

Utjecaj brzine reznog alata na učinak rezanja stijena

Vukšić, Andrija

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:877804>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**



Repository / Repozitorij:

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



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

UTJECAJ BRZINE REZNOG ALATA NA UČINAK REZANJA STIJENA
Završni rad

Andrija Vukšić
R 4078

Zagreb, 2020.



KLASA: 602-04/19-01/148
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 23.09.2020.

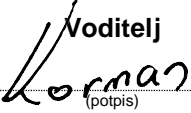
Andrija Vukšić, student

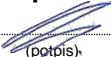
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/148, UR.BR. 251-70-12-20-2 od 05.05.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

UTJECAJ BRZINE REZNOG ALATA NA UČINAK REZANJA STIJENA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu doc. dr. sc. Tomislav Korman, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)
doc. dr. sc. Tomislav Korman
(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)
Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović
(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)
Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek
(titula, ime i prezime)

UTJECAJ BRZINE REZNOG ALATA NA UČINAK REZANJA STIJENA

Andrija Vukšić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Lančana sjekačica jedan je od najvažnijih rudarskih strojeva u eksploataciji arhitektonsko-građevnog kamena. Učinkovitost rada lančane sjekačice uvelike ovisi o brzini rezanja. Shodno tome, provedena su ispitivanja na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena. Tijekom ispitivanja mjerene su horizontalna, bočna i vertikalna komponenta duž cijelog uzorka i pri različitim brzinama na kontaktu rezne pločice sa uzorkom. Na temelju provedenih analiza dolazi se do zaključka da su prosječne vrijednosti sila za sve početne brzine približno jednake, te da su početna brzina rezanja pri kontaktu rezne pločice i uzorka i vrijeme dostizanja prosječne vrijednosti sila duž cijelog uzorka obrnuto proporcionalni.

Ključne riječi: lančana sjekačica, brzina rezanja, sile rezanja, rezna pločica
Završni rad sadrži: 30 stranica, 4 tablice, 28 slika, 0 priloga, i 21 referenca.
Jezik izvornika: Hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentori: doc.dr.sc. Tomislav Korman
Ocjenjivači: doc.dr.sc. Tomislav Korman
prof.dr.sc. Trpimir Kujundžić
doc.dr.sc. Mario Klanfar

Datum obrane: 28.9.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. LANČANA SJEKAČICA	2
2.1. Lančana sjekačica kroz povijest.....	2
2.2. Konstrukcijske veličine lančane sjekačice	3
2.3. Radne veličine lančane sjekačice	7
3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	8
4. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE	11
4.1. Uzorak za ispitivanja.....	11
4.2. Uređaj za pravolinijsko rezanje.....	13
4.3. Mjerni pretvornik sile.....	14
4.4. Tijek ispitivanja.....	17
4.5. Obrada podataka.....	20
5. ANALIZA REZULTATA	24
6. ZAKLJUČAK	28
LITERATURA	29

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Lančana sjekačica na tračnicama (Dunda i Kujundžić, 2003).	2
Slika 2-2 Osnovni dijelovi lančane sjekačice (Sariisik et al, 2010).	3
Slika 2-3 Lanac, segment lanca, razne pločice i zubi (Dunda, Kujundžić, 2003).	4
Slika 2-4 Serija sa šest nosača i osam reznih pločica (Dunda i Kujundžić, 2003).	5
Slika 2-5 Rezne pločice a) kvadratičnog, b) okruglog, c) zvjezdastog oblika (Primavori, 2005).	5
Slika 2-6 a) napadni kut α i kut otklona β , b) bočni napadni kut γ (Korman, 2014).	6
Slika 2-7 Napadni kutevi reznih pločica (Mitsubishi materials, 2017).	6
Slika 2-8 Uvjeti rezanja a) uklješteni, b) neuklješteni (Korman, 2014).	7
Slika 2-9 Radne veličine lančane sjekačice (Pellegrini, 2009).	7
Slika 3-1 Rezultantna sila i njene komponente (Korman, 2014).	8
Slika 3-2 Tipovi loma i amplitude sila za vrijeme rezanja (Mohamad, 1992).	9
Slika 4-1 Ispitivani uzorak	12
Slika 4-2 Shema kratkohodne blanjalice za metal (Nedić i Lazić, 2007).	13
Slika 4-3 Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena s mjernim pretvornikom	14
Slika 4-4 Položaj traka za mjerenje deformacija (Saglam i Unuvar, 2001).	15
Slika 4-5 Troosni mjerni pretvornik sile (Korman, 2014).	16
Slika 4-6 HBM uređaj za povezivanje mjernog pretvornika s računalom s tri priključena kanala za mjerenje horizontalne, bočne i vertikalne komponente	17
Slika 4-7 Uređaj za podešavanje dubine reza – mikroura	18
Slika 4-8 Prikaz pripremljenog uzorka neposredno prije samog rezanja na početnoj udaljenosti	19
Slika 4-9 Vertikalna sila na početku reza (zelena linija označava početak reza)	20
Slika 4-10 Udaljenost u vrha rezne pločice do uzorka	21
Slika 4-11 Dijagram brzine gibanja rezne pločice u odnosu na hod rezne pločice	21
Slika 4-12 Određivanje prosječnih sila duž cijelog reza	22
Slika 5-1 Prosječne vrijednosti sila pri rezanju duž cijelog uzorka	24
Slika 5-2 Prosječne vrijednosti sila pri ulasku rezne pločice u uzorak	24
Slika 5-3 Vrijeme pri kojem dolazi do dostizanja prosječne vrijednosti sila (crvena linija), brzina 0,77 m/s	25

Slika 5-4 Vrijeme pri kojem dolazi do dostizanja prosječne vrijednosti sila (crvena linija), brzina 0,58 m/s	26
Slika 5-5 Vrijeme pri kojem dolazi do dostizanja prosječne vrijednosti sila (crvena linija), brzina 0 m/s	26

POPIS TABLICA

Tablica 4-1 Fizičko-mehanička svojstva ispitnog uzorka (Cemtra d.o.o, 2006).....	12
Tablica 4-2 Prosječne vrijednosti sila pri početnoj brzini kretanja od 0 m/s na kontaktu rezne pločice i uzorka	22
Tablica 4-3 Prosječne vrijednosti sila pri početnoj brzini kretanja od 0,58 m/s na kontaktu rezne pločice i uzorka	23
Tablica 4-4 Prosječne vrijednosti sila pri početnoj brzini kretanja od 0,77 m/s na kontaktu rezne pločice i uzorka	23

Popis korištenih oznaka i jedinica

Oznaka	Jedinica	Opis
AG kamen	-	arhitektonsko – građevni kamen
α	(°)	napadni kut rezne pločice
β	(°)	kut otklona
γ	(°)	bočni napadni kut rezanja
δ	(°)	bočni kut rezne pločice
A	(m ²)	površina
v	(m/s)	brzina
d	(mm)	dubina reza
U	(m/s)	brzina posmaka stroja
u_t	(m/s)	brzina lanca
u	(mm)	udaljenost rezne pločice do uzorka
F_c	(N)	tangencijalna ili horizontalna sila rezanja
F_n	(N)	normalna ili vertikalna sila rezanja
F_f	(N)	bočna sila rezanja

1. UVOD

Prema članku 5. Zakona o rudarstvu (NN 52/18, 98/19), mineralne sirovine u Hrvatskoj dijele se na mineralne sirovine za industrijsku preradu, mineralne sirovine za proizvodnju građevinskog materijala, arhitektonsko – građevni kamen (kasnije AG kamen) i mineralne sirovine kovina. Podjela kamena na tehničko–građevni i AG kamen potpuno je logična jer se istraživanje, eksploatacija, obrada i namjena istih potpuno razlikuju (Dunda, Kujundžić, 2003). Ključno svojstvo AG kamena za namjenu u industriji jest prvenstveno u izgledu, a zatim i u mogućnosti stvaranja pravilnih blokova odgovarajućih dimenzija (Ashmole, 2004). Za dobivanje blokova najčešće se koriste dijamantna žična pila i lančana sjekačica, zasebno ili u međusobnoj kombinaciji. Najefikasniji način dobivanja blokova jest rad dijamantne žične pile i lančane sjekačice u kombinaciji, pri čemu sjekačica pili horizontalne rezove, a dijamantna žična pila vertikalne.

U ovom radu poseban je naglasak na lančanoj sjekačici, čija učinkovitost ovisi o pravilnom izboru konstrukcijskih i radnih veličina stroja, reznih elemenata te uvjeta i načina eksploatacije u određenoj vrsti stijene. Radne veličine su brzina posmaka stroja i brzina reznog lanca, a konstrukcijske veličine su snaga pogonskog motora, duljina mača i oblik te raspored reznih pločica na lancu sjekačice (Korman, 2014).

Cilj ovog rada je znanstveno utvrditi utjecaj brzine rezanja pri nailasku reznog alata na stijenu, na energiju i sile rezanja. Te sile imaju značajan utjecaj na mehanička svojstva elemenata lančane sjekačice i na ukupnu energiju rezanja. Ispitivanja se provode na uzorku iz kamenoloma „Redi“, nedaleko od Trogira, na modificiranoj blanjalici za metal, koja predstavlja uređaj za pravolinijsko kretanje, nosaču i reznoj pločici s lančane sjekačice CH – 60, tvrtke Pellegrini. Hipoteza postavljena prije ispitivanja jest da brzina rezanja u znatnoj mjeri utječe na sile i ukupnu energiju rezanja.

2. LANČANA SJEKAČICA

2.1. Lančana sjekačica kroz povijest

Lančane sjekačice razvile su se od podsjekačica i zasjekačica. Osnovna razlika između podsjekačica i zasjekačica, osim u orijentaciji reza, jest u namjeni. Podsjekačice su se uglavnom upotrebljavale na frontalnim, čelnim otkopima ugljena i soli, a zasjekačice pri izradi hodnika. Ostvarenjem mogućnosti rezanja u svim smjerovima prestaje podjela i upotrebljava se naziv sjekačica (Dunda, Kujundžić, 2003).

Prva prilagodba rudarske podsjekačice za primjenu u kamenolomima napravila je njemačka tvrtka Korfmann. Debljina reza iznosila je 80 mm, maksimalne dubine 75 cm, a potom 130 cm. Stroj se kretao po tračnicama; maskimalna duljina reza bez premještanja tračnica iznosila je 9 m. Premještaj tračnica odvijao se pomoću vlastite dizalice u sklopu stroja (Dunda, Kujundžić, 2003). Današnji učinak radnog elementa seže i do 4,5 m za horizontalni rez i 7,4 m za vertikalni rez, dok se debljina reza kod manjih duljina radnog elementa smanjila i do 27 mm (Primavori, 2005). Iako je način gibanja ostao nepromijenjen (slika 2-1), tračnice se premještaju pomoću hidrauličkih stopa. U svrhu veće mobilnosti koriste se samohodne sjekačice, čije podvozje može biti na gusjenicama ili kotačima (Korman, 2014).



Slika 2-1 Lančana sjekačica na tračnicama (Dunda i Kujundžić, 2003).

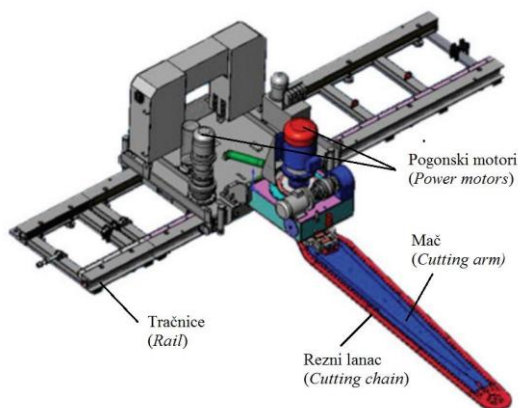
Lančane sjekačice primjenjuju se u površinskoj i podzemnoj eksploataciji, na izradi usjeka, dobivanju primarnih i komercijalnih blokova te uklanjanju otkrivke. Sjekačica je izrazito učinkovita u kombinaciji rada s dijamantnom žičnom pilom, iako najveću prednost u

samostalnom radu predstavlja jednostavnost pripremnih radnji, koje obuhvaćaju niveliranje tračnica i premještanje stroja (Korman, 2014).

2.2 Konstruktivne veličine lančane sjekačice

Ključna veličina pri odabiru lančane sjekačice je duljina radnog elementa, tj. mača, koja se odabire shodno s duljinom projektiranog reza. Povećanjem duljine mača, povećava se ukupna snaga i masa sjekačice kojom su određene maksimalne vrijednosti brzine posmaka i brzine lanca (Korman, 2014).

Glavni dijelovi lančane sjekačice prikazani su na slici 2-2. Radni element, odnosno mač, predstavlja glavni dio lančane sjekačice. Na njemu se nalazi beskonačni lanac s nosačima za rezne pločice koje se pričvršćuju uz pomoć vijaka, da bi se izbjeglo mijenjanje čitavog nosača u slučaju istrošenosti. Pokretanje lanca ostvaruje se pomoću lančanika koji je preko reduktora spojen s pogonskim motorom. Stroj se giba po tračnicama pomoću motora za posmak stroja. Lančana sjekačica sadržava i zasebne motore za zakretanje mača, postavljanje u horizontalni položaj i motor s pumpom za podmazivanje (Korman, 2014).



Slika 2-2 Osnovni dijelovi lančane sjekačice (Sariisik et al, 2010).

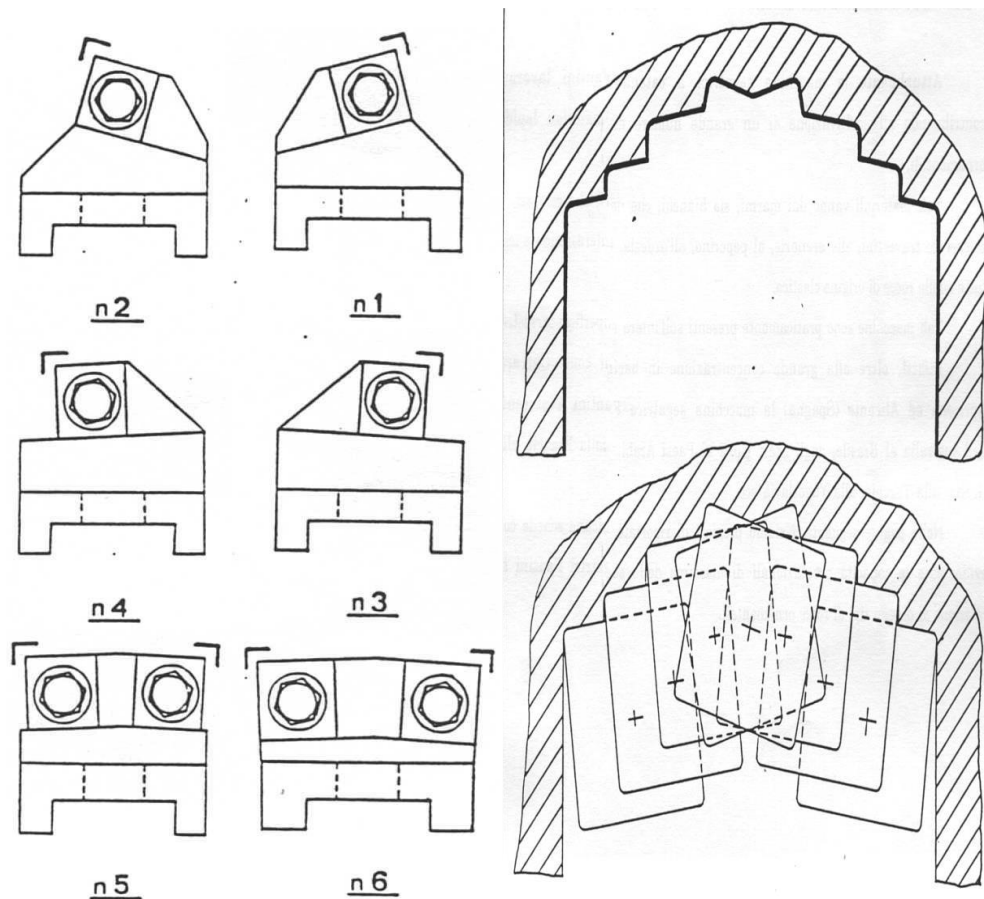
Posebnu pažnju valja posvetiti reznom lancu. Rezni lanac se sastoji od članaka koji su povezani spojnicama, koje su učvršćene pomoću zatika i osigurane osiguračima. Na svakom je članku rezni nosač s reznim pločicama. Broj nosača uvjetovan je vrstom stijene i načinom piljenja (mokrim ili suhim). Na slici 2-3 prikazan je segment reznog lanca i njegovi elementi – rezne pločice i zubi. Prva rezna pločica služi za otvaranje reza, a ostale za proširivanje. Simetrično postavljanje reznih pločica omogućuje raspodjelu ukupnih naprežanja, odnosno

smanjenje naprezanja po nosaču, što utječe na ravnomjernost piljenja i smanjenje opterećenja stroja.



Slika 2-3 Lanac, segment lanca, rezne pločice i zubi (Dunda, Kujundžić, 2003).

Rezne pločice formiraju rez u stijeni. Na slici 2-4 prikazan je primjer geometrijskog oblika reza za segment reznog lanca koji se sastoji od šest nosača i osam reznih pločica; na zadnja dva nosača s po dvije pločice. Rezne pločice jesu u direktnom kontaktu sa stijenom, stoga su vrlo odgovorne za učinak i efikasnost sjekačice. Na nosačima su učvršćene vijcima, što omogućuje lakšu zamjenu ukoliko dođe do istrošenosti ili većih oštećenja. Također, izbjegnuta je kruta veza pločice, što je rezultiralo smanjenjem otkidanja pločice. (Korman, 2014).



Slika 2-4 Serija sa šest nosača i osam reznih pločica (Dunda i Kujundžić, 2003).

Najčešća vrsta reznih pločica na tržištu jest kvadratnog oblika. Osim kvadratičnih, postoje i zvjezdaste pločice i pločice u obliku kruga (slika 2-5). One se upotrebljavaju ovisno o karakteristikama stijene koja se reže.

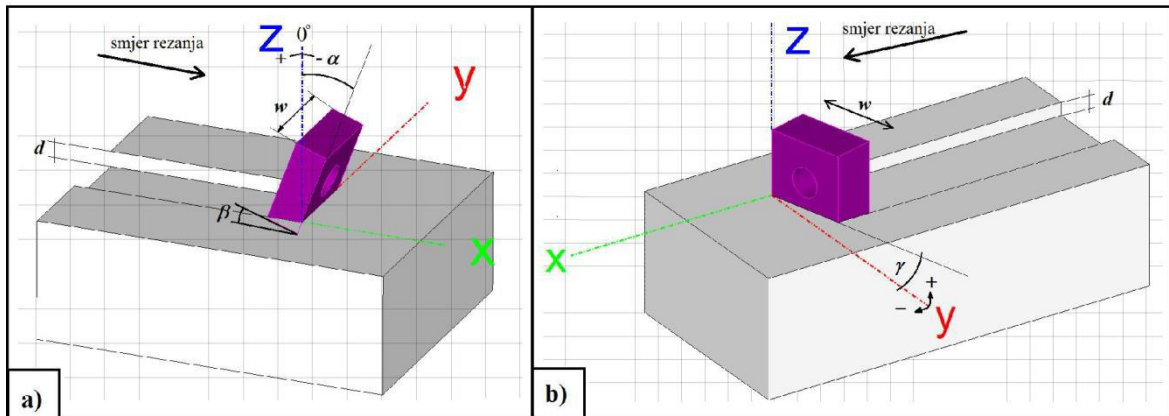


Slika 2-5 Rezne pločice a) kvadratičnog, b) okruglog, c) zvjezdastog oblika (Primavori, 2005).

Rezne pločice su izrađene od nelegiranog čelika presvučenog s volfram – karbidom. Za vrlo tvrde i abrazivne stijene koriste se pločice izrađene od polikristalnih dijamantata, koji se dobivaju u tehnološkom procesu sintetiziranjem dijamantnih čestica i na njih se nanosi

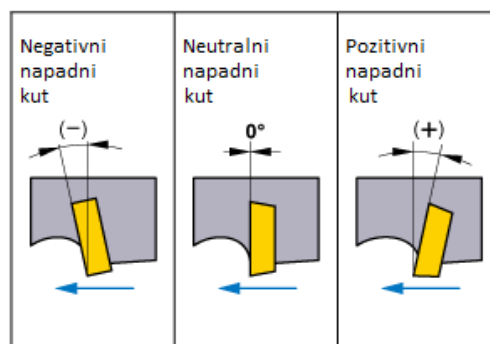
volfram – karbid, koji poboljšava plošne karakteristike za spajanje s metalima i daje dodatnu čvrstoću reznoj pločici (Primavori, 2005).

Geometrijske veličine rezne pločice određene su orijentacijom u prostoru. Geometrijskim veličinama reznih pločica podrazumijevamo (slika 2-6) napadni kut α , kut otklona β , bočni napadni kut rezanja γ i bočni kut rezne pločice δ (Korman, 2014).



Slika 2-6 a) napadni kut α i kut otklona β , b) bočni napadni kut γ (Korman, 2014).

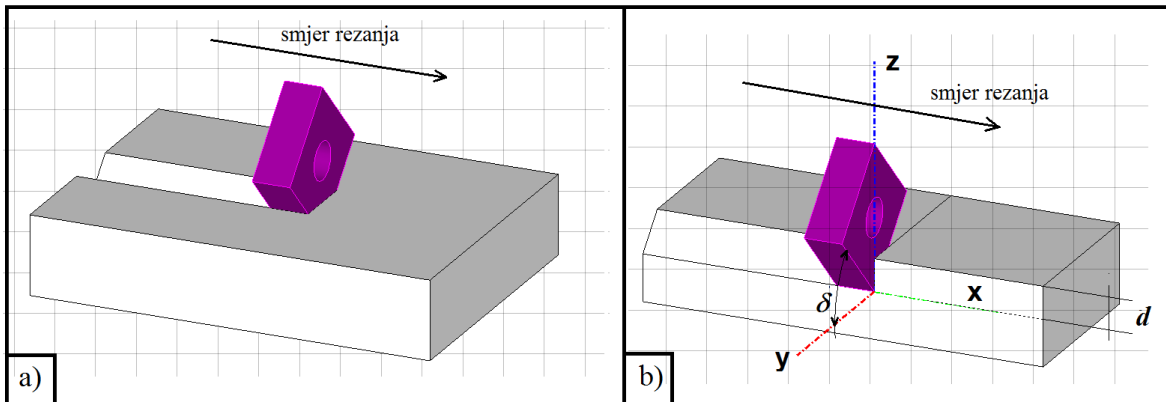
Napadni kut rezne pločice može biti pozitivan, negativan i neutralan (slika 2-7). Obzirom da se s pločicom kvadratičnog oblika ne može rezati pozitivnim kutem, koristi se pločica u obliku krnje piramide, koja koristi samo četiri vrha za rezanje, za razliku od pločice kvadratičnog oblika koja koristi osam vrhova.



Slika 2-7 Napadni kutevi reznih pločica (Mitsubishi materials, 2017).

Ranije je spomenuto da prva rezna pločica otvara rez. Uvjeti u kojima prva rezna pločica radi nazivaju se uklještenima jer postoji samo jedna slobodna površina za stvaranje odloma (slika 2-8a). Svaka sljedeća pločica reže u neuklještenim uvjetima, obzirom da iza svake

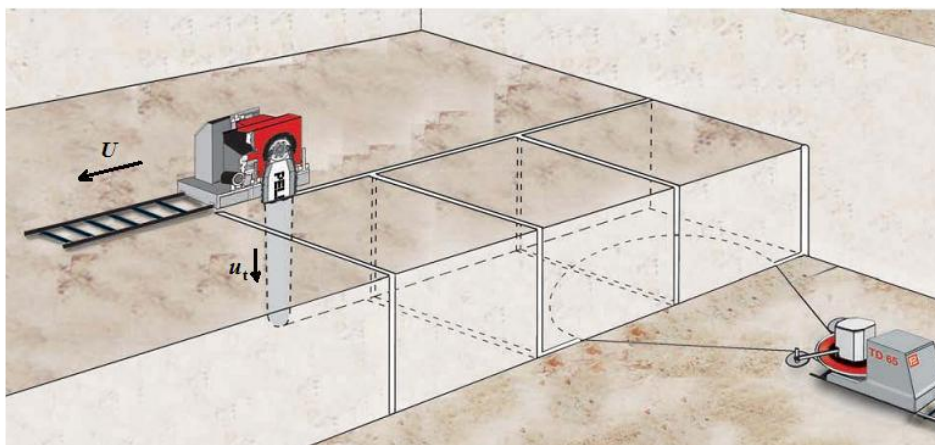
pločice ostaju dvije slobodne površine za stvaranje pukotina (slika 2-8b). Površina reza A ovisit će o orijentaciji rezne pločice i dubini reza d . Kod reznih pločica kvadratičnog oblika, gdje su bočni i napadni kut jednaki nuli, površina reza jednaka je umnošku širine rezne pločice w i dubine reza d (Korman, 2014).



Slika 2-8 Uvjeti rezanja a) uklješteni, b) neukleşteni (Korman, 2014).

2.3. Radne veličine lančane sjekačice

Uz važnost pravilnog izbora reznih elemenata lančane sjekačice, bitan je i pravilan izbor konstrukcijskih, pa tako i radnih veličina stroja. Radne veličine sjekačice jesu brzina posmaka U i brzina lanca u_t i prikazane su na slici 2-9. Posmak stroja postiže se preko lančanika, ozubljene letve i pogonskog motora, koji su integrirani u poseban uređaj. Regulacija radnih veličina vrši se putem upravljačke ploče. Primarna pogonska energija lančanih sjekačica uvijek je električna, a sekundarna energija za pogon motora može biti električna ili hidrauilčna. Brzina lanca je, u pravilu, veća od brzine posmaka do 2000 puta (Dunda, Kujundžić, 2003).

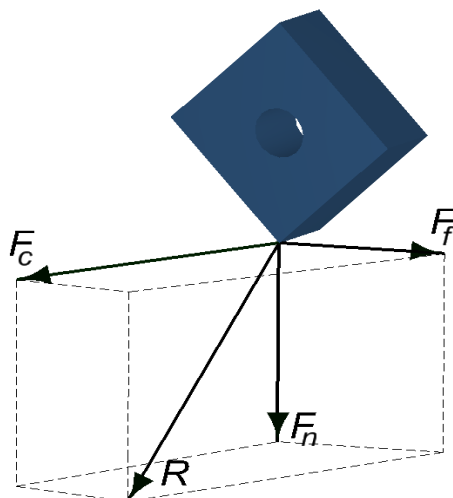


Slika 2-9 Radne veličine lančane sjekačice (Pellegrini, 2009).

3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

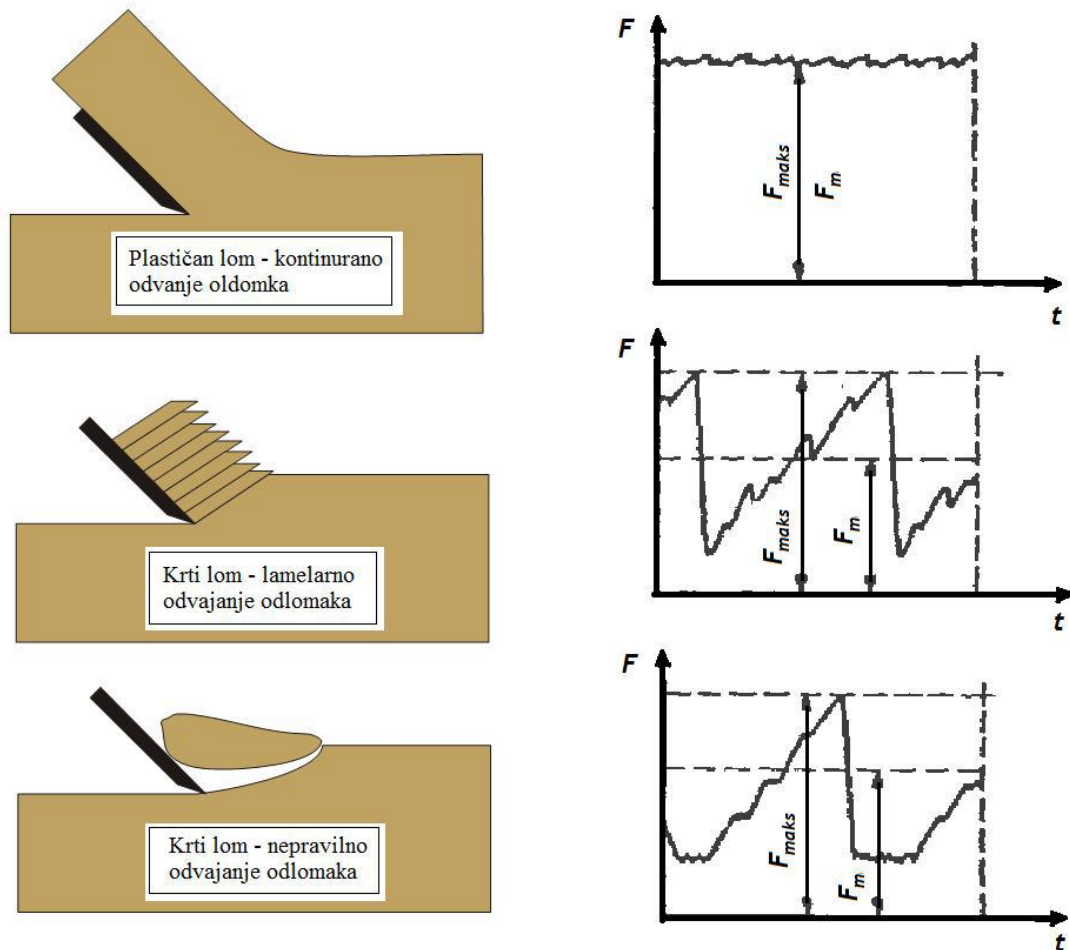
Prije nego što se istraži utjecaj brzine reznog alata na učinak sjekačice, potrebno je detaljnije analizirati ostale utjecaje na rezanje i samu mehaniku rezanja stijena. Sile koje se javljaju pri rezanju utječu na dugotrajnost reznih alata. Presudni faktori koji utječu na intenzitet, smjer i pravac sile su fizikalno–mehaničke, strukturne značajke, geometrijske veličine reznih alata i uvjeti rada. Kao posljedica međusobne interakcije reznog alata i stijene, javljaju se sile čija se rezultanta može rastaviti na tri ortogonalne komponente (slika 3-1):

- Tangencijalna ili horizontalna sila F_c koja djeluje u smjeru paralelno s trajektorijom alata,
- Normalna sila ili vertikalna sila F_n koja djeluje okomito na trajektoriju alata
- Bočna sila ili F_f koja djeluje okomito na ravninu koja je određena prethodnim dvjema silama



Slika 3-1 Rezultantna sila i njene komponente (Korman, 2014).

Prijašnjim laboratorijskim ispitivanjima utvrđeno je da svojstva materijala i geometrijske veličine reznog alata utječu na oblik odlomka pri rezanju. Prilikom rezanja stijene javljaju se dvije vrste loma: plastični i krti lom (slika 3-2). Kontinuirano odvajanje odlomka javlja se kod plastičnog loma, a diskontinuirano odvajanje, odnosno nepravilan lom, kod krtog loma (Nishimatsu, 1972). Pri malim dubinama rezanja stijene (manje od granične dubine iznad koje nastupa krti lom) moguć je plastičan lom. Eksperimentalnim istraživanjima je utvrđeno i da granična dubina ovisi o tvrdoći i jednoosnoj tlačnoj čvrstoći (Schei et al, 2000).



Slika 3-2 Tipovi loma i amplitude sila za vrijeme rezanja (Mohamad, 1992).

Prema slici 3-2, vidljivo je kako se sile razlikuju kod određene vrste loma. Prema grafovima sa slike, vidljivo je da je kod plastičnog loma srednji iznos sile (F_m) približno jednak amplitudi, tj. maksimalnoj sili (F_{maks}). Kod krtog loma maksimalna sila ima puno veći iznos nego srednji iznos sile, što je posljedica diskontinuiranog, odnosno nepravilnog loma, što dovodi do vibracija i naprezanja na reznom alatu. (Mohamad, 1992).

Težnja za razumijevanjem mehanizma rezanja stijena dovela je do nastanka brojnih modela. Rezivost neke stijene određuje se preko sila na reznom alatu i utrošene energije.

Evans (1962) prvi primjećuje da se modeli razvijeni za rezanje metala ne mogu primijeniti na rezanje stijenske mase, upravo zbog heterogenosti stijene. Razvio je model koji je baziran na krtom lomu. Nishimatsu (1992) također pretpostavlja krti lom, a do formiranja odlomka dolazi po posmičnoj ravnini. Detournay i Defourny (1992) rade s negativnim napadnim kutem rezanja, za razliku od Nishimatsua i Evansa, te su predložili model za rezanje stijena s kvadratičnim pločicama. Korman (2014) prikazuje model za određivanje minimalne brzine

lanca i sila na maču sjekačice. Osim toga, u svojoj doktorskoj disertaciji proširuje ispitivanja koja su započeli Hood i Roxborough (1992) o utjecaju konstrukcijskih i radnih veličina na učinke sjekačice. Ispitivanjem u laboratoriju potvrđuje smanjenje specifične energije rezanja s povećanjem dubine rezanja, a dubina reznih pločica se može povećati ukoliko se poveća brzina posmaka ili smanji brzina lanca.

Copur (2009) u svojim ispitivanjima ustanovljuje da s povećanjem dubine rezanja, neovisno o vrijednosti bočnog kuta rezne pločice, sile na reznom alatu rastu, dok se specifična energija smanjuje.

Copur (2011) provodi ispitivanje na šest uzoraka različitih karakteristika kako bi analizirao utjecaj pojedinih svojstava na rezne sile i energiju rezanja. Utvrđeno je da porast vrijednosti omjera tlačne i vlačne čvrstoće utječe na porast specifične energije rezanja i na vrijednost vertikalne sile.

Schei (2000) dokazuje da povećanjem negativnog napadnog kuta dolazi do povećanja specifične energije rezanja.

4. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE

Kako bi se potvrdila hipoteza o znatnom utjecaju brzine rezanja na sile na reznom alatu kao i ukupnu energiju rezanja, provedena su laboratorijska ispitivanja. Kao što je već ranije spomenuto, prema Kormanu (2014) dokazano je da se pomoću uređaja za pravolinijsko rezanje stijena može simulirati proces rezanja lančane sjekačice. Unatoč brojnim modelima za proračun sila na reznom alatu, najpouzdanija metoda jest direktno mjerenje tih sila. Na uređaj za pravolinijsko rezanje stijena (modificirana blanjalica za metal) pričvršćen je rezni segment s reznom pločicom na kojem se nalaze mjerni sustavi koji prikupljaju podatke za obradu i šalju ih na računalo. Kasnijom obradom tih podataka, dolazi se do određenih zaključaka i saznanja.

Kako bi se dobila potpunija slika o utjecaju brzine rezanja na sile i ukupnu energiju rezanja, izabrane su ukupno tri različite brzine. Obzirom da uređaj za pravolinijsko rezanje stijena postiže najveću brzinu otprilike na polovici svog hoda, ta udaljenost predstavljat će najveću brzinu. Također, uzima se udaljenost i netom prije ulaska reznog alata u stijenu i srednja udaljenost, o čemu će biti više riječi u sljedećim poglavljima. Sva ispitivanja provedena su u Laboratoriju za rudarsku mehanizaciju i arhitektonsko-građevni kamen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

4.1. Uzorak za ispitivanja

Laboratorijska ispitivanja provedena su na uzorku arhitektonsko-građevnog kamena, uzetog iz kamenoloma „Redi“, koji se u nalazi u mjestu Plano u južnom dijelu Hrvatske. Tvrtka ADRIAKAMEN d.o.o. je službeni koncesionar za rudarske radnje i eksploataciju tog ležišta. Uzorak se nalazi na slici 4-1.

Dimenzije uzorka su:

- Visina: 14,9 cm
- Širina: 6,4 cm
- Dužina: 7,44 cm

Gustoća uzorka je 2484,8 kg/m³



Slika 4-1 Ispitivani uzorak

Uzorak je svijetlo sive do bijele boje sa smeđim primjesama. Struktura je zrnata, a kamen je kompaktan i izrazite homogene strukture. Mineralni sastav, strukturne i fizičko-mehaničke karakteristike ukazuju da je uzorak vapnenac. (Francetić, 2019.)

Neka od fizičko-mehaničkih svojstava navedena su u tablici 4-1.

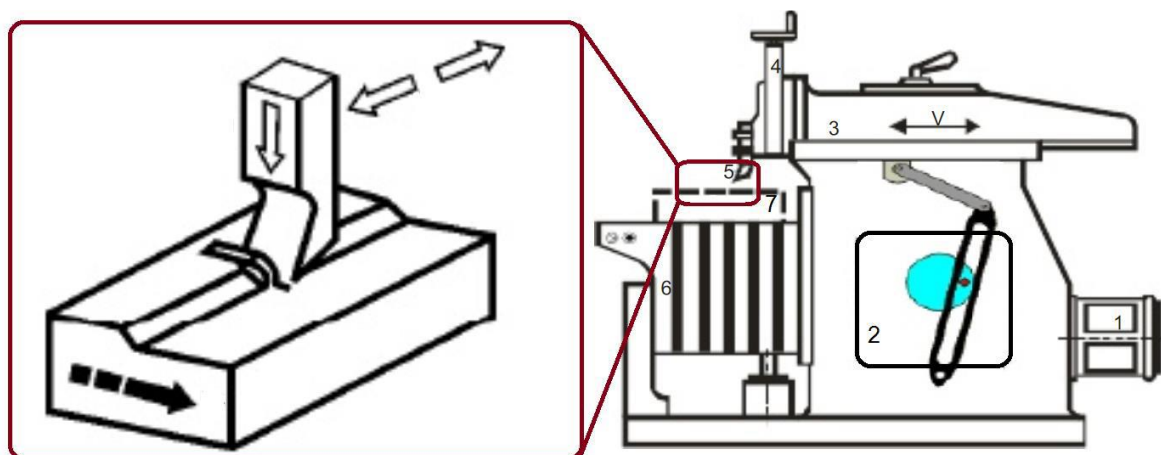
Tablica 4-1 Fizičko-mehanička svojstva ispitnog uzorka (Cemtra d.o.o, 2006).

Određena svojstva	Vrijednosti
Raspon jednoosne tlačne čvrstoće u suhom stanju	84,5-125 MPa
Raspon jednoosne tlačne čvrstoće u vodom zasićenom stanju	80-122 MPa
Raspon čvrstoće na savijanje	8,9-13,6 MPa
Otpornost na habanje	21,8 cm ³ /50 cm ²
Brzina prostiranja longitudinalnih valova	4150 m/s

4.2. Uređaj za pravolinijsko rezanje

Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena je modificirana blanjalica za metal. Blanjanje je postupak obrade odvajanjem čestica kojim se obrađuju ravne površine, kanali, vodilice i drugo, a izvodi se na alatnim strojevima kod kojih je glavno gibanje pravocrtno (Slade, 2012). Nož je inače alat za blanjanje, ali u ovom slučaju zamijenjen je reznim segmentom sjekačice. Glavno gibanje se odvija kulisnim pogonom, a povratak u početni položaj odvija se po istoj putanji. Po povratku u početan položaj obavlja se posmak koji je okomit na glavno gibanje alata. Dubina reza određuje se spuštanjem/dizanjem reznog segmenta u držaču alata. Princip rada blanjalice prikazan je na slici 4-2. Rotacija pogonskog elektromotora (1) prenosi se pomoću prijenosnika do mehanizma za pretvaranje rotacijskog gibanja u pravocrtno (2). Pravocrtno gibanje prenosi se na konzolu (3) na kojoj se nalazi nosač alata (4) na kojem je učvršćen rezni alat (5). Na radnom stolu (6) nalazi se predmet obrade (7) (Nedić i Lazić, 2007).

Kao što je već ranije spomenuto, za potrebe ovog ispitivanja nož za obradu metala zamijenjen je reznom pločicom od volfram-karbida, koja se uvelike koristi u hrvatskim kamenolomima. Na nosaču alata postavljen je mjerni pretvornik sile koji se povezuje s mjernim sustavom na računalo. Pretvornik sile omogućuje mjerenje više komponenti sila rezanja. Na slici 4-3. prikazan je uređaj za pravolinijsko rezanje stijena sa mjernim pretvornikom sile, koji se nalazi u Laboratoriju za rudarsku mehanizaciju i arhitektonsko-građevni kamen Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta (Korman, 2014).



Slika 4-2 Shema kratkohodne blanjalice za metal (Nedić i Lazić, 2007).



Slika 4-2 Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena s mjernim pretvornikom

4.3. Mjerni pretvornik sile

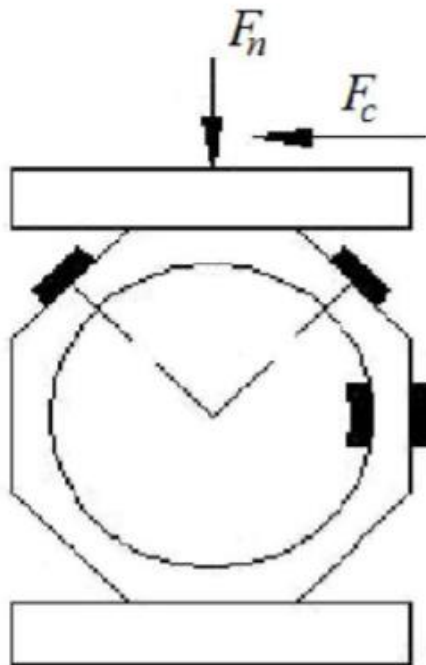
Na slici 4-5 nalazi se mjerni pretvornik sile. Sile na reznom alatu se ne mjere direktno, nego posrednim putem – mjere se deformacije materijala od kojeg je mjerni element izrađen. Deformacije mjernog elementa mogu se mjeriti pomoću elektrootpornih traka ili piezoelektričnih senzora. Mjerni pretvornik sile s piezoelektričnim sensorima radi na piezoelektričnom efektu, pri kojem kod dielektričnih materijala monokristalne strukture uslijed djelovanja sile na površinu kristala, dolazi do stvaranja električnog naboja (Youssef i El-Hofy, 2008).

Princip rada elektrootpornih traka temelji se na svojstvu metalnih vodiča da uslijed mehaničkih deformacija dolazi do promjene površine poprečnog presjeka, a samim time i promjenom otpora takvog vodiča (Kujundžić, 2002).

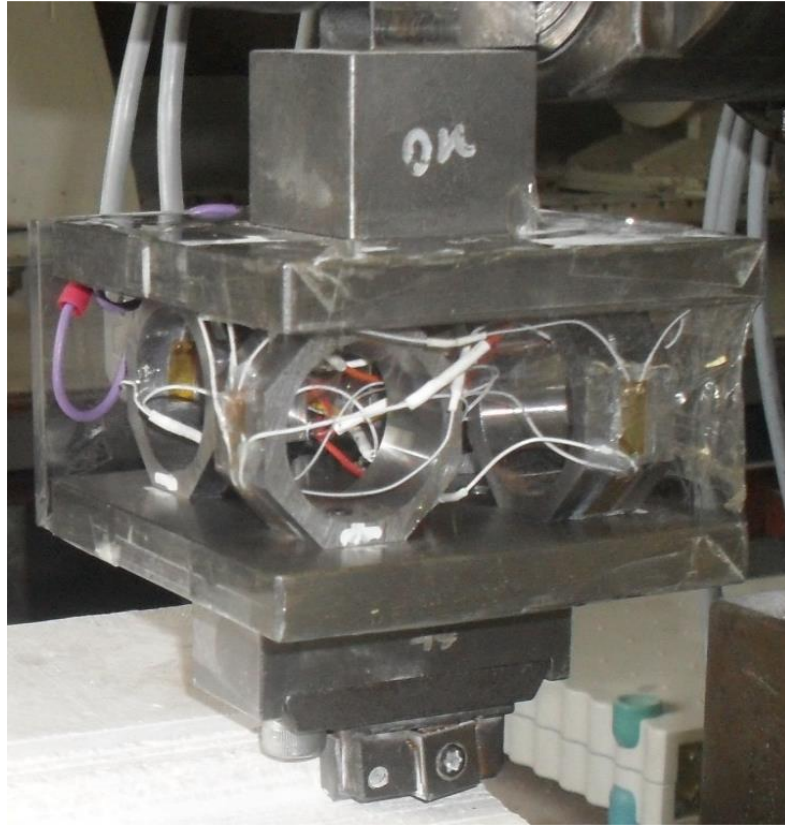
Za potrebe ispitivanja korišten je mjerni pretvornik sile koji je konstruiran za potrebe doktorskog rada „*Utjecaj konstrukcijskih i radnih veličina na učinak lančane sjekačice*“, Tomislava Kormana.

Dva osnovna zahtjeva koja materijal mjernog elementa mora zadovoljiti su krutost i osjetljivost. Krutost mora biti dovoljno velika da bi mjerni elementi podnijeli dinamička naprezanja koja nastaju tijekom rezanja, a ipak ne prevelika jer osjetljivost pretvornika sile ovisi o deformaciji elastičnog elementa u mjernom pretvorniku.

Osmerokutni prstenovi predstavljaju elastični element pretvornika sile. Sila koja djeluje na prsten mjeri se pomoću elektrootpornih traka (slika 4-4) koje su spojene u Wheatstonov most i mjere horizontalnu, bočnu i vertikalnu komponentu sile (Korman, 2014).

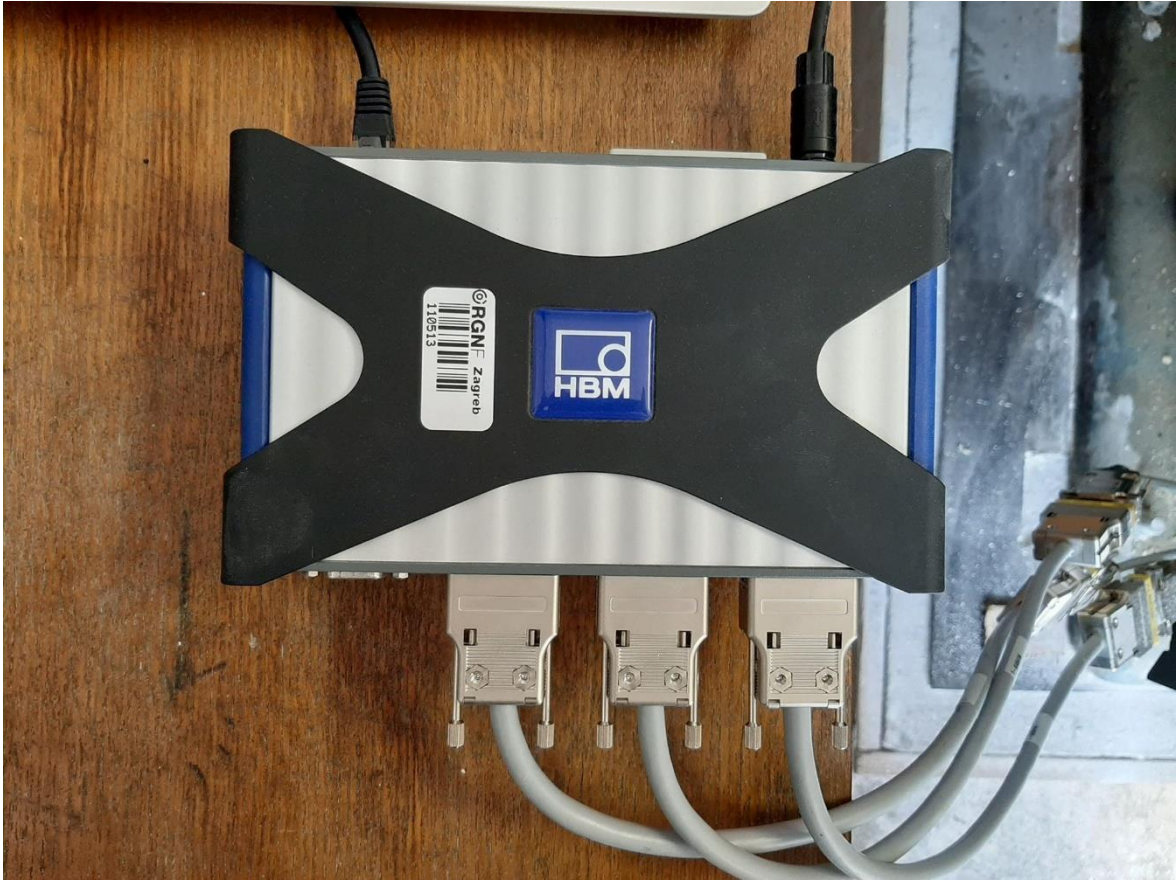


Slika 4-3 Položaj traka za mjerenje deformacija (Saglam i Unuvar, 2001).



Slika 4-4 Troosni mjerni pretvornik sile (Korman, 2014).

Za potrebe ovog ispitivanja korišten je uređaj za prikupljanje i pohranu podataka HBM (slika 4-6). Preko tri kanala, kablovima se mjerni pretvornik povezuje s HBM uređajem, koji se potom povezuje s računalom. Za upravljanje nad uređajem koristi se programsko sučelje „Catman“, koje omogućuje bilježenje i prikaz podataka te vizualno praćenje tijekom eksperimenta na monitoru računala (Korman, 2014).



Slika 4-5 HBM uređaj za povezivanje mjernog pretvornika s računalom s tri priključena kanala za mjerenje horizontalne, bočne i vertikalne komponente

4.4. Tijek ispitivanja

Kao što je ranije rečeno, ispitivanja se provode na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena. Kako ne bi došlo do pomicanja uzorka tijekom rezanja, isti se postavlja u škripac i zateže. Prije nego li se počne s rezanjem, čitavu površinu uzorka potrebno je poravnati da bude paralelna s trajektorijom reznog alata kako bi se lakše odredila dubina rezanja, koja u ovom slučaju iznosi 0.6 mm i određuje se pomoću mikroure (slika 4-7). Postupak poravnavanja se ponavlja nakon što je odrađeno svih sedam rezova za određenu udaljenost.



Slika 4-6 Uređaj za podešavanje dubine reza – mikroura

Uzorak postavljamo na tri različite udaljenosti:

- „početna udaljenost“, gdje su brzina i udaljenost jednake nuli
- „srednja udaljenost“, na četvrtini hoda blanjalice, 5,5 cm
- krajnja udaljenost, koja se nalazi na polovini hoda blanjalice, gdje blanjalica ujedno ostvaruje najveću brzinu, 11 cm

Za svaku udaljenost izvodi se po sedam rezova kako bi se što egzaktnije utvrdio iznos sve tri komponente. Promjenom udaljenosti između vrha pločice i uzorka, mijenja se brzina reznog alata pri ulasku u uzorak. Prethodno spomenuto je provedeno s obzirom da na blanjalici nije moguće mijenjati brzine bez dodatnih modifikacija na samome uređaju. Valja napomenuti da brzina nije konstantna, već se od nule do maksimalne vrijednosti mijenja po zakonu sinusoide.

Izlazni signal pretvornika bilježen je brzinom od 4800 uzoraka po sekundi. Zatim se te vrijednosti preko HBM uređaja (poglavlje 4.3.) pohranjuju na računalo, pri čemu je vrijednost električnog signala izražena kao omjer napona u milivoltima/voltima. U

programu „Microsoft office Excel“ programirana je rutina koja pretvara električni signal u vrijednosti izražene u njutnima (Korman, 2014).

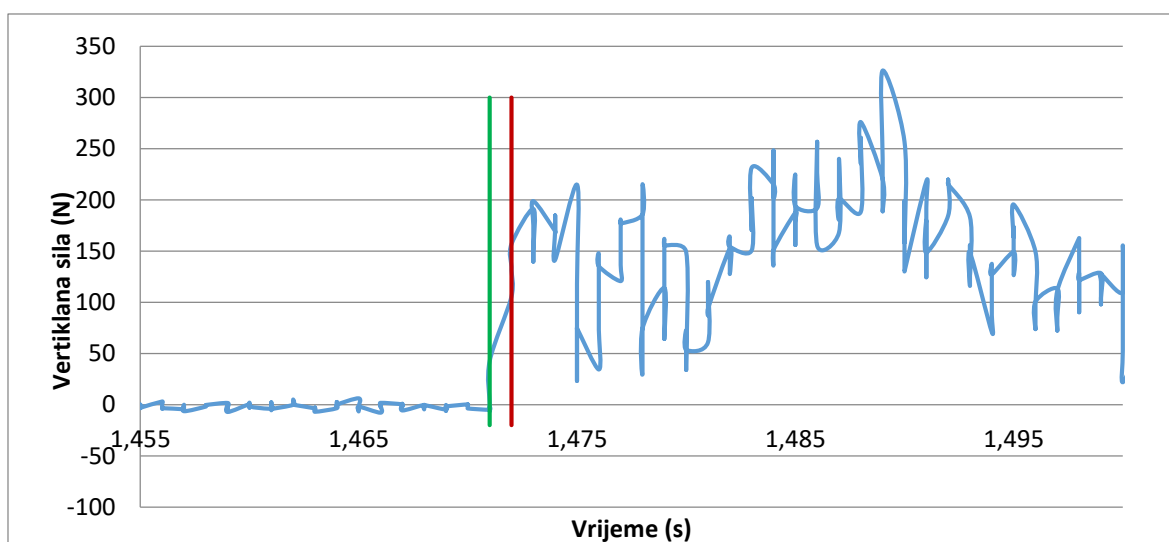
Konačno, izveden je ukupno 21 rez, sedam za svaku udaljenost (slika 4-8). Obradili su se podatci za sve rezove i zabilježile su se prosječne vrijednosti sila, maksimalne vrijednosti, vrijeme rezanja i utrošena energija na rezanje. Nakon potpune obrade podataka, detaljan uvid u konačne rezultate ostvaren je korištenjem grafova i usporedbom dobivenih vrijednosti, a pomoću istih donesen je konačan zaključak rada.



Slika 4-7 Prikaz pripremljenog uzorka neposredno prije samog rezanja na početnoj udaljenosti

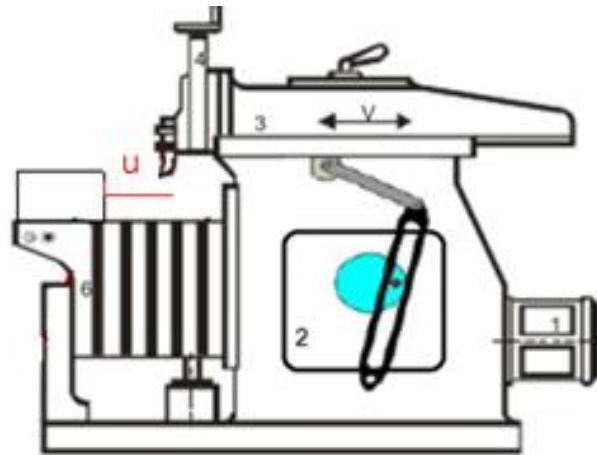
4.5. Obrada podataka

Sam proces obrade podataka počinje od unosa vrijednosti na kompjuteru zabilježenih podataka koji je opisan u poglavlju 4.4. Nakon što su podatci uneseni u programiranu rutinu u „Microsoft Office Excel“, slijedi označavanje početka rezanja. Na slici 4-9 prikazan je dijagram sila/vrijeme pomoću kojeg se određuju sile na ulazu u stijenu. Obzirom da je iz grafa teško precizno odrediti trenutak ulaska rezne pločice u uzorak, izračunata je prosječna vrijednost sile na mjestu kontakta rezne pločice i stijene unutar 0,002 sekunde, što predstavlja deset zabilježenih mjerenja. Zelena linija označava početak rezanja, odnosno mjerenja, a crvena linija označava kraj mjerenja.

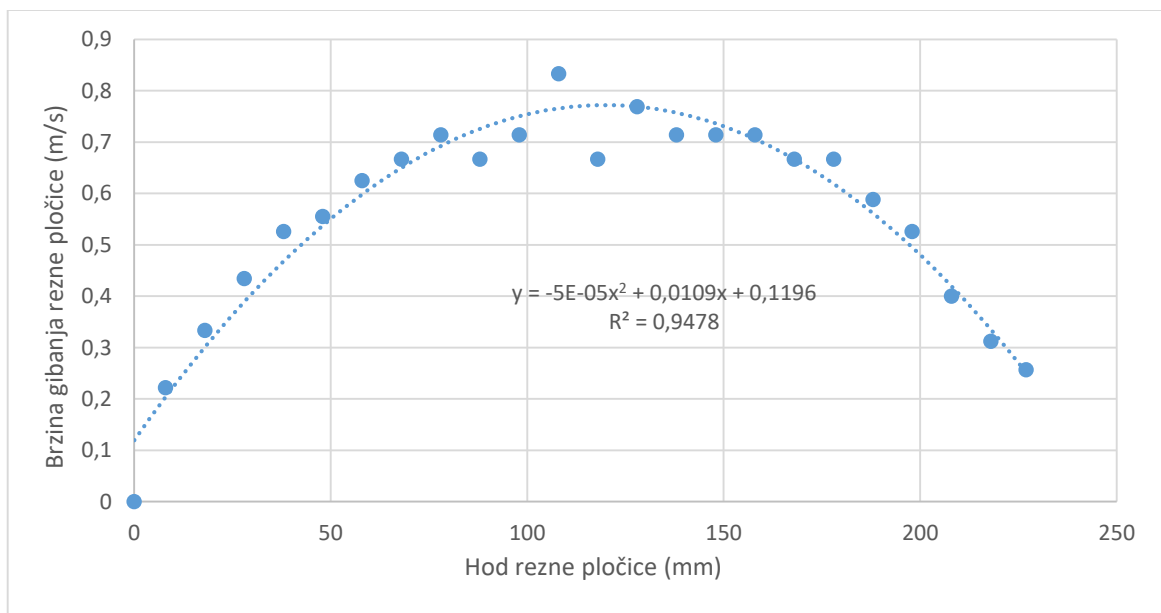


Slika 4-8 Vertikalna sila na početku reza (zelena linija označava početak reza)

Kao što je već ranije spomenuto, ispitivanja su se odvijala na tri različite udaljenosti uzorka od vrha rezne pločice (slika 4-10). Za prvo ispitivanje brzina je iznosila 0 m/s, dok se za ostala dva ispitivanja brzina određuje pomoću dijagrama na slici 4-11. Dijagram opisuje zavisnost brzine gibanja rezne pločice o hodu rezne pločice, koji je poznat za obje preostale udaljenosti, a dobiven je na temelju podataka iz mjerenja vremena i prijedjenog puta rezne pločice.



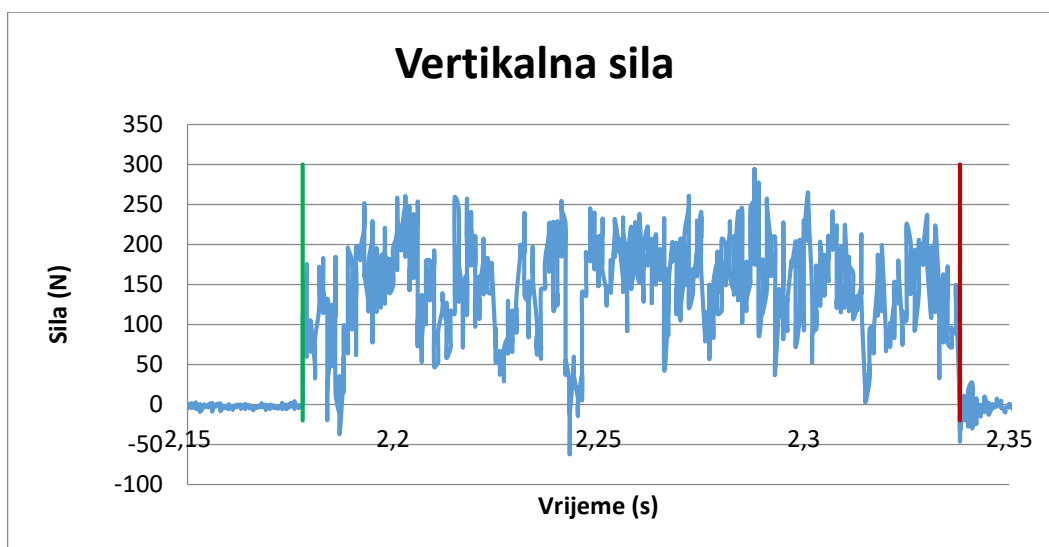
Slika 4-9 Udaljenost u vrha rezne pločice do uzorka



Slika 4-10 Dijagram brzine gibanja rezne pločice u odnosu na hod rezne pločice

Očitana vrijednost brzine pri maksimalnoj udaljenosti, koja iznosi 11 cm, jest 0,77 m/s, a očitana vrijednost brzine srednje udaljenosti, koja iznosi 5,5 cm, jest 0,58 m/s.

Već je ranije ustanovljeno da je prilikom obrade svakog ispitivanja prvi korak određivanje početka i kraja rezanja. Za svako ispitivanje određena je prosječna vrijednost horizontalne, bočne i vertikalne komponente duž cijelog reza (slika 4-12) i u trenutku kontakta rezne pločice i stijene (slika 4-10).



Slika 4-11 Određivanje prosječnih sila duž cijelog reza

U svrhu boljeg uvida i lakše usporedbe konačnih rezultata, napravljene su tablice s podacima prosječnih vrijednosti horizontalne, bočne i vertikalne komponente sile za sve tri početne brzine rezanja na kontaktu rezne pločice i stijene. U sljedećem poglavlju provedena je detaljnija analiza rezultata.

Tablica 4-2 Prosječne vrijednosti sila pri početnoj brzini kretanja od 0 m/s na kontaktu rezne pločice i uzorka

R.B.	Prosječne vrijednosti sila					
	Pri ulasku reznog alata u uzorak			Pri rezanju uzorka		
	Horizontalna	Bočna	Vertikalna	Horizontalna	Bočna	Vertikalna
	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
1	22,9	5,7	12,6	61,7	21,3	133,3
2	19,6	2,4	18,1	65,0	20,8	134,3
3	16,4	12,0	12,5	82,0	30,3	170,5
4	-6,9	11,3	16,6	71,7	27,2	146,2
5	27,8	1,7	40,1	79,8	29,2	163,7
6	22,9	4,1	22,3	74,5	26,3	152,0
7	19,9	8,4	18,3	78,5	26,5	160,9
Prosjek	17,5	6,5	20,1	73,3	26,0	151,5

Tablica 4-3 Prosječne vrijednosti sila pri početnoj brzini kretanja od 0,58 m/s na kontaktu rezne pločice i uzorka

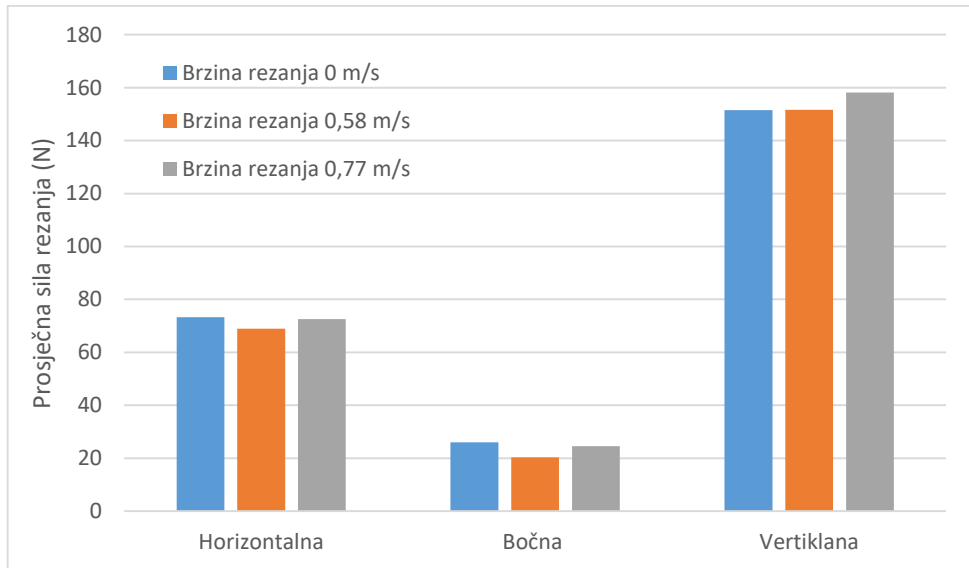
R.B.	Prosječne vrijednosti sila					
	Pri ulasku reznog alata u uzorak			Pri rezanju uzorka		
	Horizontalna	Bočna	Vertikalna	Horizontalna	Bočna	Vertikalna
	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
1	71,10	14,91	103,79	65,50	19,25	146,40
2	51,35	12,69	85,41	63,71	17,35	141,81
3	33,28	-6,98	80,15	67,26	16,75	149,64
4	82,69	33,66	119,13	70,90	22,72	154,66
5	29,88	-0,07	89,18	71,67	22,25	156,50
6	104,90	56,02	137,14	71,19	20,64	155,90
7	77,87	24,53	111,57	72,08	23,11	156,69
Prosjek	64,4	19,3	103,8	68,9	20,3	151,7

Tablica 4-4 Prosječne vrijednosti sila pri početnoj brzini kretanja od 0,77 m/s na kontaktu rezne pločice i uzorka

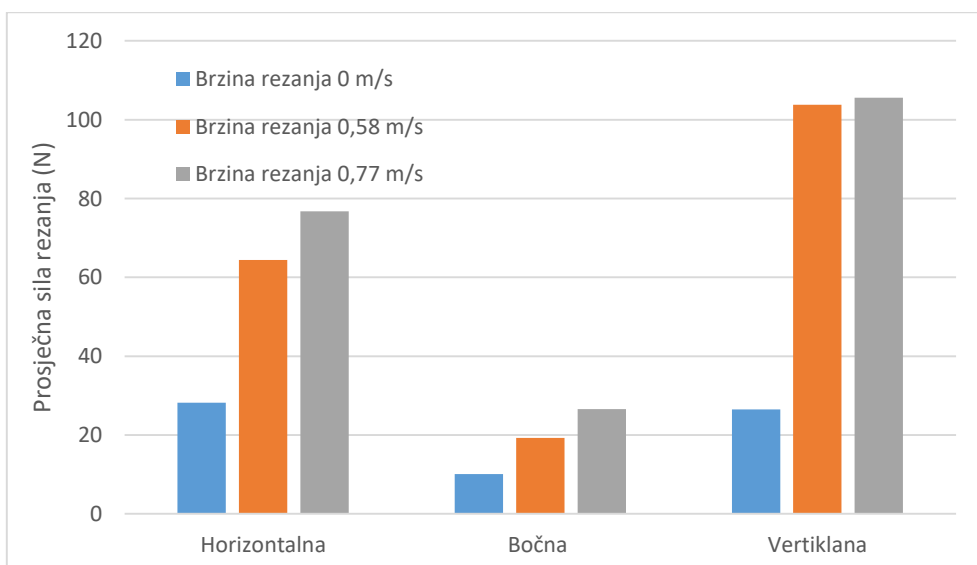
R.B.	Prosječne vrijednosti sila					
	Pri ulasku reznog alata u uzorak			Pri rezanju uzorka		
	Horizontalna	Bočna	Vertikalna	Horizontalna	Bočna	Vertikalna
	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
1	113,66	32,13	140,17	75,50	27,71	165,13
2	33,19	9,48	81,80	68,25	21,83	149,46
3	108,65	37,99	128,50	72,96	25,52	160,14
4	16,19	4,69	37,64	71,60	24,03	154,46
5	86,87	19,54	111,95	79,25	29,19	172,91
6	81,50	37,10	97,87	65,68	21,03	144,40
7	97,07	45,40	141,07	74,49	22,80	160,92
Prosjek	76,7	26,6	105,6	72,5	24,6	158,2

5. ANALIZA REZULTATA

Nakon što je završen postupak obrade podataka, pristupa se analizi i donošenju zaključaka cijelog ispitivanja. U svrhu lakše i preglednije analize i usporedbe rezultata, koristit će se dijagrami.



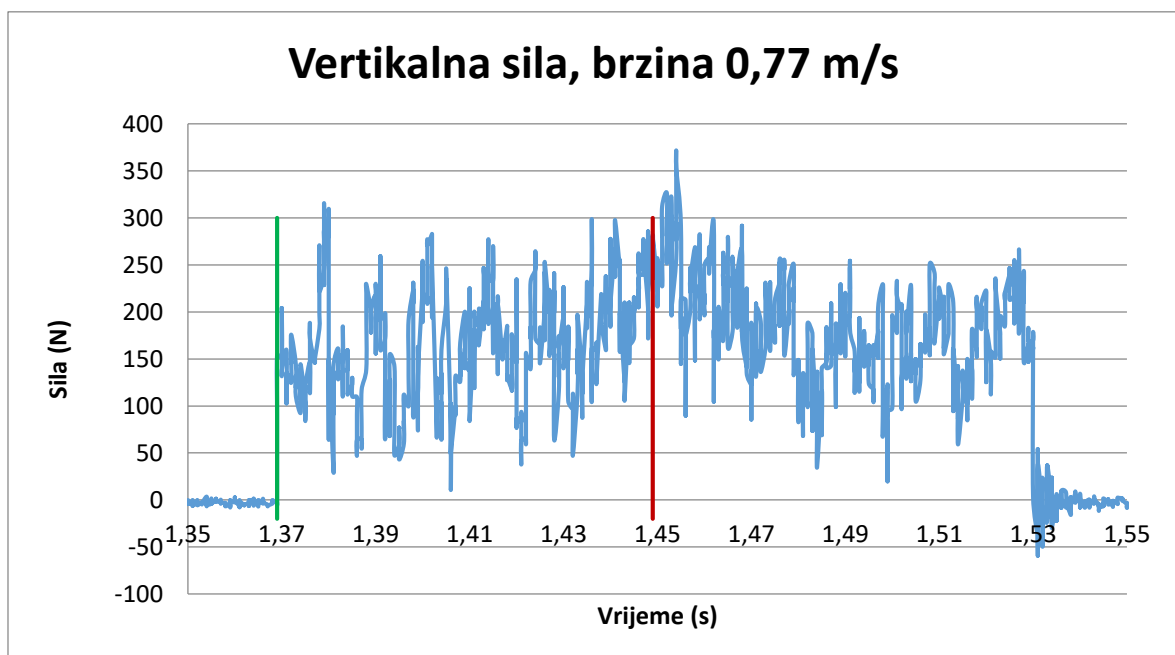
Slika 5-1 Prosječne vrijednosti sila pri rezanju duž cijelog uzorka



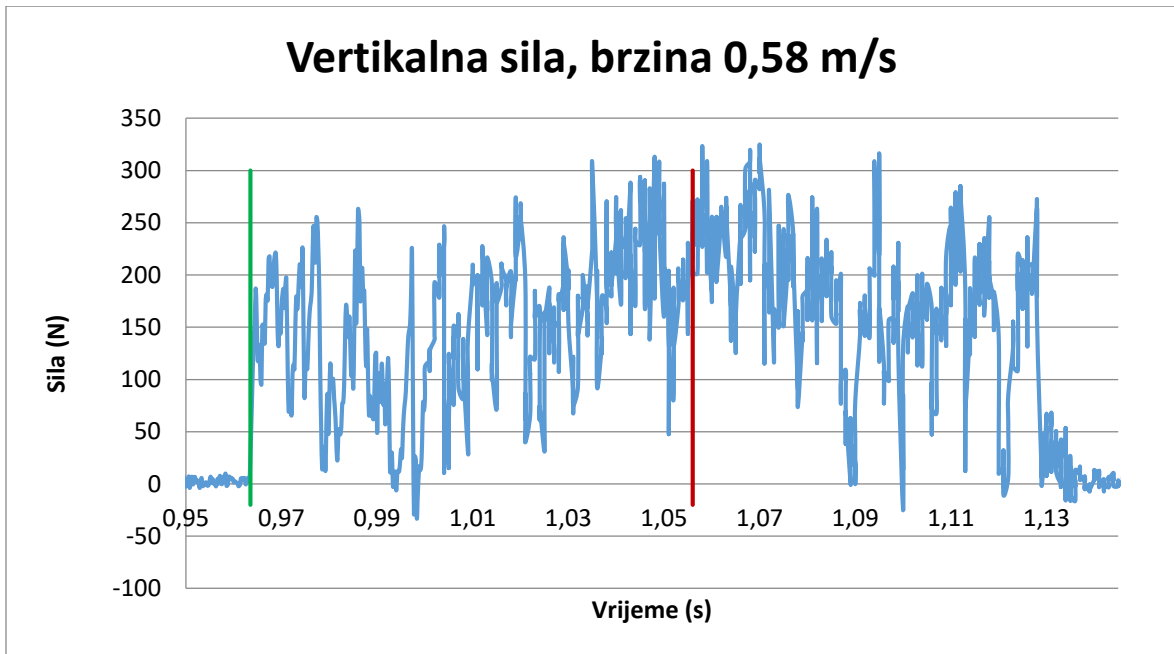
Slika 5-2 Prosječne vrijednosti sila pri ulasku rezne pločice u uzorak

Proučavajući prosječne vrijednosti sila pri rezanju duž cijelog uzorka, prvo što se da primijetiti jest da su prosječne vrijednosti sila za sve početne brzine približno jednake. Razlike u iznosima posljedica su nehomogenosti uzorka. To ukazuje na činjenicu da prosječne vrijednosti sila vrlo malo ovise o početnoj brzini rezanja stijene. Izmjerene vrijednosti odgovaraju vrijednostima prijašnjih ispitivanja, npr. prema Francetić (2019), koji zaključuje da postojanje pukotina također nema skoro nikakav utjecaj na prosječne vrijednosti sila.

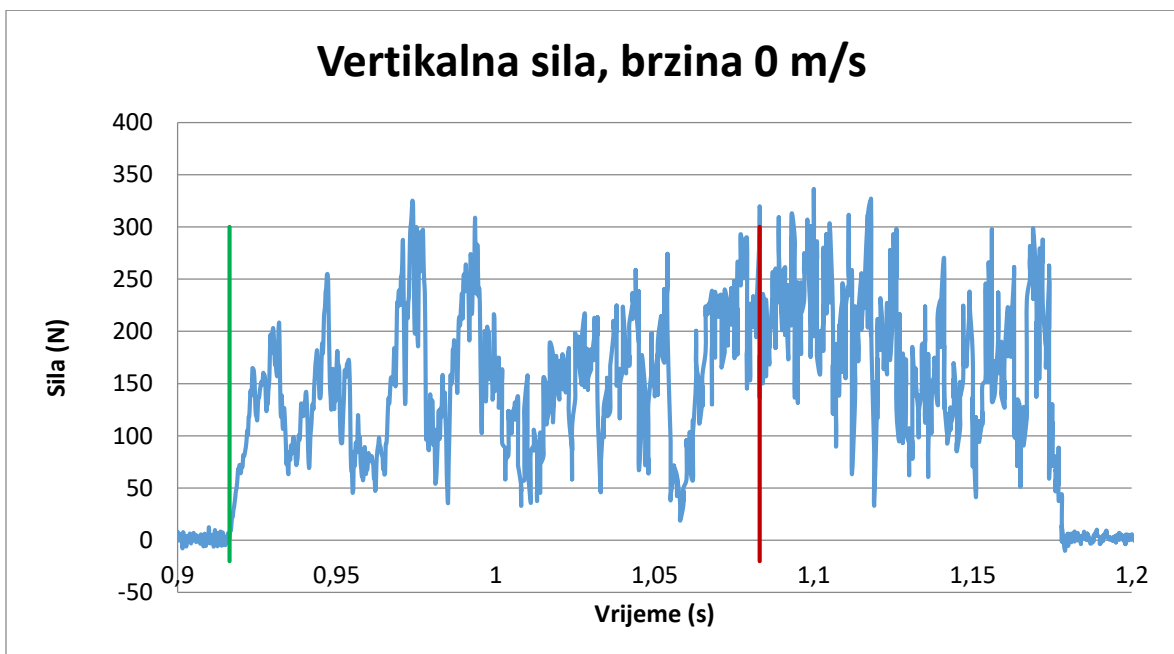
Detaljnijom analizom vremenskog tijeka ispitivanja, dolazi se do zaključka da rezanje uz najveću početnu brzinu rezanja, pri kontaktu rezne pločice i stijene, najbrže dostiže prosječne vrijednosti sila duž cijelog uzorka, otprilike na polovici reza (slika 5-3), a rezanje uz najmanju početnu brzinu najsporije (slika 5-5). Time se ustvrđuje da su početna brzina rezanja pri kontaktu rezne pločice i uzorka i vrijeme dostizanja prosječne vrijednosti sila duž cijelog uzorka obrnuto proporcionalni, odnosno uz najveću početnu brzinu, potrebno je najmanje vremena za dostizanje prosječnih vrijednosti sila. Ovakav zaključak je i logičan, obzirom da su vrijednosti sila pri brzini ulaska u stijenu od 0,77 m/s od samog početka rezanja veće od onih pri brzini od 0 i 0,58 m/s (slika 5-4).



Slika 5-3 Vrijeme pri kojem dolazi do dostizanja prosječne vrijednosti sila (crvena linija), brzina 0,77 m/s



Slika 5-4 Vrijeme pri kojem dolazi do dostizanja prosječne vrijednosti sila (crvena linija), brzina 0,58 m/s



Slika 5-5 Vrijeme pri kojem dolazi do dostizanja prosječne vrijednosti sila (crvena linija), brzina 0 m/s

Pri brzini od 0 m/s na kontaktu rezne pločice i uzorka, horizontalna i bočna sila su u prosjeku dva i pol puta, a vertikalna čak pet puta manja od prosječnih vrijednosti pri rezanju uzorka.

Nadalje, pri brzini od 0,58 m/s i 0,77 m/s na kontaktu rezne pločice i uzorka, dolazi do smanjenja vrijednosti vertikalne sile za trećinu od prosječnih vrijednosti pri rezanju uzorka.

Iz provedenih analiza proizlazi da početna brzina rezanja ne utječe na prosječne sile rezanja duž cijelog uzorka, već samo na vrijednost sile koje se javljaju u trenutku ulaska reznog alata u stijenu. Kako bi se potvrdile dobivene analize potrebno je provesti dodatna ispitivanja pri različitim dubinama reza s obzirom da su ispitivanja provedena isključivo za dubinu reza 0,6 mm.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je istražiti utjecaj brzine rezanja na učinak rezanja stijena. Sva ispitivanja provedena su u Laboratoriju za rudarsku mehanizaciju i arhitektonsko-građevni kamen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena. Poseban naglasak bio je na utjecaju početne brzine rezanja, točnije, brzine na samom kontaktu rezne pločice i uzorka. Izveden je ukupno 21 rez, sedam za svaku početnu brzinu. Izračunate su prosječne vrijednosti horizontalne, bočne i vertikalne sile duž cijelog uzorka i prosječne vrijednosti tih triju sila pri kontaktu rezne pločice i stijene.

Prvi zaključak je ujedno i potvrda prijašnjih istraživanja. Prosječne vrijednosti svih sila za sve početne brzine približno su jednake. Iz tog se da zaključiti da početna brzina rezanja i nema velik utjecaj na prosječne vrijednosti sila. Sličan zaključak donosi i Francetić (2019.), koji zaključuje da postojanje pukotina nema nikakav utjecaj na prosječne vrijednosti sila rezanja.

Promatrajući vremenski tijek rezanja, dolazi se do zaključka da rezanje uz najveću početnu brzinu rezanja, pri kontaktu rezne pločice i stijene, najbrže dostiže prosječne vrijednosti sila duž cijelog uzorka. Za najveću početnu brzinu to je otprilike na polovici reza, dok manjim vrijednostima početnih brzina pri ulasku u stijenu treba duže vremena za dostizanje prosječnih vrijednosti sila.

Nadalje, pri početnoj brzini od 0 m/s dolazi do znatnog smanjenja vrijednosti sve tri sile u odnosu na prosječnu silu rezanja, dok se za brzine od 0,58 m/s i 0,77 m/s znatno smanjuje jedino vertikalna sila. Buduća ispitivanja trebala bi analizirati utjecaj brzine rezanja pri različitim dubinama reza na sile i energiju rezanja.

LITERATURA

1. ASHMOLE, I., 2004. Dimension Stone: The Small Scale Mining Potential in South Africa. Paper presented at Small Scale Mining 2004. Johannesburg
2. COPUR, H., 2009. Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 45. str. 104-12
3. COPUR, H., BALCI, C., TUMAC, D., BILGIN, N., 2011. Field and Laboratory Studies on Natural Stones Leading to Empirical Performance Prediction of Chain Saw Machines. *Int J Rock Mech& Min Sci.* 48. str. 269-282.
4. DETOURNAY, E., DEFOURNY, P., 1992. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts.* Vol. 29. No. 1. Pergamon.
5. DUNDA, S., KUJUNDŽIĆ, T., 2003. Digitalni udžbenik: Eksploatacija arhitektonsko građevnog kamena. RGN fakultet. Zagreb.
6. EVANS, I., 1962. A theory of the basic mechanics of coal ploughing. In *Proceedings International Symposium on Mining Research*, Pergamon Press. London. str. 761-798
7. FRANČETIĆ, T., 2019. Utjecaj diskontinuiteta u stijenskoj masi na rad lančane sjekačice. Zagreb. RGN fakultet
8. HEKIMOGLU, O. Z., 2014. Studies on increasing the performance of chain saw machines for mechanical excavation of marbles and natural stones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 72. str. 230-241
9. HOOD, M. C., ROXBOROUGH, F. F., 1992. Rock breakage: mechanical. *SME mining engineering handbook.* 1. str. 680-721.
10. KORMAN, T., 2014. Utjecaj konstrukcijskih i radnih veličina na učinak lančane sjekačice, Doktorski rad. Zagreb, RGN fakultet.
11. KORMAN, T., KUJUNDŽIĆ T., KLANFAR M., 2015. Analiza konstrukcijskih I radnih veličina lančane sjekačice. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin.* 10.17794/rgn.2015.1.5, str:45-54, RGN fakultet, Zagreb
12. MOHAMAD, Z., 1992. The use of fracture mechanics analysis in rock tunnelling machines assessment. Doktorska disertacija. Sveučilište Teknologija Mara.
13. NEDIĆ, B., LAZIĆ, M., 2007. Proizvodne tehnologije: Obrada metala rezanjem. Mašinski fakultet. Kragujevac

14. NISHIMATSU, Y., 1972. The mechanics of rock cutting. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 9. str. 261- 270.
15. PRIMAVORI, P., 2005. Il manual dell atagiatrice a catena. Fantini Suds.p.a. Strada Prov.le 12. No.52 – 03012 Anahni (FR)
16. SAGLAM, H., UNUVAR, A., 2001. Three-component, strain gage based milling dynamometer design and manufacturing. Journal of Integrated Design and Process Science. Vol.5(2). str. 95-109.
17. SARIISIK, A., SARIISIK, G., 2010. Efficiency analysis of armed-chained cutting machines In block production in travertine quarries. Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy, 110(8), str. 473.
18. SCHEI, G., FJAER, E., DETOURNAY, E., KENTER, CJ., FUH, GF., ZAUSAIN, F., 2000. The Scratch Test: An Attractive Technique for Determining Strength and Elastic Properties of Sedimentary Rocks. Annual Technical Conference and Exhibition (2000) SPE 63255. Society of Petroleum Engineers. str 1-7.
19. YOUSSEF, H. A., EL-HOFY, H., 2008. Machining technology: machine tools and operations. CRC Press.

WWW IZVORI:

1. MITSUBISHI MATERIALS. Function of tool features for face milling,
URL:http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_rotating_tools/face_mills/tec_rotating_function_cutting_edge/tec_milling_function_cutting_edge(22.08.2017.)
2. SLADE, I., (2012): Obrada materijala II., Digitalni udžbenik,
URL: <http://www.cnt.tesla.hr>. (16.8.2020.)