materijal SK10, na slici 4.3 su prikazane vrijednosti za profil 2-2, a na slici 4.4 za profil 3-3. Na slikama 4.5 i 4.6 za SK15 prikazane su vrijednosti akceleracije, brzine i pomaka za materijal SK15, na slici 4.5 su prikazane vrijednosti za profil 2-2, a na slici 4.6 za profil 3-3.



Slika 4.1: Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK3, BDK4 i BDK5 profila 2-2 za materijal Dravski pijesak

4.2 Posmično naprezanje, τ u ovisnosti o vremenu, T za tri promatrane točke u profilu po dubini

Na slikama od 4.7 do 4.12 grafički su prikazani podaci o posmičnom naprezanju, τ u ovisnosti o vremenu, T za svaki akcelerometar profila 2-2 i profila 3-3, također podijeljene po vrsti materijala. Na slikama 4.7 i 4.8 prikazane su vrijednosti za Dravski pijesak, na slici 4.7 su prikazane vrijednosti posmičnih naprezanja u vremenu za profil

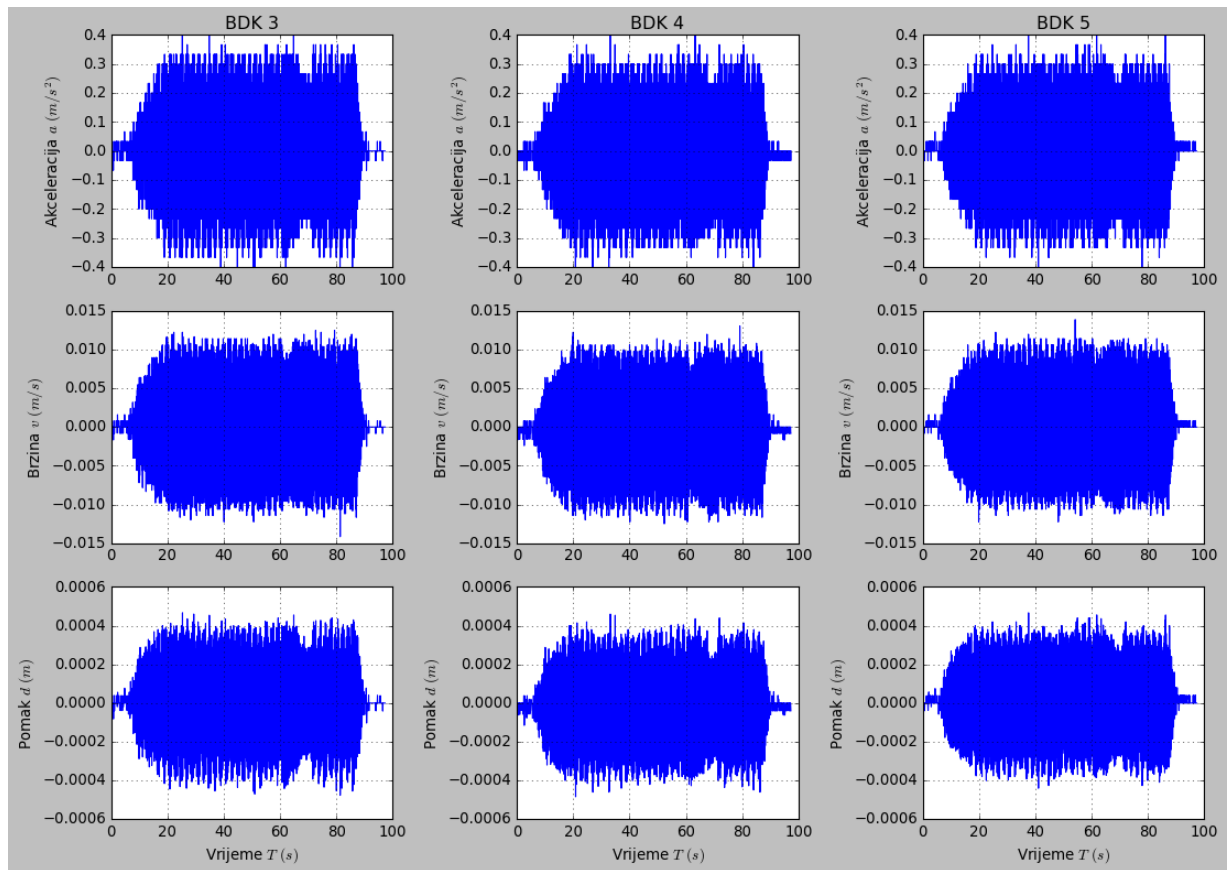


Slika 4.2: Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 profila 3-3 za materijal Dravski pijesak

2-2, a na slici 4.8 za profil 3-3. Na slikama 4.9 i 4.10 prikazane su vrijednosti posmičnih naprezanja u vremenu za materijal SK10, na slici 4.9 su prikazane vrijednosti za profil 2-2, a na slici 4.10 za profil 3-3. Na slikama 4.11 i 4.12 za SK15 prikazane su vrijednosti posmičnih naprezanja u vremenu za materijal SK15, na slici 4.11 su prikazane vrijednosti za profil 2-2, a na slici 4.12 za profil 3-3.

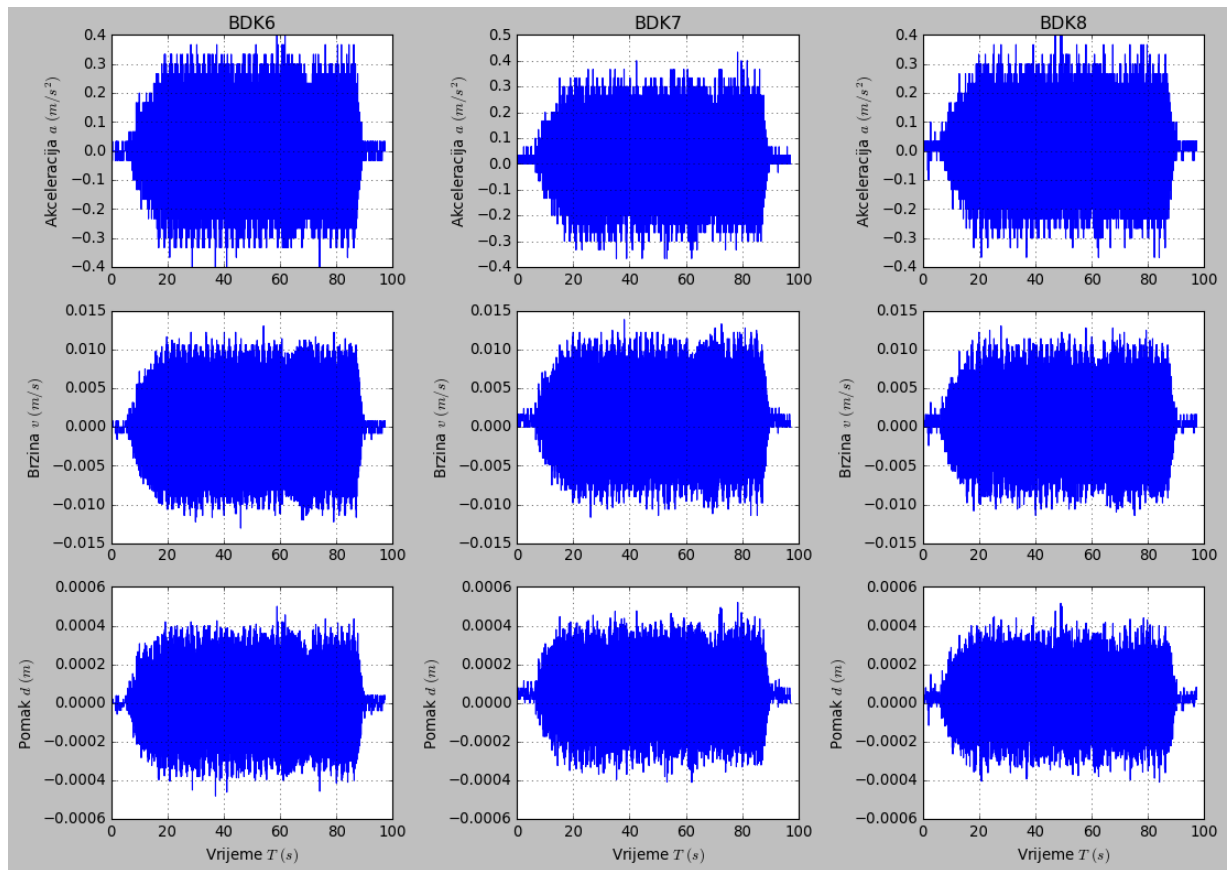
4.3 Posmične deformacije γ u ovisnosti o vremenu, T na dubini z_2

U nastavku, na slikama 4.13 do 4.18, su prikazani grafički podaci o veličinama posmičnih deformacija, γ u ovisnosti o vremenu, T elementa tla na dubini z_2 profila 2-2 i profila 3-3, također podijeljeni po vrsti materijala. Na slikama 4.13 i 4.14 prikazane su vrijednosti za Dravski pijesak, na slici 4.13 su prikazane vrijednosti posmičnih deformacija u vremenu za profil 2-2, a na slici 4.14 za profil 3-3. Na slikama 4.15 i 4.16 prikazane su vrijednosti posmičnih deformacija u vremenu za materijal SK10, na slici 4.15 su prikazane vrijednosti za profil 2-2, a na slici 4.16 za profil 3-3. Na slikama 4.17 i 4.18 za SK15 prikazane su vrijednosti posmičnih deformacija u vremenu za materijal

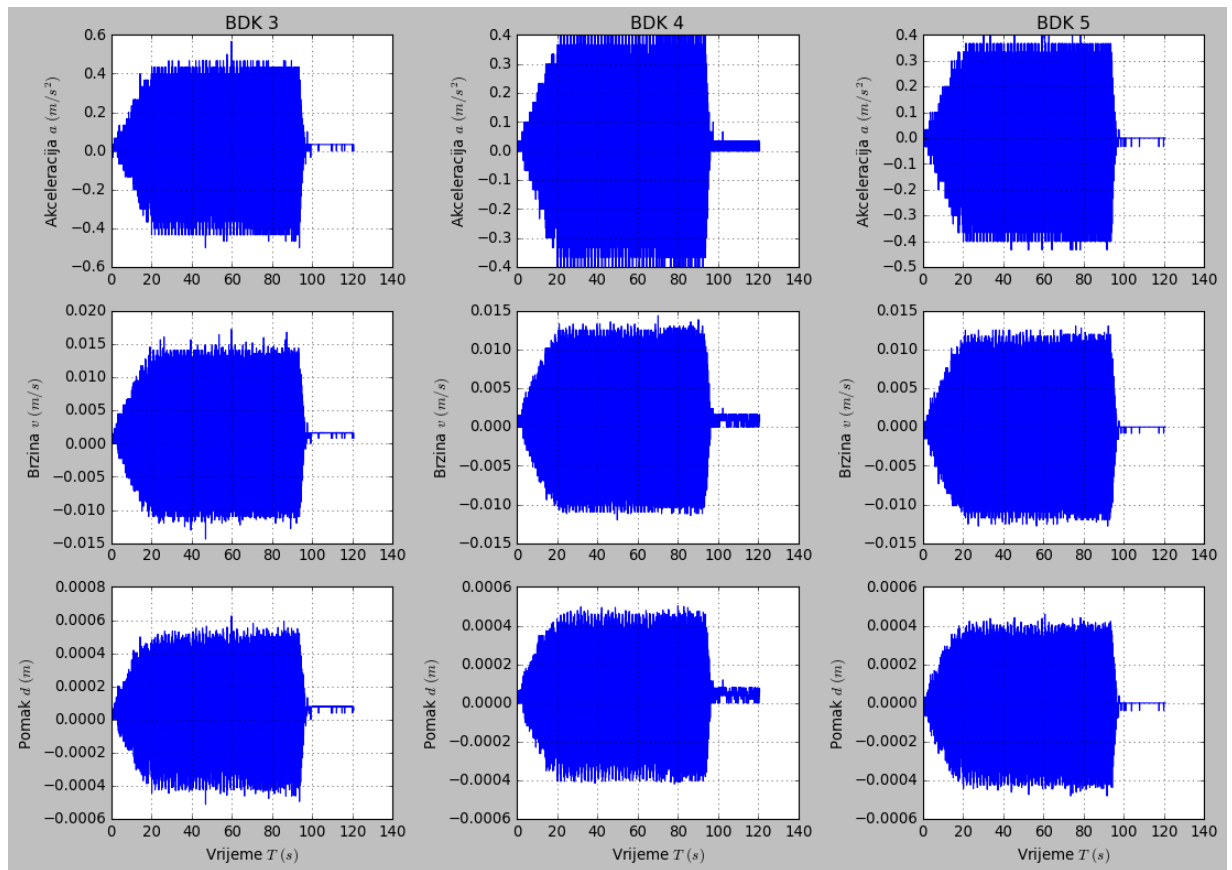


Slika 4.3: Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 profila 2-2 materijala SK10

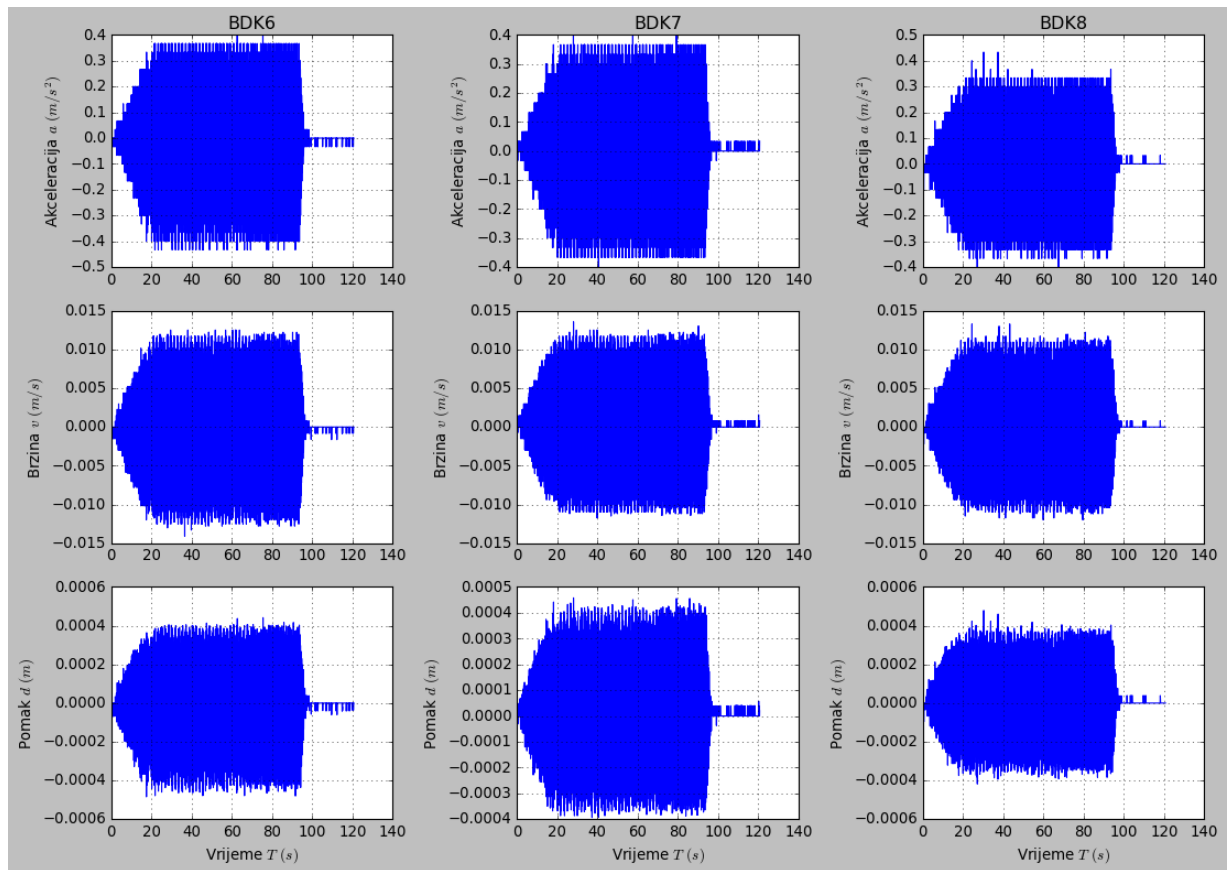
SK15, na slici 4.17 su prikazane vrijednosti za profil 2-2, a na slici 4.18 za profil 3-3.



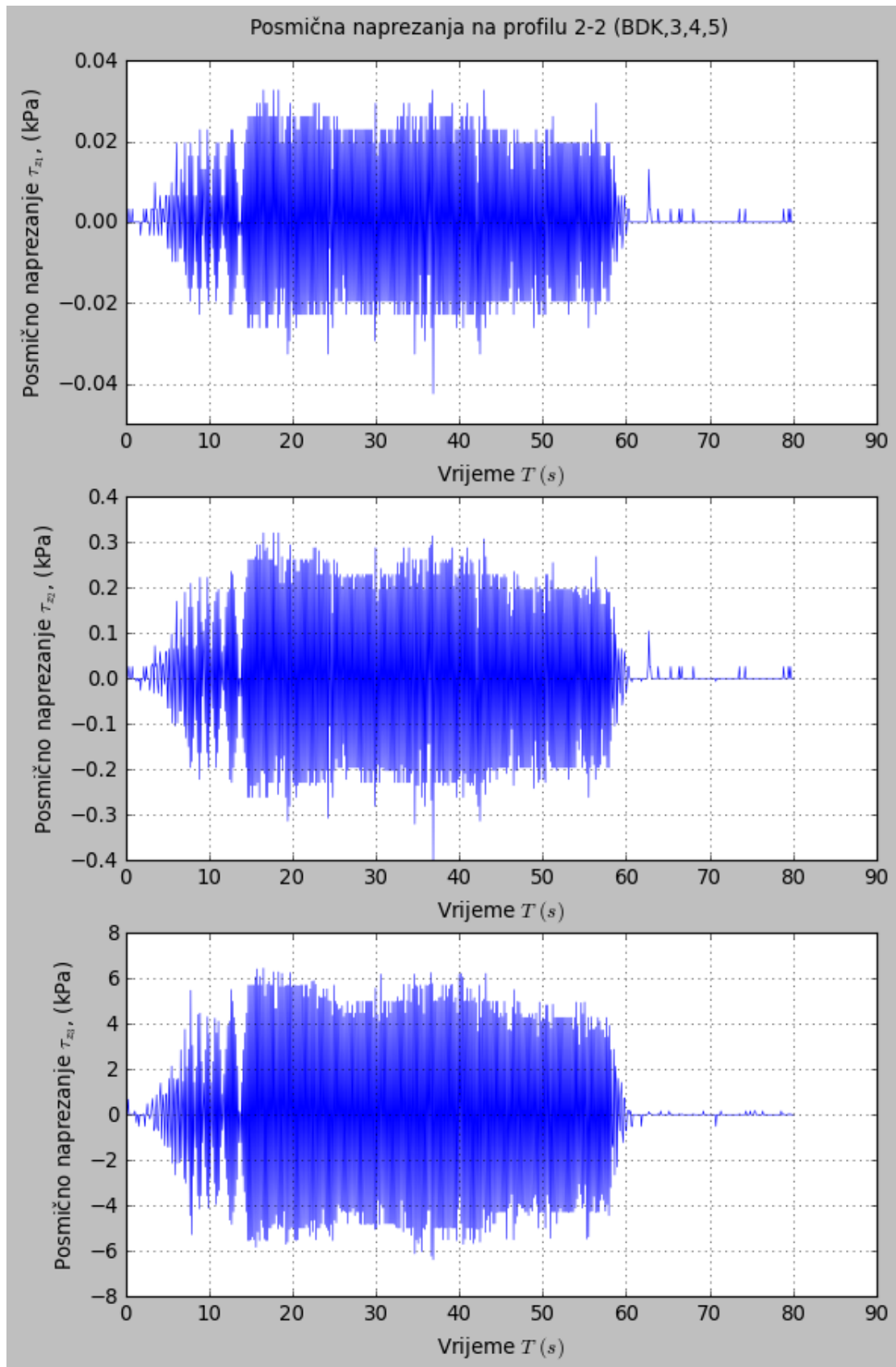
Slika 4.4: Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 profila 3-3 materijala SK10



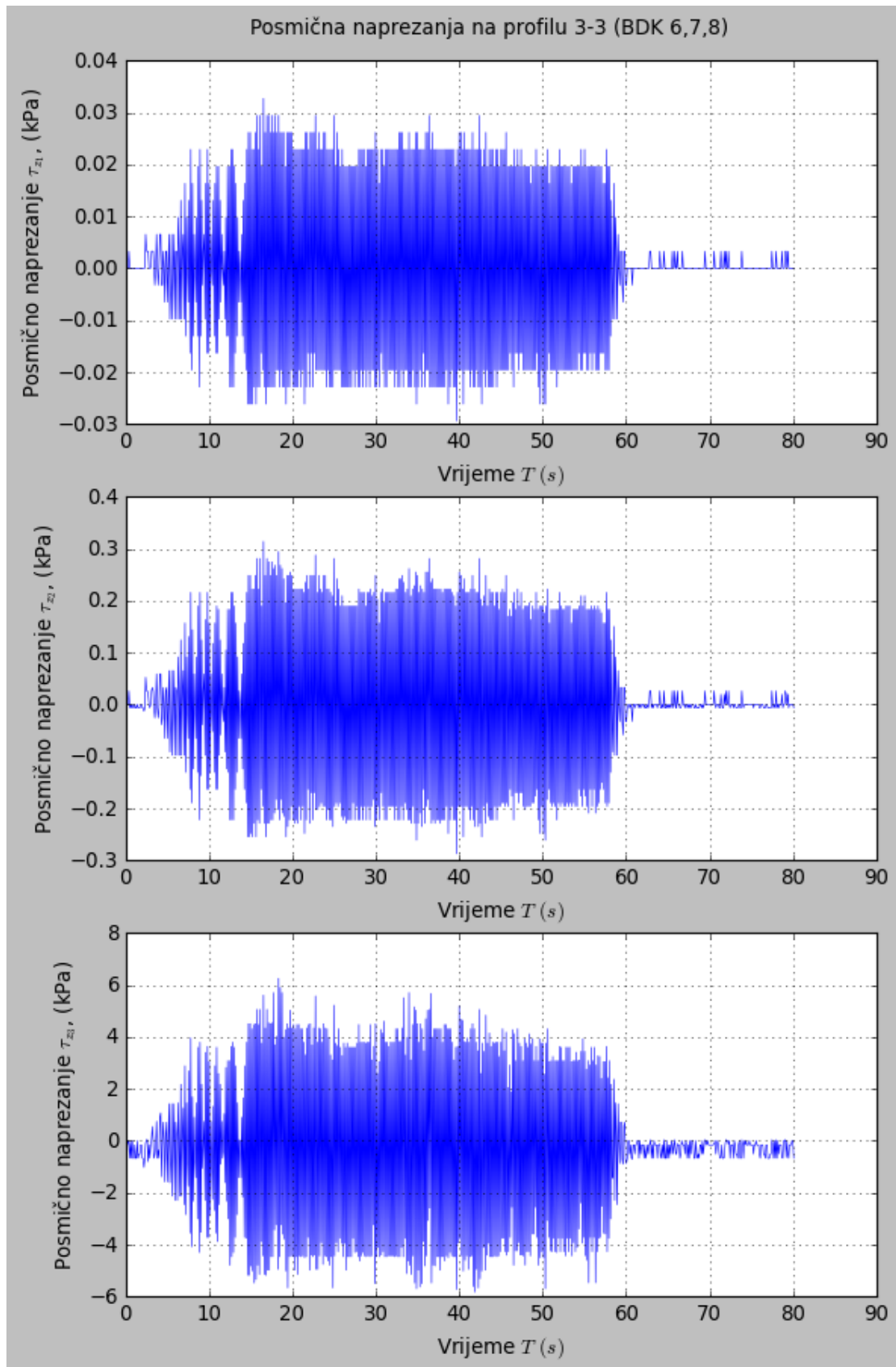
Slika 4.5: Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 profila 2-2 materijala SK15



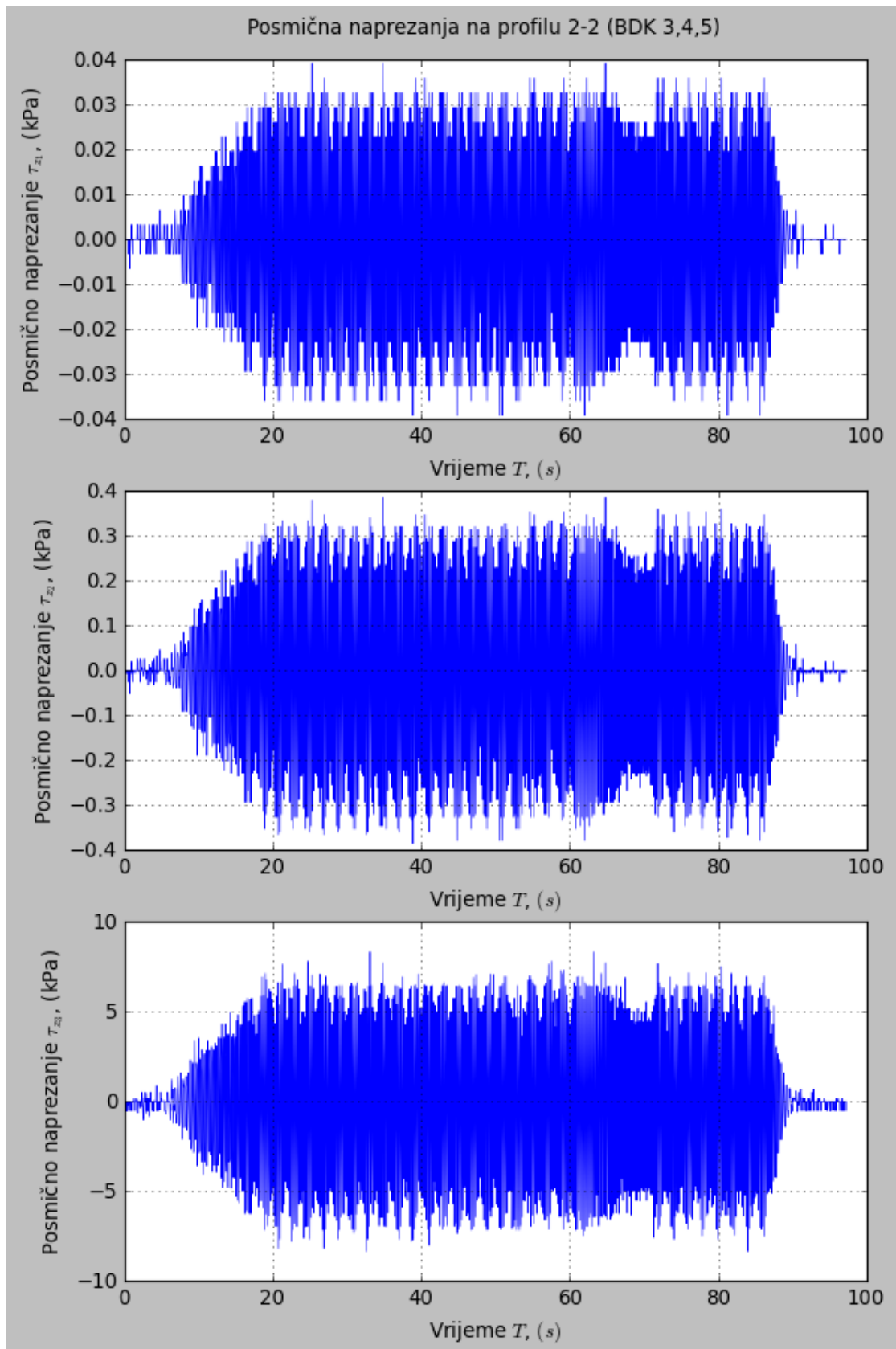
Slika 4.6: Akceleracija, brzina i pomak u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 profila 3-3 materijala SK15



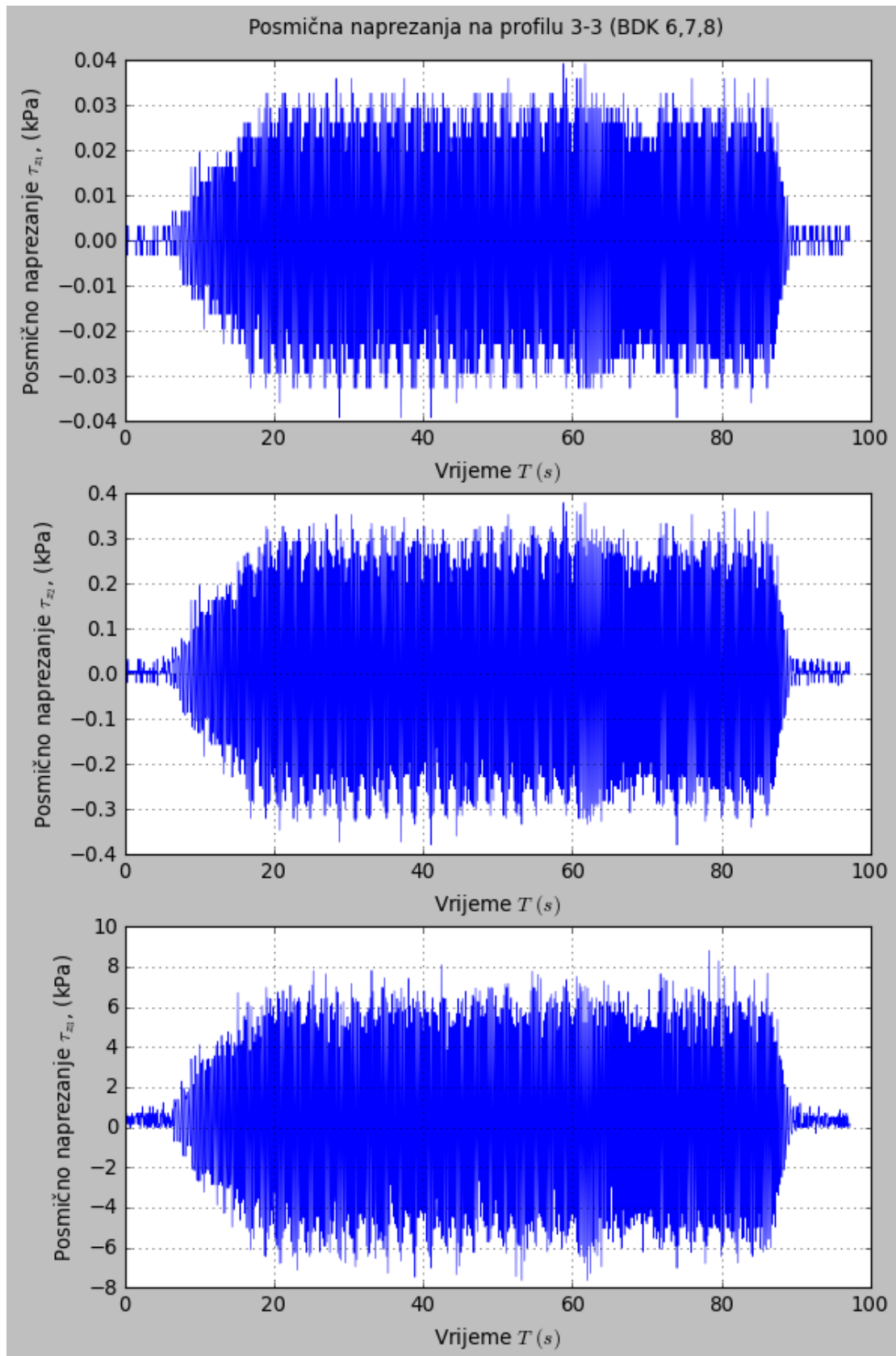
Slika 4.7: Posmična naprezanja na profilu 2-2 u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 u materijalu Dravski pijesak



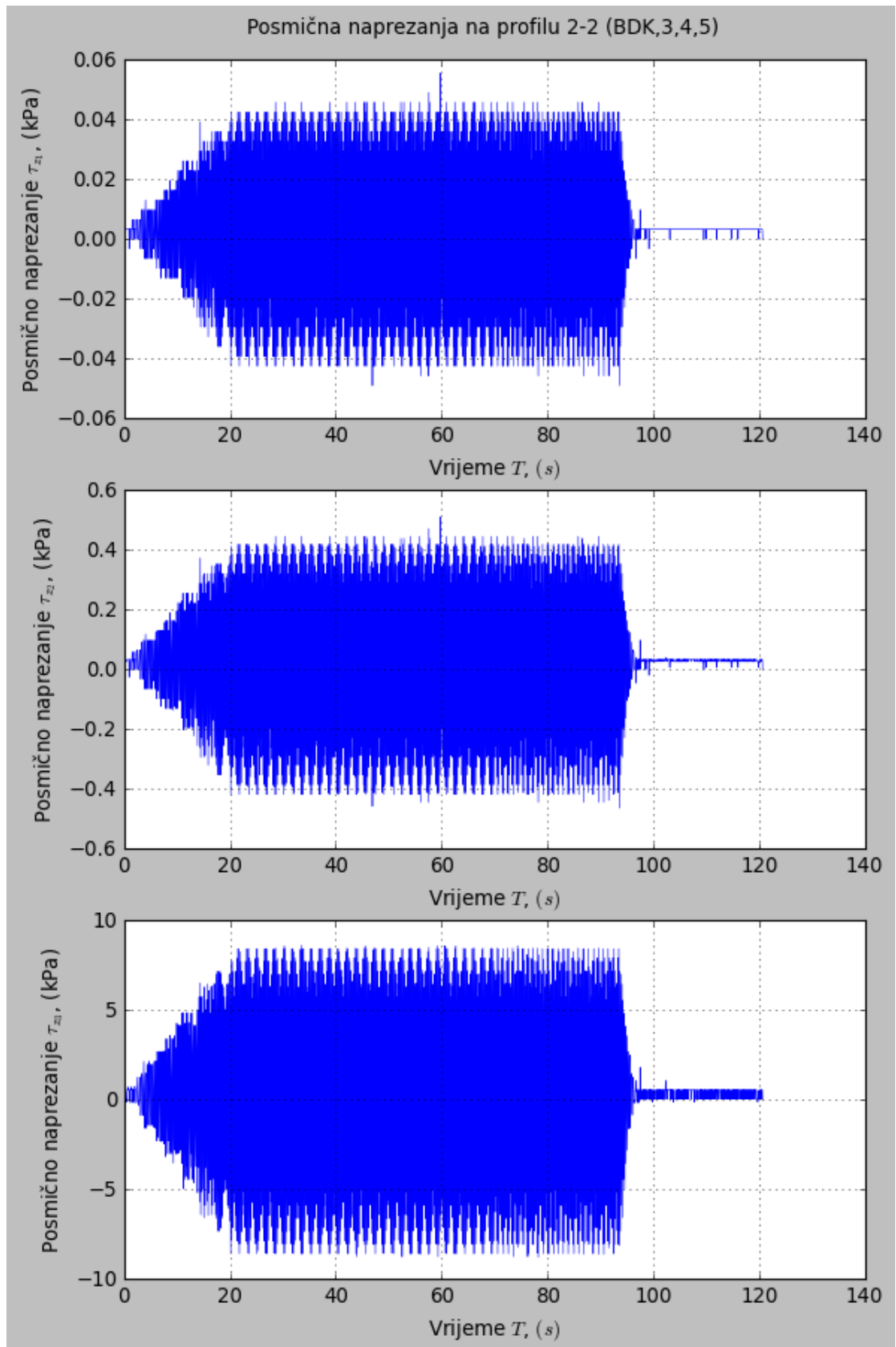
Slika 4.8: Posmična naprezanja na profilu 3-3 u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 u materijalu Dravski pijesak



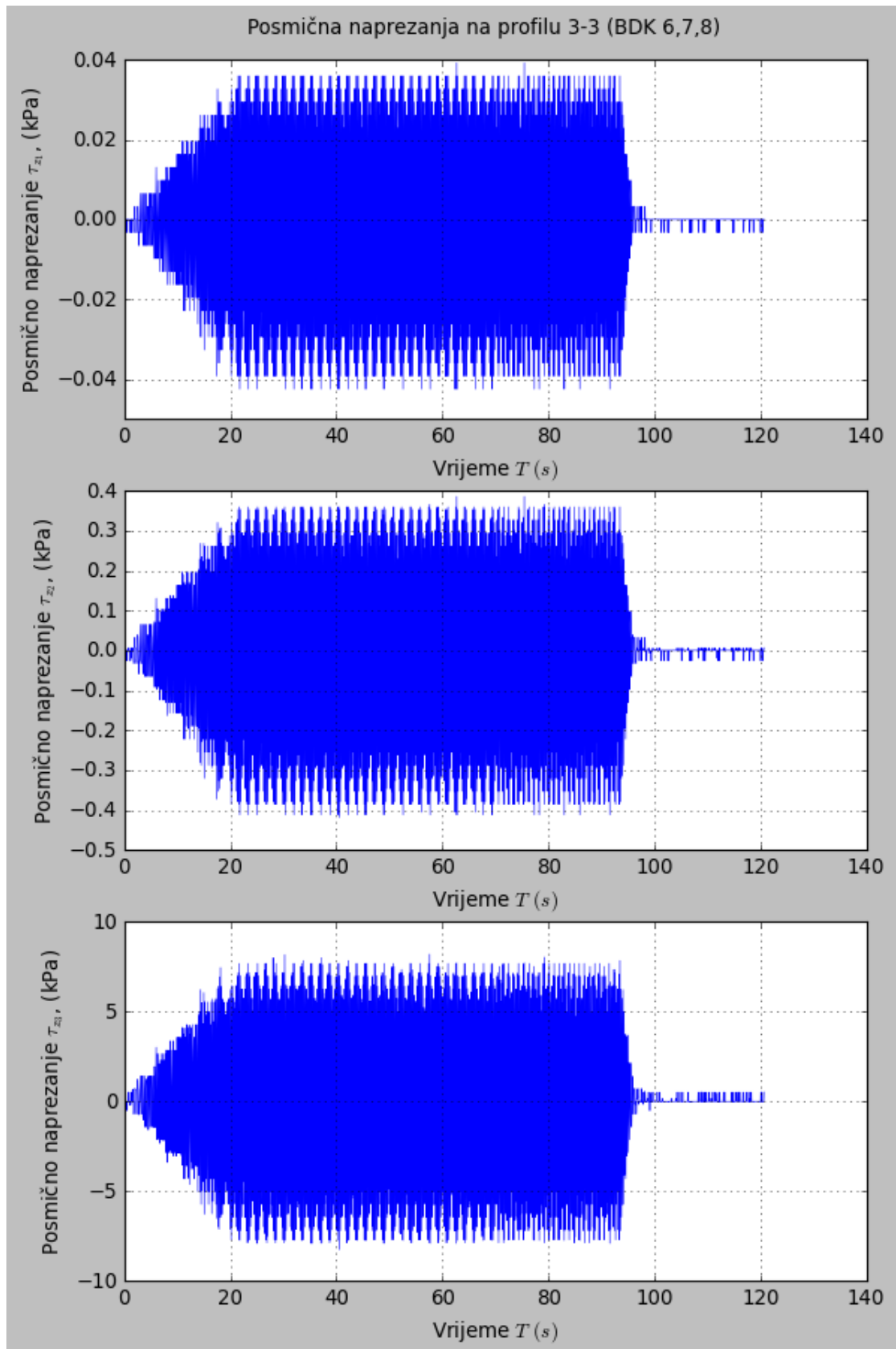
Slika 4.9: Posmična naprezanja na profilu 2-2 u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 u materijalu SK10



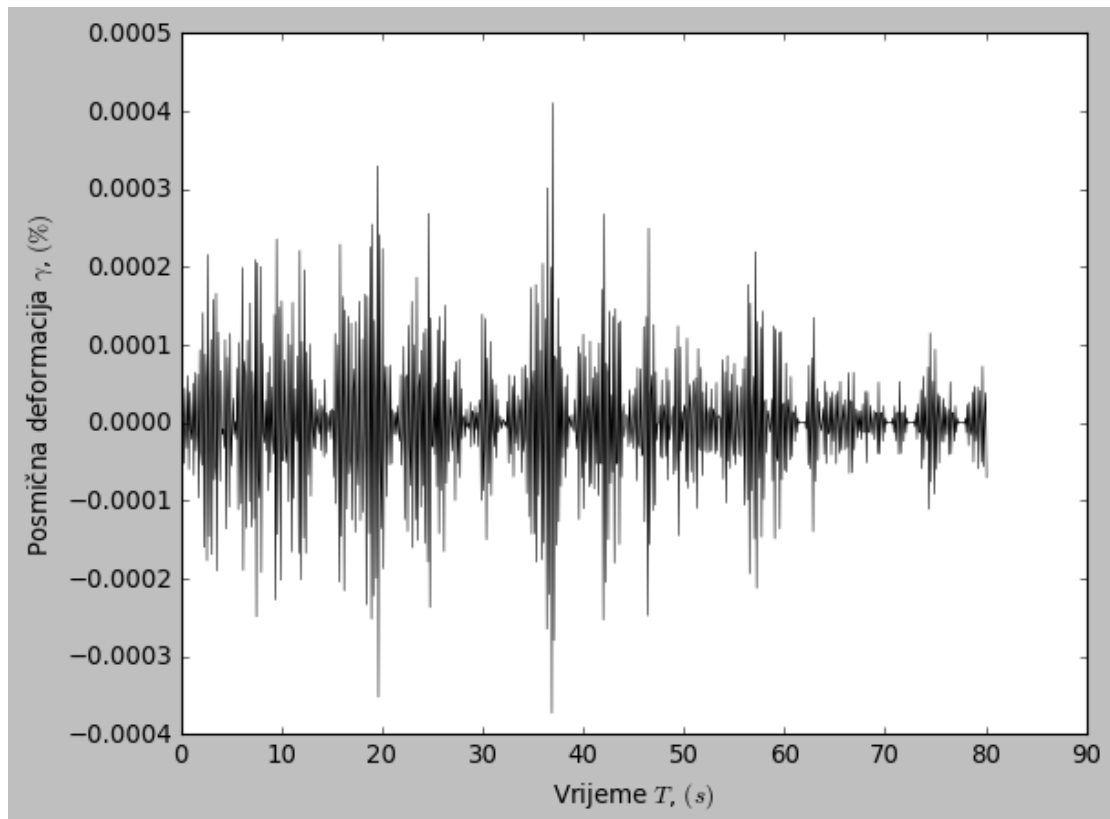
Slika 4.10: Posmična naprezanja na profilu 3-3 u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 u materijalu SK10



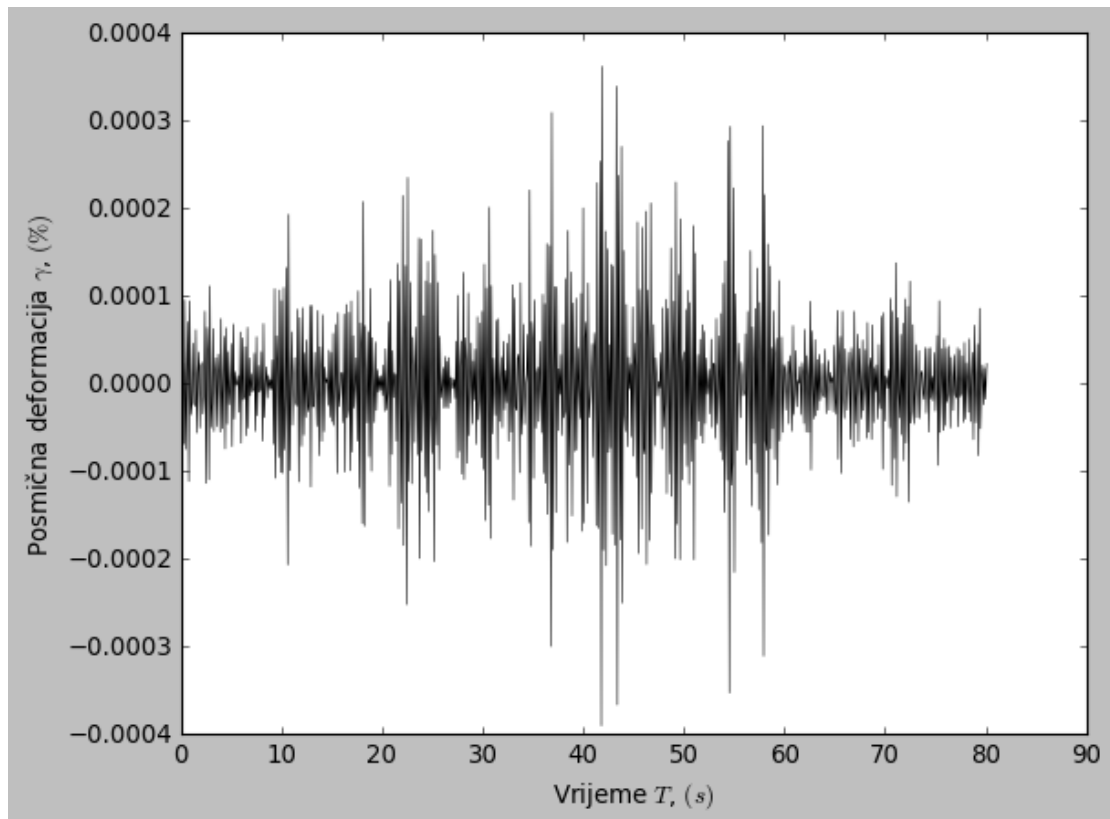
Slika 4.11: Posmična naprezanja na profilu 2-2 u točkama akcelerometra BDK3,BDK4 i BDK5 u materijalu SK15



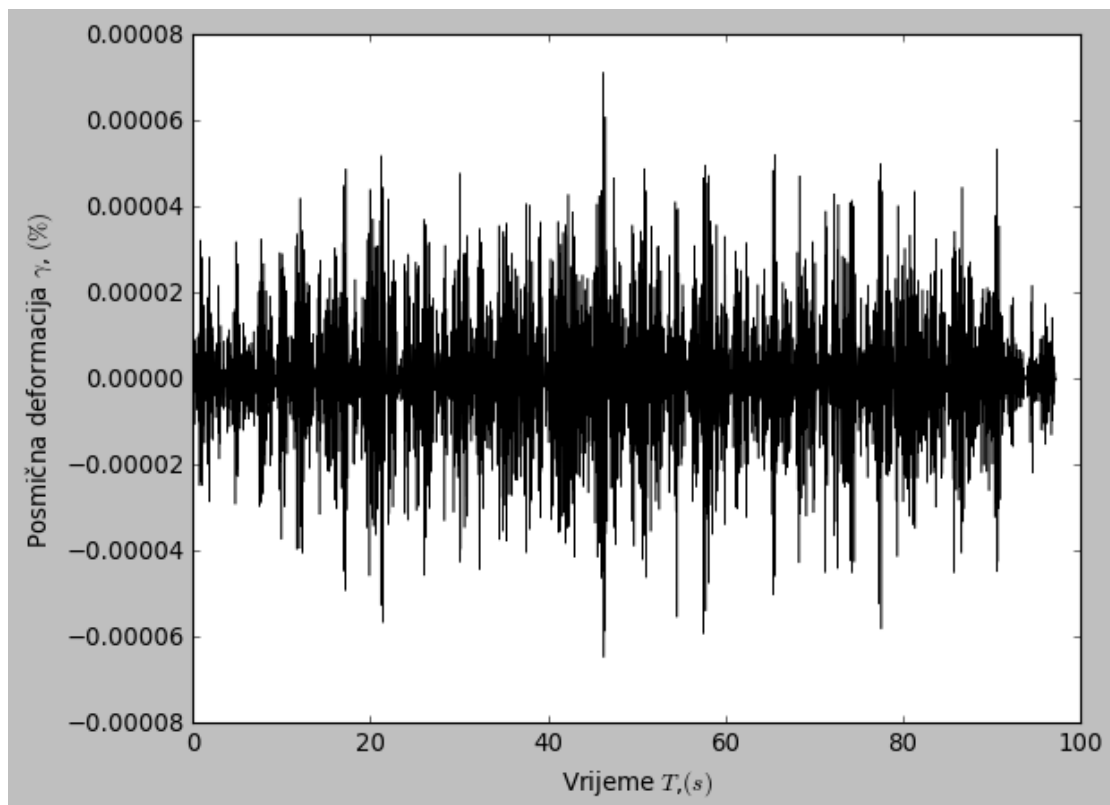
Slika 4.12: Posmična naprezanja na profilu 3-3 u točkama akcelerometra BDK6, BDK7 i BDK8 u materijalu SK15



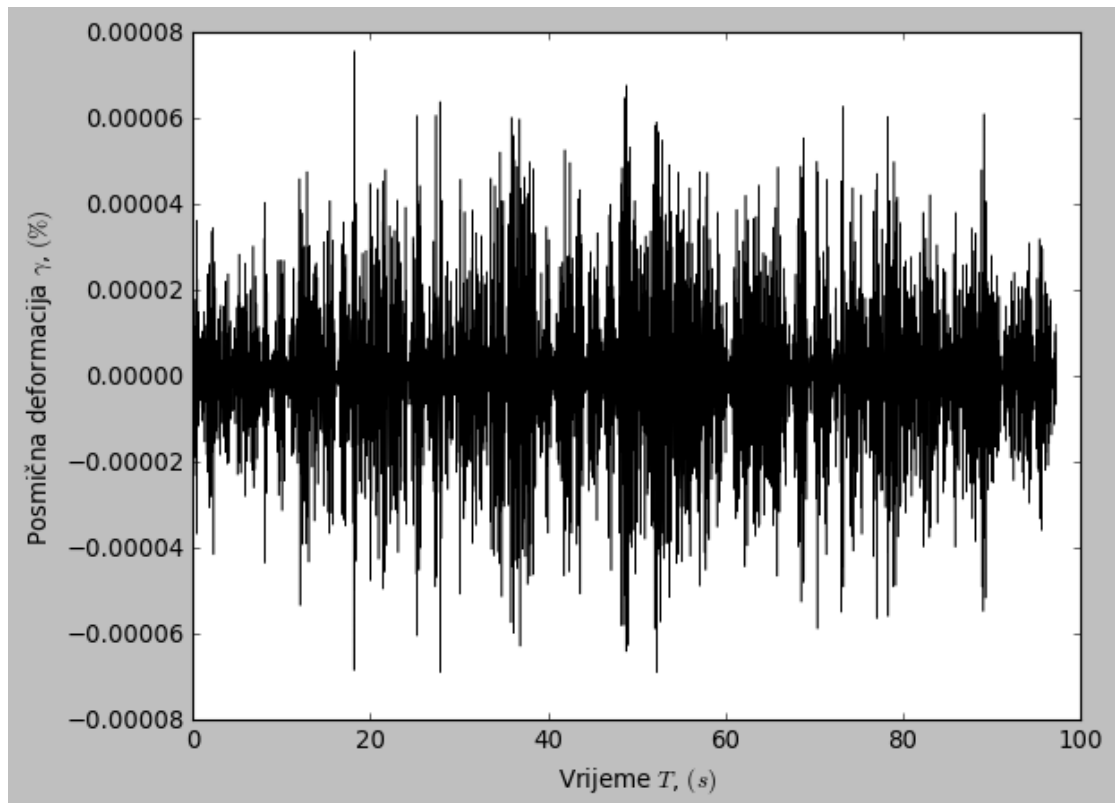
Slika 4.13: Posmična deformacija elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu Dravski pijesak



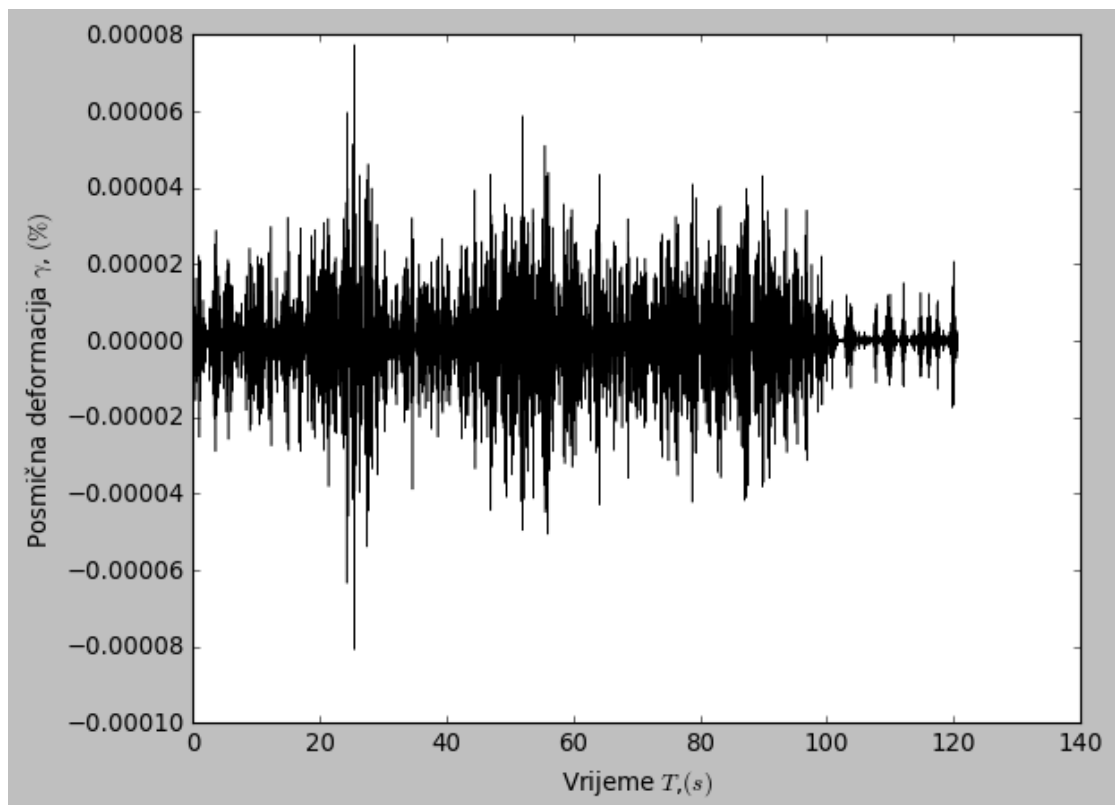
Slika 4.14: Posmična deformacija elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu Dravski pijesak



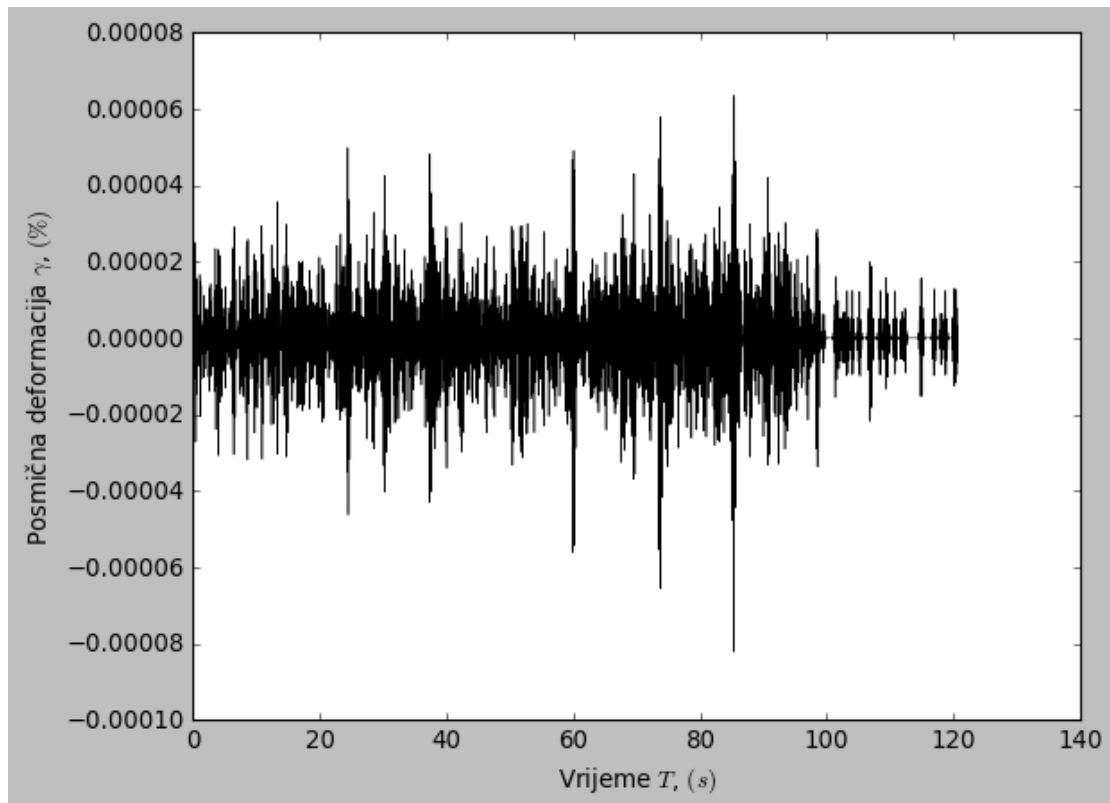
Slika 4.15: Posmična deformacija elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu SK10



Slika 4.16: Posmična deformacija elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu SK10



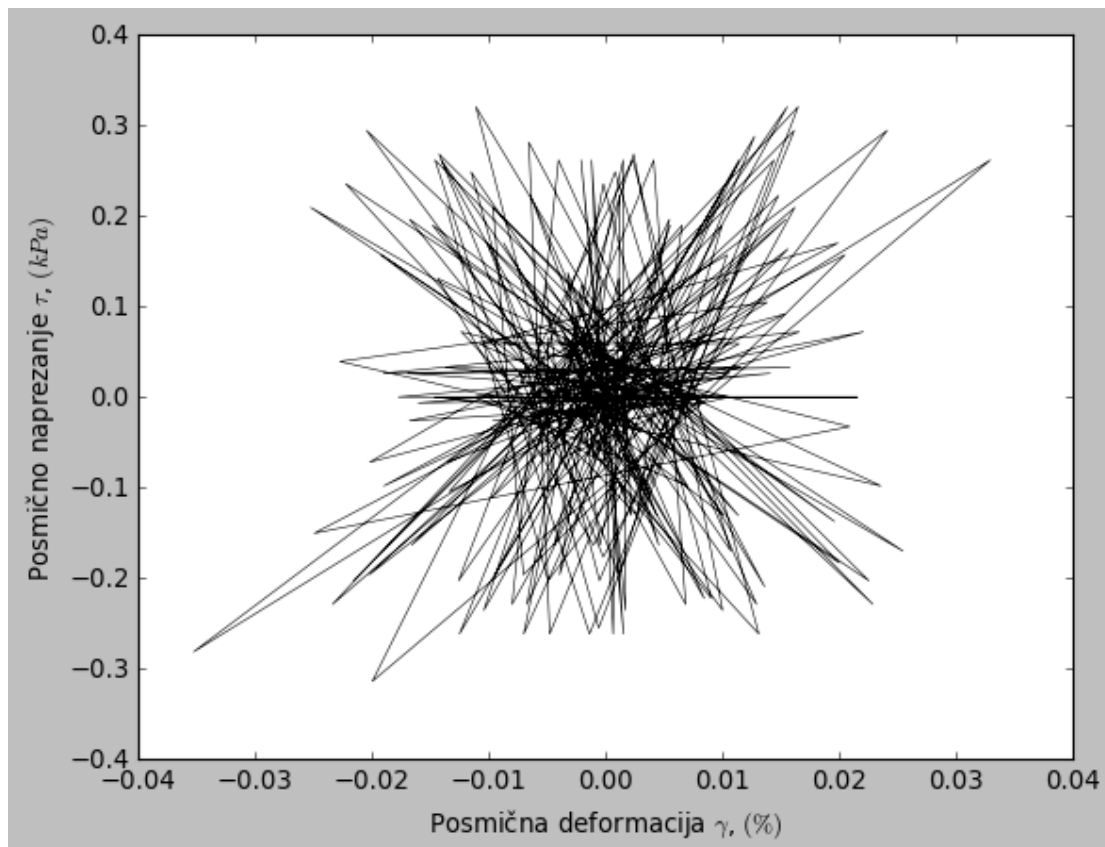
Slika 4.17: Posmična deformacija elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu SK15



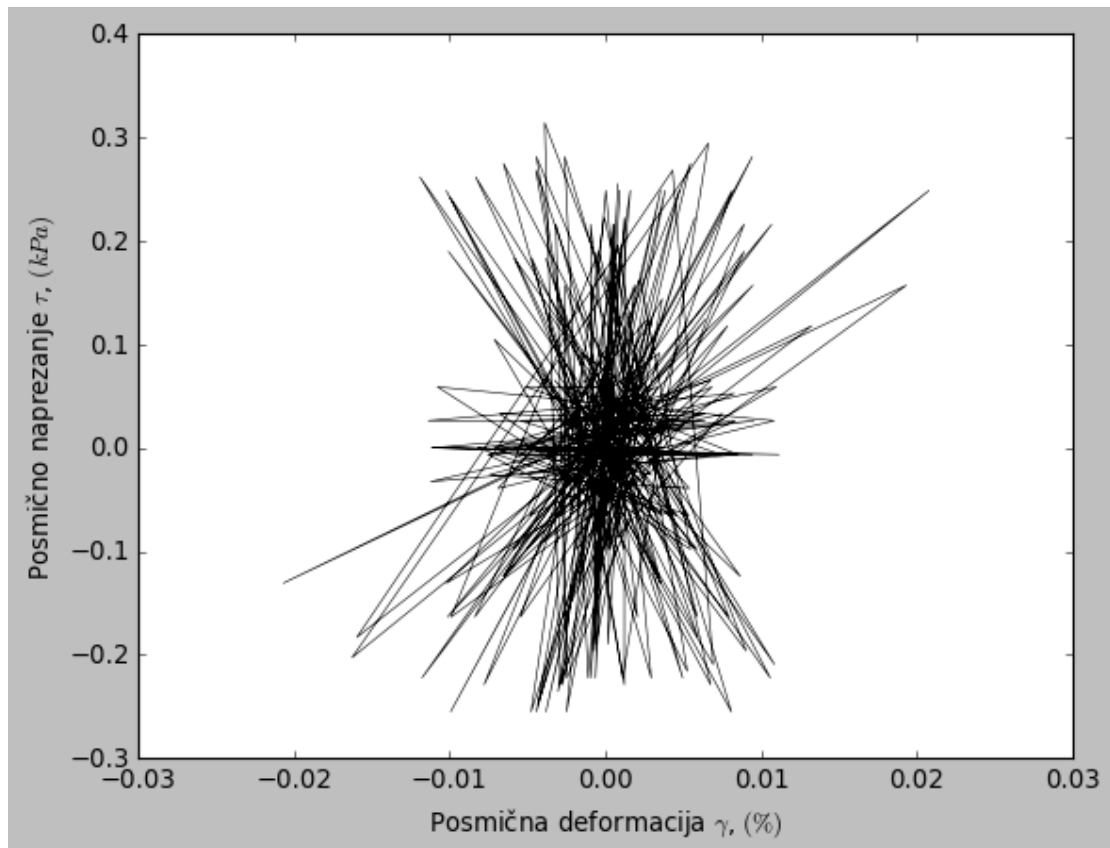
Slika 4.18: Posmična deformacija elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu SK15

4.4 Ciklička petlja za element tla na dubini z_2

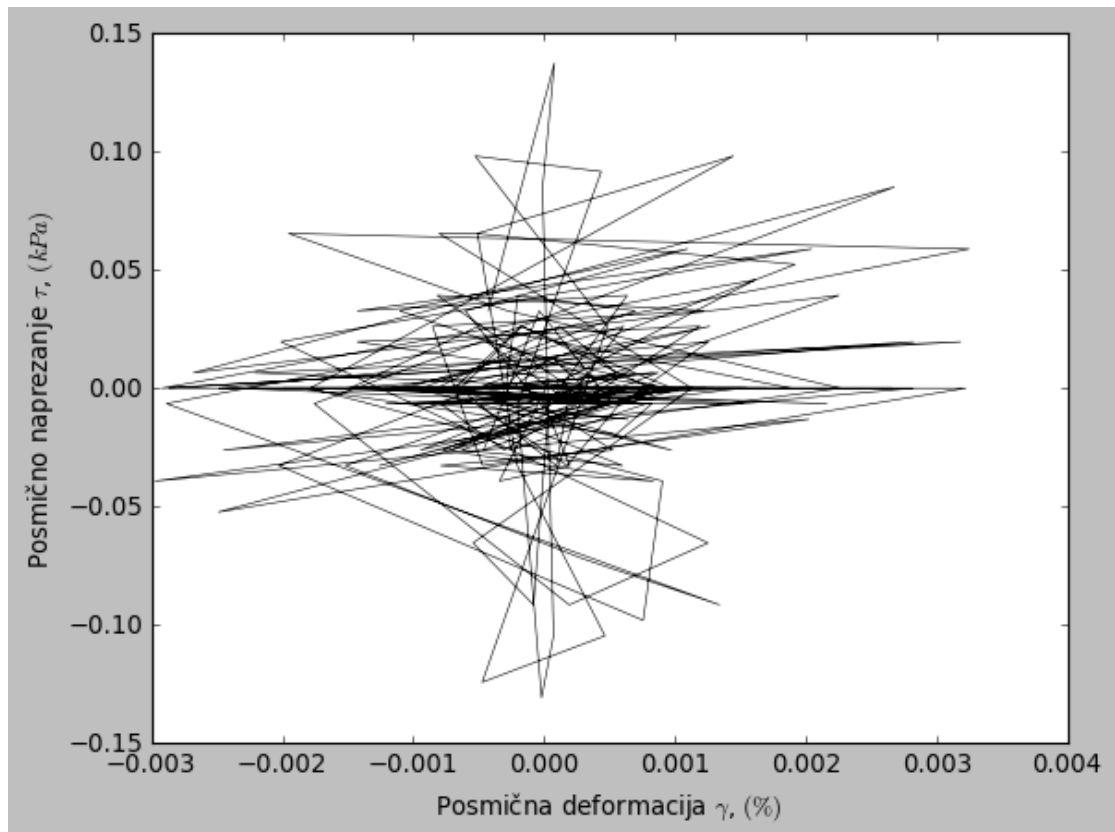
Na slikama 4.19 do 4.24 grafički su prikazani podaci o ponašanju tla uslijed dinamičkog opterećenja opisanog uz pomoć posmičnog naprezanja, τ i posmične deformacije, γ koji čine cikličku petlju. Rezultati su prikazani za element tla u profilima 2-2 i 3-3, na dubini z_2 za svaki ispitani materijal. Na slikama 4.19 i 4.20 prikazane su vrijednosti za Dravski pijesak, na slici 4.19 je prikazana ciklička petlja za profil 2-2 na dubini z_2 , a na slici 4.20 za profil 3-3 na dubini z_2 . Na slikama 4.21 i 4.22 prikazane su vrijednosti za materijal SK10, na slici 4.21 je prikazana ciklička petlja za profil 2-2 na dubini z_2 , a na slici 4.22 za profil 3-3 na dubini z_2 . Na slikama 4.23 i 4.24 prikazane su vrijednosti za materijal SK15, na slici 4.23 je prikazana ciklička petlja za profil 2-2 na dubini z_2 , a na slici 4.24 za profil 3-3 na dubini z_2 .



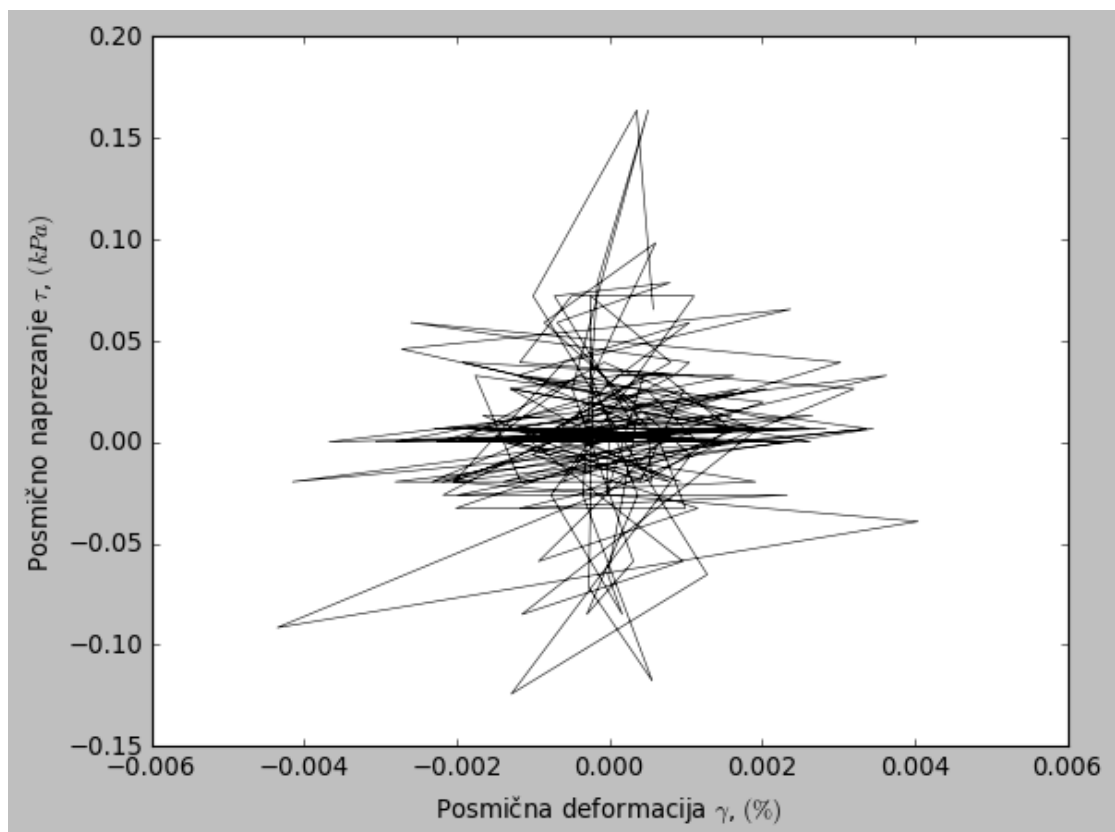
Slika 4.19: Ciklička petlja elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu Dravski pijesak



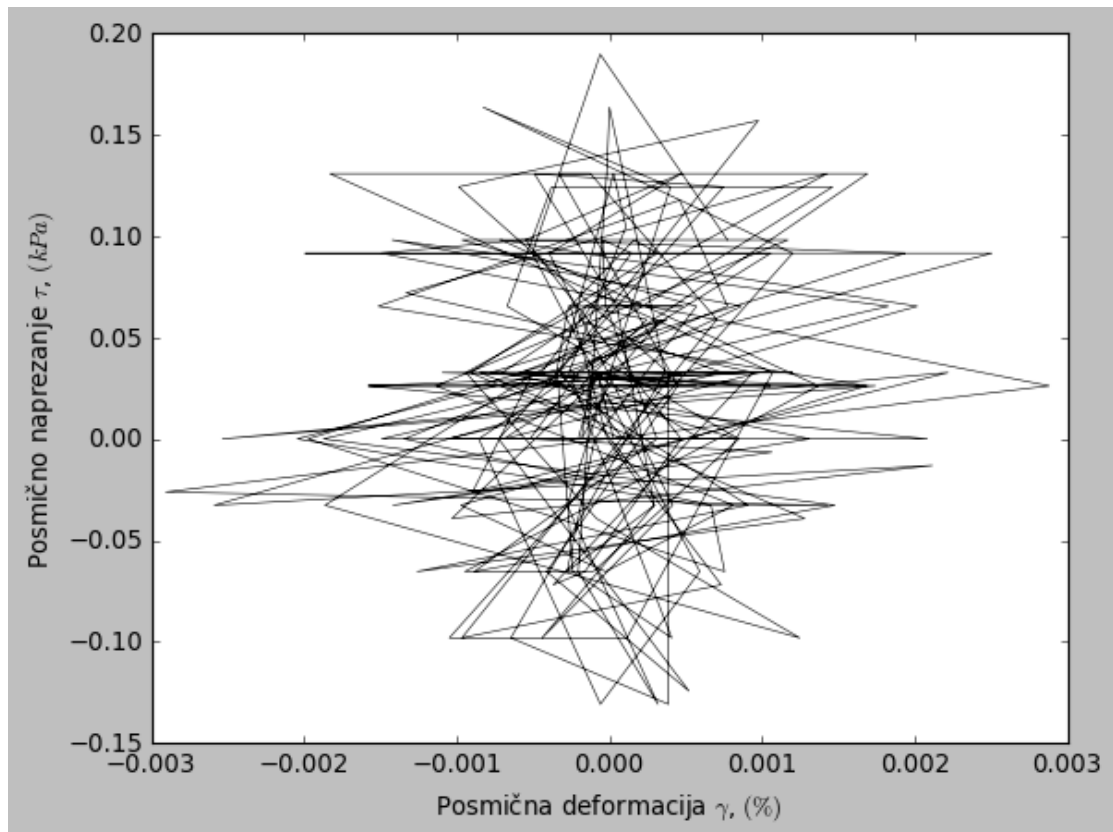
Slika 4.20: Ciklička petlja elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu Dravski pijesak



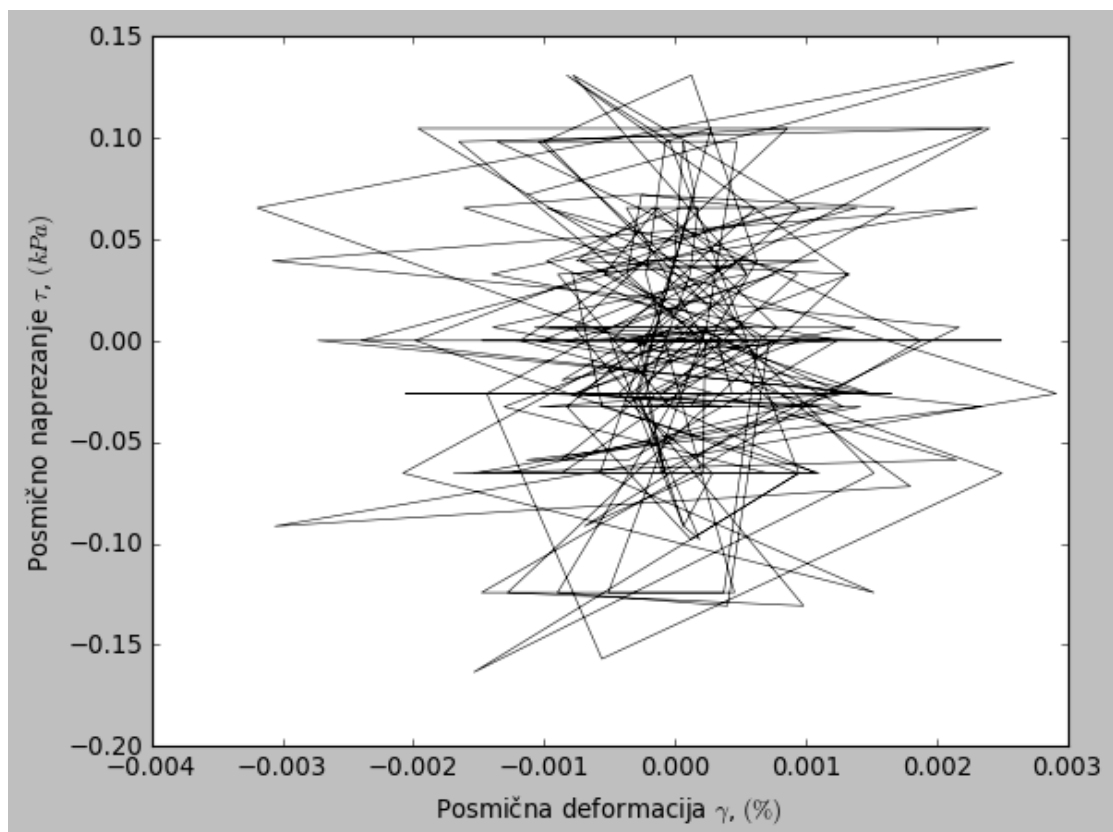
Slika 4.21: Ciklička petlja elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu SK10



Slika 4.22: Ciklička petlja elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu SK10



Slika 4.23: Ciklička petlja elementa tla profila 2-2 na dubini z_2 u materijalu SK15



Slika 4.24: Ciklička petlja elementa tla profila 3-3 na dubini z_2 u materijalu SK15

5. DISKUSIJA

Sirovi podaci dobiveni ispitivanjem fizičkog modela umanjene kosine uslijed dinamičkih opterećenja u 1g uvjetima analizirani su u svrhu dobivanja podataka o cikličkom ponašanju ispitivanog materijala i obrađeni su pomoću programskog paketa Anaconda (Phyton). Obradom podataka dobiveni su podaci o ubrzanju svakog pojedinog akcelerometra u ovisnosti o vremenu koji su se integrirali jednom u točki kako bi se dobila vrijednost brzine u promatranoj točki, a drugi puta kako bi se dobio pomak u istoj promatranoj točki. Zbog šumova u podacima ubrzanja, korišten je Butterworth *low-pass* filter kod izračuna brzina i pomaka. Šumovi nisu u potpunosti uklonjeni, pa je u budućim obradama podataka poželjna modifikacija filtera ili pokušaj s nekom drugom vrstom koja bi imala bolji odziv. Dobivene vrijednosti akceleracija prikazane u poglavlju 4.1 smanjuju se s dubinom, a trend smanjenja slijede brzina i pomak. Primjećuje se razlika između odziva Dravskog pijeska i Kaolanda 10 i 15 u propagaciji valova. Pijesak ima slabiji odziv i samim time manje vrijednosti iskazanih veličina.

Pomoću izraza 2.6 iz poglavlja 2.4.1 programiran je kod koji računa posmična naprezanja u točkama akcelerometara i kod za izračun posmične deformacije iz izraza 2.7, također iz poglavlja 2.4.1. Posmično naprezanje uvelike raste s dubinom promatranog elementa. Također, uspoređujući rezultate materijala međusobno, naprezanja rastu kako se povećava postotak kaolinske gline u pijesku. Iz pregleda grafičkih prikaza posmične deformacije poglavlja 4.3 vidljivo je da se kod Dravskog pijeska javljaju veće deformacije od onih kod pijeska s dodatkom 10% odnosno 15% kaolinske gline. Podaci o posmičnom napreznju i posmičnoj deformaciji u kombinaciji s kodom za iscrtavanje petlje dati će prikaz cikličkih petlji. Sukladno prijašnjim prikazima rezultata posmičnog napreznja i posmične deformacije, definirana je geometrija cikličkih petlji. Kod pijeska nagib krivulja je manji, a kako raste sastav gline u materijalu krivulje su većeg nagiba, neke čak i u potpunosti horizontalne. Dobiveni podaci ne iskazuju realne veličine u stvarnosti zbog skaliranja svih veličina na samom početku, pa se tako realne veličine mogu dobiti povratnim skaliranjem na veličinu prototipa.

6. ZAKLJUČAK

Snažni potresi su vrlo česti uzročnici velikog broja klizišta, a štete uzrokovane pojavom klizišta induciranih potresima ponekad su mnogo veće od šteta uzrokovanih samim potresom. Niz čimbenika može utjecati na rezultate i razmjere klizišta, kao što su priroda potresa i geografski, hidrološki i meteorološki uvjeti lokacije klizišta. Ponašanje tla u uvjetima potresa i dalje je predmet opsežnog istraživanja te se ne smije promatrati kao izdvojeni element već kao veća cjelina, a izvrstan način za takav pristup svakako su fizički modeli umanjenih klizišta na kojima se mogu vršiti različita ispitivanja. Cilj ovog rada bio je uspostaviti plan mjerenja ubrzanja u tijelu kosine te analizirati podatke u slučaju kosine koja je izložena potresnom opterećenju. Na temelju mjerenih podataka utvrđeno je cikličko ponašanje te je uspoređeno ponašanje tri različite vrste materijala od kojih je kosina izvedena (čisti pijesak, pijesak sa 10% kaolina te pijesak sa 15% kaolina). Dobiveni rezultati ispunili su očekivanja, ali i ukazali na elemente proračuna koji imaju prostora za modifikaciju. Dobiveni rezultati pružiti će korisne podatke koji bi se mogli koristiti za daljnju obradu podataka, a unaprijeđenjem tehnika i proračuna mogu pomoći i u predviđanju ponašanja padina u prirodi te poboljšati postupke projektiranja i odabir odgovarajućih mjera sanacija klizišta.

LITERATURA

- [1] Images, Jiji Press/AFP/Getty. Earthquake triggers landslides in hokkaido, japan – in pictures, 2018. URL <https://www.theguardian.com/world/gallery/2018/sep/06/earthquake-landslides-hokkaido-japan-in-pictures>.
- [2] Céline, BOURDEAU. Why do earthquakes trigger catastrophic landslides?, encyclopedia of the environment, 2022. URL shorturl.at/cENP9.
- [3] Jasenka, Sremac. Povijest zemlje, 1999. URL shorturl.at/EKR01.
- [4] 2011. URL shorturl.at/kPRSZ.
- [5] Tomljenović, B. Petrologija s geologijom - predavanja, 2016. URL shorturl.at/fjo01.
- [6] Ramon Gilsanz, S.E., Petr Vancura. Understanding seismic design through a musical analogy, 2015. URL <https://www.structuremag.org/?p=8230>.
- [7] Experience, Alaska Native Geoscience Learning. Earthquake hazard maps liquefaction: Alaska emphasis, 2020. URL shorturl.at/nqCDL.
- [8] Pecker, Alain. Soil behaviour under cyclic loading. In *Advanced Earthquake Engineering Analysis*, pages 1–13. Springer, 2007.
- [9] Hsu, Chu-Chung and Vucetic, Mladen. Volumetric threshold shear strain for cyclic settlement. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(1): 58–70, 2004.
- [10] Vucetic, Mladen, Lanzo, Giuseppe, and Doroudian, Macan. Damping at small strains in cyclic simple shear test. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124(7):585–594, 1998.
- [11] Kramer, Steven Lawrence. *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India, 1996.
- [12] Sulovsky, Tea. *Cikličko ponašanje dravskog pijeska u nedreniranim uvjetima*. PhD thesis, University of Rijeka. Faculty of Civil Engineering in Rijeka, 2018.

- [13] Turković, Martina. *Cikličko ponašanje uniformnog pijeska u dreniranim i nedreniranim uvjetima pri malim efektivnim naprezanjima*. PhD thesis, University of Rijeka. Faculty of Civil Engineering, 2021.
- [14] Arkinsos, JH and Salfors, G. Experimental determination of soil properties. *Proceedings of the 10th ECSMFE*, 3:915–956, 1991.
- [15] Iai, S, Tobita, T, and Nakahara, T. Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests. *Geotechnique*, 55(5):355–362, 2005.
- [16] Kamai, Ronnie and Boulanger, RW. Characterizing localization processes during liquefaction using inverse analyses of instrumentation arrays. *Meso-scale shear physics in earthquake and landslide mechanics*, pages 219–238, 2010.
- [17] Butterworth filter, 2008. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter.
- [18] V. Jagodnik, J. Peranić, N. Čeh, S. Pajalić, M. Vivoda Prodan and Ž. Arbanas . Behaviour of small scale landslide model under dynamic loading at 1g condition. Presentation of.
- [19] Quanser shake table iii xy, 2010. URL <https://edu4industry.com/en/produkt/quanser-shake-table-iii/>.
- [20] Zhang, Yingbin. *Earthquake-induced landslides*. Springer, 2012.
- [21] Dobrilla, Simona. *Modalna analiza nosača uslijed nejednolikih pomaka oslonaca i usporedba s eksperimentalno dobivenim rezultatima*. PhD thesis, University of Rijeka. Faculty of Civil Engineering in Rijeka, 2017.
- [22] Vucetic, Mladen. Soil properties and seismic response. In *Proc., 10th World Conf. on Earthquake Engineering*, volume 3, pages 1199–1204. Balkema, 1992.
- [23] Ademović, Naida. Geo-expo 2017.
- [24] Higaki, Daisuke and Abe, Shinro. Classification of the geomorphology, geology and movement types of earthquake landslides. In *Earthquake-induced landslides*, pages 37–44. Springer, 2013.
- [25] Drpić, Nikolina. *Dinamički odaziv dugačkih konstrukcija na višestruku potresnu pobudu oslonaca*. PhD thesis, University of Rijeka. Faculty of Civil Engineering, 2020.
- [26] Kovačević, MS, Jurić Kaćunić, D, Car, M, and Bačić, M. Suvremene geodetske i geofizičke metode ispitivanja tla i stijena, izazovi u graditeljstvu 2, lakušić, stjepan (ur.). *Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera*, pp. 287315, 2014.

- [27] Presti, Diego Lo, Pallara, Oronzo, and Mensi, Elena. Characterization of soil deposits for seismic response analysis. In *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis*, pages 109–157. Springer, 2007.
- [28] Luna, Ronaldo and Jadi, Houda. Determination of dynamic soil properties using geophysical methods. In *Proceedings of the first international conference on the application of geophysical and NDT methodologies to transportation facilities and infrastructure, St. Louis, MO*, pages 1–15, 2000.
- [29] Holtz, R.D., Kovacs, W.D., and Sheahan, T.C. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Pearson, 2011. ISBN 9780132496346. URL <https://books.google.hr/books?id=EY7hcAAACAAJ>.
- [30] Knappett, Jonathan. *Craig's soil mechanics*, volume 8. spon press London, 2012.
- [31] Kokusho, Takaji. *Innovative earthquake soil dynamics*. CRC Press, 2017.
- [32] zavod Miroslav Krleža, Leksikografski. Rezonancija, 2021. URL shorturl.at/BQUX9.
- [33] veleučilište u Zagrebu, Tehničko. Željko lebo željko lebo, dipl. ing. grañ. član hzn/to 221 tehničko veleučilište u zagrebu.
- [34] Douglas, John. Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61(1-2):43–104, 2003.
- [35] Hrasnica, Mustafa. Response spectra for the seismic evaluation of buildings. *Građevinar*, 54(11.):657–663, 2002.
- [36] Arbanas, Željko, Jagodnik, Vedran, Peranić, Josip, Pajalić, Sara, Vivoda Prodan, M, and Čeh, Nina. Physical model of rainfall induced landslide in flume test: preliminary results. In *Proceedings of the 4th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Hybrid Luleå/Zoom, Luleå, Sweden*, pages 6–8, 2020.
- [37] Ellis, George. *Control system design guide: using your computer to understand and diagnose feedback controllers*. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [38] Ladd, R.S. Preparing test specimens using under compaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1):16–23, 1978. ISSN 01496115. doi: 10.1520/GTJ10364J.
- [39] Eckersley, D. Instrumented laboratory flowslides. *Geotechnique*, 40(3):489–502, 1990.

- [40] Spence, KJ and Guymer, I. Small-scale laboratory flowslides. *Geotechnique*, 47 (5):915–932, 1997.
- [41] Wang, Fawu and Shibata, Hiroki. Influence of soil permeability on rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests. *Canadian geotechnical journal*, 44 (9):1128–1136, 2007.
- [42] Technical data, 2018. URL <https://seika.de/english/index.htm>.
- [43] Technical data, 2018. URL <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/aramis-3d-camera>.