

# Ispitivanje posmičnih značajki stijenskih diskontinuiteta

---

**Bartol, Denis**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:236704>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

**ISPITIVANJE POSMIČNIH ZNAČAJKI STIJENSKIH  
DISKONTINUITETA**

Diplomski rad

Denis Bartol

R-3491

Zagreb, 2018

ISPITIVANJE POSMIČNIH ZNAČAJKI STIJENSKIH DISKONTINUITETA

DENIS BARTOL

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Prilikom rudarskih i geotehničkih zahvata u stijenskoj masi jedan od bitnih čimbenika je razumijevanje ponašanja diskontinuiteta unutar same stijenske mase. U radu je prikazan i objašnjen postupak provedbe laboratorijskih ispitivanja posmičnih značajki diskontinuiteta. Provedeno je ispitivanje na prirodnim uzorcima u Geomehničkom laboratoriju, Odjelu za mehaniku stijena na RGN fakultetu u Zagrebu, na temelju kojeg je napravljen prikaz rezultata i njihova analiza.

Ključne riječi: laboratorijsko ispitivanje, posmične značajke diskontinuiteta, prirodni uzorci.

Diplomski rad sadrži: 44 stranice, 30 slika, 2 tablice i 20 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski.

Diplomski rad je pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Petar Hrženjak, izvanredni profesor RGNF

Pomoć pri izradi: Dr. sc. Karolina Gradiški

Ocjenjivači: Dr. sc. Petar Hrženjak, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Dalibor Kuhinek, docent RGNF  
Dr. sc. Antonia Jaguljnjak-Lazarević, docentica RGNF

Datum obrane: 16. veljače 2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

EXAMINATION OF SHEAR CHARACTERISTICS OF ROCK DISCONTINUITY

DENIS BARTOL

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics,  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

In the case of mining and geotechnical interventions in rock mass one of the important factors is understanding the behavior of discontinuity within the rock mass itself. This paper presents and explains the procedure for conducting laboratory tests of rock discontinuity shear characteristics. A study was carried out on natural specimens in the Geomechanical Laboratory, Rock Mechanics Department at the RGN Faculty in Zagreb, on the basis of which the results were presented and their analysis.

Keywords: laboratory testing, shear characteristics of rock discontinuity, natural rock specimens.

Thesis contains: 44 pages, 30 figures, 2 tables and 20 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Petar Hrženjak, Associate Professor RGNF

Technical support  
and assistance: PhD Karolina Gradiški

Reviewers: PhD Petar Hrženjak, Associate Professor RGNF  
PhD Dalibor Kuhinek, Assistant Professor RGNF  
PhD Antonia Jaguljnjak-Lazarević, Assistant Professor RGNF

Date of defense: February 16, 2018.

## SADRŽAJ

POPIS TABLICA.....	III
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA.....	VI
1. UVOD.....	1
2. ODREĐIVANJE PARAMETARA POSMIČNE ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA... 2	
2.1. Diskontinuiteti.....	2
2.2. Laboratorijsko određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta prema preporučenoj metodi ISRM-a .....	2
2.2.1 Oprema.....	4
2.2.2 Priprema uzoraka za ispitivanje.....	6
2.2.3 Postupak ispitivanja.....	9
2.2.4 Prikaz rezultata ispitivanja.....	13
3. OPIS UREĐAJA, OPREME I POTREBNIH MJERENJA .....	16
3.1. Opis uređaja.....	16
3.2. Određivanje prirasta sile i hoda potisnih cilindara.....	19
3.3. Određivanje hrapavosti i tlačne čvrstoće diskontinuiteta.....	23
3.4. Opis računalnog programa korištenog u ispitivanjima.....	25
4. PROVEDENA ISPITIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA.....	28
4.1 Opis materijala uzoraka.....	28
4.2. Određivanje baznog kuta trenja intaktnog materijala.....	33
4.3. Provedba ispitivanja i dobiveni rezultati.....	34

5. ZAKLJUČAK.....	42
6. LITERATURA.....	43

## **POPIS TABLICA**

<b>Tablica 4-1.</b> Vrijednosti JRC za svaki uzorak.....	31
<b>Tablica 4-2.</b> Podaci o uzorcima.....	31

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Shematski prikaz uzorka za laboratorijsko određivanje posmične čvrstoće. a) uobičajeni postupak ugradnje, b) alternativni pristup (Muralha et al., 2014).....	6
<b>Slika 2-2.</b> Tipični dijagrami za ispitivanja posmičnih značajki diskontinuiteta, a) u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja, b) u uvjetima konstantne normalne krutosti (Muralha et al., 2014).....	14
<b>Slika 3-1.</b> Prikaz uređaja za izravni posmik razvijenog na RGN fakultetu s ugrađenim uzorkom i mjernom opremom.....	18
<b>Slika 3-2.</b> a) SBEL servo pumpa model 347, b) elektromotorna hidraulična pumpa SOILTEST.....	18
<b>Slika 3-3.</b> Prikaz pomaka klipa horizontalnog potisnog cilindra u vremenu kod 3 zaokreta vijka.....	20
<b>Slika 3-4.</b> Prikaz brzine hoda klipa za različiti položaj regulacijskog vijka.....	20
<b>Slika 3-5.</b> Prikaz prirasta tlaka servo pumpe za različite vrijednosti napona elektromotora regulacijskog ventila.....	21
<b>Slika 3-6.</b> Prikaz prirasta sile potisnog cilindra za različite vrijednosti napona elektromotora regulacijskog ventila servo pumpe.....	22
<b>Slika 3-7.</b> Prikaz prirasta naprezanja na plohu diskontinuiteta uzorka za različite vrijednosti napona elektromotora regulacijskog ventila.....	22
<b>Slika 3-8.</b> a) Prikaz standardiziranih profila diskontinuiteta s pridruženim vrijednostima JRC (Barton, N., Choubey V., 1977), b) prikaz obrasca za određivanje JRC-a pomoću amplitude i duljine diskontinuiteta (Barton, 1982).....	24
<b>Slika 3-9.</b> Prikaz prve kartice sučelja programa.....	26
<b>Slika 3-10.</b> Prikaz druge kartice sučelja programa.....	26
<b>Slika 3-11.</b> Prikaz treće kartice sučelja programa.....	27
<b>Slika 4-1.</b> Dio geološke karte Istre s naznačenim formacijama i eksploatacijskim poljima „Kirmenjask“ vapnenaca (Matičec et al., 2013).....	29
<b>Slika 4-2.</b> Prikaz prvog uzorka prije ispitivanja.....	31
<b>Slika 4-3.</b> Prikaz drugog uzorka prije ispitivanja.....	32
<b>Slika 4-4.</b> Prikaz trećeg uzorka prije ispitivanja.....	32



<b>Slika 4-5.</b> Prikaz načina ispitivanja baznog kuta trenja intaktnog materijala.....	33
<b>Slika 4-6.</b> Prikaz rezultata ispitivanja baznog kuta trenja intaktnog materijala.....	34
<b>Slika 4-7.</b> Uzorak spreman za ispitivanje ugrađen u uređaj za posmik.....	35
<b>Slika 4-8.</b> Prikaz prvog uzoraka nakon sloma .....	36
<b>Slika 4-9.</b> Prikaz drugog uzoraka nakon sloma .....	37
<b>Slika 4-10.</b> Prikaz trećeg uzoraka nakon sloma .....	37
<b>Slika 4-11.</b> Slika prikazuje odnos posmičnog naprezanja i posmičnog pomaka za prvi uzorak (18-001-001).....	38
<b>Slika 4-12.</b> Slika prikazuje odnos normalnog pomaka i posmičnog pomaka za prvi uzorak (18-001-001).....	38
<b>Slika 4-13.</b> Slika prikazuje odnos posmičnog naprezanja i posmičnog pomaka za drugi uzorak (18-001-002).....	39
<b>Slika 4-14.</b> Slika prikazuje odnos normalnog pomaka i posmičnog pomaka za drugi uzorak (18-001-002).....	39
<b>Slika 4-15.</b> Slika prikazuje odnos posmičnog naprezanja i posmičnog pomaka za treći uzorak (18-001-003).....	40
<b>Slika 4-16.</b> Slika prikazuje odnos normalnog pomaka i posmičnog pomaka za treći uzorak (18-001-003).....	40
<b>Slika 4-17.</b> Odnos posmičnog naprezanja i normalnog naprezanja za sva tri uzorka odnosno tri različita normalna naprezanja.....	41

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
$\varphi_b$	bazični kut trenja	°
$l$	duljina	m
$R$	električni otpor	$\Omega$
$E$	energija	J
$f$	frekvencija	Hz
$c$	kohezija	MPa
$\varphi$	kut unutarnjeg trenja	°
$m$	masa	g
$U$	napon	V
$\delta n$	normalni pomak	mm
$\sigma_n$	normalno naprezanje	MPa
$N$	normalno opterećenje	kN
$V$	obujam	m <sup>3</sup>
$P$	ploština	m <sup>2</sup>
$\delta s$	posmični pomak	mm
$\tau$	posmično naprezanje	MPa
$T$	posmično opterećenje	kN
$F$	sila	N
$p$	tlak	Pa
$t$	vrijeme	s

## 1. UVOD

Diskontinuiteti, odnosno pukotine u stijenskoj masi, kao sastavni dio same stijenske mase, imaju velikog utjecaja na njeno ponašanje, zbog čega su onda i od posebnog interesa. Kod inženjerskih zahvata diskontinuiteti u stijenama stvaraju nepovoljne uvjete u pogledu stabilnosti same stijenske mase, a time i objekta koji se gradi u ili na takvoj stijeni. U ovome radu prvo je opisan postupak laboratorijskog određivanja čvrstoće diskontinuiteta prema preporučenim metodama ISRM-a (eng. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering) u kojem se opisuje procedura i norme koje opisuju način postupanja, pripremu te provedbu ispitivanja.

Ovakva ispitivanja još uvijek su u dosta ranoj fazi te još ima puno prostora za napredak u razumijevanju ponašanja diskontinuiteta prilikom posmičnog naprežanja. Neka od dosadašnjih ispitivanja su provedena korištenjem umjetnih uzoraka, korištenjem ispune unutar diskontinuiteta, zatim višefazni način posmicanja diskontinuiteta, te normalna laboratorijska ispitivanja u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja i u uvjetima konstantne normalne krutosti.

U našem ispitivanju napravljena su ispitivanja na uzorcima kamena „Kirmenjak“ na uređaju za ispitivanje posmične čvrstoće koji je razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, isključivo u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja. Prethodno je dan prikaz koncepta uređaja i opis ostalih uređaja korištenih u ispitivanju. Provedena su mjerenja kojima su utvrđene neke značajke uređaja kao što su mogući prirasti hoda horizontalnog potisnog cilindra i prirasti sile vertikalnog potisnog cilindra. Zatim je dan opis uzorka i opisan je postupak dobivanja vrijednosti JRC-a (eng. Joint roughness coefficient) te baznog kuta trenja.

Naposljetku je napravljeno samo posmično ispitivanje na temelju kojeg su prikazani i analizirani dobiveni podaci.

## **2. ODREĐIVANJE PARAMETARA POSMIČNE ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA**

### **2.1 Diskontinuiteti**

Pojam „diskontinuitet“ odnosi se na sve mehaničke prekide u stijenskoj masi nastale uslijed različitih djelovanja. Diskontinuiteti po postanku mogu biti geološki (rasjedi, slojevitost, škriljavost i folijacija) ili antropogeni (pukotine izazvane različitim inženjerskim zahvatima ili ispitivanjima).

Bez obzira na njihov postanak, diskontinuiteti imaju značajnu ulogu u ponašanju stijenske mase, a time i na projekte koji uključuju nagibe terena, površinske iskope i podzemne prostorije. Lomovi u stijenskoj masi uzrokovani diskontinuitetima jedan su od vodećih hazarda u građevinskim i rudarskim projektima, a posljedica toga su nesreće i skupi zastoji u radovima.

Procjenjivanje rizika jednog ovakvog blokovitog sustava u određenom projektu zahtijeva analizu parametara posmične čvrstoće diskontinuiteta. Najbolje procjene smicanja dobivene su in-situ ispitivanjima izravnog smicanja jer uključuju „efekt mjerila“, odnosno ispitivanja se provode na stvarnim dimenzijama diskontinuiteta. Međutim, zbog trajanja i troškova ovakvih ispitivanja, uobičajeno je ispitivanja izravnog smicanja provoditi u laboratoriju na relativno manjim uzorcima (Muralha et al., 2014).

### **2.2 Laboratorijsko određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta prema preporučenoj metodi ISRM-a**

Međunarodno udruženje za mehaniku stijena (International Society for Rock Mechanics, ISRM), 2014. godine izdalo je revidiranu verziju Metode za određivanje posmične čvrstoće stijenskih pukotina (eng. Rock joints).

Ova preporučena metoda je revizija i poboljšanje Dijela 2. preporučene metode za laboratorijsko određivanje izravne posmične čvrstoće (ISRM, 2007), a pripremljena je uzevši u obzir tehnološki napredak nakon njenog prvog publiciranja kao i ostale postojeće standardne metode uključujući ASTM D 5607-08 (ASTM, 2008), USACE RTH 203-80 (USACE, 1980) i JGS 2451-2008 (JGS, 2008). Doseg odnosno sadržaj ove metode sadrži određene upute i restrikcije.

Preporučena metoda je ograničena na određivanje kvazistatičke posmične čvrstoće diskontinuiteta pod postupnim posmičnim opterećenjem.

Diskontinuiteti također mogu biti potpuno ili djelomično ispunjeni, kao što je npr. ispunjena glinom. Preporučena metoda nije namijenjena ispitivanjima s ispunom gdje pritom moraju biti uzeti u obzir uvjeti pornog tlaka.

Preporučena metoda omogućuje mjerenje vršne i rezidualne posmične čvrstoće u određenom smjeru i to kao funkciju normalne sile koja je nanijeta na plohu posmika. Rezultati se mogu implementirati, na primjer, u analizi granične ravnoteže blokova stijene na kosinama ili bokovima u podzemnom iskopu te kao ulazni parametri za elemente „pukotina“ u numeričkom modeliranju blokovite stijenske mase bilo kao kontinuirane ili diskontinuirane geotehničke sredine.

Posmična čvrstoća stijenskog diskontinuiteta može se odrediti u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja (eng. Constant Normal Load, CNL) ili u uvjetima konstantne normalne krutosti (eng. Constant Normal Stiffnes, CNS). Ispitivanjem smicanja pri konstantnom normalnom opterećenju uređaj tijekom ispitivanja osigurava da se normalan pritisak održava konstantnim. Ovakav tip ispitivanja djelotvoran je jedino u situacijama kao što su npr. nepodgrađene stijenske kosine. Međutim, ovakav način ispitivanja baš i nije najpogodniji način u situacijama gdje normalan pritisak ne ostaje konstantan te je on promjenjiv tijekom ispitivanja. Ova situacija javlja se u dubljim podzemnim iskopima ili kosinama pojačanim sidrima. Ovdje puno bolji i reprezentativniji rezultati ispitivanja diskontinuiteta i pukotina dobili bi se koristeći ispitivanja u uvjetima konstantne normalne krutosti (Jiang et al., 2004).

U uvjetima konstantnog normalnog opterećenja, određivanje posmične čvrstoće obično uključuje primjenu nekoliko različitih vrijednosti konstantnog normalnog opterećenja ili naprezanja na više uzoraka iste pukotine ili ispitne plohe te mjerenje posmičnih naprezanja i odgovarajućih posmičnih i normalnih pomaka koji rezultiraju iz propisanog prirasta posmičnih pomaka. Trebalo bi se uzeti najmanje tri, ali po mogućnosti pet, uzoraka iz iste pukotine ili ispitne plohe sa sličnim karakteristikama i ispitati duž istog smjera smicanja.

U slučajevima kada nije moguće uzeti dovoljno veliki broj uzoraka, umjesto toga, isti uzorak može biti više puta ispitan u uvjetima različitog konstantnog normalnog opterećenja. Za jednu pukotinu u stijeni treba koristiti najmanje tri, ali bolje pet normalnih naprezanja. Ovaj se višefazni pristup može koristiti samo kada su lom i degradacija

hrapavosti površine pukotine u sljedećim fazama smicanja minimalni (npr. pod niskim normalnim naprežanjima). Kako bi se minimizirao utjecaj oštećenja i trošenja, svaka sljedeća faza smicanja treba biti provedena sa znatno višim normalnim naprežanjima.

U uvjetima opterećenja konstantne normalne krutosti određivanje jedne posmične čvrstoće uključuje ispitivanje više uzoraka iz iste pukotine ili smjera ispitivanja uz različito početno normalno opterećenje i/ili konstantnu normalnu krutost, te mjerenje posmičnih i normalnih naprežanja i odgovarajućih pomaka koji rezultiraju iz propisanog prirasta posmičnih pomaka. Mora se uzeti također najmanje tri, ali po mogućnosti pet uzoraka iz iste pukotine ili smjera ispitivanja i ispitati duž istog smjera smicanja.

### 2.2.1 Oprema

#### A. Uređaj za ispitivanje

Određivanje posmične čvrstoće stijenskog diskontinuiteta obično se provodi uređajem za izravno smicanje. Uređaji za određivanje posmične čvrstoće mogu sadržavati određene varijacije, no najčešće su jako slični. Uređaji za ispitivanje izravnim smicanjem obično uključuju sljedeće elemente, a prikaz se može vidjeti na slici 2-1. :

- a) Kruti sustav za ispitivanje, uključujući kruti okvir na kojeg se može staviti dio za opterećivanje i kruti držač uzorka koji je dovoljno čvrst kako bi se spriječila deformacija tijekom ispitivanja i ispravno zabilježila svojstva pukotine nakon loma.
- b) Držač uzorka, kao što su kutija, prsteni ili slični dijelovi. Držač mora omogućiti relativne posmične i normalne pomake duž diskontinuiteta. Sile trenja na okviru držača uzorka moraju biti minimizirane.
- c) Naprave za opterećivanje koje primjenjuju normalno i posmično opterećenje s odgovarajućim prirastom moraju biti izvedene na način da rezultanta posmičnog opterećenja prolazi kroz središte područja smicanja kako bi se minimizirala rotacija uzorka.
- d) Naprave koje mjere normalna i posmična opterećenja koja se primjenjuju na uzorke i normalne i posmične pomake tijekom ispitivanja.

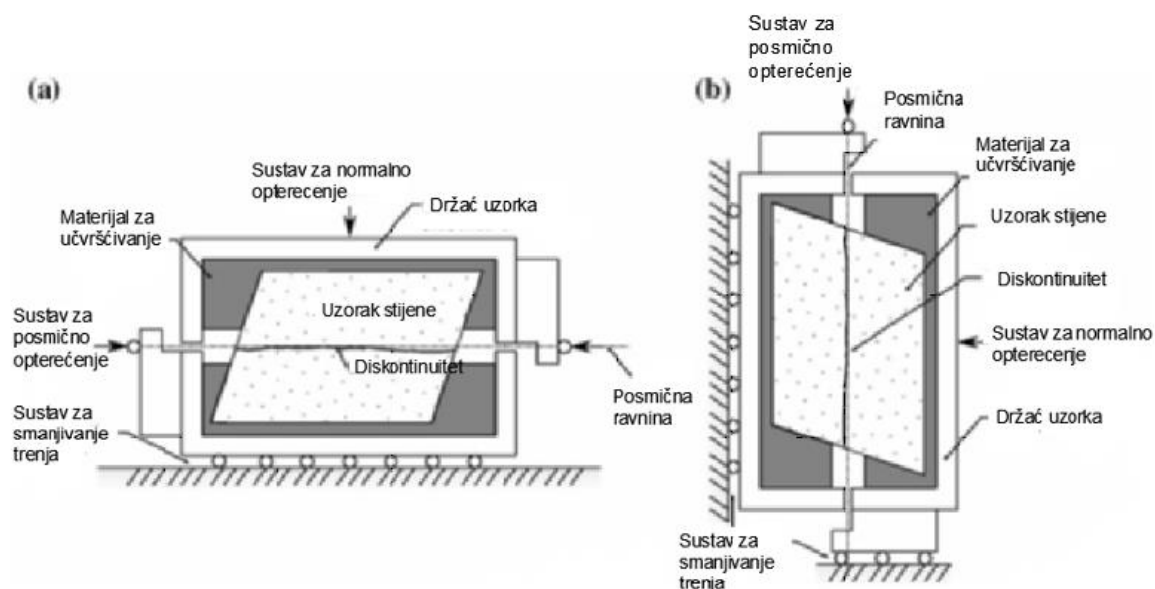
## B. Uređaj za opterećenje

- a) Posmične sile obično pokreću potisni cilindri (hidraulički, pneumatski, mehanički itd.) Potisni cilindri i povezani dijelovi trebaju biti projektirani na način da osiguraju posmično opterećenje jednakomjerno raspoređeno na ravnini diskontinuiteta koja se ispituje, s rezultantom sile koja djeluje paralelno na ravninu smicanja kroz njeno središte.
- b) Primijenjeno konstantno normalno opterećenje ili konstantnu normalnu krutost obično omogućuju potisni cilindri. Opterećenje mora biti jednakomjerno distribuirano na ravnini diskontinuiteta koja se ispituje, te se treba ostvariti pomak smicanja veći od dilatancije koja se očekuje na ispitivanju.
- c) Može se koristiti i konzolni sustav kako bi se primijenilo konstantno normalno opterećenje vlastite težine u ispitivanjima konstantnog normalnog opterećenja, dok se opruga može koristiti kako bi se održalo stanje normalne krutosti za ispitivanja konstantne normalne krutosti.
- d) Opterećenje u uređaju mora biti konstruirano na način da se održava primijenjena sila ili krutost unutar zadane tolerancije ( $\pm 2\%$ ).

## C. Bilježenje sila i pomaka

- a) Normalne i posmične sile mjere se s točnošću višom od  $\pm 2\%$  izravno tlačnim ćelijama, ili neizravno manometrom, pretvornikom tlaka ili mjernim prstenima. Pretvornici pomaka koriste se za mjerenje pomaka.
- b) Potrebna su najmanje dva pretvornika: jedan je postavljen paralelno s posmičnom ravninom kako bi mjerio posmični pomak, a drugi je postavljen vertikalno na središte uzorka kako bi mjerio normalni pomak. Bilo bi bolje koristiti dva pretvornika koja mjere posmični pomak na način da mjere skretanje uzorka s pravca, a tri do četiri pretvornika trebali bi mjeriti horizontalni pomak tako da se može ocijeniti nagib i zaokretanje uzorka.
- c) Uobičajeno je provoditi kontinuirana mjerenja ovih parametara (frekvencija uzorkovanja viša od 1 Hz) koristeći neku vrstu opreme za računalno prikupljanje podataka jer odgovara uvjetima kvazistatičkog opterećenja koje ova preporučena metoda za određivanje posmične čvrstoće stijenskih pukotina uzima u obzir.

d) Kako bi se osiguralo da se opterećenja efektivno nanesu na površinu smicanja, prikladno je izmjeriti sile trenja ili provesti zamjenska ispitivanja prije pravih ispitivanja.



Slika 2-1. Shematski prikaz uređaja za laboratorijsko određivanje posmične čvrstoće.

a) uobičajeni postupak ugradnje, b) alternativni pristup (Muralha et al., 2014)

## 2.2.2 Priprema uzoraka za ispitivanje

### A. Uzorkovanje

a) Odabire se smjer ispitivanja i bilježe se nagib, azimut i ostale relevantne geološke značajke. Ako je moguće, one bi trebale biti označene na uzorku kako bi se prilikom smicanja uzorak smicao u istom smjeru kao i u prirodi.

b) Uzorci jezgre koji sadrže ispitnu plohu skupljani su koristeći metode kojima bi se minimizirao poremećaj. Dimenzije uzorka i položaj ispitne plohe u jezgri trebali bi, ako je moguće, osigurati ugradnju bez daljnjeg skraćivanja u laboratoriju i osigurati da je uzorak dobro uklopljen u kućište.

c) Nikakva tekućina, osim vode, ne bi smjela doći u kontakt s ispitnim uzorkom prije ispitivanja. Uzorci diskontinuiteta za koje se čini da su kontaminirani blatom koje je nastalo bušenjem ili koji imaju neprirodnu površinu trebaju biti odbačeni.



d) Uzorci trebaju biti označeni naljepnicama i zapakirani kako bi se izbjegla šteta u transportu do laboratorija. Posebna se pažnja treba posvetiti kako ne bi došlo do diferencijalnog pomaka duž uzorkovanog diskontinuiteta. Kod transporta uzoraka i skladištenja ukoliko se ne ispituju odmah, potrebno ih je čuvati na način da se očuvaju vremenski uvjeti i prirodna vlažnost. Pritom se koriste kontejneri nepropusni na vlagu, vrpce, plastični omoti, vosak ili druga sredstva. Lomljivi uzorci zahtijevaju poseban tretman, npr. pakiranje u poliuretansku pjenu.

e) U laboratoriju, rukovanje uzorcima i njihovo skladištenje treba biti provedeno prema gore navedenim mjerama kako bi se izbjeglo bilo kakvo oštećenje uzorka, i ako je potrebno, kako bi se sačuvao in situ sadržaj vlage.

## B. Dimenzije uzoraka

a) Preferiraju se uzorci s pravilnim (pravokutnim ili ovalnim) područjem presjeka. Međutim, uzorci mogu biti bilo kojeg oblika, ali takvi da područje presjeka može biti određeno s potrebnom točnošću.

b) Visina uzorka treba biti veća od debljine posmične (ispitne) zone i dovoljna da se uzorak postavi u kućište u držaču uzorka.

c) Duljina ispitne ravnine (mjerena duž smjera smicanja) mora biti najmanje 10 puta veća od maksimalne duljine neravnine.

d) Širina ispitne ravnine (mjerena okomito na smjer smicanja) mora biti najmanje 48 mm, u skladu s diskontinuitetima skupljenim iz jezgre.

e) Širina ispitne ravnine ne treba se znatnije mijenjati duž posmične duljine. Minimalna širina treba biti veća od 75% maksimalne širine.

f) Polovica uzorka koja ostaje pričvršćena tijekom ispitivanja smicanja treba imati veću duljinu nego polovica koja se miče tako da pukotina uvijek ima oslonac i da nominalna površina koja je u kontaktu ostane konstantna. Ako takva procedura nije provediva zbog smanjene duljine uzorka, u proračunu treba uzeti u obzir smanjenje nominalnog područja tijekom smicanja.

### C. Mjerenje dimenzija uzorka

- a) Sve značajke površine diskontinuiteta koje mogu utjecati na posmičnu čvrstoću, uključujući alteracije, prevlake, ispune itd. treba ocijeniti sukladno metodologiji opisanoj u Preporučenoj metodi ISRM-a za opis diskontinuiteta u stijenskim masama (ISRM 2007).
- b) Prije i poslije ispitivanja obje stijenske ispitnog uzorka trebaju biti fotografirane i površina obje stijenske mora biti izmjerena kako bi se ocijenila površinska hrapavost i oštećenje neravnina. U tu se svrhu mogu koristiti dva tipa opreme:
- Profilometri su jednostavni uređaji kojima se određuje serija linearnih profila hrapavosti površine uzorka u smjeru i okomito na smjer smicanja. Broj profila ovisi o dimenziji površine, ali treba iscrtati najmanje tri profila duž svakog smjera.
  - Ako su raspoloživi, mogu se koristiti 3D beskontaktni mjerni uređaji (npr. laserski skener, fotogrametrijska ili stereoskopska kamera) kako bi se digitalizirala čitava površina diskontinuiteta. Uz takve je sustave moguće dobiti mjerna mjesta s nominalnom udaljenošću manjom od 0,5 mm i preciznošću višom od 0,025 mm.
- c) Prije svakog ispitivanja mora se odrediti veličina nominalne površine presjeka posmične ravnine uzorka s odstupanjem maksimalno do 2.5 mm<sup>2</sup>. Kod pravilnih geometrijskih oblika površina se može izmjeriti pomičnim mjerilom ili mikrometrom. Kod nepravilnih oblika može se nacrtati kontura presjeka na papiru i površina presjeka se može izmjeriti planimetrom ili sličnim instrumentom. Površina se može izmjeriti i 3D beskontaktnim mjernim uređajem ili CAD softverom.

### D. Ugradnja uzorka u kalup

- a) Da bi se ispitao uzorak diskontinuiteta, svaka polovica uzorka mora biti učvršćena u svojoj polovici držača uzorka (npr. prsteni, kutija). S obzirom na to da su uzorci diskontinuiteta rijetko izrezani tako da savršeno pristaju u držač uzoraka, te da nekad ravnine diskontinuiteta nisu usklađene, uzorci se u kućište postavljaju u nekom drugom lijevanom materijalu (npr. cement, smola i sl.) kako bi se osiguralo čvrsto prijanjanje. Iako su dopuštene neke prilagodbe, postavljanje ispitnog uzorka u kućište treba se odvijati na sljedeći način:
- Izvaditi uzorak iz pakiranja.
  - Staviti donju polovicu uzorka centralno u donju polovicu držača za uzorak. Osigurati da je smična ploha, koja će biti ispitana, pričvršćena i paralelna s ravninom smicanja i

da je ispravno orijentirana u donosu na smjer smicanja. Osigurati da uzorak može zadržati isti položaj dok se ulijeva i dok se ne stvrdne materijal za učvršćivanje u kućištu.

- Pažljivo uliti materijal za učvršćivanje u kućištu, pripremljen u skladu s uputama proizvođača, u prostor između donje polovice uzorka i donje polovice držača uzorka. Prestati ulijevati točno ispod opće ravnine ispitne zone. Osigurati da materijal za učvršćivanje u kućištu ne dođe u zonu od otprilike 5 mm oko stranica ravnine smicanja. Ne dirati sklop držača uzorka nakon ulijevanja materijala dok se materijal dovoljno ne stvrdne.

- Nakon što se materijal za učvršćivanje u kućištu na dnu dovoljno stvrdne, postaviti razdjelnik određene debljine na donji držač tako da njegov rub okružuje donju polovicu uzorka u kućištu i obuhvaća debljinu ispitne zone. Ako je potrebno, nanijeti sloj silikonskog premaza preko površine materijala u kućištu. Postaviti gornju polovicu ispitnog uzorka na donju polovicu koja je položena u kućište. Osigurati da dvije polovice čvrsto prijanjanju. Spustiti gornju polovicu držača uzorka na razdjelnik, a da se pri tome ne poremeti položaj gornje polovice uzorka. Povezati dvije polovice držača uzorka. Uliti materijal za učvršćivanje u kućištu u prstenasti prostor između gornje polovice držača uzorka i gornje polovice uzorka. Ne remetiti sklop dok se materijal za učvršćivanje u kućištu ne stvrdne.

- Ukloniti razdjelnike, pijesak ili glinu kako bi se oslobodila ispitna ploha za ispitivanje smicanja.

b) Nakon postavljanja u kućište, treba provjeriti da je prosječni položaj ravnine kroz ispitnu ravninu paralelan s gornjom i donjom površinom držača za uzorak (tj. ravninom smicanja).

### 2.2.3 Postupak ispitivanja

#### A. Prethodni zadaci

a) Prije bilo koje serije ispitivanja, treba odrediti uvjete opterećenja i raspon normalnih opterećenja koja će se primijeniti tijekom smicanja, u skladu s očekivanim naprezanjima na pukotinama u planiranom projektu (npr. kosina, temeljenje brane, podzemna kaverna ili tunel).

b) Mogu se provesti zamjenska ispitivanja s uzorcima niske deformabilnosti, kao što je čelik, istih dimenzija kao što su pravi uzorci i postavljeni u kućište prema istom postupku. Zamjenska ispitivanja uzoraka s pukotinama omogućuju da se utvrdi da svi uređaji rade ispravno i mogu omogućiti kalibraciju mjernih instrumenata.

#### B. Ugradnja uzorka u uređaj

- a) Ugraditi i orijentirati uzorak u kućištu u pokretne i fiksne držače uzorka ispitnog uređaja.
- b) Osigurati da su svi mjerni instrumenti kalibrirani u skladu s laboratorijskim procedurama za kalibriranje.
- c) Ispitati sve uređaje za praćenje kako bi se osiguralo da ispravno rade i da su pravilno spojeni na sustav za prikupljanje podataka.
- d) Postaviti sve uređaje za mjerenje pomaka okomito na površinu smicanja tako da dodiruju okvir pokretne polovice držača uzorka kako bi mjerili normalni pomak tijekom ispitivanja. Obično se koriste četiri mjerna uređaja za mjerenje normalnog pomaka kako bi se procijenio nagib i zaokretanje pokretne polovice uzorka tijekom ispitivanja
- e) Postaviti uređaje za pomak na stroj na način da mjere posmični pomak uzorka tijekom ispitivanja. Treba koristiti par uređaja koji su simetrično postavljeni u odnosu na područje presjeka uzorka.
- f) Osigurati da svi uređaji za praćenje pomaka imaju dovoljan prostor kako bi omogućili normalne i posmične pomake koji se očekuju tijekom ispitivanja. Povrh toga, osigurati da ti uređaji ostanu u kontaktu s držačem uzorka tijekom ispitivanja kako bi ispravno zabilježili pomake.
- g) Ako je potrebno, ugraditi i staviti u ispravan položaj sve ostale mjerne uređaje, npr. tlačne ćelije.

#### C. Primjena opterećenja

Normalno opterećenje:

- a) Prije bilo kojeg ispitivanja smicanja, primjena normalnog opterećenja trebala bi se sastojati od kontinuiranog povećanja normalnog opterećenja na zonu smicanja po postupnom prirastu dok se ne postigne određeno normalno naprezanje, te se bilježe posljedični normalni pomaci.

- b) Svaki ciklus opterećenja i rasterećenja traje oko 5 minuta. U skladu s tim, propisani su prirasti od 0,01 MPa/s ili manje.
- c) Treba uzeti u obzir bilo koje dodatno normalno opterećenje primijenjeno na ispitnu plohu. Na primjer, ako se uzorak nalazi u horizontalnom položaju u uređaju za ispitivanje, u obzir treba uzeti težinu gornje polovice uzorka.
- d) Kod ispitivanja konstantnog normalnog opterećenja treba osigurati da ispitni uređaj zadrži određeno konstantno normalno opterećenje tijekom trajanja ispitivanja. Kod ispitivanja konstantne normalne krutosti treba osigurati da ispitni uređaj zadrži određenu konstantnu normalnu krutost tijekom trajanja ispitivanja.
- e) Ako je moguće, potrebno je ukloniti porni tlak u stijeni i materijal ispune uz ravninu smicanja prije smicanja. Treba primijeniti posmično opterećenje kad se normalni pomak stabilizira.

Posmično opterećenje:

- a) Nakon što se normalni pomaci stabiliziraju pod primijenjenim normalnim opterećenjem, treba kontinuirano ostvarivati posmični pomak po izabranom prirastu posmičnog pomaka dok se ne dostigne konačna ili rezidualna posmična čvrstoća. U pravilu, dovoljan je posmični pomak koji iznosi između 5 i 10% duljine diskontinuiteta.
- b) Prirasti posmičnog pomaka oko 0,1-0,2 mm/min su obično pogodni za cijelo ispitivanje, iako mogu biti neznatno povećani sve do vrijednosti od oko 0,5 mm/min nakon vršne posmične čvrstoće. U posebnim slučajevima, kao što su pukotine s tankim glinenim prevlakama, može biti nužan sporiji prirast (niža od 0,05 mm/min).

#### D. Alternativni pristup

- a) Određivanje posmične čvrstoće pukotine u stijeni može se odvijati prema dva različita tipa procedura: jednofazna procedura smicanja i višefazna procedura smicanja. Oba tipa procedura mogu se provoditi u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja i konstantne normalne krutosti.
- b) Jednofazna procedura smicanja uključuje primjenu nekoliko konstantnih normalnih naprezanja na više uzoraka iz pukotine ili ispitnih ploha, te mjerenje posmičnih naprezanja i odgovarajućih normalnih pomaka koji rezultiraju iz propisanog prirasta posmičnog pomaka

c) Višefazna procedura smicanja sastoji se od ponavljano g ispitivanja istog uzorka pod različitim konstantnim normalnim naprezanjima. Za jednu pukotinu u stijeni treba primijeniti najmanje tri, ali bolje pet različitih normalnih naprezanja s ispitivanjem smicanja u istom smjeru. Osim toga, mogu se provoditi dvije moguće tehnike provođenja višefaznih ispitivanja smicanja: ispitivanje bez vraćanja uzorka u njegov početni prirodni položaj prije svake faze smicanja ili uz vraćanje uzorka u njegov početni prirodni položaj prije svake faze smicanja.

#### E. Mjerenja

##### Normalni pomak ( $\delta_n$ )

a) Izmjeriti i zabilježiti normalne pomake uzorka pri svakom promatranju opterećenja kako bi se odredio normalni pomak uzorka iz pukotine kako je prije definirano u Odlomku 2.2.1.

b) Preporučuje se da se koriste četiri mjerna uređaja za praćenje nagiba i zaokretanja ispitnih uzoraka. Može se koristiti manji broj mjernih uređaja, ali u svim slučajevima oni moraju omogućiti da se odredi normalni pomak u središtu presjeka uzorka.

##### Posmični pomak ( $\delta_s$ )

a) Izmjeriti posmični pomak uzorka pri svakom promatranju opterećenja kako bi se odredio posmični pomak uzorka iz pukotine kako je prije definirano u Odlomku 2.2.1.

b) Preporučuje se da se koriste dva mjerna uređaja za praćenje nagiba i zaokretanja ispitnih uzoraka. Posmični pomak mora se odrediti u središtu presjeka uzorka.

##### Normalno opterećenje (N):

a) Ako je mehanizam normalnih opterećenja bilo koji drugi osim vlastite težine opterećenja (tj. ispitivanja u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja), treba izmjeriti primijenjeno normalno opterećenje pri svakom promatranju posmičnog opterećenja uređajem za mjerenje opterećenja. Normalno opterećenje mora biti kontinuirano praćeno tijekom ispitivanja.

##### Posmično opterećenje (T):

a) Izmjeriti primijenjeno posmično opterećenje uređajem za mjerenje opterećenja. Odabrana učestalost mjerenja trebala bi biti dovoljna kako bi se u potpunosti obuhvatila

reakcija uzorka na pomak opterećenja. Ta učestalost ovisi o prirodi uzorka i prirastu posmičnog pomaka. Uglavnom, mjerenje svake sekunde ili manje tijekom trajanja ispitivanja trebalo bi biti adekvatno.

#### 2.2.4 Prikaz rezultata ispitivanja

##### A. Podatci

Provjeriti pojedine zabilježene podatke kako bi se provjerila dosljednost svih mjerenja.

Ako se nominalna naprezanja ne dobivaju izravno putem sustava prikupljanja podataka, treba izračunati normalna i posmična naprezanja kao:

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \quad (2-1)$$

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (2-2)$$

gdje su:

$N$  – normalno opterećenje (kN) ;

$T$  - posmično opterećenje (kN);

$A$  - nominalna površina (cm<sup>2</sup>);

$\sigma_N$  - normalno naprezanje (MPa) i

$\tau$  - posmično naprezanje (MPa).

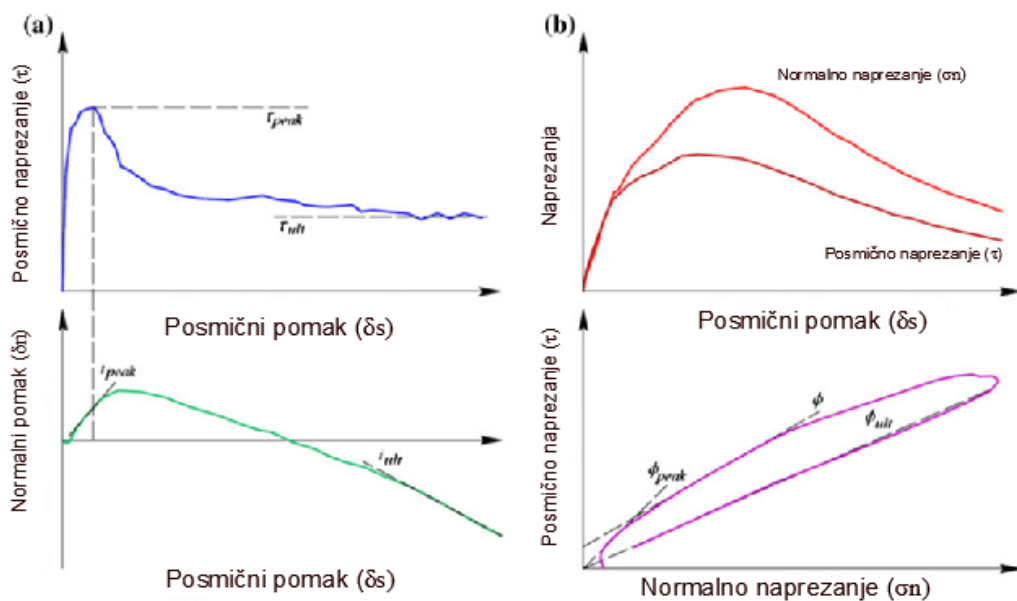
Ako se nominalno površina smanjuje tijekom posmičnog pomaka, to se mora uzeti u obzir prilikom izračuna nominalnih naprezanja.

Treba izračunati normalne i posmične pomake ako se ne mogu dobiti izravno putem sustava prikupljanja podataka.

## B. Dijagrami i izračuni

a) Iscrtavanja sljedećih dijagrama potrebna su za određivanje posmične čvrstoće uzorka stijene, a na slici 2-2. se vidi prikaz:

- Dijagrami posmičnog pomaka u odnosu na posmično naprezanje;
- Dijagrami normalnog pomaka u odnosu na posmični pomak;
- Dijagrami normalnog opterećenja u odnosu na posmični pomak, u slučaju ispitivanja pri konstantnoj normalnoj krutosti.



Slika 2-2. Tipični dijagrami za ispitivanja posmičnih značajki diskontinuiteta, a) u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja, b) u uvjetima konstantne normalne krutosti (Muralha et al., 2014)

- b) Može se prikazati i dijagram normalnog opterećenja u odnosu na normalni pomak u fazama primjene normalnog opterećenja.
- c) Koristeći zabilježene podatke i dijagram posmičnog napreznja u odnosu na posmični pomak, treba ocijeniti vršna i konačna ili rezidualna posmična napreznja za svaki uzorak iste pukotine u stijeni ili ispitnoj plohi u slučaju jednofaznih ispitivanja ili za sve faze višefaznih ispitivanja istog uzorka stijene.



- d) Koristeći zabilježene podatke i dijagram normalnog pomaka u odnosu na posmični pomak, treba ocijeniti kutove vršne i konačne ili rezidualne dilatacije za svaki uzorak iste pukotine u stijeni ili ispitnoj plohi u slučaju jednofaznih ispitivanja ili za sve faze višefaznih ispitivanja istog uzorka stijene.
- e) Iscrtati dijagrame koji prikazuju odnose vršnog posmičnog naprezanja u odnosu na normalno naprezanje i konačnog ili rezidualnog posmičnog naprezanja u odnosu na normalno naprezanje.
- f) Koristiti te dijagrame da bi se ocijenili parametri čvrstoće propisanog kriterija sloma. Mohr-Coulombovi kriteriji su obično prikladni kako bi se adekvatno modeliralo rezultate ispitivanja smicanja pukotine u stijeni. U tom slučaju, parametri tog kriterija linearnog sloma definirani su kako slijedi:

$$\tau = c + \sigma_N \tan \varphi \quad (2-3)$$

gdje su:

$c$  - kohezija (kPa) i

$\varphi$  - kut unutarnjeg trenja ( $^{\circ}$ ).

- g) Pri primjeni Mohr-Coulombovog kriterija, posebnu pažnju treba posvetiti parametrima čvrstoće. Rezultate ne treba ekstrapolirati nakon područja primijenjenih normalnih naprezanja tijekom ispitivanja, posebno za niske vrijednosti  $\sigma_N$ .
- h) U slučaju hrapavih ili neravnih stijenki, nelinearna krivulja posmične čvrstoće može biti reprezentativnija od rezultata ispitivanja. U tim je slučajevima moguće uzeti u obzir druge priznate kriterije sloma, izračunati odgovarajuće parametre i njih uzeti kao rezultate ispitivanja. Takvi kriteriji uključuju:  $i$  vrijednosti od Pattona (Barton, 1976) ili koeficijent hrapavosti od Bartona i Choubeya (1977). Taj koeficijent uz to omogućuje razmatranje učinka veličine uzorka.
- i) U slučaju višefaznih ispitivanja, kohezija može biti precijenjena zbog akumulacije oštećenja pri uzastopnom smicanju istog uzorka pukotine.
- j) Kako su dostupna mjerenja posmičnog i normalnog pomaka, parametri deformabilnosti, kao što je normalna i posmična krutost uzoraka, mogu se izvesti iz ispitivanja (Muralha et al., 2014).

### **3. OPIS UREĐAJA, OPREME I POTREBNIH MJERENJA**

#### **3.1 Opis uređaja**

Ispitivanja parametara posmične čvrstoće diskontinuiteta provedena su na uređaju za izravni posmik koji je razvijen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Glavni dijelovi uređaja za izravni posmik su: okvir cijelog uređaja, hidraulički potisni cilindri, hidraulične pumpe, donje i gornje čeljusti preko kojih se nanosi normalno i posmično opterećenje, ležajevi po kojima se pomiče donja čeljust, polukuglični ležajevi kojim se osigurava ravnomjeren prijenos sile s cilindra na čeljusti i uzorak, mjerila opterećenja, mjerila horizontalnih i vertikalnih pomaka, sustav za kondicioniranje i prikupljanje mjerenih električnih veličina te računalo kojim se prati ispitivanje. Okvir uređaja izgrađen je od osam U-profila koji su međusobno spojeni varom. On se sastoji od gornjeg i donjeg nosača okvira, od kojih se svaki sastoji od dva U-profila (UPN 240) zavarena po dužini te četiri U-profila koji ih povezuju, a ujedno služe i kao uporište na podu. Na donji nosač postavlja se donja podložna ploča na koju se stavljaju valjkasti ležajevi po kojima se pomiče donja čeljust. Na donju čeljust postavlja se uzorak i na uzorak zatim dolazi gornja čeljust. Za postizanje vertikalne i horizontalne sile koriste se hidraulički potisni cilindri koji su smješteni unutar okvira uređaja za izravni posmik. Ravnomjeren prijenos sile s hidrauličkih cilindara na čeljusti i uzorak osiguran je upotrebom polukugličnih ležajeva koji se nalaze na gornjoj i donjoj čeljusti. Na ove ležajeve nanosi se grafička mast radi boljeg prijanjanja. Vertikalni potisni cilindar pričvršćen je za gornji nosač okvira, a horizontalni potisni cilindar visi na lancima koji su također pričvršćeni za gornji nosač okvira. Potisni cilindri se sastoje od plašta, klipa i ovojnice. Unutarnji radni promjer klipa iznosi 125 mm, a promjer dijela klipa koji izlazi van iznosi 90 mm. Prema radnoj površini određuje se iznos sile preko iznosa tlaka. Prikaz uređaja može se vidjeti na slici 3-1.

Vertikalni potisni cilindar pokreće se SBEL servo pumpom model 347. Pumpa se sastoji od glavne strujne sklopke na desnoj strani, ploče s ventilima u središnjem dijelu na kojoj se nalaze: ventil s oznakom „1“, ventil s oznakom „2“, povratni ventil s oznakom „DUMP“ i regulacijski ventil s oznakom „MANUAL CONTROL“. Prilikom korištenja SBEL Servo pumpe, kao pogonske jedinice, postoji manualni i automatski način upravljanja. Kod manualnog načina rada ventil „1“ mora biti zatvoren, ventil „2“ otvoren, a povratni ventil zatvoren. Regulacija tlaka u sustavu provodi se regulacijskim ventilom s oznakom „MANUAL CONTROL“. U slučaju automatskog načina rada ventil „1“ mora biti otvoren,

ventil „2“ zatvoren, a povratni ventil zatvoren. U tom slučaju regulacija tlaka u sustavu provodi se preko računalnog mjernog i upravljačkog sustava koji napaja dvosmjerni elektromotorni ventil s istosmjernom strujom od  $\pm 0-24$  V napona. Kod oba načina rada, pokretanje motora pumpe odvija se pomoću virtualne sklopke za uključivanje pumpe koja se nalazi u sučelju aplikacije i fizičke sklopke koja se nalazi u strujnom krugu upravljačkog dijela sustava uz uključenost glavne strujne sklopke. Isto tako kod oba načina rada, otpuštanje tlaka i povrat potisnog cilindra preše u početni položaj ostvaruje se isključenjem pumpe i otvaranjem povratnog ventila.

Horizontalni potisni cilindar pokreće se elektromotornom hidrauličnom pumpom SOILTEST. Elektromotorna hidraulična pumpa SOILTEST ima upravljački dio koji se sastoji od električne sklopke, ručice glavnog ventila na desnoj strani, vijka za regulaciju protoka u sredini i ručice za ostvarivanje brzog protoka na lijevoj strani. Za ostvarivanje tlaka potrebno je da ručica glavnog ventila bude u gornjem položaju dok za otpuštanje tlaka i povrat potisnog cilindra u početni položaj ručica glavnog ventila se povlači u donji položaj. U normalnom radu ručica brzog protoka treba biti u položaju prema elektromotoru, a u slučaju kad se želi ostvariti brzi protok, odnosno brzo kretanje potisnog cilindra, ručica brzog protoka se povlači od elektromotora. Vijak za regulaciju protoka okreće se od početnog položaja u smjeru kazaljke na satu s mogućnošću zaokreta za sedam krugova. Kad je vijak u početnom položaju ostvaruje se maksimalan protok odnosno maksimalan prirast tlaka, a njegovim zakretanjem u smjeru kazaljke na satu smanjuje se prirast tlaka. Na slici 3-2. prikazane su obje pumpe koje pokreću potisne cilindre.



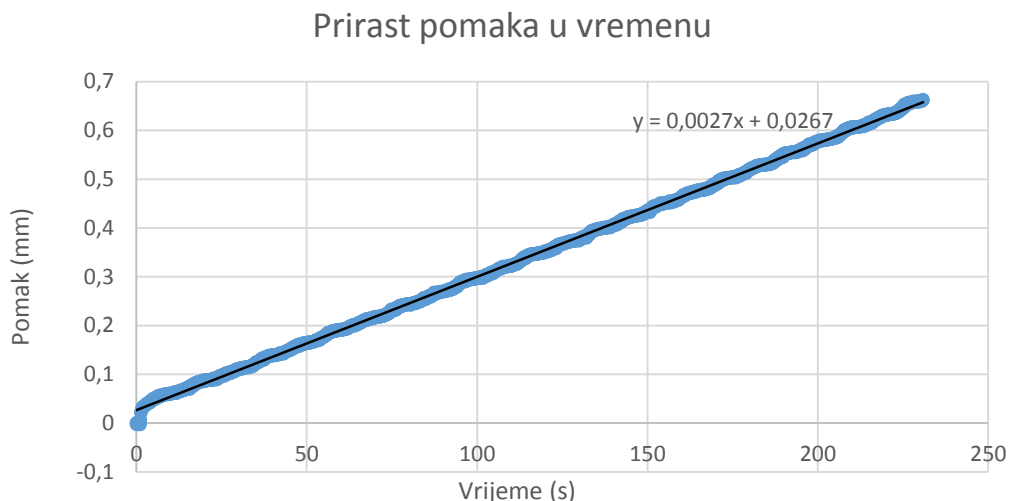
Slika 3-1. Prikaz uređaja za izravni posmik razvijenog na RGN fakultetu s ugrađenim uzorkom i mjernom opremom



Slika 3-2. a) SBEL servo pumpa model 347, b) elektromotorna hidraulična pumpa SOILTEST

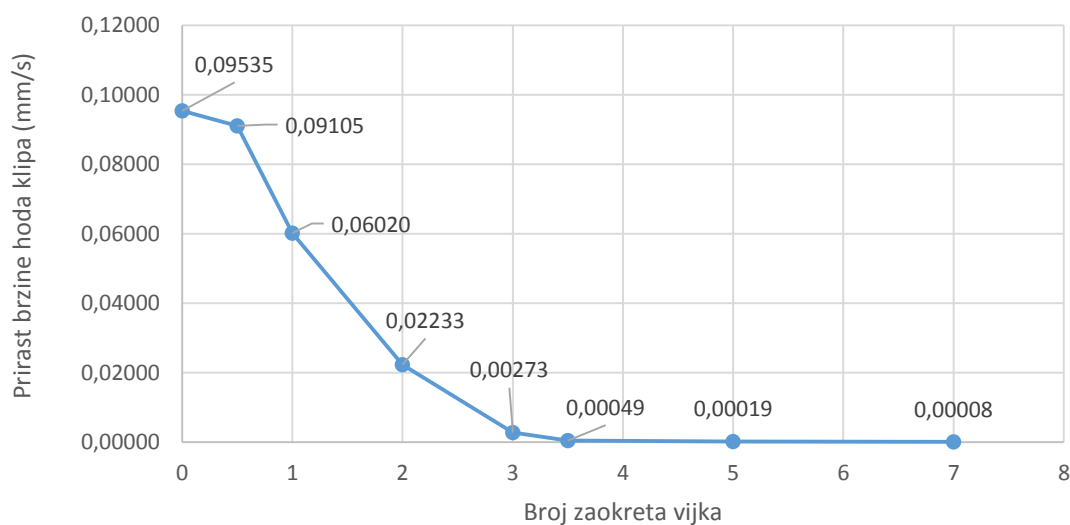
### 3.2 Određivanje prirasta sile i hoda potisnih cilindara

Da bi se odredile značajke uređaja s obzirom na mogućnost prirasta sila i brzine hoda potisnih cilindara, napravljena su mjerenja u kojima je određena brzina hoda horizontalnog potisnog cilindra kojeg pogoni elektromotorna hidraulična pumpa SOILTEST te prirast tlaka, odnosno sile vertikalnog potisnog cilindra kojeg pokreće SBEL servo pumpa. Određivanje ovih prirasta nam omogućuje da se odrede prirasti koji će se koristiti u ispitivanjima na pravim uzorcima. Brzina hoda horizontalnog cilindra regulira se preko regulacijskog ventila na način da se zakretanjem ventila u smjeru kazaljke na satu smanjuje brzina hoda cilindra. Kako bi se odredila brzina hoda cilindra u ovisnosti o položaju regulacijskog ventila, mjerenja su provedena za različite položaje ventila. Digitalni upravljački program korišten za ova i sva ostala ispitivanja u ovom radu dizajniran je pomoću LabVIEW-a i kasnije će biti pobliže opisan. Pomaci su se mjerili pomoću LVDT-a. Napravljeno je osam mjerenja s različitim položajem vijka za regulaciju protoka. Mjerenja su redosljedom napravljena s vijkom u početnom položaju (0 okretaja), vijkom zaokrenutim za 0,5 okreta, 1 okret, 2 okreta, 3 okreta, 3,5 okreta, 5 okretaja te naposljetku 7 okretaja čime je ostvaren minimalni prirast tlaka odnosno hoda cilindra. Iz podataka o vremenu i pomaku napravljen je dijagram, a iz nagiba pravca koji opisuje podatke dobiven je podatak prirasta pomaka u vremenu. Iz jednadžbe pravca nagiba dobiven je podatak o prirastu pomaka mjerenog u milimetrima u vremenu mjerenog u sekundama. Na slici 3-3. prikazan je dijagram prirasta pomaka kod 3 okreta vijka. Veliki broj podataka bio je zabilježen pomoću aplikacije LabVIEW, a podaci su obrađeni pomoću Microsoft Excela 2016.



Slika 3-3. Prikaz pomaka klipa horizontalnog potisnog cilindra u vremenu kod 3 zaokreta vijka

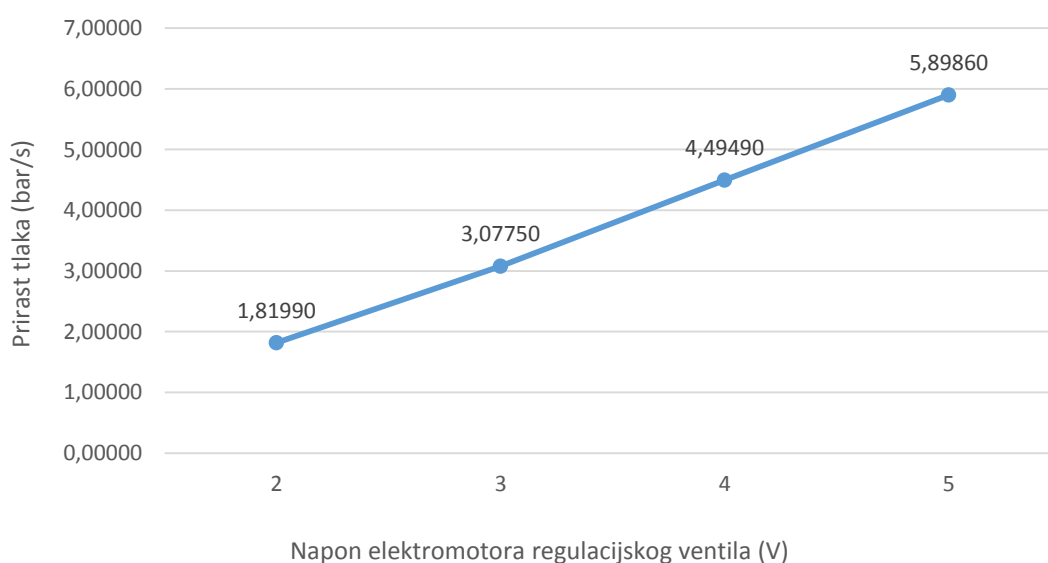
Prirasti za sva ispitivanja s različitim položajima vijka prikazani su na slici 3-4.



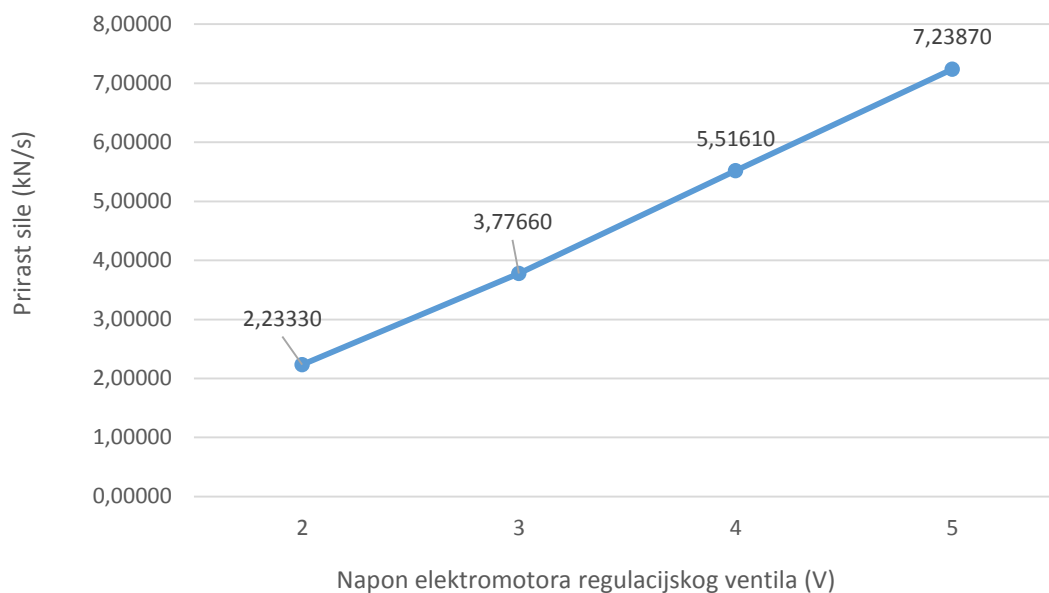
Slika 3-4. Prikaz brzine hoda klipa za različiti položaj regulacijskog vijka

Prema preporučenoj metodi za ispitivanje najpogodniji su prirasti posmičnog pomaka od oko 0,1 mm/min do 0,2 mm/min. Pa prema tome u našim rezultatima ispitivanja vidimo da je ovakav prirast dobiven kad je regulacijski vijak zaokrenut tri puta stoga će se koristiti prirast hoda od 0,15 mm/min.

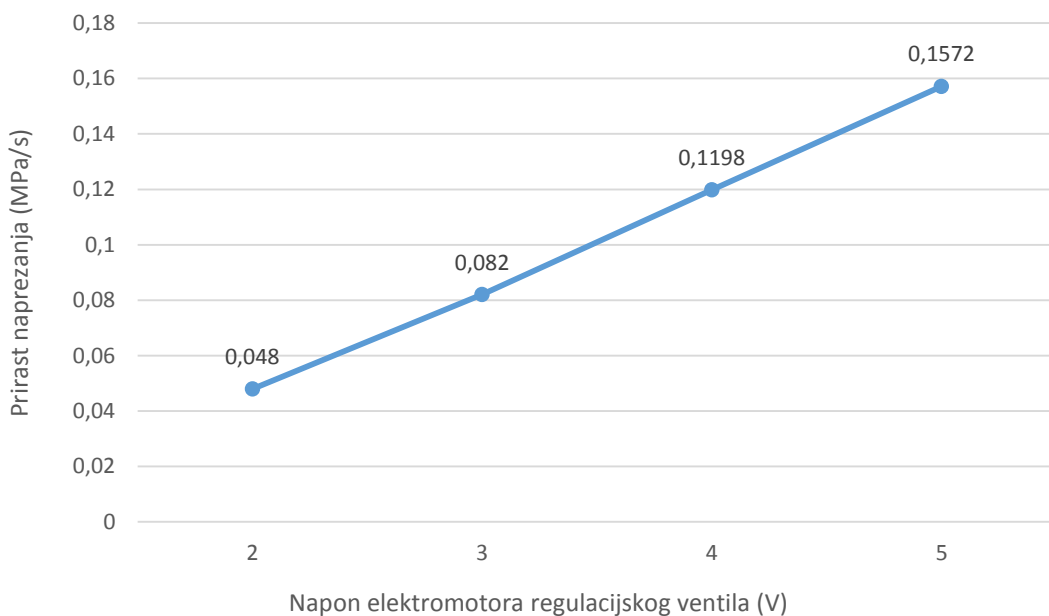
Mjerenje prirasta tlaka, odnosno sile vertikalnog potisnog cilindra zabilježena su pomoću senzora tlaka. Mjerenja su također provedena pomoću aplikacije u LabWIEV-u prilikom čega su redoslijedom napravljena ispitivanja s otvorenim povratnim ventilom servo pumpe, zatim zatvorenim povratnim ventilom te pri naponima elektromotora regulacijskog ventila od 2 V, 3 V, 4 V i 5 V. Kad je povratni ventil servo pumpe pri njenom radu otvoren određuje se minimalni radni tlak sustava. Tlak koji se ostvaruje kad je povratni ventil otvoren pri otporu regulacijskog ventila od  $120 \Omega$  iznosi 2,45 bara, što daje silu od 3,0 kN na potisnom cilindru. Za slučaj kad je povratni ventil zatvoren kod otpora od  $120 \Omega$  dobiven je tlak od 5 bara što daje silu od 6,16 kN. Dobivene vrijednosti prirasta tlaka prikazane su na slici 3-5. Zatim je dan prikaz prirasta sile koji je izračunat preko iznosa tlaka i radne površine klipa cilindra. Ovi iznosi prirasta sile prikazani su na slici 3-6. Pomoću iznosa prirasta sile i površine gornje stranice uzorka dobit će se stvarni prirast naprezanja za uzorke koje će se ispitivati. Na slici 3-7. dan je primjer prikaza prirasta naprezanja na uzorcima površine od  $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  izražen u MPa/s.



Slika 3-5. Prikaz prirasta tlaka servo pumpe za različite vrijednosti napona elektromotora regulacijskog ventila



Slika 3-6. Prikaz prirasta sile potisnog cilindra za različite vrijednosti napona elektromotora regulacijskog ventila servo pumpe



Slika 3-7. Prikaz prirasta naprezanja na plohu diskontinuiteta uzorka za različite vrijednosti napona elektromotora regulacijskog ventila

Preporučena metoda nalaže da prirasti naprezanja budu od 0,01 MPa/s ili manje. U našem ispitivanju koristit će se prirast naprezanja oko 0,01 MPa/s i prosječni napon kojim se ostvaruje ovaj prirast iznosi 0,02 V.



### 3.3. Određivanje hrapavosti i tlačne čvrstoće diskontinuiteta

Čvrstoća i deformabilnost diskontinuiteta uvelike ovise o hrapavosti stijenke diskontinuiteta. Kako bi se izrazila hrapavost diskontinuiteta korišten je parametar „koeficijent hrapavosti diskontinuiteta“ (eng. Joint Roughness Coefficient, JRC) kojeg je razvio Barton (Barton, 1973). Kako bi utvrdili što točniju vrijednost koeficijenta JRC korišteno je nekoliko metoda utvrđivanja. Prvi dio bila je vizualna usporedba hrapavosti diskontinuiteta i standardiziranih profila diskontinuiteta s pridruženim vrijednostima JRC. Druga metoda koja je korištena je alternativna metoda koja se svodi na određivanje amplitude u odnosu na referentnu liniju diskontinuiteta i duljinu mjernog profila kojeg reprezentira određeni JRC. Prikaz obrazaca korištenih u ove dvije metode dan je na slici 3-8. Treća metoda određivanja vrijednosti JRC napravljena je korištenjem regresijske jednadžbe  $R_p$  te uvrštavanjem ove vrijednosti u jednadžbu za JRC. Ovi izrazi uzeti su na temelju objavljenih rezultata istraživanja iz rada (Jang et al., 2014):

$$JRC = 65.9(R_p - 1)^{0.302} - 9.65 \quad (3-1)$$

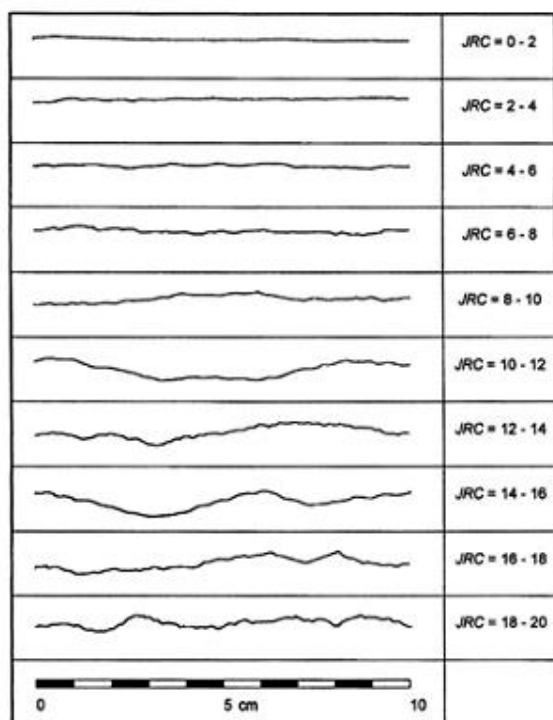
$$R_p = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2]^{1/2}}{L} \quad (3-2)$$

gdje su:  $x_i$ - horizontalna udaljenost mjerne točke na diskontinuitetu od početne točke

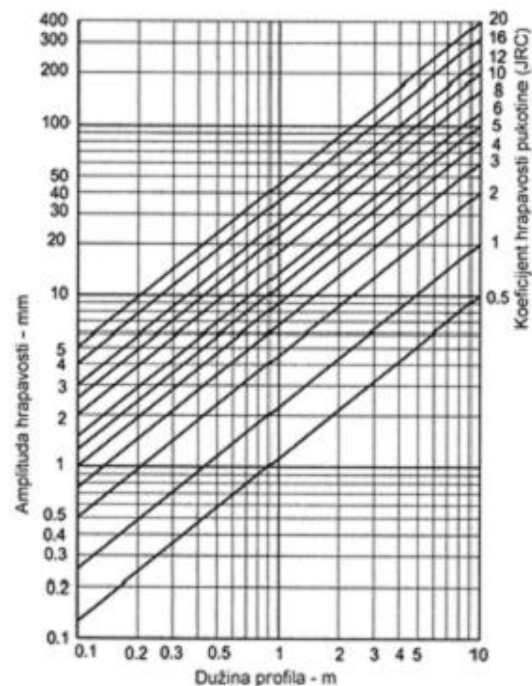
$y_i$ -vertikalna udaljenost točke na diskontinuitetu od referentne ravnine

$L$ -duljina duž diskontinuiteta od prve do zadnje mjerne točke

Način na koji je ovo provedeno je uzimanjem vrijednosti udaljenosti i amplitude duž diskontinuiteta na karakterističnim točkama. U prosjeku je uzimano 18 podataka na jednom diskontinuitetu. Izračunate su vrijednosti na diskontinuitetima s obje strana uzorka te je uzeta aritmetička sredina. Naknadno je obavljeno još profiliranje površine diskontinuiteta nakon razdvajanja uzoraka poslije sloma korištenjem prve metode. I ovi podaci su korišteni u procjeni vrijednosti JRC-a.



a)



b)

Slika 3-8. a) Prikaz standardiziranih profila diskontinuiteta s pridruženim vrijednostima JRC (Barton, N., Choubey V., 1977), b) prikaz obrasca za određivanje JRC-a pomoću amplitude i duljine diskontinuiteta (Barton, 1982)

Prilikom utvrđivanja JRC vrijednosti najveću težinu imala je treća metoda, a prva i druga metoda su više poslužile kao kontrola.

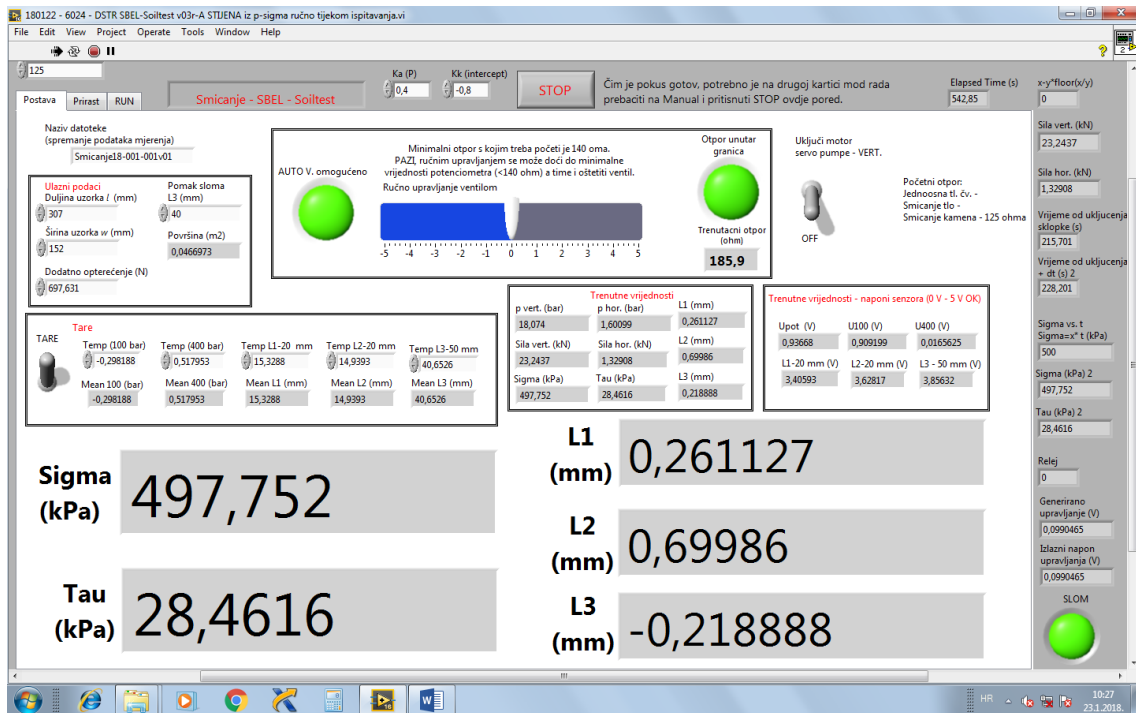
Vrijednost tlačne čvrstoće stijenki diskontinuiteta (eng. Joint Compressive Strength, JCS) i tlačne čvrstoće intaktnog materijala vrijednosti su koje se mogu dobiti korištenjem Schmidtovog čekića (sklerometra). Ta ispitivanja se najčešće provode prema preporučenoj metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena (Aydin, 2009). Schmidtov čekić postavlja se okomito na ispitivanu stijenku diskontinuiteta odnosno plohu intaktnog materijala. Napravljeno je po 15 ispitivanja za svaku stijenku diskontinuiteta kao i plohu intaktnog materijala te je na temelju njih dobivena srednja vrijednost iz koje je određena čvrstoća. Ove vrijednosti također spadaju u parametre posmične čvrstoće diskontinuiteta.

### 3.4. Opis računalnog programa korištenog u ispitivanjima

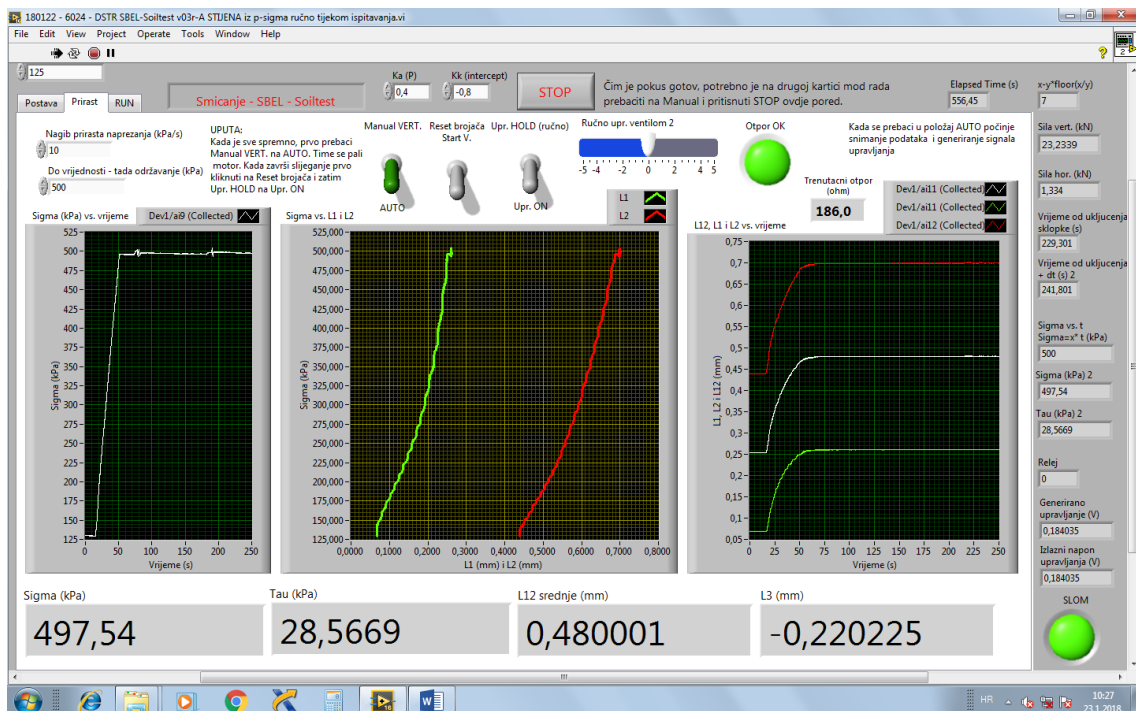
Upravljački program za određivanje posmične čvrstoće u uvjetima konstantnog normalnog opterećenja razvijen je pomoću računalnog programa LabVIEW. LabVIEW je programski paket za grafičko programiranje virtualnih instrumenata i on omogućuje akviziciju podataka, mjerenje, procesno upravljanje, analizu i prezentaciju podataka. Sučelje programa izgrađeno je pomoću blok dijagrama odnosno petlje koje upravljaju radom obiju pumpi potisnih cilindara. Uređaji za mjerenje pomaka i tlaka također su spojeni s računalom odnosno programom. Sučelje programa sastoji se od triju kartica koje se mogu vidjeti na slikama 3-9., 3-10. i 3-11. Upravljanje je brzo i jednostavno. Na prvoj kartici se unose osnovni podaci poput dimenzija i površine, zatim dodatno opterećenje kojeg uzrokuju podložne ploče i gornja čeljust. Ovdje se nalaze i sklopke za pokretanje ispitivanja i uključivanje pumpe vertikalnog cilindra. Nakon što su mjerni uređaji namješteni, prije početka ispitivanja potrebno je tarirati vrijednosti pomaka i tlaka. Ovdje se namješta početna vrijednost otpora koji pokazuje položaj regulacijskog ventila servo pumpe koja je iznosila 125 ohma. Na toj kartici se vide i trenutne vrijednosti svih mjernih uređaja koji su spojeni.

Na drugoj kartici zadaje se prirast naprezanja koji je određen u prethodnim ispitivanjima te vrijednost vertikalnog naprezanja do kojeg će rasti i nakon toga se održavati. Kada vertikalno naprezanje naraste do tražene vrijednosti ovdje se zatim uključuje motor pumpe horizontalnog cilindra i tako započinje smicanje. Prirast pomaka horizontalnog cilindra također je određen u prethodnim ispitivanjima i iznosi 0,0025 mm/s. Na ovoj kartici se još vidi prikaz dijagrama vertikalnih pomaka L1 i L2 u vremenu, zatim u odnosu na vertikalno naprezanje i odnos vremena i vertikalnog naprezanja. Treća kartica je produžetak druge i na njoj se vidi par dijagrama koji prikazuju odnose vremena, posmičnog posmika i posmičnog naprezanja.

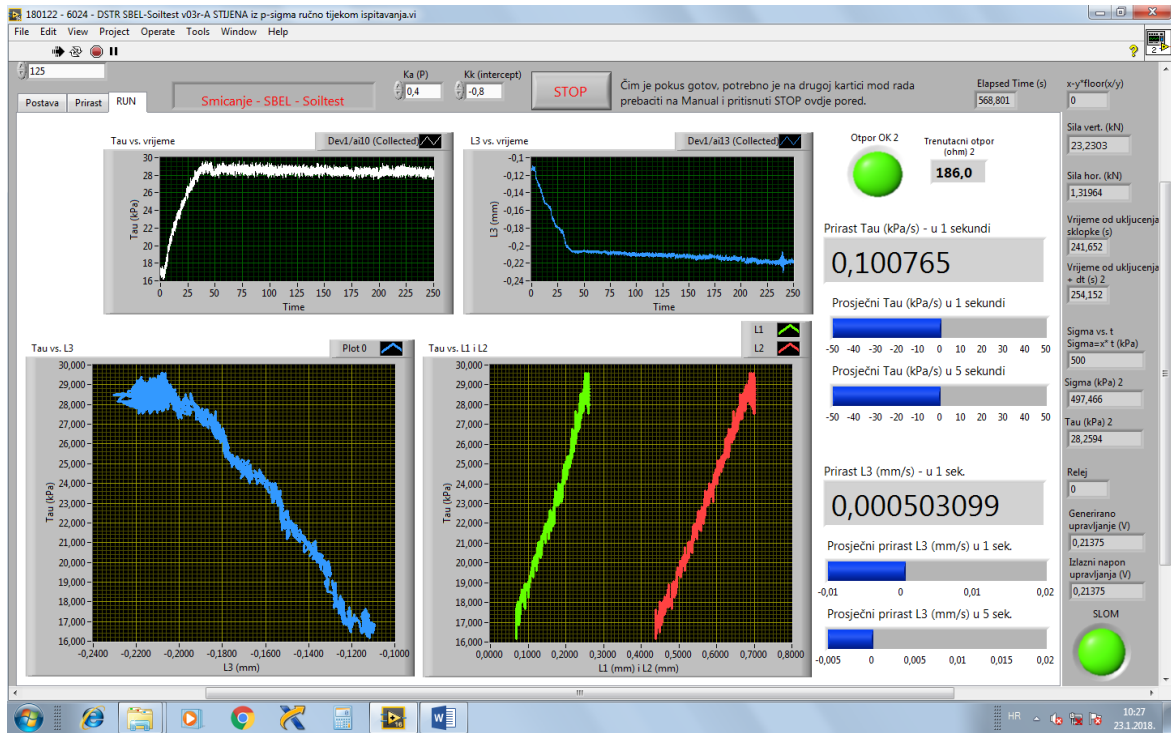
Najvažnije od svega je to što ovaj program tijekom ispitivanja prikuplja podatke, prikazuje ih u raznim grafovima te bilježi u datoteku na disku računala. Podaci se prikupljaju brzinom od 1000 uzoraka u sekundi u blokovima od 50 uzoraka što znači da se petlja odvija brzinom od 20 ponavljanja u sekundi. Dodatnom funkcijom se osigurava zapisivanje svakog desetog uzorka tj. efektivno dva uzorka u sekundi. Time se postiže relativno brza provedba petlje, što je bitno za dobro upravljanje, no sprječava se zapisivanje prevelikog broja podataka. Izlazni podaci su vrijeme, normalna i posmična sila, normalno i posmično naprezanje i pomaci triju LVDT-a.



Slika 3-9. Prikaz prve kartice sučelja programa



Slika 3-10. Prikaz druge kartice sučelja programa



Slika 3-11. Prikaz treće kartice sučelja programa

## 4. PROVEDENA ISPITIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE DISKONTINUITETA

### 4.1. Opis materijala uzoraka

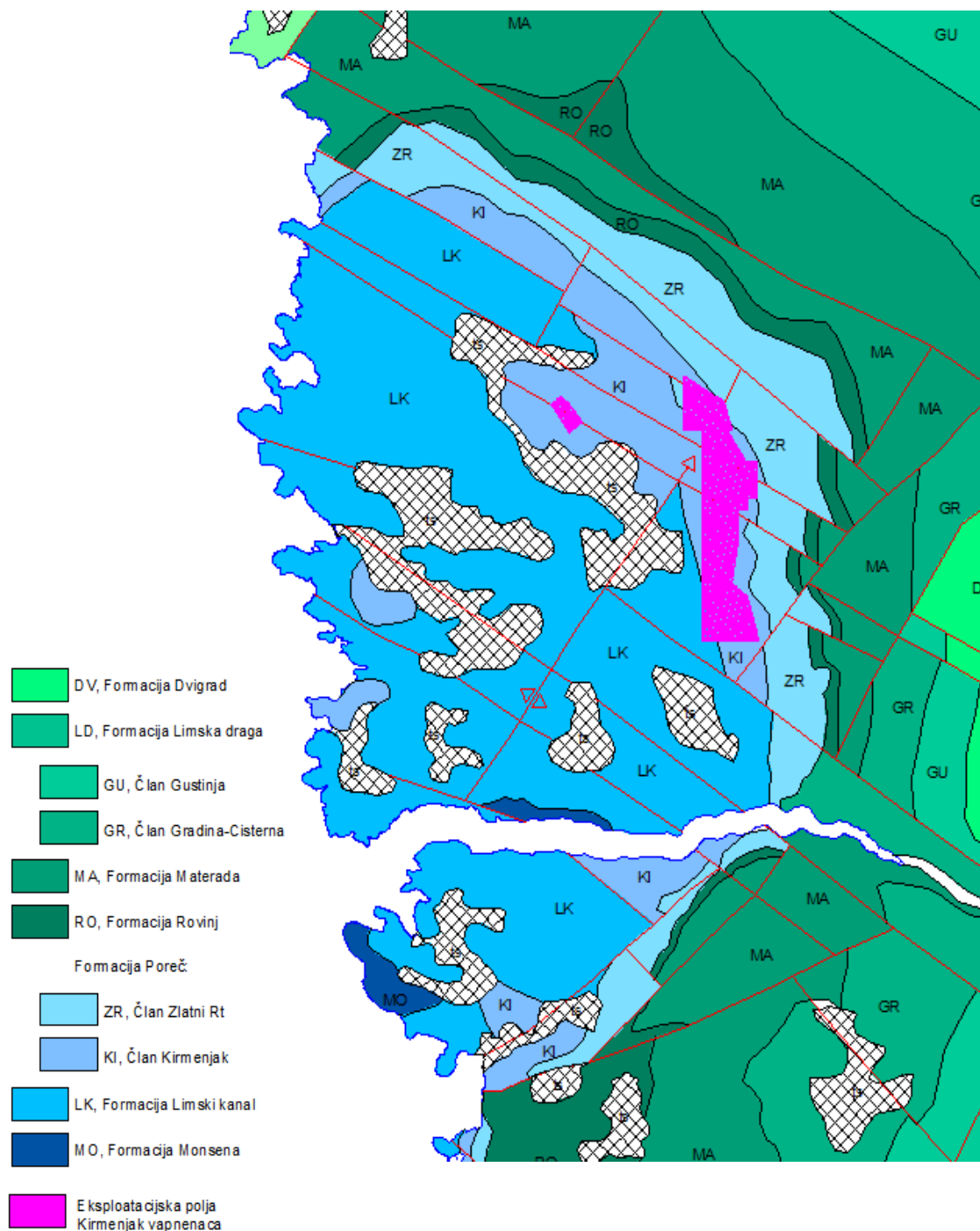
U ovom ispitivanju korišteni su uzorci prirodnog kamena vapnenca pod nazivom Kirmenjak (ili "Pietra d' Orsera" u Italiji). Naslage ovih vapnenaca protežu se kontinuirano zapadnim dijelom Istre, od Poreča do Rovinja, koje su jedino u području Linskog kanala tektonski prekinute.

Površinski kopovi vapnenca Kirmenjak smješteni su u eksploatacijskim poljima "Kirmenjak-jug" i "Kirmenjak-sjever" te "Valkarin" u Istri. Danas jedino aktivno eksploatacijsko polje "Kirmenjak-jug" prostire se od sela Kirmenjak na sjeveru do sela Marasi na jugu.

Na slici 4-1. dan je prikaz dijela geološke karte u Istri. Tijekom taloženja kirmenjak vapnenca vladajući utjecaj imali su utjecaji plime i oseke, isušivanje natplimskog okoliša s vadoznom dijagenozom. U plitkim ulegnućima vladali su močvarni uvjeti s taloženjem breča s crnim valuticama, tzv. "black-pebble" breče. Crne valutice i ulomci vrlo vjerojatno su nastali kao ostaci razaranja reduktivnih močvarnih taloga pri djelovanju visokih olujnih valova. Većina donjeg dijela Kirmenjak jedinice grade ritmička izmjenjena debelo uslojenih peletnih (porculanastih) mudstona i fenestralnih mudstona s proslojcima konglomerata i breča. Gornji dijelovi Kirmenjak jedinice taloženi su u sličnim uvjetima s jače izraženim periodima isušivanja i preplavlivanja uz nešto veću energiju vode. Ovdje se sedimentacija odvijala u mirnim okolišima plitkog potplimskog do muljevitog natplimskog pojasa. U ovim uvjetima je započeo proces dolomitizacije, prvo od neočvrstih vapnenačkih taloga u natplimskom okolišu, a kasnije se dolomitizacija nastavlja na već očvrstim vapnencima. To je početak nastajanja Fantazija dolomita (Miko et al., 2013).

Za ovo ležište možda i najznačajnija karakteristika je pojava stilolita. Stilolitizacija je proces otapanja stijene uslijed djelovanja tlaka. Parcijalnim otapanjem stijena može smanjiti obujam i do 30%. Ovisno o čistoći primarne stijene na površini stilolita zaostaje glinovita komponenta sivo-zelenkaste boje. Svakako je čist stilolitni šav indikator kompaktne stijene, ali ne mora značiti da ona nije tektonski raspucana. Slojnice također mogu biti stilolitizirane, a redovito se javljaju između određenih slojeva. Količina glinovite ispune ovisi o otvorenosti slojnice. Takve slojnice olakšavaju eksploataciju jer se blokovi mogu odvajati utovarivačem,

a prilikom obaranja same se odvajaju. Kirmenjak vapnenci javljaju u slojevima raznih debljina, od nekoliko centimetara do 2 metra.



Slika 4-1. Dio geološke karte Istre s naznačenim formacijama i eksploatacijskim poljima „Kirmenjak“ vapnenaca (Matičec et al., 2013)

Kvaliteta ovog kamena je na toj razini da je Komitet za spašavanje Venecije pri UN-u donio odluku kako je vapnenac tipa Kirmenjak ili "Pietra d' Orsera" jedini materijal koji se smije ugrađivati u tamošnje kamene građevine. On ima izrazitu otpornost na djelovanje morskih soli. Kamen koji se eksploatira u eksploatacijskom polju "Kirmenjak-jug" komercijalno se naziva "Kirmenjak" s podnazivima "Kirmenjak svijetli" ili "Kirmenjak tamni". Smjer piljenja s obzirom na teksturu stijene određuje estetski izgled površine, "kontra" piljenje okomito na slojevitost ili "po daski" paralelno sa slojevitošću, odnosno stilolitskim šavovima.

Kamen je boje slonovače s karakterističnim stilolitima vidljivim kod piljenja "kontra". Lom je plitkoškolkast, sitno hrapav do gladak. Relativna tvrdoća je po Mohsu 4 (Zvocak, S., Buić, I., 2016).

Iznos čvrstoće na tlak u suhom stanju kreće se u veličinama od 169 MPa. Poslije smrzavanja ta ista čvrstoća kreće se u veličinama od 163 MPa, a ova ispitivanja provedena su prema normi HRN EN 1926. Čvrstoća na savijanje kreće se u iznosima od 9,7 MPa, a ispitivanje je rađeno prema normi HRN EN 12372. Otpornost na habanje po metodi Böhme iznosi od 14,3 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>2</sup>, a ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN 14157. Otvorena poroznost iznosi 0,7%, a norma prema kojoj se ispitivalo je HRN EN 1936. Upijanje vode iznosi 0,12 %.

S ovakvim karakteristikama materijal je primjenjiv za sve vrste oblaganja, kako unutarnja tako i vanjska. Može se ugrađivati u svim klimatskim uvjetima (Zvocak, S., Buić, I., 2016).

Tri uzorka ovog kamena korištena se u ispitivanjima. Uzorci su vrlo precizno izrezani u obliku kvadra na pilani tvrtke Kamen d.d. Pazin. Prikaz uzoraka vidi se na slikama 4-2 do 4-4. Diskontinuiteti na sva tri uzorka su stilolitne pukotine. Svaki od tri uzorka sadrži dva diskontinuiteta na prosječnoj udaljenosti od 8 cm i ploha prostiranja oba diskontinuiteta je paralelna s gornjom odnosno donjom stranicom. Prikaz rezultata sve tri spomenute metode iz koje se modelirala vrijednost JRC dan je u tablici 4-1. Diskontinuiteti nemaju prekide i imaju suhu ispunu. U tablici 4-2. prikazani su podaci o svakom uzorku, a oni su dobiveni mjerenjima te iz rezultata spomenutih ispitivanja.



Tablica 4-1. Vrijednosti JRC za svaki uzorak

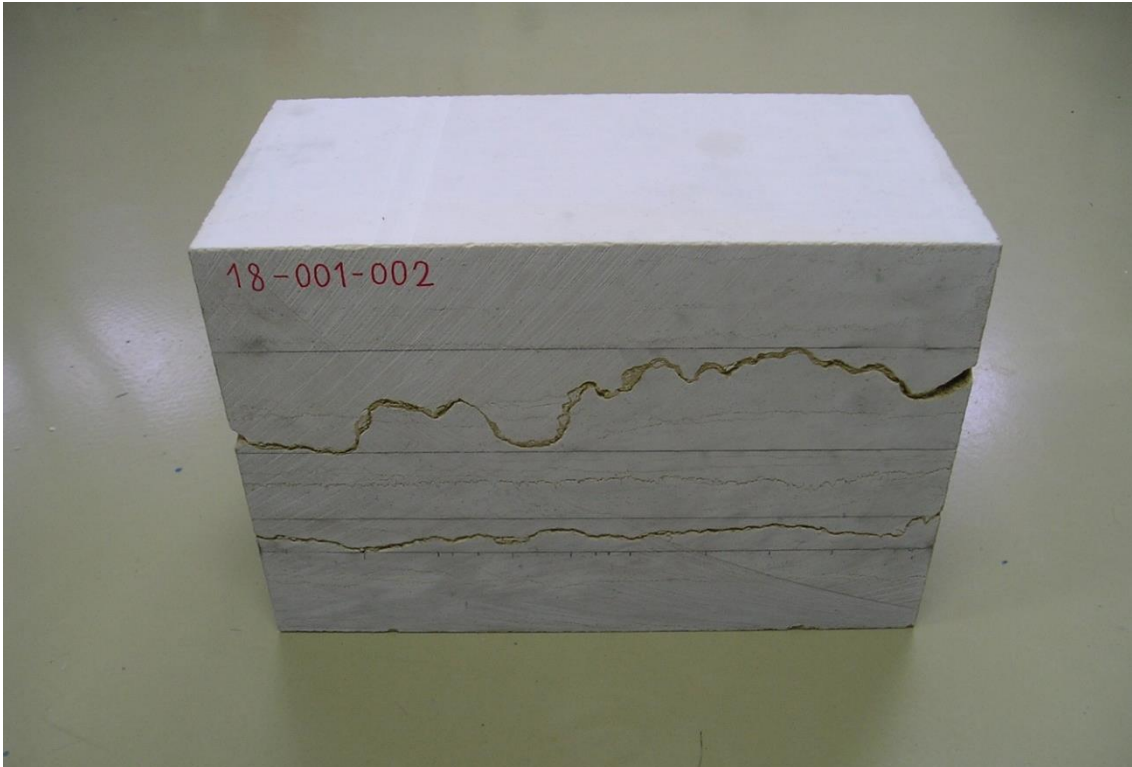
Laboratorijska oznaka	JRC metoda 1.	JRC metoda 2	JRC metoda 3.
18-001-001	16-18	20	20
18-001-002	14-16	20	15
18-001-003	16-18	18	16

Tablica 4-2. Podaci o uzorcima

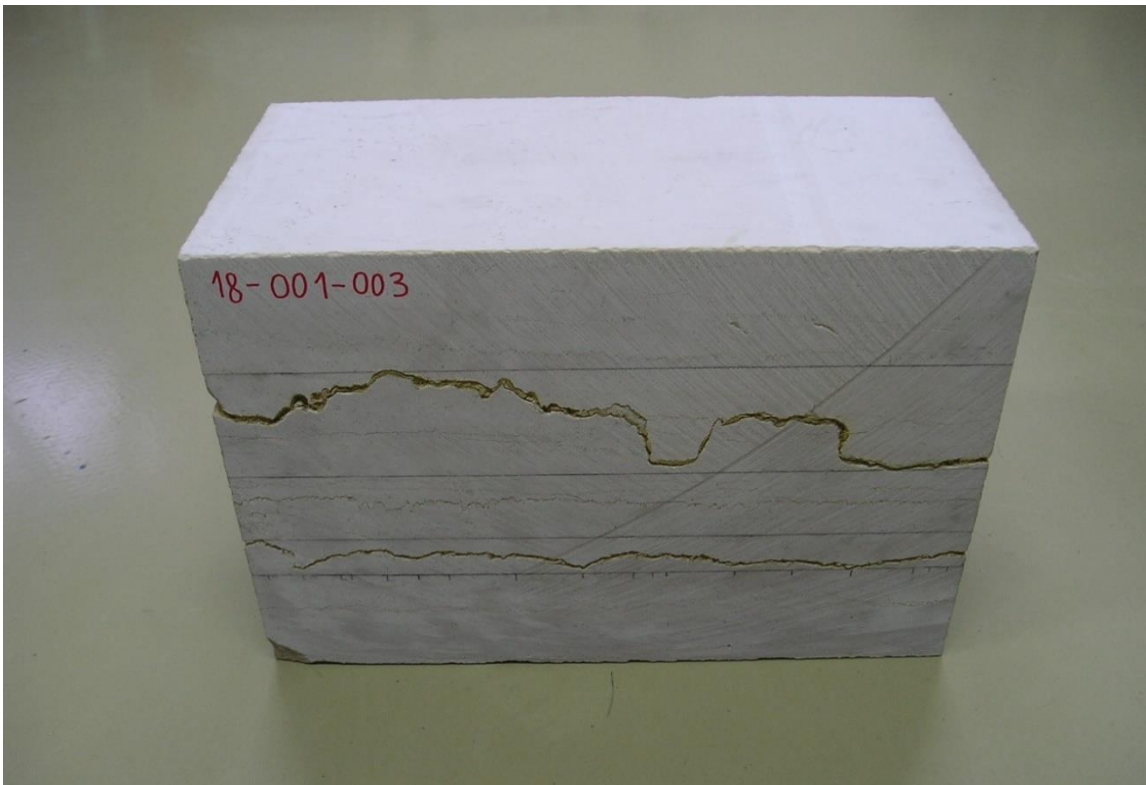
Laboratorijska oznaka uzorka	18-001-001	18-001-002	18-001-003
Visina x širina x duljina (cm)	21,8 x 15,2 x 30,7	22,4 x 15,0 x 30,7	23,0 x 15,0 x 30,7
Masa (kg)	24,44	24,42	24,58
Zijev diskontinuiteta (mm)	0,6	0,7	0,6
JRC	20	15	16
JCS (MPa)	56	56	62
Čvrstoća intaktnog materijala (MPa)	92	94	88



Slika 4-2. Prikaz prvog uzorka prije ispitivanja



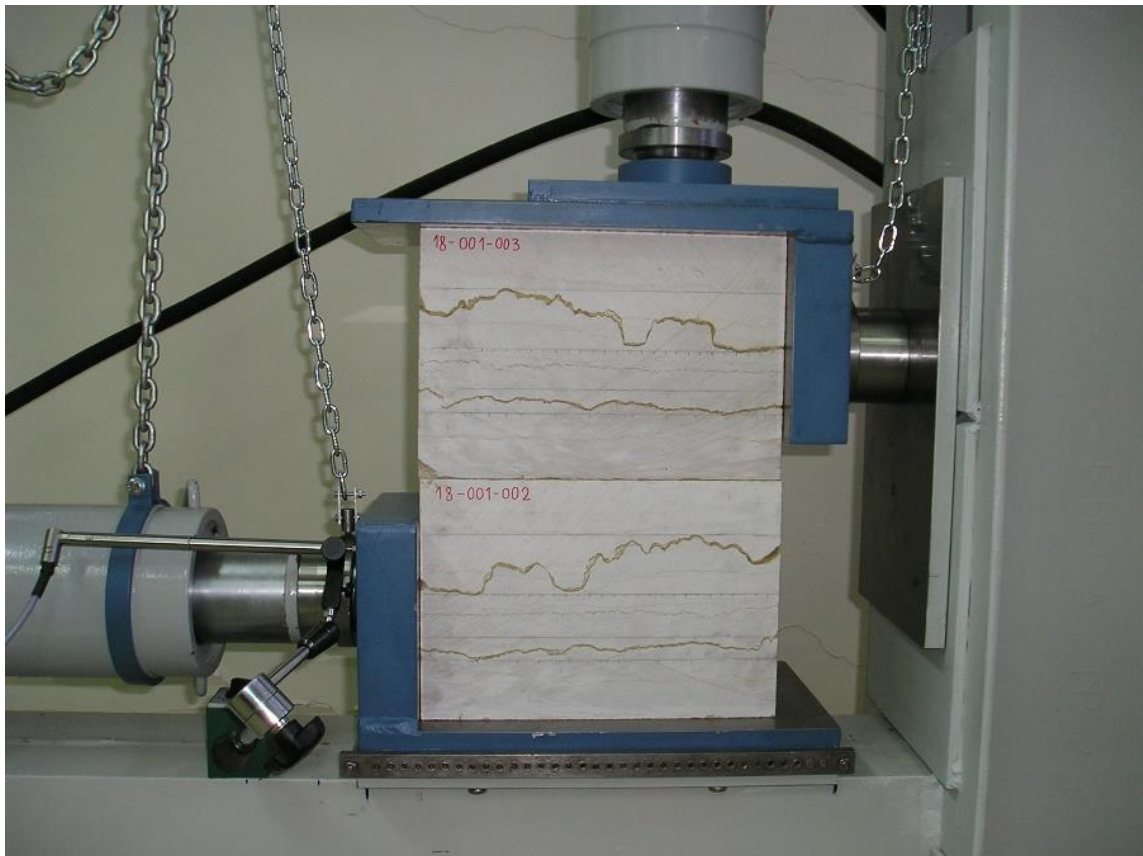
Slika 4-3. Prikaz drugog uzorka prije ispitivanja



Slika 4-4. Prikaz trećeg uzorka prije ispitivanja

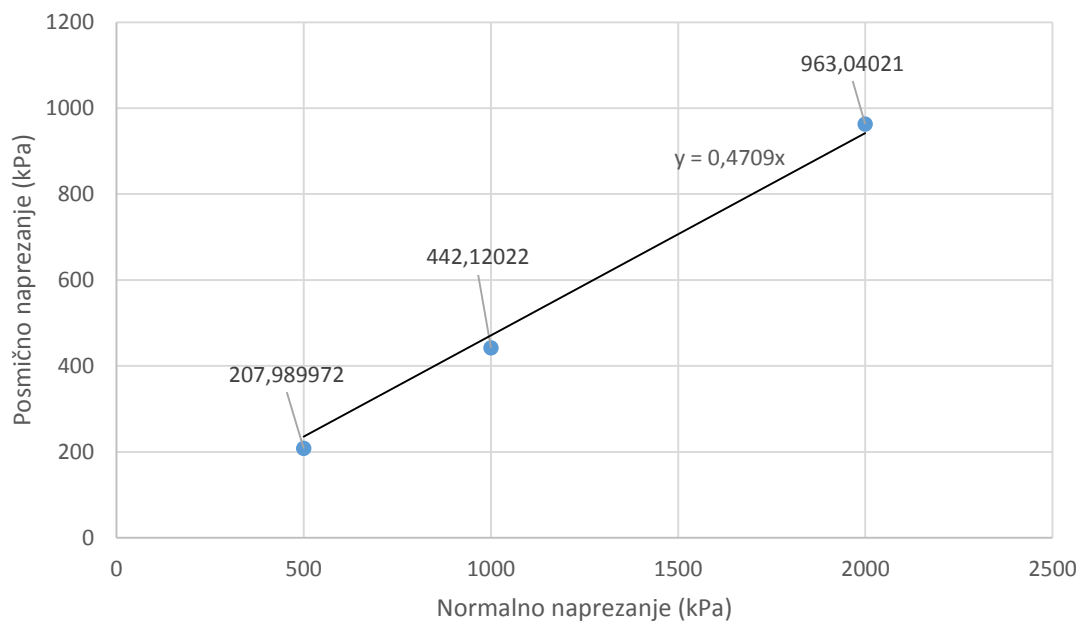
## 4.2. Određivanje baznog kuta trenja intaktnog materijala

Cilj ovog ispitivanja bilo je određivanje kuta trenja intaktnog materijala. Ovaj podatak bitan je prilikom proračuna posmične čvrstoće diskontinuiteta. Kako bi odredili kut trenja uzorci su ugrađeni u uređaj za posmik na način da je jedan uzorak postavljen na drugi što se može vidjeti na slici 4-5. Na ovaj način su u kontaktu ravne prerezane plohe intaktnog materijala. Napravljena su tri ispitivanja s različitim normalnim napreznjima kako bi se mogao dobiti pravac čvrstoće. Normalna napreznja su redoslijedom iznosila  $\sigma_1=500$  kPa,  $\sigma_2=1000$  kPa i  $\sigma_3=2000$  kPa. Na slici 4-6. prikazan je dijagram s rezultatima ispitivanja iz kojih je dobiven pravac čvrstoće s nagibom koji predstavlja bazni kut trenja. Izračunati bazični kut trenja iznosi  $\varphi_b=25,22$ .



Slika 4-5. Prikaz načina ispitivanja baznog kuta trenja intaktnog materijala

## Prikaz rezultata ispitivanja



Slika 4-6. Prikaz rezultata ispitivanja baznog kuta trenja intaktnog materijala

### 4.3. Provedba ispitivanja i dobiveni rezultati

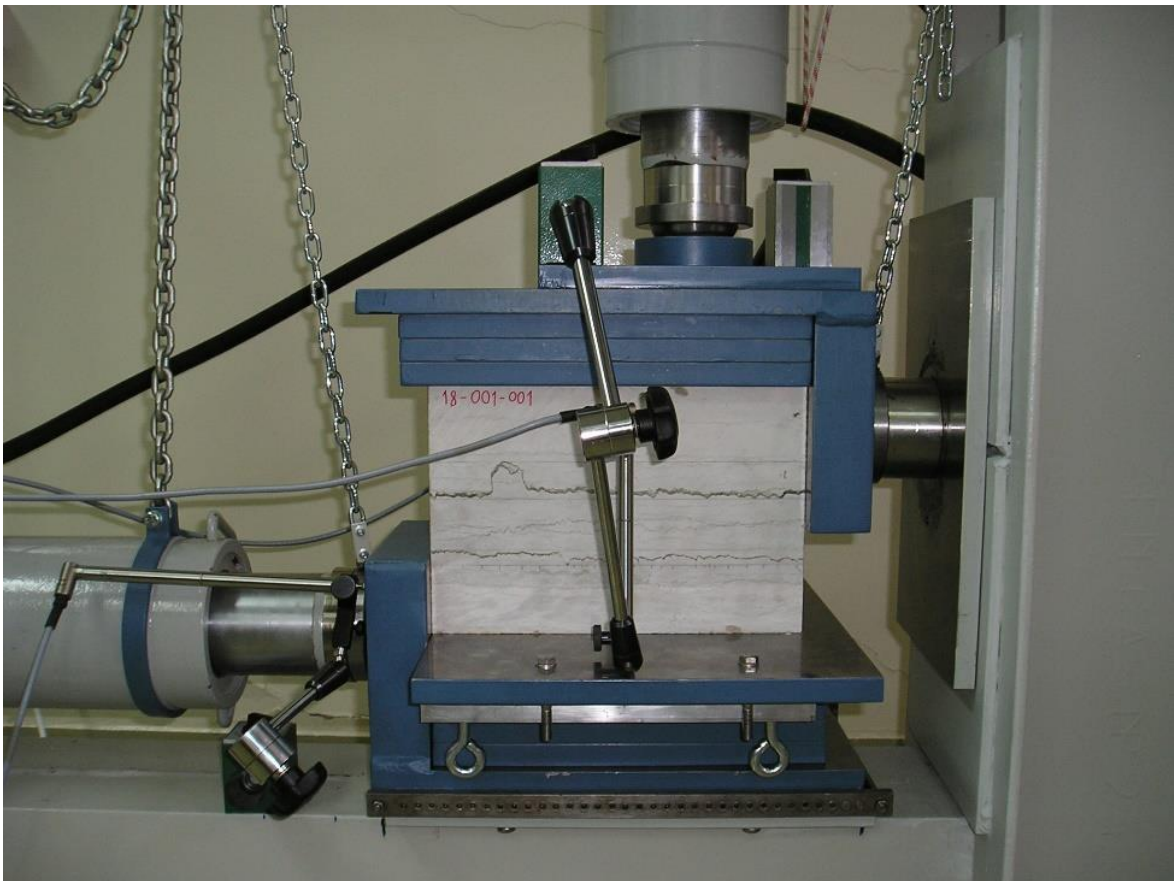
Prije ispitivanja na uzorcima za procjenu posmične čvrstoće diskontinuiteta koja se može očekivati prilikom ispitivanja korištena je još i Bartonova empirijska formula koja uključuje parametre baznog kuta trenja  $\varphi_b$ , JRC-a i JCS-a, čiji podaci su dobiveni iz ranijih ispitivanja na temelju izraza (Barton, 1973, 1976):

$$\tau = \sigma_n \tan \left( \varphi_b + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (4-1)$$

Za vrijednost normalnog naprezanja  $\sigma_n=500$  kPa, odnosno za prvi uzorak, posmična čvrstoća iznosila bi  $\tau = 1133,885$  kPa. Za drugi uzorak i za vrijednost  $\sigma_n=1000$  kPa posmična čvrstoća iznosila bi  $\tau = 1254,600$  kPa. Za treći uzorak i za vrijednost  $\sigma_n=2000$  kPa posmična čvrstoća iznosila bi  $\tau = 2307,381$  kPa.

Ispitivanja u uređaju za posmik su provedena u skladu s preporučenom metodom za određivanje posmične čvrstoće stijenskih pukotina. Uzorak je pravilnog oblika te nije bilo

napora oko ugradnje uzorka u uređaj. Uzorak je samo postavljen na podložne ploče na način da je centriran i da ploha diskontinuiteta ima slobodan hod. Na uzorak su postavljene razdjelne ploče i gornja čeljust. Na slici 4-7. prikazan je ugrađeni uzorak u uređaj za posmik. Prije početka ispitivanja spojeni su mjerni uređaji. Za pomak su korištena tri LVDT mjerna uređaja. Dva su pratila vertikalne pomake, a jedan je pratio horizontalne pomake. Tlačne ćelije na oba cilindra mjerila su iznos tlaka u vertikalnom i horizontalnom cilindru. U LabVIEW računalnom programu provjerava se da li je sve ispravno spojeno odnosno da li je sve spremno za ispitivanje. Svaki uzorak je imao različito normalno naprezanje kako bi se mogao odrediti pravac čvrstoće. Korištena normalna naprezanja iznosila su  $\sigma_1=500$  kPa,  $\sigma_2=1000$  kPa i  $\sigma_3=2000$  kPa. U prethodnom ispitivanju određeno je kako ostvariti prirast, a on je uzet prema Preporučenoj metodi i iznosio je 0,01 MPa/s za vertikalni potisni cilindar, te 0,15 mm/min za horizontalni potisni cilindar.

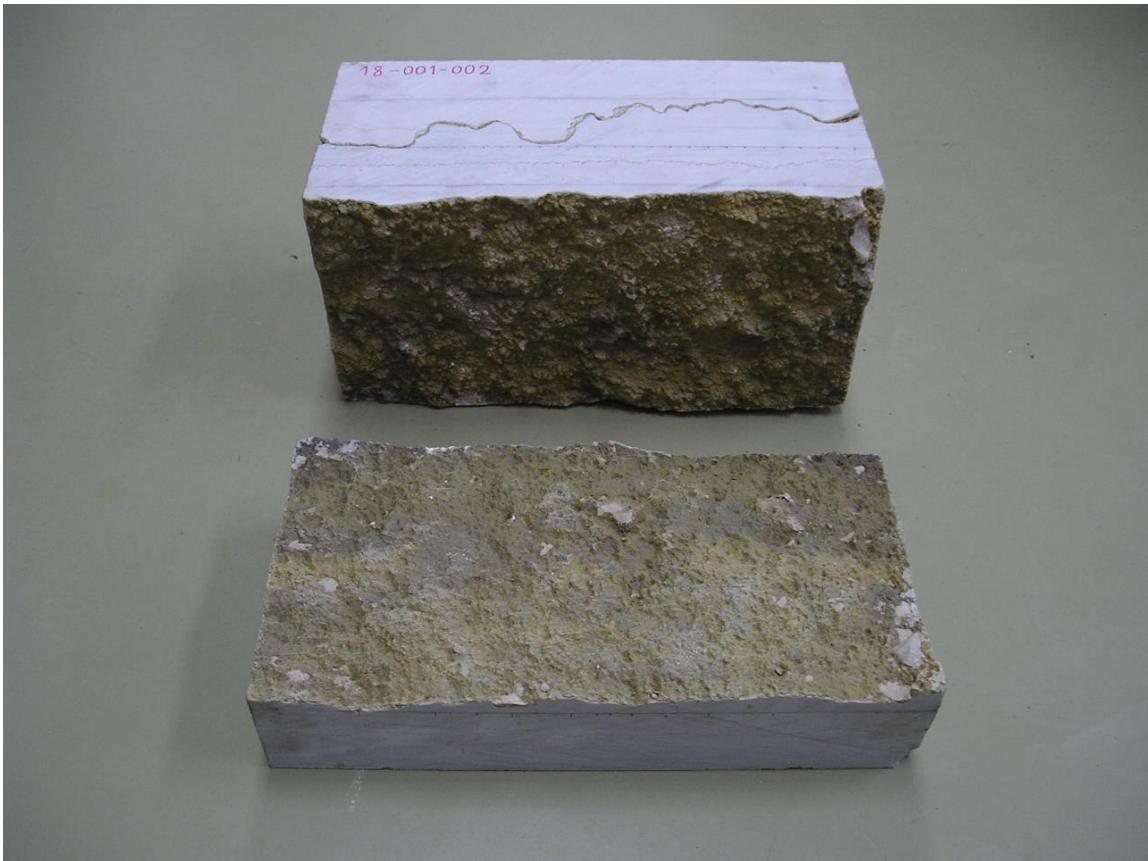


Slika 4-7. Uzorak spreman za ispitivanje ugrađen u uređaj za posmik

U ispitivanjima nije došlo do posmičnog sloma u potpunosti jer se radi o diskontinuitetima koji su stilolitske pukotine izuzetne hrapavosti. Ovo su jedne od najčvršćih pukotina koje se javljaju u prirodi. Prilikom ispitivanja u trenutku kada je posmično naprezanje značajno premašilo normalno naprezanje počelo se primjećivati zaokretanje uzorka što je onemogućilo potpuni posmični slom uzorka i zapravo uslijed zaokretanja dolazi do odvajanja na plohi diskontinuiteta. Nakon takvog sloma utvrđena je pojava stijenskih mostova koji su na taj način dodatno otežavali posmicanje uzorka. Rezultati ispitivanja vide se na slikama 4-11. do 4-16., a na slikama 4-8. do 4-10. prikazani su uzorci nakon sloma.



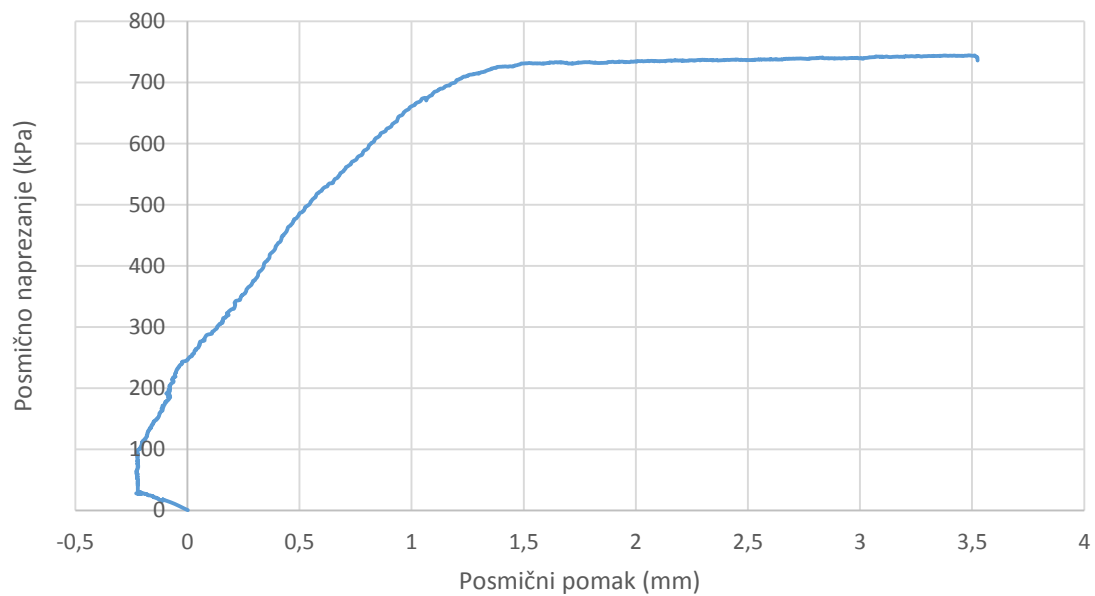
Slika 4-8. Prikaz prvog uzorka nakon sloma



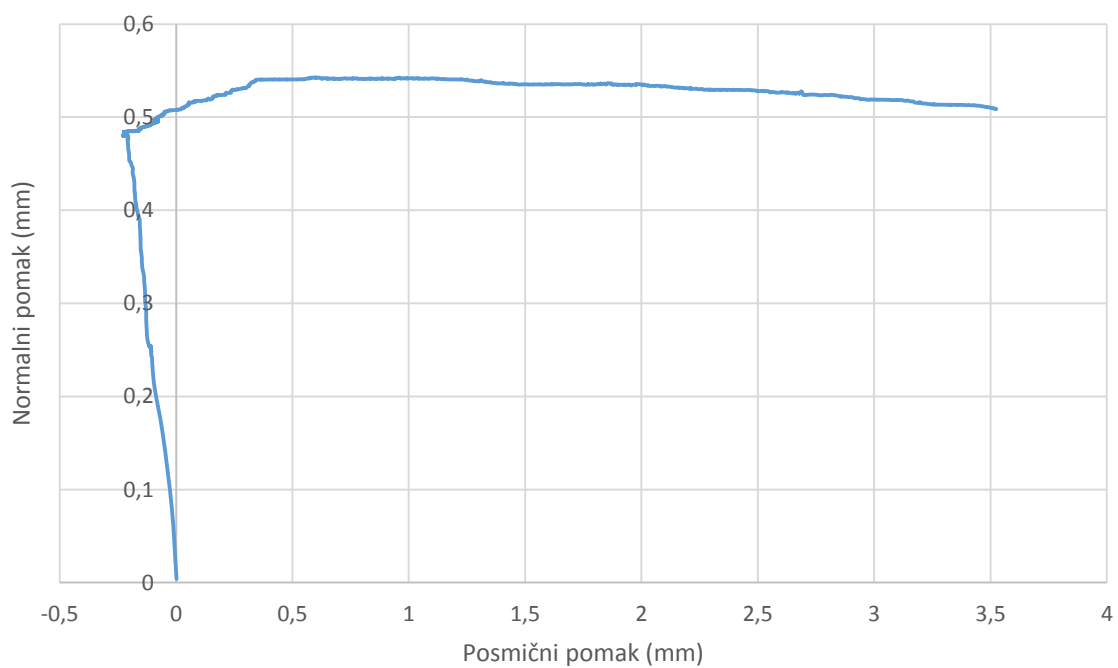
Slika 4-9. Prikaz drugog uzorka nakon sloma



Slika 4-10. Prikaz trećeg uzorka nakon sloma

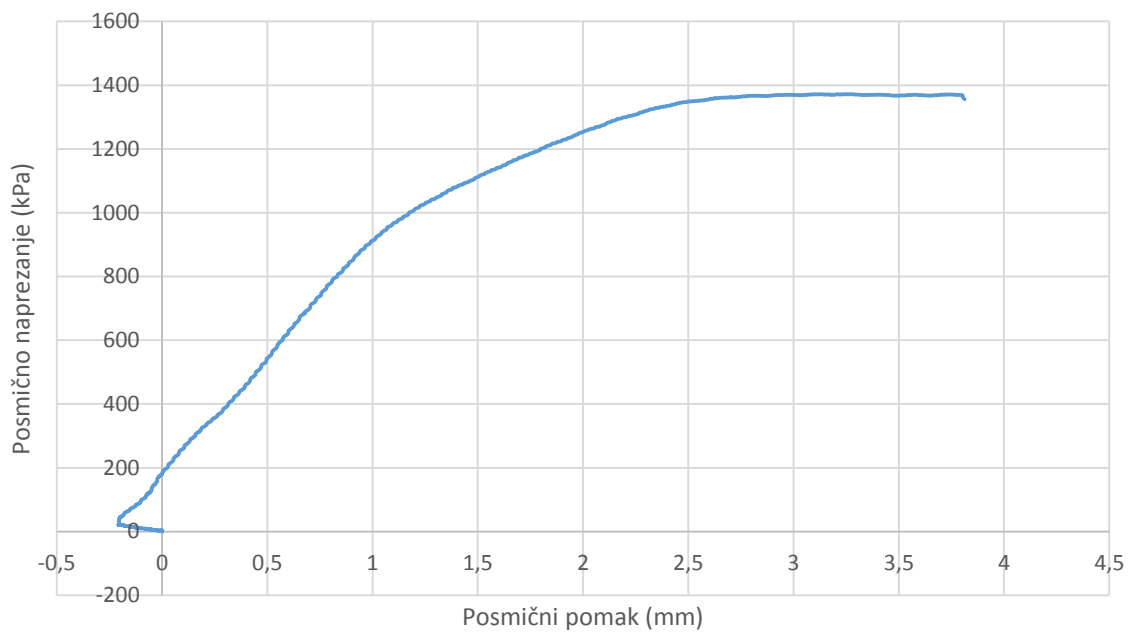


Slika 4-11. Slika prikazuje odnos posmičnog napreznaja i posmičnog pomaka za prvi uzorak (18-001-001)

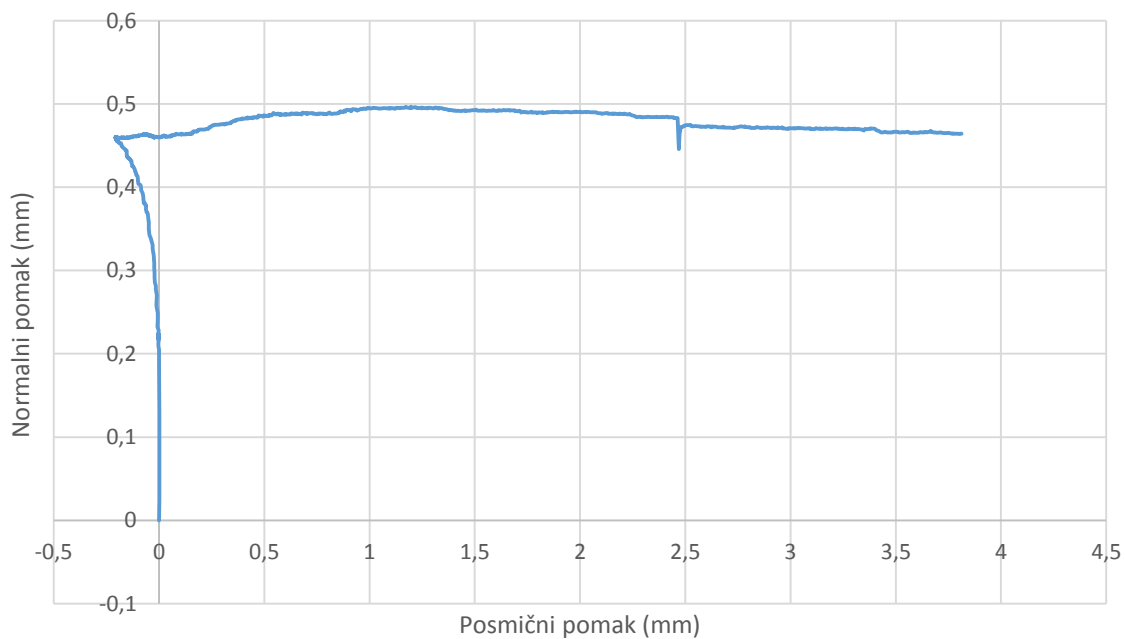


Slika 4-12. Slika prikazuje odnos normalnog pomaka i posmičnog pomaka za prvi uzorak (18-001-001)

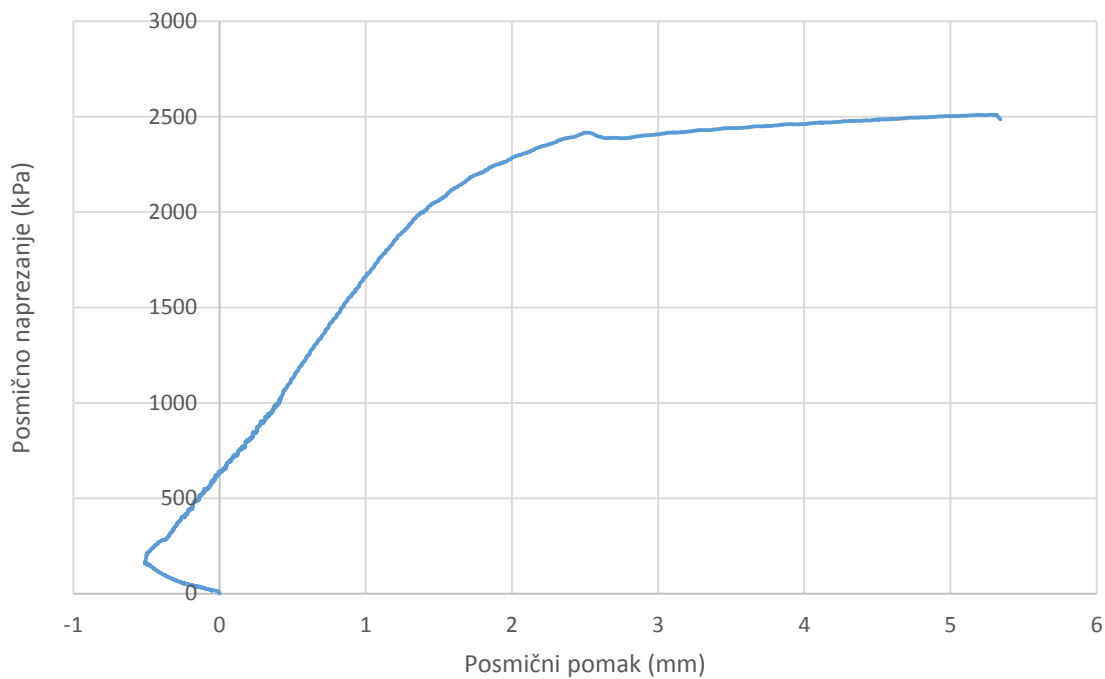




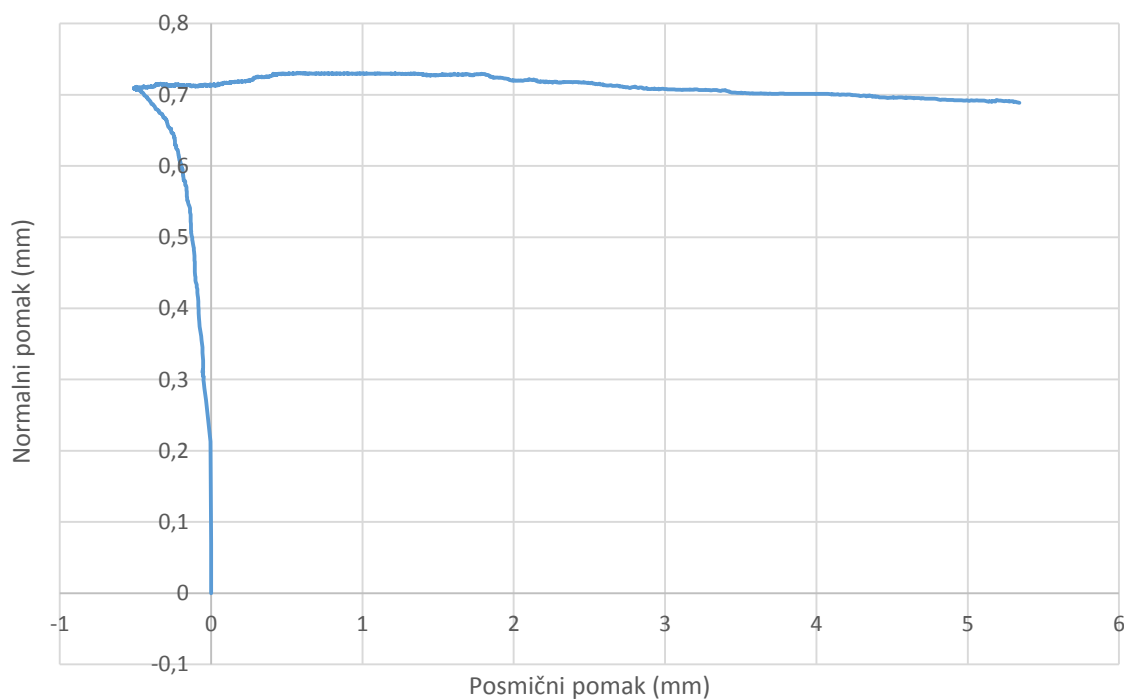
Slika 4-13. Slika prikazuje odnos posmičnog naprezanja i posmičnog pomaka za drugi uzorak (18-001-002)



Slika 4-14. Slika prikazuje odnos normalnog pomaka i posmičnog pomaka za drugi uzorak (18-001-002)

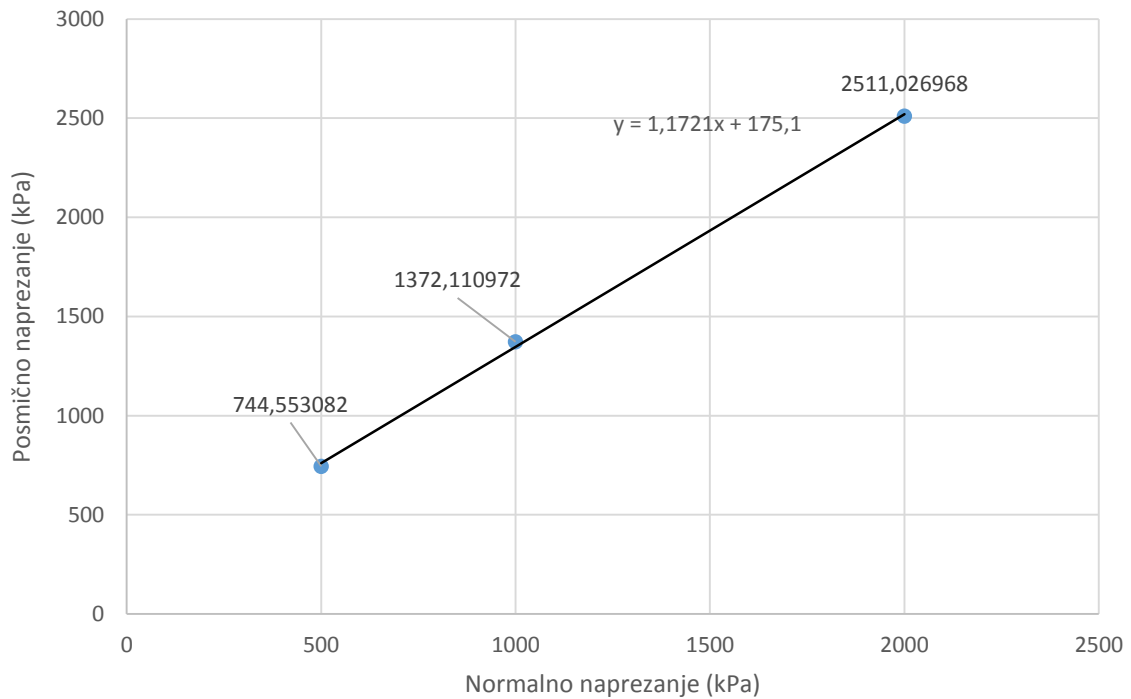


Slika 4-15. Slika prikazuje odnos posmičnog naprezanja i posmičnog pomaka za treći uzorak (18-001-003)



Slika 4-16. Slika prikazuje odnos normalnog pomaka i posmičnog pomaka za treći uzorak (18-001-003)

Iz ova tri ispitivanja izrađen je pravac čvrstoće koji se može vidjeti na slici 4-17. Posmična naprežanja za sva tri uzorka iznosila su  $\tau_1=744,553\text{ kPa}$ ,  $\tau_2=1372,111\text{ kPa}$  i  $\tau_3=2511,027\text{ kPa}$ . Iz pravca nagiba određuje se vrijednost kohezije koja iznosi  $c=175,1\text{ kPa}$  te vršni kut unutarnjeg trenja koji iznosi  $49,5^\circ$ , a koji predstavljaju najvažnije parametre u određivanju posmične čvrstoće diskontinuiteta.



Slika 4-17. Odnos posmičnog naprežanja i normalnog naprežanja za sva tri uzorka odnosno tri različita normalna naprežanja

Zbog prirode konstrukcije uređaja za posmik prilikom porasta normalnog naprežanja uzorak se blago posmakne u suprotnom smjeru što se očituje u negativnom predznaku posmičnog pomaka. Ovi karakteristični izgledi grafova normalnog pomaka i posmičnog pomaka pripisuju se konsolidaciji uzorka koja je nastupila prije nego je započeo posmik. Vidljivo je kako su vrijednosti naprežanja dobivenih u ispitivanju dosta slične vrijednostima naprežanja dobivenih iz Bartonove empirijske formule.

## 5. ZAKLJUČAK

Na uređaju za izravni posmik, razvijenom na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, provedena su ispitivanja na uzorcima vapnenca „Kirmenjak“ koji su sadržavali stilolitne diskontinuitete, čiji su rezultati prikazani u ovom radu. Kako bi se provelo ovo ispitivanje bilo je potrebno provesti niz drugih ispitivanja i mjerenja. Samo ispitivanje provedeno je u skladu s Preporučenom metodom Međunarodnog društva za mehaniku stijena, a upravljanje i prikupljanje podataka omogućeno je pomoću programa LabVIEW što je uvelike olakšalo sam postupak. Posmična čvrstoća ovih stilolitnih diskontinuiteta bila je veća od očekivane što je uzrokovalo i otežane uvijete tijekom ispitivanja. Prikazani su podatci ispitivanja i provjereni pomoću empirijske Bartonove formule za određivanje posmične čvrstoće diskontinuiteta čime su dobivene vrlo slične vrijednosti. Rezultati ispitivanja mogu poslužiti za razumijevanje ponašanja ovakvog tipa diskontinuiteta i to u zahvatima u stijenama na dubinama manjim od 100 metara. Za zahvate na većim dubinama potrebna su još dodatna ispitivanja s većim normalnim naprezanjima.

## 6. LITERATURA

1. ASTM, 2008. *Standard test method for performing laboratory direct shear strength test of rock specimens under constant normal force*. ASTM International, West Conshohocken, p 12
2. AYDIN, A. 2009. *ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 46, p 627-634
3. BARTON, N. 1973. *Review of a new shear strength criterion for rock joints*. Engineering Geology, 7(4), p 287-332
4. BARTON, N. 1976. *Shear strength of rock and rock joints*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 13(9), p 255-279
5. BARTON, N. 1976. *Shear strength of rock and rock joints*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 13(10), p 1-24
6. BARTON, N. 1982. *Shear strength investigations for surface mining*. Proc. Of the 3rd Conference on Surface Mining. Ch. 7, p 171-196
7. BARTON, N., CHOUBEY, V. 1977. *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 10(1-2), p 1-54
8. HZN, 2008. *Norma HRN EN 12372:2008, Metode ispitivanja prirodnoga kamena - - Određivanje čvrstoće pri savijanju pod koncentriranim opterećenjem*. HZN
9. HZN, 2008. *Norma HRN EN 1926:2008, Metode ispitivanja prirodnoga kamena – Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće*. HZN
10. HZN, 2017. *Norma HRN EN 14157:2017, Metode ispitivanja prirodnoga kamena – Određivanje otpornosti na abraziju*. HZN
11. HZN, 2008. *Norma HRN EN 1936:2008, Metode ispitivanja prirodnoga kamena – Određivanje gustoće i prostorne mase, ukupne i otvorene poroznosti*. HZN
12. ISRM, 2007. *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. In: Ulusay R Hudson JA (eds), Suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM, Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara

13. JANG, H., KANG, S., JANG, B. 2014. *Determination of Joint Roughness Coefficients Using Roughness Parameters*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, p 2061–2073
14. JGS, 2008. *Method for direct shear test on a rock discontinuity*. Japanese Geotechnical Society, Tokyo, p 8
15. JIANG, Y., XIAO, J., TANABASHI, Y., MIZOKAMI, T. 2004. *Development of an automated servo – controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, p 275 – 286
16. MATIČEC, D., FUČEK, L., PALENIK, D., OŠTRIĆ, N. 2013. *Geološka karta i tumač u „Rudarsko-geološka studija potencijala i gospodarenja mineralnim sirovinama Istarske županije“*. Studija. Zagreb: Hrvatski geološki institut.
17. MIKO, S., KRUK, B., DEDIĆ, Ž., KRUK, LJ., PEH, Z., KOVAČEVIĆ-GALOVIĆ, E., GABRIĆ, A. 2013. *Rudarsko-geološka studija potencijala i gospodarenja mineralnim sirovinama Istarske županije*. Studija. Zagreb: Hrvatski geološki institut
18. MURALHA, J., GRASSELLI, G., TATONE, B., BLUMEL, M., CHRYSSANTHAKIS, P., YUAJING, J. 2014. *ISRM Suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(1), p 291-302
19. USACE, 1980. *Method of test for direct shear strength of rock core specimens*. United States Army Corps of Engineers, Vicksburg, p 9
20. ZVOČAK, S., BUIĆ, I. 2016. *Elaborat o rezervama AG i TG kamena na eksploatacijskom polju „Kirmenjask-jug“*. Kamen d.d. Pazin