Utjecaj napadnog kuta reznih pločica lančane sjekačice na sile rezanja

Rajič, Danijel

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:169:499367

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

UTJECAJ NAPADNOG KUTA REZNIH PLOČICA LANČANE SJEKAČICE NA SILE REZANJA

Diplomski rad

Danijel Rajič

R-131

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet

Diplomski rad

UTJECAJ NAPADNOG KUTA REZNIH PLOČICA LANČANE SJEKAČICE NA SILE REZANJA

Danijel Rajič

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

Sažetak

U ovom diplomskom radu opisane su konstrukcijske i radne veličine lančane sjekačice te njihova namjena i razvoj. Osnovni cilj rada je analizirati utjecaj napadnog kuta reznog elementa lančane sjekačice na sile rezanja. Opisana su prijašnja istraživanja utjecaja konstrukcijskih i radnih veličina na učinak lančane sjekačice. Provedena su laboratorijska ispitivanja uređajem za pravolinijsko rezanje stijena na pet uzoraka, različitih fizičko mehaničkih svojstava pri čemu su mjerene sve tri komponente sile. Ispitivanja su provedena s pozitivnim i negativnim kutom rezanja pri različitim dubinama reza. Statističkom obradom podataka dobiveni su korelacijski odnosi između dubina rezanja, napadnog kuta i vrijednosti sve tri komponente sile.

Ključne riječi: arhitektonsko-građevni kamen, lančana sjekačica, sila rezanja, napadni kut, rezne pločice

Diplomski rad sadrži: 36 stranica, 3 tablica, 31 slika, 10 priloga i 28 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj : 1. Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF

2. Dr. sc. Mario Klanfar, docent RGNF

3. Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Datum obrane: 21. rujan 2017.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master'sThesis

THE INFLUENCE OF RAKE ANGLE OF CUTTING TOOLS ON CHAIN SAW CUTTING FORCES

Danijel Rajič

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department for Mining Engineering and Geotechnics,
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Master's Thesis describe purpose and development of chain saw machines and their constructional and operational parameters. The main aim of the paper is to analyse the impact of the rake angle of the cutting tools of the chain saw on cutting forces. Previous researches of the influence of constructional and operational parameters on the chain saw have been described. Cutting forces were measured by laboratory tests performed by linear stone cutting machine, for five samples with different physical-mechanical properties. The tests were performed with a positive and negative rake angle at different depths of the cut. The statistical processing of data yielded correlation relations between the cutting depth, rake angle and value of all three components of the force.

Keywords: dimension stone, chain saw, cutting forces, rake angle, cutting tools

Thesis contains: 36 pages, 3 tables, 31 figures, 10 appendixes and 28 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: 1. Tomislav Korman, PhD, Assistant Professor RGNF

Reviewers: 1. Tomislav Korman, PhD, Assistant Professor RGNF

2. Mario Klanfar, PhD, Assistant Professor RGNF

3. Dubravko Domitrović, PhD, Assistant Professor RGN

Date of defense: September 21, 2017.

SADRŽAJ

I. POPIS TABLICA II
II. POPIS SLIKA III
III. POPIS PRILOGA V
IV. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA VI
1. UVOD 1
2. LANČANA SJEKAČICA 2
2.1. Konstrukcijske veličine lančane sjekačice 2
2.2. Radne veličine lančane sjekačice 10
3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA 12
4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA 17
4.1. Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena 17
4.2. Mjerni pretvornik sile 19
4.3. Opis uzoraka 22
4.4. Metoda ispitivanja 24
4.5. Analiza rezultata 26
5. ZAKLJUČAK 32
6. LITERATURA 34

POPIS TABLICA

Tablica 4-1 Prikaz rezultata mjerenja za negativni napadni kut reznog elementa 26
Tablica 4-2 Prikaz rezultata mjerenja za pozitivni napadni kut reznog elementa 27
Tablica 4-3 Prikaz omjera normalne i horizontalne vrijednosti sile za negativni i pozitivni napadni kut 31

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Lančana sjekačica na tračnicama (Dunda i Kujundžić, 2003) 3
Slika 2-2 Samohodne lančane sjekačice a) na gusjenicama b) na gumenim kotačima (Dunda i Kujundžić, 2003) 3
Slika 2-3 Dijelovi lančane sjekačice (Korman, 2014) 4
Slika 2-4 Segment reznog lanca lančane sjekačice (Sariisik i Sariisik, 2010) 5
Slika 2-5 Redoslijed postavljanja nosača i geometrijski oblik reza, reznog segmenta lanca sa šest nosača i osam reznih pločica (Dunda i Kujundžić, 2003) 6
Slika 2-6 Rezne pločice a) kvadratičnog oblika b) kružnog oblika c) zvjezdastog oblika (Primavori, 2005) 7
Slika 2-7 Geometrijske veličine reznog alata a) α=-20°, γ=0°, δ=0°, β =20°; b) α=0°, γ =15°, δ=0°, β=0° (Korman, 2014) 7
Slika 2-8 Negativni, neutralni i pozitivni napadni kut rezne pločice (Mitsubishi materials, 2017) 9
Slika 2-9 Rezultantna sila rezanja i njene komponente (Korman, 2014) 10
Slika 3-1 Kut odloma pri rezanju u ukliještenim uvjetima (Copur et. al., 2011) 13
Slika 3-2 Odnosi između specifične energije i jednoosne tlačne čvrstoće (Richard, 1999) 14
Slika 3-3 Utjecaj napadnog kuta i kuta otklona na sile rezanja (Hood i Roxborough, 1992) 15
Slika 3-4 Odnos između negativnog napadnog kuta i specifične energije (Schei et al., 2000) 16
Slika 3-5 Utjecaj dubine reza i bočnog kuta na normalnu komponentu sile rezanja (Copur, 2009) 16
Slika 3-6 Utjecaj geometrijskog oblika reznih pločica na vrijednosti horizontalne sile (Richard et al., 2010) 17
Slika 4-1 Način glavnog gibanja mehaničke blanjalice (Slade, 2012) 19
Slika 4-2 Shematski prikaz kratkohodnog blanjanja (Slade, 2012) 19
Slika 4-3 Shema kratkohodne blanjalice za metal (Nedić i Lazić, 2007) 20
Slika 4-4 Uređaj za pravolinijsko rezanj stijena i mjerni sustav (Korman, 2014) 20
Slika 4-5 Konstrukcija mjernog pretvornika sile (Korman, 2014) 22
Slika 4-6 Mjerni sustav za mjerenje sile rezanja (Korman, 2014) 22
Slika 4-7 Uređaj za umjeravanje pretvornika sile (Korman, 2014) 24
Slika 4-8 Uzorci za ispitivanje 25

Slika 4-9 Uzorak pripremljen za ispitivanje 26
Slika 4-10 a) nosač rezne pločice za negativni napadni kut b) nosač rezne pločice za pozitivni napadni kut 26
Slika 4-11 Primjer obrade rezultata ispitivanja (Korman, 2014) 27
Slika 4-12 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile za uzorak Brenzberg..... 30
Slika 4-13 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile za uzorak Kraljev vrh 30
Slika 4-14 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile za uzorak Lasinja 31
Slika 4-15 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile za uzorak Špica 32
Slika 4-16 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile za uzorak Vukov Dol 32

POPIS PRILOGA

Prilog 1. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Brenzberg

Prilog 2. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Kraljev vrh

Prilog 3. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Lasinja

Prilog 4. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Špica

Prilog 5. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Vukov Dol

Prilog 6. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Brenzberg

Prilog 7. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Kraljev vrh

Prilog 8. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Lasinja

Prilog 9. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Špica

Prilog 10. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Vukov Dol

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

α – napadni kut rezne pločice (°)

γ – bočni napadni kut rezanja (°)

δ – bočni kut rezne pločice (°)

β - kut otklona(°)

F_c– horizontalna sila (N)

F_n– normalna sila (N)

F_f - bočna sila (N)

R – rezultanta sila rezanja (N)

CSPI – penetracijski indeks lančane sjekačice

w - masa lančane sjekačice bez tračnica (kg)

H_o – efektivna duljina mača (m)

UCS – jednoosna tlačna čvrstoća (N/m^2)

σ_t– tlačna čvrstoća (N/m^2,Pa)

σ_t– vlačna čvrstoća (N/m^2,Pa)

σ_L– lomna žilavost ($MN/m^{1.5}$)

d_s – odskok Schmidtovog čekića (ISRM)

U – brzina pomaka sjekačice (m/s)

u_t – brzina lanca (m/s)

S – dužina segmenta (m)

ω` - kut odloma (°)

φ – kut između mača i pravca rezanja (°)

d - dubina reza (mm)

1. UVOD

Prilikom eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena, proizvod kamenoloma je masivni blok, te se fizičko mehaničke značajke kamena ne mogu razdvojiti od karaktera njegovog ležišta. Sukladno tome arhitektonsko-građevni kamen ima vrijednost samo ako se iz ležišta mogu vaditi kameni blokovi pogodni za industrijsku preradbu (Dunda i Kujundžić, 2003). Razvojem i uvođenjem novih strojeva, najčešće se koriste dijamantna žična pila i lančana sjekačica, u eksploataciju arhitektonsko-građevnog kamena imalo je utjecaja na promjenu tehnologije dobivanja arhitektonsko-građevnog kamena.

Lančane sjekačice se koriste za izradu horizontalnih ili vertikalni rezova, pri površinskoj i podzemnoj eksploataciji. Pravilan izbor konstrukcijskih i radnih veličina lančane sjekačice, te reznih elemenata, utječe na učinkovitost stroja. Isto tako će na učinak lančanih sjekačica imati utjecaja fizičko mehanička svojstva stijene. Glavne radne veličine lančane sjekačice su brzina posmaka sjekačice i brzina reznog lanca, a odabiru se na temelju preporuke proizvođača ili iskustvu rukovatelja. Konstrukcijske veličine su snaga pogonskog motora, duljina mača i oblik i raspored reznih pločica na lancu sjekačice. Cilj ovog rada je ispitati utjecaj konstrukcijske veličine lančane sjekačice, odnosno napadnog kuta reznog elementa na vrijednosti sila na reznim pločicama, za negativni i pozitivni napadni kut, s obzirom na dubinu rezanja uzoraka. U skladu s ciljem istraživanja postavljena je hipoteza rada koja glasi da dubina rezanja i napadni kut reznog elementa lančane sjekačice značajno utječu na vrijednosti svih triju komponenti sila na reznim pločicama. Simuliranje rezanja stijena je provedeno uređajem za pravolinijsko rezanje stijena. Navedeni uređaj je modificirana blanjalica za metal, kod koje je nož za obradu metala zamijenjen reznim pločicom lančane sjekačice određenih geometrijskih veličina, te je na nosaču alata postavljen mjerni pretvornik sile povezan sa računalnim sustavom. Ispitivanje je provedeno na pet uzoraka stijena različitih fizičko mehaničkih značajki. Uzorci su prikupljeni sa eksploatacijskih polja: „*Brenzberg*“, „*Kraljev vrh*“, „*Lasinja*“, „*Špica*“, „*Vukov Dol*“. Na temelju dobivenih rezultata određena je korelacijska zavisnost sile rezanja o dubini reza i napadnom kutu.

2. LANČANA SJEKAČICA

Lančane sjekačice su se razvile od podsjekačica i zasjekačica, koje se ubrajaju među najstarije rudarske strojeve. Podsjekačice su se koristile za horizontalno ispiljene plohe, podsjeke, a zasjekačice za vertikalne ili kose rezove, zasjeke. Ispočetka su se koristile kao pomoćni strojevi u mekanim materijalima, uglavnom ugljenu. Najmodernije sjekačice imaju mogućnost rezanja svih vrsta rezova, pa se više ne upotrebljava podjela na podsjekačice i zasjekačice, nego se govori samo o sjekiricama (Dunda i Kujundžić, 2003).

2.1 Konstrukcijske veličine lančane sjekačice

Postepenim razvojem i usavršavanjem rudarske podsjekačice, došlo je do primjene podsjekačica pri eksploataciji kamena. Njemačka tvrtka Korfmann je prva prilagodila podsjekačicu za ugljen u podsjekačicu za kamen, 1928. godine u kamenolomu travertina. Podsjekačica se kretala po tračnicama s duljinom sekcije 3 m, maksimalnom dubinom reza 75 cm, koja se kasnije povećala na 130 cm, a debljina reza je iznosila 80 mm. Nakon Drugog svjetskog rata, Korfmannova sjekačica se koristi u Francuskoj, u kamenolomu vapnenca Comblanche. Debljina reza je smanjena na 50 mm, a duljina mača ostaje do 200 cm (Dunda i Kujundžić, 2003).

Danas je široka primjena lančanih sjekačica na našim kamenolomima, većinom različitih izvedaba talijanske tvrtke Fantini. Razvojem lančanih sjekačica duljina radnog elementa se povečala na čak 4,5 m za horizontalni rez i 7,4 m za vertikalni rez. Debljina reza je smanjena na 42 mm, za veće duljine mača. Kod manjih duljina mača debljina reza iznosi 27 mm. Način gibanja kod većine današnjih sjekačica je ostao isti, pomoću tračnica (slika 2-1). Kod prvih verzija lančanih sjekačica na tračnicama, koristile su se dodatne sekcije tračnica, većina ih je imala po tri sekcije dužine 3 m. Premještanje tračnica se odvijalo pomoću vlastite dizalice koja se nalazila u sklopu stroja. Kod suvremenih lančanih sjekačica tračnice se premještaju pomoću hidrauličkih stopa. Jako je važno centrirati tračnice, jer o tome ovisi kvaliteta piljenja. Tračnice se ne smiju tijekom piljenja pomicati, te moraju biti dobro učvršćene u vodoravnom položaju. Ako su tračnice loše centrirane, dolazi do deformacije mača sjekačice i iskrivljenja reza, te smanjenja radnog vijeka stroja. Lančane sjekačice se primjenjuju u površinskoj i podzemnoj eksploataciji, pri izradi usjeka i dobivanju komercijalnih blokova u ležištima. Najveća je prednost sjekačica u kratkim pripremnim radnjama (Korman, 2014).



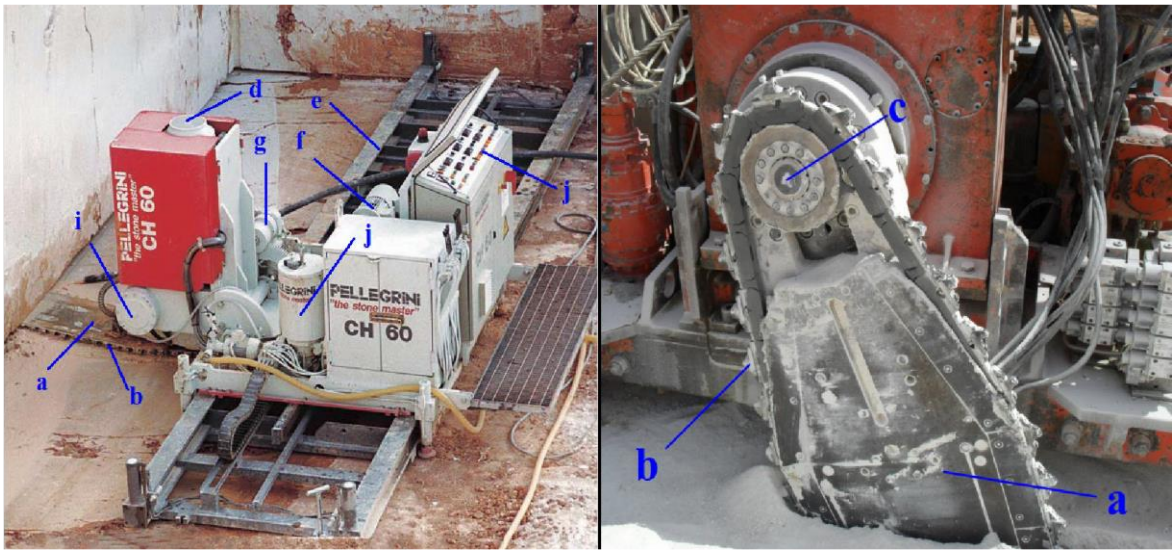
Slika 2-1 Lančana sjekačica na tračnicama (Dunda i Kujundžić, 2003).

Razvile su se i mobilnije lančane sjekačice, kada je potreba za većom mobilnosti, samohodne sjekačice. Podvozje samohodnih sjekačica može biti na gusjenicama (slika 2-2 a) ili kotačima, odnosno sjekačica koju je moguće montirati na traktor (slika 2-2 b), traktorska sjekačica koja nema svoj vlastiti pogon, nego koristi hidraulički sklop traktora, te je njena najveća prednost u mobilnost u odnosu na ostale modele, što najviše koristi kad je potrebno odrezati manji nepravilni blok (Korman, 2014).



Slika 2-2 Samohodne lančane sjekačice a) na gusjenicama b) na gumenim kotačima (Dunda i Kujundžić, 2003).

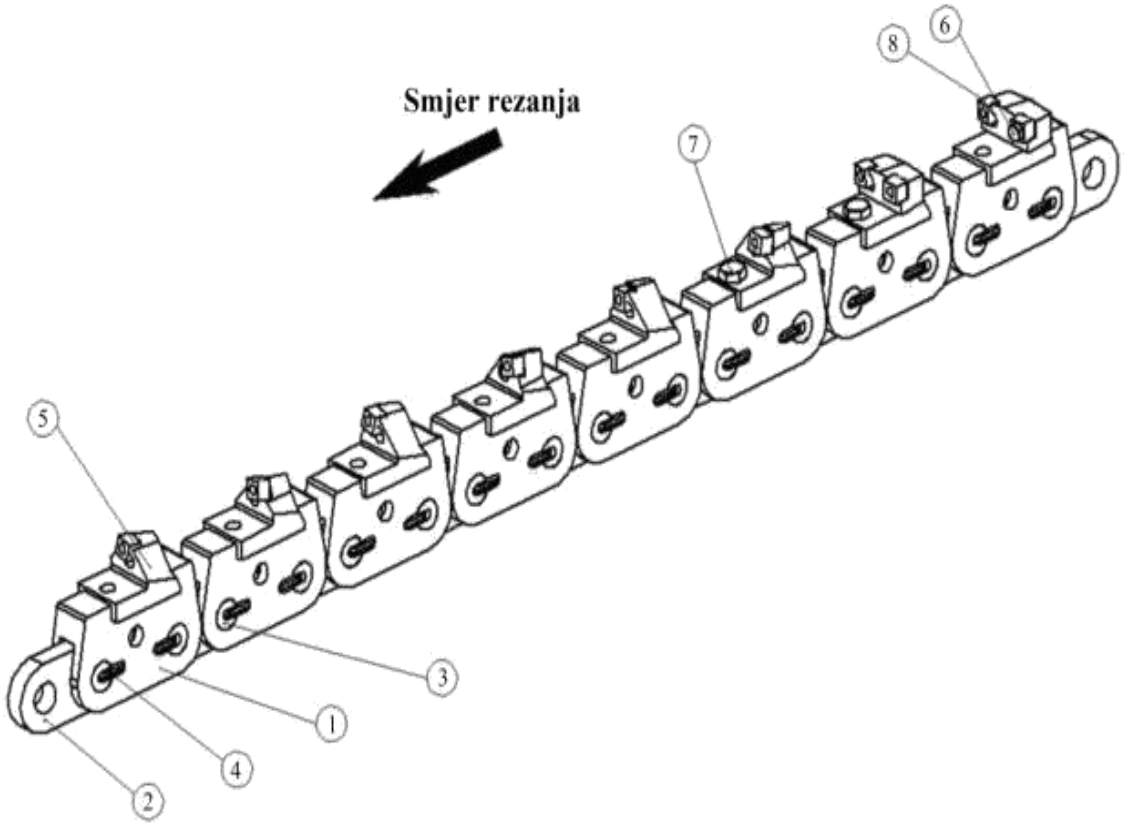
Ovisno o metodi eksploatacije koja se koristi se odabire lančana sjekačica. Ključna veličina pri odabiru sjekačice je projektirana dubina reza, te se prema tome odabire duljina mača. O duljini mača ovisi i ukupna snaga i masa sjekačice kojom su određene maksimalne vrijednosti brzine posmaka i brzine lanca. Lančana sjekačica se sastoji od dijelova prikazanih na slici 2-3. Glavni dio sjekačice je radni organ odnosno mač (a) na kojemu se nalazi beskonačni lanac (b) sa nosačima za rezne pločice koje se pričvršćuju pomoću vijaka. Lanac se na maču pokreće pomoću lančanika (c) koji je preko reduktora spojen s glavnim pogonskim motorom (d). Gibanje sjekačice se odvija po tračnicama (e) ,koje moraju biti učvršćene i centrirane, pomoću motora za posmak stroja (f). Zakretanje mača u ravnini rezanja se odvija pomoću motora za posmak mača (g), a za postavljanje mača u horizontalni ili vertikalni položaj služi poseban motor (i). Rezni elementi se tijekom rada sjekačice moraju cijelo vrijeme podmazivati za što služi motor sa pumpom za podmazivanje (j). Upravljačka ploča (k) služi za reguliranje brzine posmaka sjekačice, brzine lanca i položaj mača. Lanac mača (slika 2-4) se sastoji od članaka (1) koji su međusobno povezani spojnicama (2). Spojnice su osigurane pomoću osigurača (4), a učvršćuju se pomoću zatika (3). Na članke lanca se pomoću vijaka (7) učvršćuju nosači pločica (5). Rezne pločice (8) se također pomoću vijaka (6) učvršćuju na članak lanca (Korman, 2014).



Slika 2-3 Dijelovi lančane sjekačice (Korman, 2014).

a) radni organ b) lanac i rezni elementi c) pogonski lančanik d)pogonski motor e) tračnice f) motor za posmak stroja g) motor za posmak mača i) motor za zakretanje mača j) motor s pumpom za podmazivanje k) upravljačka ploča

Konstrukcija reznih elemenata i lanca razlikuje se ovisno o proizvođaču. Proizvođač određuje prostorni raspored i geometrijske veličine reznih pločica. Iz razloga što utjecaj konstrukcije lanca i reznih elemenata nije istražen dovoljno, odabir lančane sjekačice i reznih elemenata se vrši temeljem preporuke proizvođača (Korman et al., 2015)

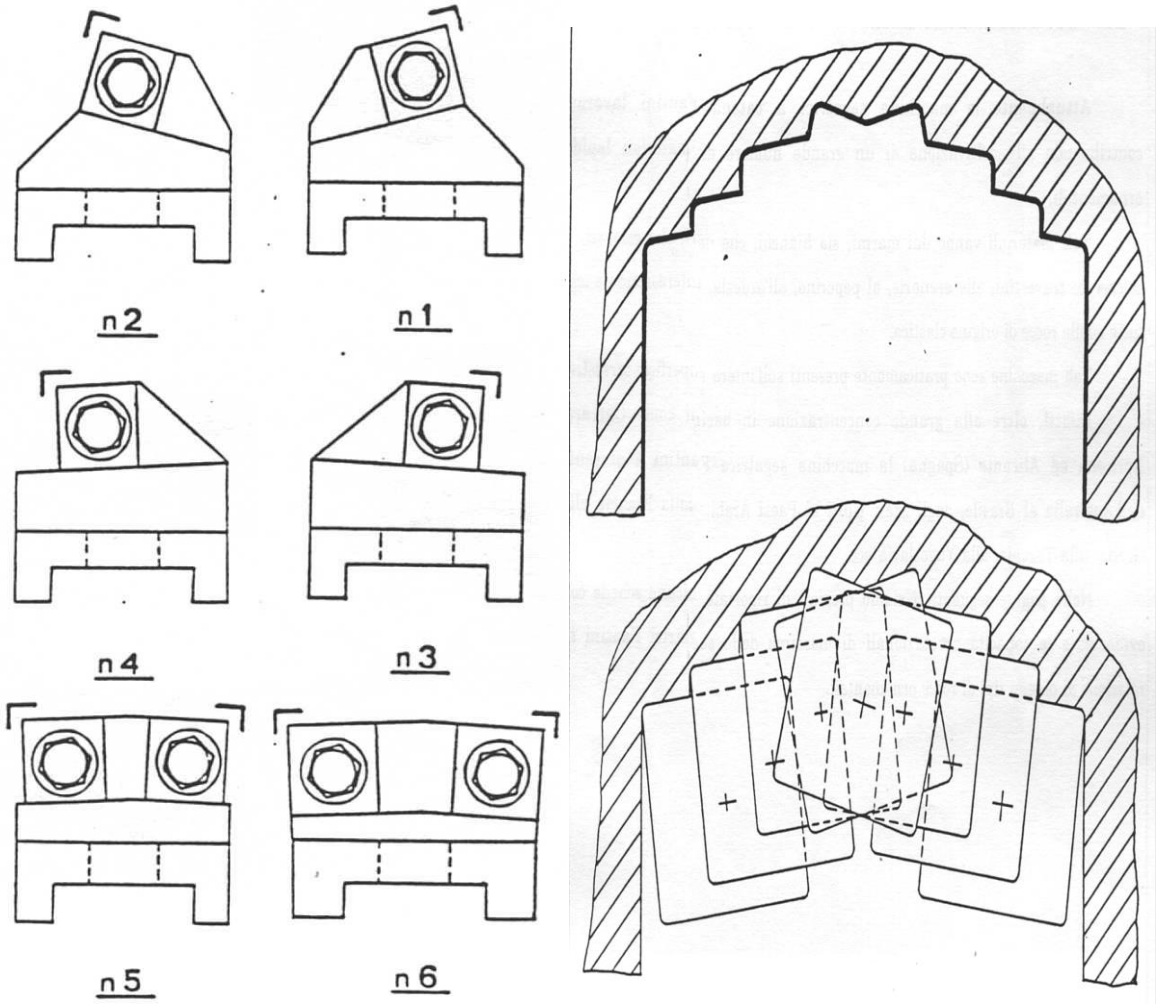


Slika 2-4 Segment reznog lanca lančane sjekačice (Sariisik i Sariisik, 2010).

1) članak lanca 2) spojnica 3) klin 4) osigurač klina 5) nosač pločice 6) rezna pločica 7) vijak nosača 8) vijak pločice

Rezni lanac je konstruiran tako da se prvom reznom pločicom u seriji otvara rez, a svaka sljedeća rezna pločica služi za proširivanje reza. Smanjenje naprezanja po nosaču, samim time i smanjenje opterećenja stroja se postiže simetričnim postavljanjem reznih pločica. Na slici 2-4 je prikazan niz reznog lanca od osam nosača i deset reznih pločica. Prvih šest nosača ima jednu pločicu, dok zadnja dva nosača imaju po dvije pločice, zbog širine reza. Segment reznog lanca ponavlja se naizmjenično, a broj ponavljanja ovisi o duljini radnog organa odnosno mača.

Redoslijed postavljanja nosača na lanac označava se brojevima, a geometrijski oblik reza ovisi o orijentaciji i broju reznih pločica. Na slici 2-5 je prikazan primjer geometrijskog oblika reza, za segment reznog lanca sa šest nosača i osam reznih pločica.



Slika 2-5 Redoslijed postavljanja nosača i geometrijski oblik reza, reznog segmenta lanca sa šest nosača i osam reznih pločica (Dunda i Kujundžić, 2003).

Rezna pločica je dio na lancu lančane sjekačice, koja je u direktnom kontaktu sa kamenom i o njoj jako ovisi učinak rada lančane sjekačice. Postoji više vrsta reznih pločica na tržištu, a najčešće se koriste rezne pločice u obliku kvadrata, zvijezde i kruga (slika 2-6). Za izradu reznih pločica se koristi nelegirani čelik koji se onda presvlači sa volfram-karbidom. Postoje i rezne pločice izrađene od polikristalnih dijamanata, presvučene volfram karbidom, koje se koriste za abrazivne i vrlo tvrde stijene. Polikristalni dijamant se dobiva u tehnološkom procesu sintetiziranjem odabranih dijamantnih čestica te

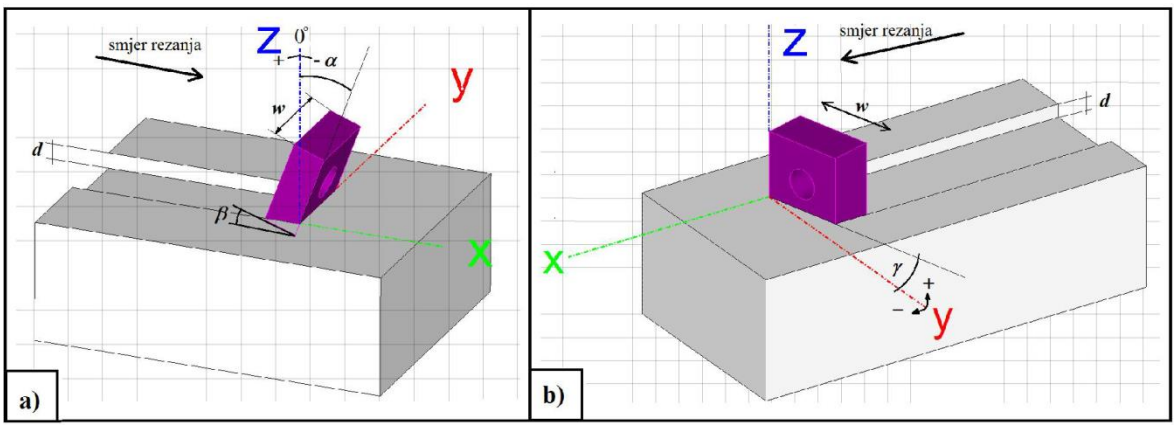
se na njega nanosi volfram-karbidni supstrat, koji poboljšava plošne karakteristike za spajanje s ostalim metalima i daje dodatnu čvrstoću reznoj pločici (Primavori, 2005).



Slika 2-6 Rezne pločice a) kvadratičnog oblika, b) kružnog oblika, c) zvjezdastog oblika (Primavori, 2005).

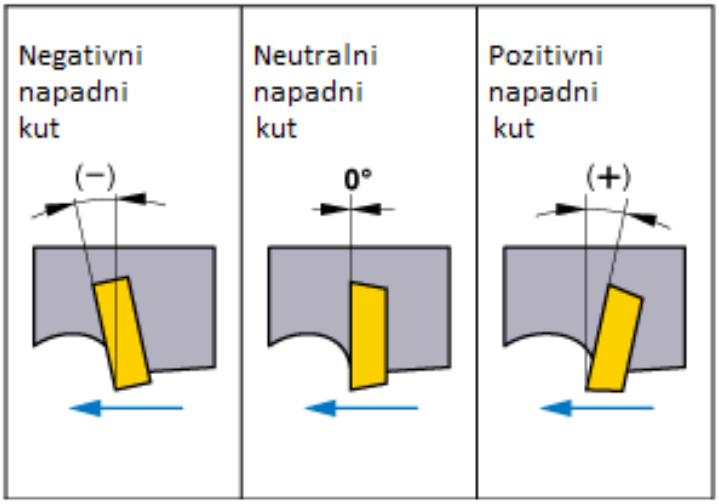
Kod novijih lančanih sjekačica rezne pločice se pričvršćuju na nosače pločica vijcima, dok su se kod starijih modela reznog alata pričvršćivale varenjem. Kada se istroše vrhovi reznih pločica, odvijanjem i zakretanjem pločica za rezanje, namjeste se vrhovi koji nisu istrošeni. Vijčanim spajanjem pločice na nosače pločica, pojednostavljena je i ubrzana promjena pločica i izbjegnuta je kruta veza pločica što je rezultiralo smanjenim otkidanjem pločica. Rezna pločica se bira prema vrsti stijene koja se reže i prema najboljem omjeru cijene reznih pločica i površine ispiljenog reza. U našim kamenolomima se najčešće i dalje primjenjuju rezne pločice od nelegiranog čelika (Korman, 2014).

Svaka rezna pločica na lancu je određena svojim geometrijskim veličinama u prostoru (slika 2-7). Geometrijske veličine rezne pločice su: napadni kut rezne pločice α, kut otklon β, bočni kut rezne pločice δ i bočni napadni kut rezanja γ.



Slika 2-7 Geometrijske veličine reznog alata a) α=-20°, γ=0°, δ=0°, β =20°; b) α=0°, γ =15°, δ=0°, β=0° (Korman, 2014).

Slika 2-7 a) prikazuje geometrijske veličine za reznu pločicu sa napadnim kutem α = -20°, bočnim napadnim kutom rezanja γ= 0°, bočnim nagibom rezne pločice δ = 0° i kutom otklona β = 20°, a slika 2-7 b) prikazuje geometrijske veličine za reznu pločicu sa bočnim napadnim kutem γ = 15°, a svi ostali kutevi su jednaki nuli. Na slici 2-8 prikazani su negativni, neutralni i pozitivni napadni kut rezne pločice. Rezna pločica koja se koristi prilikom rezanja pozitivnim napadnim kutem je pločica u obliku krnje piramide. Razlog tomu je to što se sa reznom pločicom kvadratičnog oblika ne može postići pozitivni kut. Razlika između reznih pločica za pozitivni i negativni napadni kut je i u tome što se kod pločice kvadratičnog oblika koristi svih osam vrhova za rezanje, dok se kod pločice oblika krnje piramide koriste samo četiri vrha za rezanje.

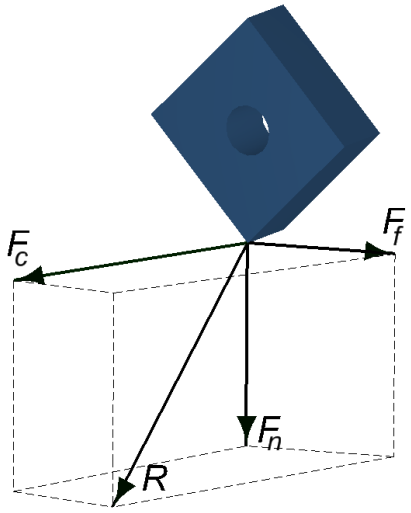


Slika 2-8 Negativni, neutralni i pozitivni napadni kut rezne pločice (Mitsubishi materials, 2017).

Prva rezna pločica na lancu lančane sjekačice uvijek reže u uklještenim uvjetima, odnosno ima samo jednu slobodnu površinu za formiranje odloma, dok svaka sljedeća rezna pločica reže u neuklještenim uvjetima i ima dvije slobodne površine za formiranje odloma. Navedene geometrijske veličine rezne pločice, fizikalno – mehaničke i strukturne značajke stijenske mase te uvjeti rezanja utječu na smjer, pravac i intenzitet sile rezanja. Rezultantna sila R koja se javlja tijekom rezanja prilikom interakcije stijene i reznog alata može se rastaviti na tri ortogonalne komponente (slika 2-9).

- tangencijalna ili horizontalna sila F_c, djeluje paralelno s trajektorijem alata,
- normalna sila F_n, djeluje okomito na trajektoriju alata,

- bočna sila F_f, koja djeluje okomito na ravninu koja je određena prethodnim dvjema silama



Slika 2-9 Rezultantna sila rezanja i njene komponente (Korman, 2014).

Prilikom rezanja stijena generalno se mogu razlikovati dvije vrste loma, plastični i krti lom. Kod plastičnog loma dolazi do kontinuiranog odvajanja odlomaka i manje su amplitude sila rezanja, dok se kod krtog loma odvajanje odlomaka događa lamelarno i odlomci se formiraju diskontinuirano. Veće amplitude rezne sile kod krtog loma imaju za posljedicu veće vibracije i dinamička naprezanja na reznom alatu i samim time veće trošenje alata.

Postoji više raznih modela koji opisuju veličine koje utječu na učinkovitost rezanja. Rezivost stijenske mase može se odrediti na temelju vrijednosti sila koje se pojavljuju na reznom alatu i energiji koja se utroši na rezanje. Postoje četiri osnovna analitička modela kojima se može opisati teorija rezanja: Merchant-ov model, Evans-ov model, Nishimatsu-ov model, Detournay-ov i Defourny-ov model (Korman, 2014.).

Merchant (1945) je prvi predstavi model za proračun sila na reznom alatu u obradi metala. Model je primjenjiv za alate sa reznom oštricom u obliku klina, uz pretpostavku da do sloma dolazi na mjestu gdje je vrh reznog alata okomit na pravac kretanja alata, te se temelji na pretpostavci da je dubina reza *d*, manja od širine reznog alata (Merchant, 1945). Evans (1962) je ustanovio da prilikom rezanja ugljena ne dolazi do kontinuiranog odvajanja odlomaka nego da se odlomci ugljena odvajaju diskontinuirano, uslijed vlačnih naprezanja. Na temelju ispitivanja razvio je model za rezanje stijena sa reznim alatom u

obliku klina (Evans, 1962). Nishimatsu (1972) je pretpostavio da do sloma materijala dolazi po posmičnoj ravnini, te da oblik loma ima jednostavni oblik klina. Prema obliku odlomljenih čestica, došao je do zaključka da pri rezanju stijena ne dolazi do plastičnih deformacija (Nishimatsu, 1972). Detournay-ov i Defourny-ov se zasniva na eksperimentalnim rezultatima uređaja za pravolinijsko rezanje stijena. Model pretpostavlja da sile rezanja ovise o unutarnjoj specifičnoj energiji koja je povezana s tlačnom čvrstoćom. Model se koristi samo za male dubine rezanja i uzima u obzir stupanj istrošenosti reznih pločica (Detournay i Defourny, 1992).

U svim navedenim analitičkim modelima razmatra se interakcija reznog alata i stijene dvodimenzionalno, dok se u stvarnosti interakcija odvija trodimenzionalno, i to je najveći nedostatak tih modela. U modele također nije uključen utjecaj bočnog kuta i bočnog napadnog kuta rezne pločice koji također imaju utjecaja na se na reznom alatu.

2.2. Radne veličine lančane sjekačice

Kod lančanih sjekačica pogonska energija je uvijek električna, dok sekundarna energija za pogon motora može biti električna ili hidraulična. Neovisno o izvedbi sjekačice, ključne radne veličine kod lančanih sjekačica su brzina posmaka U i brzina lanca u_{to}, a njihove vrijednosti ovise o otporima koji se javljaju uslijed rezanja. Brzina posmaka i brzina lanca moraju biti prilagođene otporima koji se javljaju usred rezanja, a regulacija se vrši pomoću regulatora na upravljačkoj ploči. Pravac gibanja lanca može biti okomit ili pod određenim kutem u odnosu na smjer posmaka, a ovisi o položaju mača. Brzina lanca je u prosjeku dvije tisuće puta veća od brzine posmaka, a optimalne vrijednosti brzine posmaka i lanca temelje se na preporuci proizvođača (Korman et al., 2015).

Na temelju dosadašnjih istraživanja, najveći učinak na rezanje lančanih sjekačica ima jednosobna tlačna čvrstoća i efektivna duljina mača (Copur, 2009). Teže sjekačice su stabilnije i proizvode manje vibracije na reznom elementu, te imaju veći učinak rezanja od lakših sjekačica. Povećanje učinka rezanja također je moguće ostvariti povećanjem efektivne duljine mača, ako sjekačica ima dovoljnu snagu i masu. Također je ustanovljeno da je jednoosna tlačna čvrstoća obrnuto proporcionalna učinku rezanja, odnosno da se napredak rezanja smanjuje povećanjem jedoosne tlačne čvrstoće (Copur et al., 2011).

Prema navedenim utjecajnim veličinama razvijen je indeks penetracije lančane sjekačice CSPI (Chain Saw Penetration Index):

$$CSPI = \frac{W \cdot H_o}{UCS}, \tag{2-1}$$

gdje je:

CSPI – penetracijski indeks lančane sjekačice,

W – masa lančane sjekačice bez tračnica,

H_o – efektivna duljina mača (m),

UCS – jednoosna tlačna čvrstoća (N/m^2).

Čimbenici koji utječu na dubinu rezanja su: brzina posmaka, brzina lanca, dužina reznog segmenta i kuta mača, a dubinu reza je moguće izračunati prema izrazu (Mellor, 1976):

$$d = \frac{U}{u_t} \cdot S \cdot \sin \varphi, \tag{2-2}$$

gdje je:

U – brzina pomaka sjekačice (m/s),

u_t – brzina lanca (m/s),

S – dužina segmenta (m)

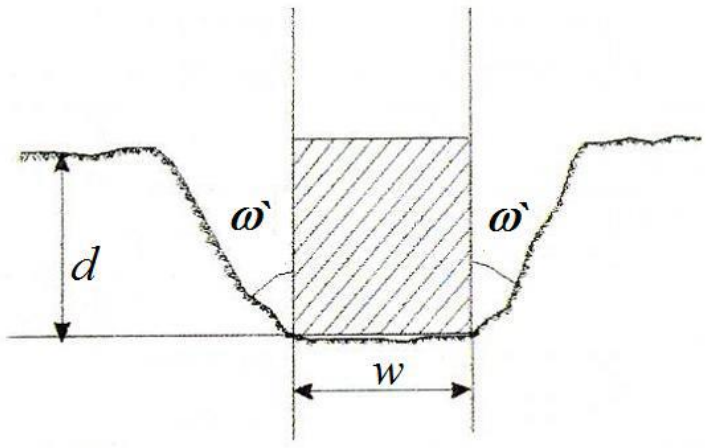
φ – kut između mača i pravca rezanja (°).

Iz izraza je vidljivo da dubina reza ovisi o radnim ali i o konstrukcijskim veličinama. Povećanjem omjera brzine lanca i brzine posmaka povećati će se i dubina rezanja reznih pločica, ali kod elektro-hidrauličkih sjekačica smanjenjem brzine lanca smanjuje se i brzina posmaka što rezultira smanjenjem učinka (Dagrain et. al., 2001). Kod električnih lančanih sjekačica brzinu posmaka je moguće smanjiti neovisno o brzini lanca, međutim brzinu lanca je moguće smanjiti do te mjere da mora biti dovoljno velika da odstranjuje odlomljeni materijal nastao za vrijeme rezanja. O brzini lanca ovisi i potrošnja alata, Kenny i Johnson (1976) su ustanovili da povećanjem dubine reza dolazi do smanjenja trošenja alata.

3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

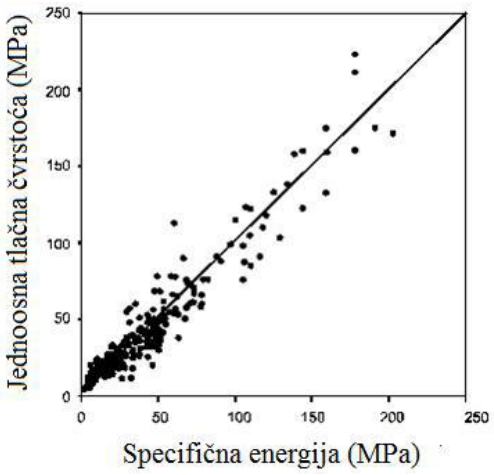
Prilikom istraživanja utjecaja fizičko mehaničkih svojstava stijena na efikasnost lančane sjekačice, treba uzeti u razmatranje i ostale čimbenike kao što su konstrukcija reznog alata i radne veličine. Čvrstoća stijene ima utjecaj na sile i na energiju rezanja, a utjecaj čvrstoće ovisi o obliku i položaju reznog alata (Roxborough, 1987). Prilikom ispitivanja utjecaja raznih elemenata na učinak lančane sjekačice, jako je teško dovesti u korelaciju sve elemente koji utječu na samo rezanje stijenske mase. Prema dosadašnjim teorijama sile na reznim elementima konusnog oblika ovisi o omjeru vlačne i tlačne čvrstoće i vlačnoj čvrstoći. Kod lančanih sjekačica rezni elementi su kvadratičastog oblika, te na učinak rezanja može djelovati posmična ili vlačna sila ovisno o kutu napada. Kod materijala homogenog sastava puno je lakše definirati interakciju između materijala i reznog elementa, nego kod stijena koje su heterogeni elementi. Iz tih razloga se ispitivanja najčešće provode na pojedinom alatu i na temelju uzorka stijene.

Copur et. al. (2011) su analizirali utjecaj određenih svojstava stijenske mase na sile i energiju rezanja. Ispitivanja je proveo na šest grupa uzoraka različitih fizikalno mehaničkih svojstava, pri različitim dubinama rezanja, pomoću uređaja za pravolinijsko rezanje i pri napadnom kutu reznih pločica od -5°. Na temelju rezultata ispitivanja ustanovljeno je da na porast specifične energije rezanja utječe porast vrijednosti omjera tlačne i vlačne čvrstoće. Također je ispitivanjem utvrđeno da površina brazde koju ostavlja rezni element u uzorku ovisi o površini reznog alata i kutu odloma $\omega`$, a kut odloma se povećava s porastom vrijednosti vlačne čvrstoće (slika 3-1).



Slika 3-1 Kut odloma pri rezanju u uklještenim uvjetima (Copur et. al., 2011).

Pri manjim dubinama rezanja (do 2 mm) dolazi do plastičnog odloma stijene i ustanovljeno je ispitivanjima da do te dubine specifična energija rezanja ovisi o tlačnoj čvrstoći. Richard (1999) je proveo ispitivanje na velikom broju uzoraka, dovodeći u interakciju specifičnu energiju rezanja i tlačnu čvrstoću pri dubini rezanja do 2 mm i napadnom kutu od -15°. Na slici 3-2 je prikazano kako specifična energija rezanja raste sa porastom tlačne čvrstoće. Promjenom dubine rezanja odnosno povećanjem dubine reza preko 2 mm, specifična energija rezanja prestaje ovisit o tlačnoj čvrstoći te počinje ovisiti o vlačnoj čvrstoći i napadnom kutu.



Slika 3-2 Odnosi između specifične energije i jednoosne tlačne čvrstoće (Richard, 1999).

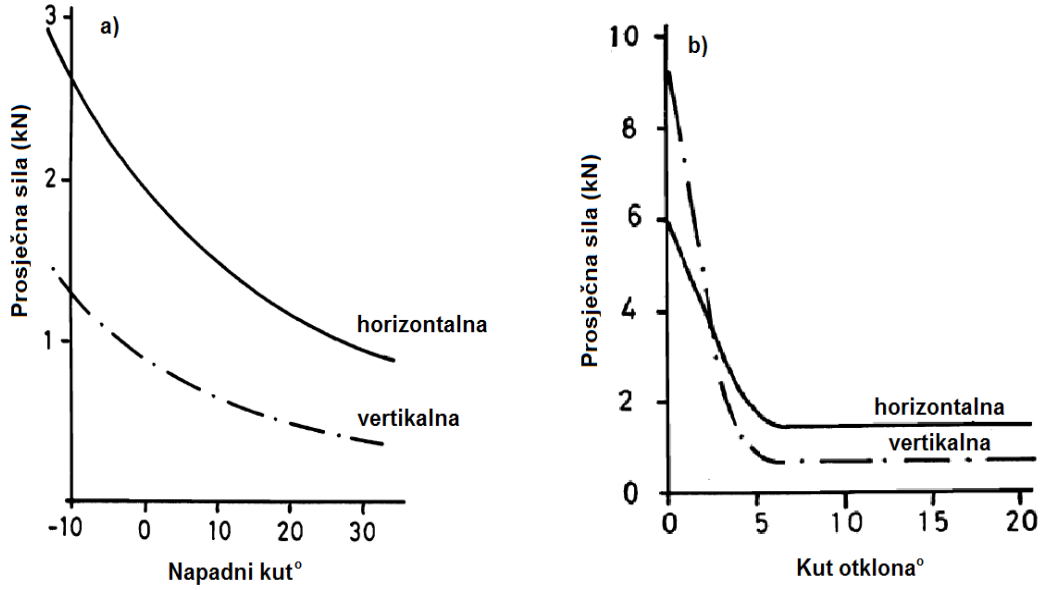
Jedno od fizikalno mehaničkih svojstava koje utječe na specifičnu energiju rezanja je i vlažnost, prema dosadašnjim istraživanjima. Mammen et al. (2009) su u svom radu istraživali utjecaj vlažnosti uzorka na energiju rezanja. Istraživanja su provedena na pješčenjacima pri različitim stupnjevima vlažnosti. Analiza rezultata je pokazala da se sile i energija rezanja smanjuje sa povećanjem vlažnosti na uzorcima pješčenjaka. Vrijednosti sile i energije određeni su na uređaju za pravolinijsko rezanje, a sadržaj vlage i svojstva stijena određena su prema ISRM-metodama.

Geometrijske veličine reznih pločica na lančanim sjekačicama razlikuju se ovisno o proizvođaču. U poglavlju dva opisane su rezne pločice i njihove geometrijske veličine te sile koje se javljaju prilikom rezanja, na reznom alatu.

Analizom rezultata ispitivanja koje su proveli Hood i Roxborough (1992) o utjecaju napadnog kuta i kuta otklona na vrijednosti sila koje se javljaju na reznim alatima za iskop stijena, došli su do zaključka da se prosječna sila smanjuje povećanjem napadnog

kuta odnosno da vrijednost sile za napadne kuteve mogu biti veće i do 3 puta u odnosu na pozitivne napadne kuteve. Optimalni napadni kut je 20°, a daljnjim povećanjem vrijednosti napadnog kuta poboljšanja su jako mala, a vjerojatnost pucanja alata se povećava. Ispitivanja su pokazala da kod reznih alata gdje je otklonski kut blizu nule, dolazi do velikih vrijednosti sila na reznim alatima, a povećanjem kuta otklona za 5° vrijednosti sila se smanjuju, te daljnje povećanje kuta ne utječe na vrijednost sila. Na slici 3-3 je prikazan utjecaj napadnog kuta i kuta otklona na sile rezanja.

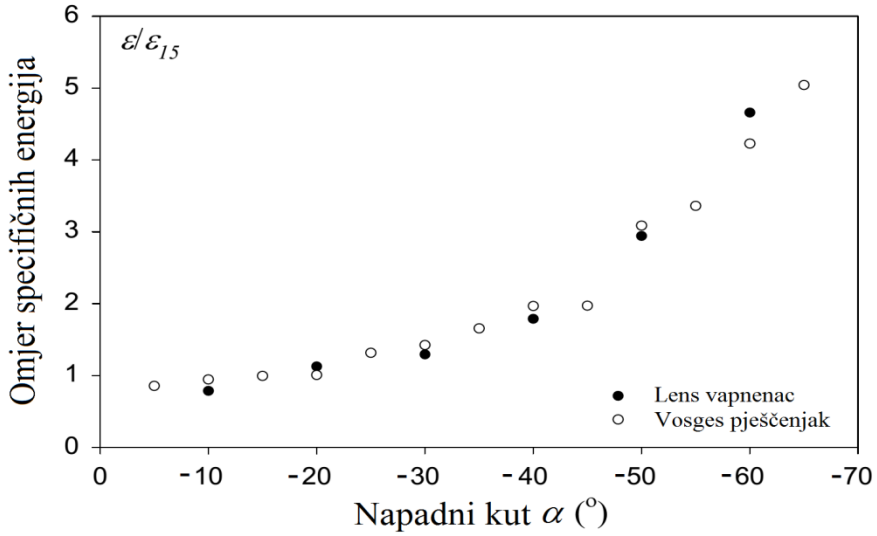
Lančane sjekačice najčešće koriste rezne pločice kvadratnog oblika i kod njih je najčešće napadni kut negativan. Iz prethodno opisanog istraživanja (Hood i Roxborough, 1992), moglo bi se zaključiti da bi trošenje reznih pločica bilo puno manje uslijed manje vrijednosti sila na vrhovima reznih pločica kada bi se koristio pozitivan napadni kut reznih pločica na lančanim sjekačicama, međutim u obzir se mora uzeti da rezne pločice sa negativnim napadnim kutom imaju osam vrhova predviđenih za rezanje koji se rotiraju dok se ne potroše, a rezne pločice sa pozitivnim napadnim kutem samo četiri vrha. Učinkovitost jednog ili drugog tipa pločica ovisit će o odnosu ukupnih troškova i ispiljene površine reza (Korman, 2014).



Slika 3-3 Utjecaj napadnog kuta i kuta otklona na sile rezanja (Hood i Roxborough, 1992).

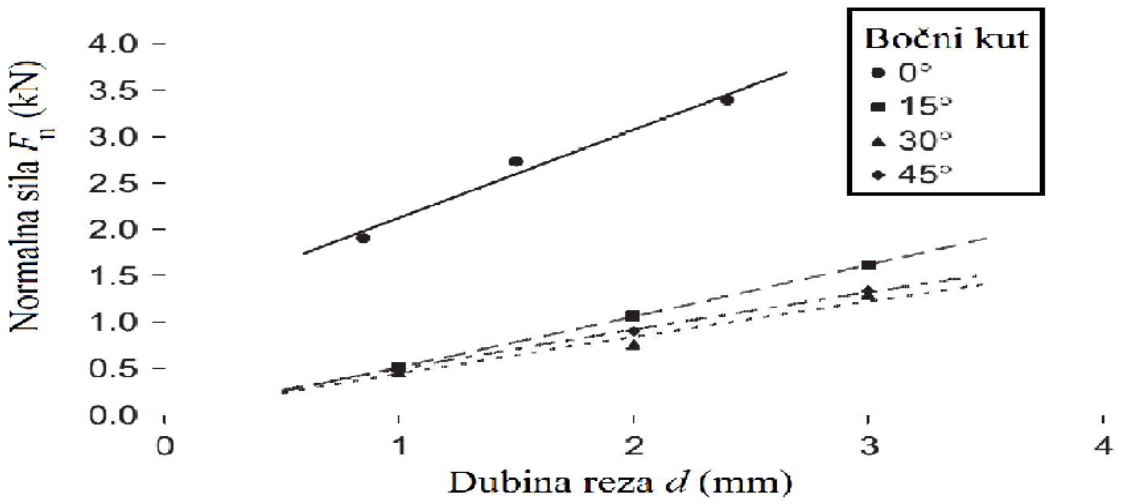
Schei et al. (2000) su analizirali utjecaj veličine vrijednosti negativnog napadnog kuta na specifičnu energiju rezanja. Došli su do zaključka da sa povećanjem negativnog napadnog kuta dolazi do povećanja specifične energije rezanja, što se može vidjeti na dijagramu na slici 3-4. Na ordinati se nalazi omjer specifične energije ε za pojedini

negativni napadni kut i specifične energije ε_{15} za negativni napadni kut od -15°, a na apscisi se nalazi negativni napadni kut.



Slika 3-4 Odnos između negativnog napadnog kuta i specifične energije (Schei et al., 2000).

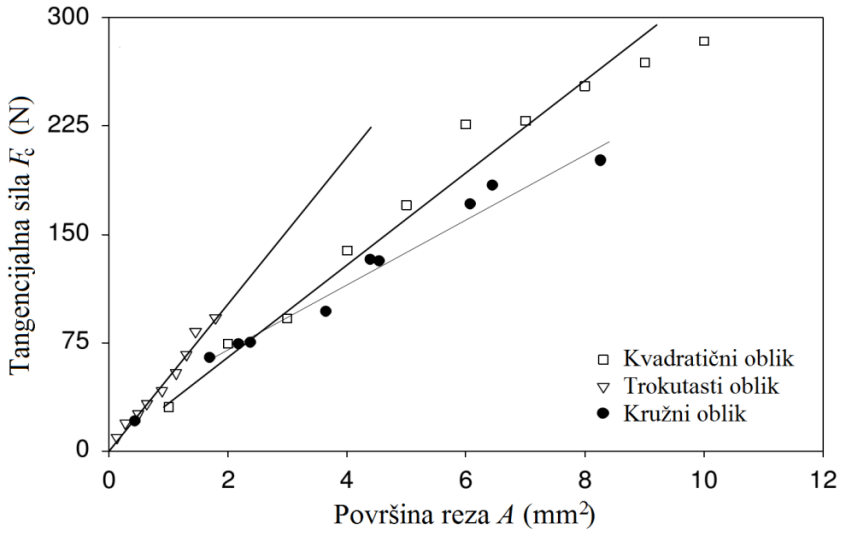
Copur (2009) je proveo ispitivanje s ciljem razumijevanja utjecaja geometrijskih veličina reznog alata lančane sjekačice na energiju rezanja i sile. Cilj ispitivanja je bio ustanoviti utjecaj bočnih kuteva, uvjeta rezanja, poprečnog razmaka pločica i dubine reza na sile i specifičnu energiju rezanja. Prilikom ispitivanja je korišten uređaj za pravolinijsko rezanje, konstantne veličine su bile napadni kut od -5° i brzina rezanja od 40 cm/s (slika 3-5).



Slika 3-5 Utjecaj dubine reza i bočnog kuta na normalnu komponentu sile rezanja (Copur, 2009).

Drugi dio ispitivanja odnosio se na utjecaj poprečnog razmaka između reznih pločica na specifičnu energiju trošenja. Rezultati su pokazali da premalen razmak *s* između pločica generira veliku specifičnu energiju, te je povećana potrošnja pločica i dolazi do predrobljavanja stijene. Kod prevelikog razmaka pločica također se javlja velika specifična energija te proces rezanja je nedovoljno učinkovit. Kako bi odredio optimalan razmak između pločica Copur je proveo istraživanja koja su uključivala mjerenje sile pri različitim poprečnim razmacima i dubinama rezanja, te je dobio optimalan omjer poprečnog razmaka i dubine reza *s/d* koji se kreće u granicama od 1 do 5, ovisno o fizikalno mehaničkim svojstvima uzorka.

Na energiju rezanja također utječe i oblik rezne pločice kao i oblik brazde što ga rezna pločica ostavlja za sobom prilikom rezanja ovisno o geometrijskom obliku rezne pločice (kvadratični, trokutasti, kružni) i poprečnom razmaku između dviju susjednih reznih pločica. Richard et al. (2010) su proveli ispitivanje utjecaja oblika reznih pločica na vrijednosti horizontalne sile. Koristili su rezne pločice kvadratičnog, trokutastog i kružnog oblika pri napadnom kutu od 15°. Došli su do rezultata da je vrijednost horizontalne sile najveća kod reznih pločica trokutastog oblika, a najmanja kod reznih pločica kružnog oblika, pri jednakoj površini reza (slika 3-6).



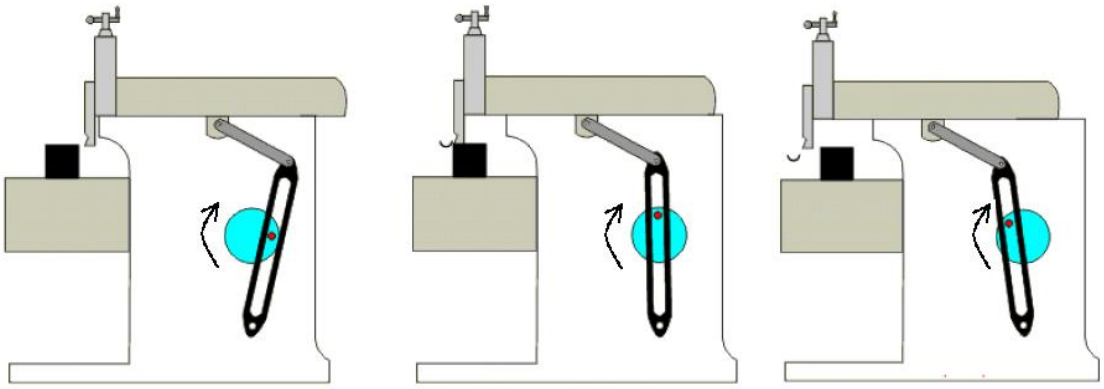
Slika 3-6 Utjecaj geometrijskog oblika reznih pločica na vrijednosti horizontalne sile (Richard et al., 2010).

4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

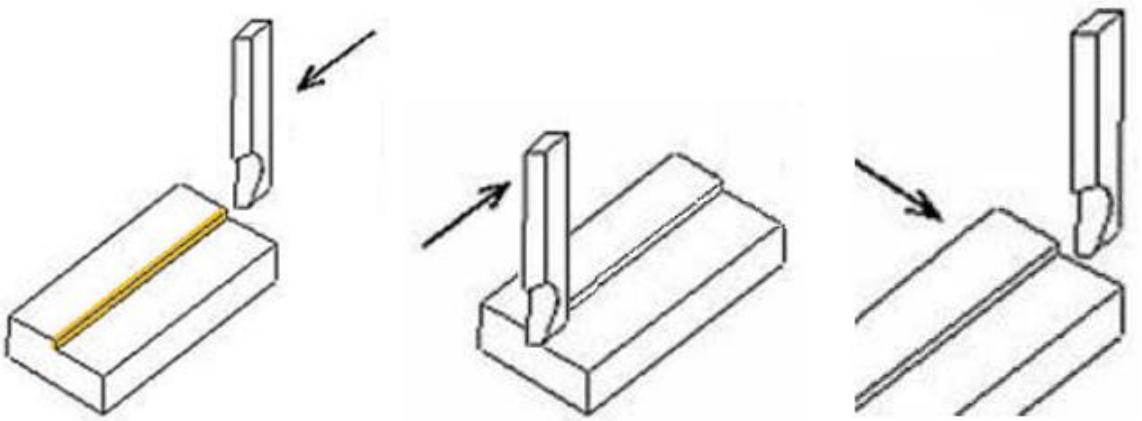
Utjecaj konstrukcije reznog lanca na učinak sjekačice je moguće analizirati na temelju sila koje se javljaju na reznim pločicama tijekom rezanja. Vrijednosti sila koje se pojavljuju na reznim pločicama u prvom redu ovise o geometrijskim veličinama reznih pločica i o dubini reza. Ispitivanje je provedeno sa svrhom određivanja utjecaja jedne geometrijske veličine rezne pločice, odnosno napadnog kuta, na vrijednosti sila na reznim pločicama. Laboratorijska ispitivanja su provedena na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena u Laboratoriju za rudarsku mehanizaciju i arhitektonsko-građevni kamen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

4.1. Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena

Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena je modificirana blanjalica za metal. Blanjanje (eng. *shaping*) 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). Alat za blanjanje je nož određene geometrije, koji tijekom rezanja obavlja glavno pravocrtno gibanje. Glavno gibanje se obavlja kulisnim pogonom (slika 4-1). Povratak alata u početni položaj je po istoj putanji. Nakon povratka alata u početni položaj slijedi posmak koji je okomit na glavno gibanje alata i kod kratkohodnih blanjalica ga obavlja radni stol. Dubina reza se određuje spuštanjem ili podizanjem noža u držaču alata. Shematski prikaz kratkohodnog blanjanja je prikazan na slici 4-2.

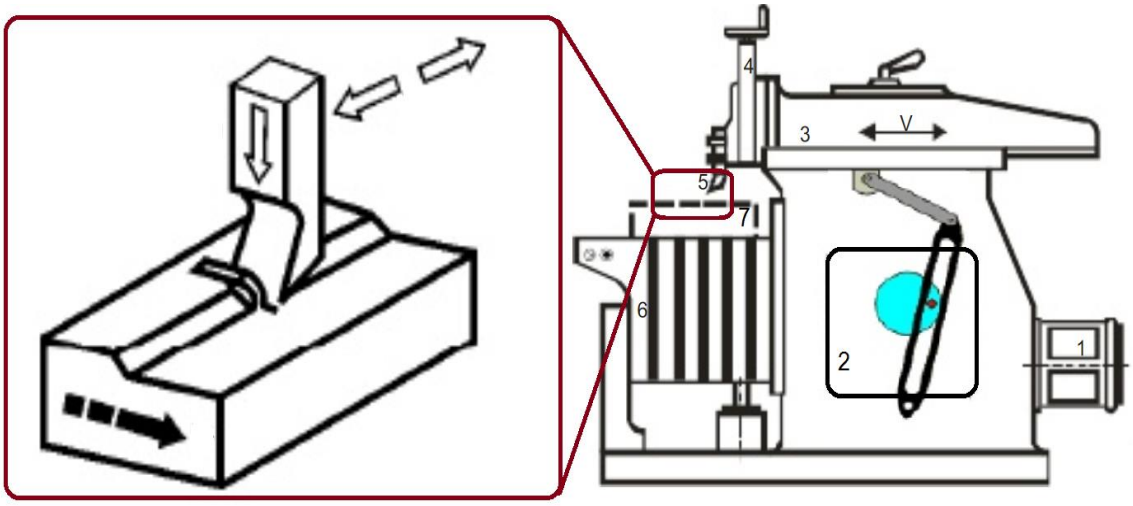


Slika 4-1 Način glavnog gibanja mehaničke blanjalice (Slade, 2012).



Slika 4-2 Shematski prikaz kratkohodnog blanjanja (Slade, 2012).

Blanjalica radi na način da se rotacija pogonskog elektromotora (1) prenosi pomoću prijenosnika do mehanizma za pretvaranje rotacijskog u pravocrtno gibanje (2). Pravocrtno gibanje se prenosi na konzolu (3) na kojoj se nalazi nosač alata (4) na kojem je učvršćen rezni alat (5). Time je omogućeno glavno pravocrtno gibanje. Na radnom stolu (6) koji se giba pomoću mehanizma posmaka, nalazi se predmet obrade (7) (Nedić i Lazić 2007). Shematski prikaz i dijelovi blanjalice prikazani su na slici 4-3.



Slika 4-3 Shema kratkohodne blanjalice za metal (Nedić i Lazić, 2007).

Za potrebe laboratorijskih ispitivanja kod uređaja za linearno rezanje nož za obradu metala je zamijenjen reznom pločicom od volfram-karbida, kvadratnog oblika, a na nosaču alata je postavljen mjerni pretvornik sile koji se povezuje sa mjernim sustavom na računalo. Pretvornik sile omogućuje mjerenje jedne ili više komponenti sila rezanja. Na

slici 4-4 prikazan je uređaj za pravolinijsko rezanje stijena sa troosnim mjernim pretvornikom sile i mjernim sustav, korišten u ispitivanju (Korman, 2014).

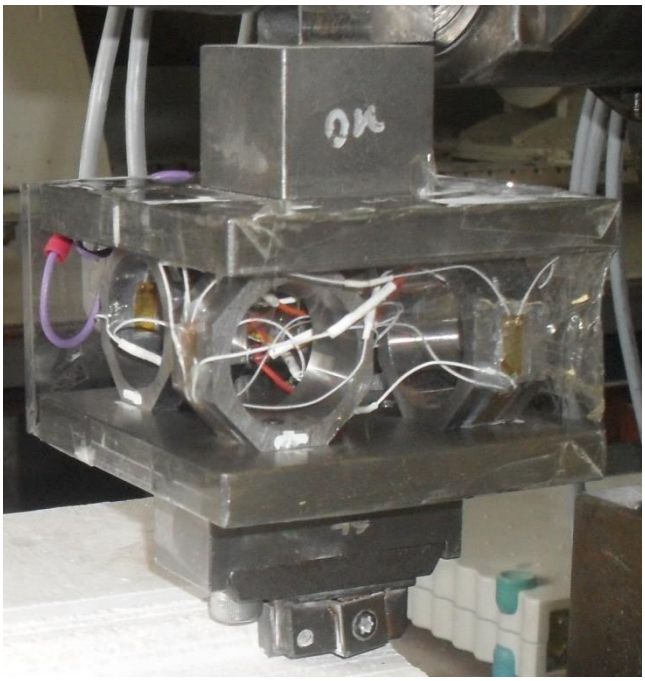


Slika 4-4 Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena i mjerni sustav (Korman, 2014).

4.2. Mjerni pretvornik sile

Postoje različiti tipovi mjernih pretvornika sile, ovisno o zahtjevima prilikom mjerenja sile rezanja. Većina pretvornika sile razvijena je za mjerenja sila pri obradi metala, međutim uz određene modifikacije mogu se primijeniti i u području rezanja stijena. Sile na reznom alatu ne mogu se mjeriti izravno već se mogu mjeriti samo deformacije materijala od kojeg je izrađen, kao posljedica djelovanja rezultantne sile. Deformacije mjernog elementa mogu se mjeriti pomoću elektrootpornih traka ili piezoelektričnih senzora. Mjerni pretvornik sile sa piezoelektričnim senzorima rade 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). Rad mjernih pretvornika sile sa elektrootpotnim trakama temelji se na svojstvu metalnih vodiča da uslijed mehaničkih deformacija, rastezanja kod vlačnog ili skupljanja kod tlačnog djelovanja, dolazi do relativnih promjena duljine, a time i do površine poprečnog presjeka, što rezultira promjenom otpora takvog vodiča (Kujundžić, 2002). S obzirom da

trenutno ne postoji mjerni pretvornik sile komercijalne izvedbe koji bi odgovarao specifičnostima ovih ispitivanja, za potrebe ispitivanja je korišten mjerni pretvornik sile konstruiran za potrebe doktorskog rada *„Utjecaj konstrukcijskih i radnih veličina na učinak lančane sjekačice“*, Tomislava Kormana. Pretvornik sile je izrađen tako da odgovara obliku i dimenzijama nosača reznih pločica, u prirodnoj veličini, koje se koriste kod lančanih sjekačica. Pri odabiru materijala i dimenzija mjernih elemenata postavljaju se dva zahtjeva, a to su krutost i osjetljivost. Krutost mora biti dovoljno velika kako bi mjerni elementi podnijeli dinamička naprezanja koja nastaju uslijed rezanja i kako bi se smanjio utjecaj vibracija na mjerenja tijekom rezanja. Istodobno krutost ne smije biti prevelika s obzirom da osjetljivost pretvornika sile ovisi o deformaciji elastičnog elementa u mjernom pretvorniku. Pretvornik sile sastoji se od krutih i elastičnih elemenata. Elastični elementi pretvornika sile su osmerokutni prstenovi koji su učvršćeni vijcima između dvije krute ploče. Sila koja djeluje na prsten mjeri se indirektno pomoću elektrootpornih mjernih traka na prstenu. Elektrootporne trake spojene su u Wheatstoneov most i mjere bočnu, horizontalnu i normalnu komponentu sile. Minimalna debljina stijenke mora zadovoljiti uvjet krutosti, odnosno deformacije nastale uslijed djelovanja maksimalne predviđene sile moraju biti unutar elastičnog područja. Mjerni pretvornik sile projektiran je za maksimalne vrijednosti sila do 5000 N (Korman, 2014). Konstrukcija mjernog pretvornika sile prikazana je na slici 4-5.



Slika 4-5 Konstrukcija mjernog pretvornika sile (Korman, 2014).

Za potrebe ovog mjerenja korišten je samostalni uređaj za prikupljanje podataka „Hbm Spider 8“ sa četiri kanala koji komuniciraju s računalom preko paralelnog sučelja. Za kompletan nadzor i upravljanje nad uređajem „Hbm Spider8“ koristi se programsko sučelje „Catman“, koje je instalirano na računalu. Program „Catman“ omogućuje bilježenje i prikaz podataka te vizualno praćenje tijeka eksperimenta na monitoru računala i promjene sila duž reza. Mjerni sustav za mjerenje sile prikazan je na slici 4-6.



Slika 4-6 Mjerni sustav za mjerenje sile rezanja (Korman, 2014).

Prije početka ispitivanja je potrebno odrediti vezu između sile koja se nanosi na mjerni pretvornik sile i električnog signala na izlazu pretvornika, u tu svrhu je provedeno statičko umjeravanje. Umjeravanje je provedeno za sve tri osi pretvornika sile, pri konstantnom nanošenju sile od 0 N do 2000N. Na ispitnom uređaju tlačna sila se nanosi pomoću hidrauličnog cilindra i ručne hidraulične pumpe. Hidraulični cilindar je učvršćen na konstrukciju uređaja okomito na horizontalnu ravninu postolja uređaja, a sastoji se od vanjske cijevi cilindra, klipa s klipnjačom i opruga pomoću kojih se klip vraća u početni položaj. Gibanje klipa se ostvaruje pomoću hidraulične pumpe preko koje se regulira brzina i intenzitet nanošenja sile (Kujundžić, 2002).

Prilikom umjeravanja prirast sile je bio kontinuiran, a intenzitet sile je registriran na računalu pomoću umjerenog pretvornika sile i uređaja za prikupljanje podataka „Spider8“. Za umjeravanje je korišten mjerni pretvornik sile proizvođača HBM model Z4A, klase točnosti 00 i mjernog područja 0 N do 20 kN. Poprečna osjetljivost pretvornika sile uzrokuje promjene izlaznog napona na sva tri kanala, neovisno o tome na koju os se nanosi sila. Veličina poprečne osjetljivosti ovisi o tome koliko su mjerne trake precizno

postavljene i o međusobnom položaju prstenova, i ona je uvijek prisutna neovisno o konstrukciji pretvornika sile. Pomoću mikrure postavljene na mjesto učvršćenja pretvornika sile, zamijećen je pomak u točki učvršćenja na uređaju za umjeravanje, za vrijednosti sila većih od 2000 N, s obzirom na taj pomak se nisu provodila umjeravanja iznad navedenih vrijednosti, iako je pretvornik sile dimenzioniran za veće vrijednosti sila. Na temelju ispitivanja dobivene su umjerne krivulje za pretvorbu vrijednosti izlaznog signala u milivoltima/voltu za vrijednosti sile u njutnima (Korman, 2014). Na slici 4-7 prikazan je uređaj za umjeravanje pretvornika sile.



Slika 4-7 Uređaj za umjeravanje pretvornika sile (Korman, 2014).

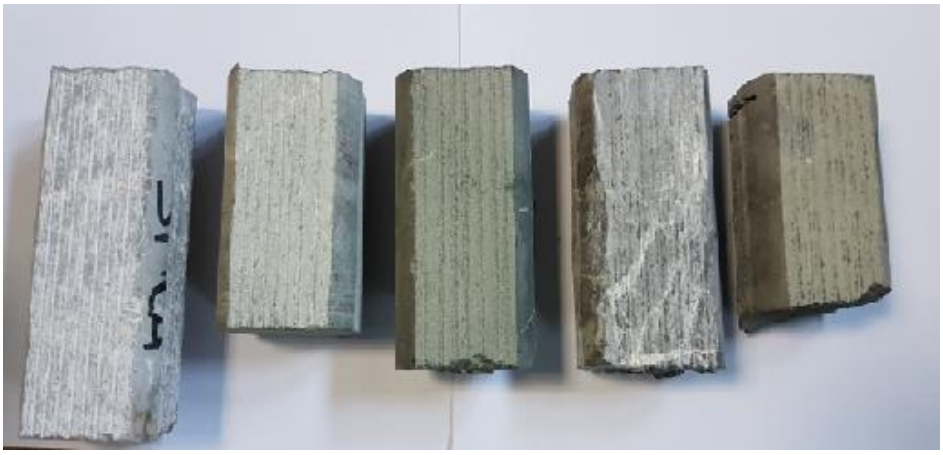
Nakon umjeravanja uređaja određena je i prirodna frekvencija mjernog pretvornika. Prirodna frekvencija je određena krutošću samog pretvornika, te je određena na način da su se mehaničkim udarcem po tijelu pretvornika sile pobudile vibracije, a pomoću mjernog sustava bilježeni signali. Prikupljeni podaci su obrađeni u programu LabView, te je određena prirodna frekvencija koja ovisno o osi iznosi od 1800 Hz do 2400 Hz.

4.3. Opis uzoraka

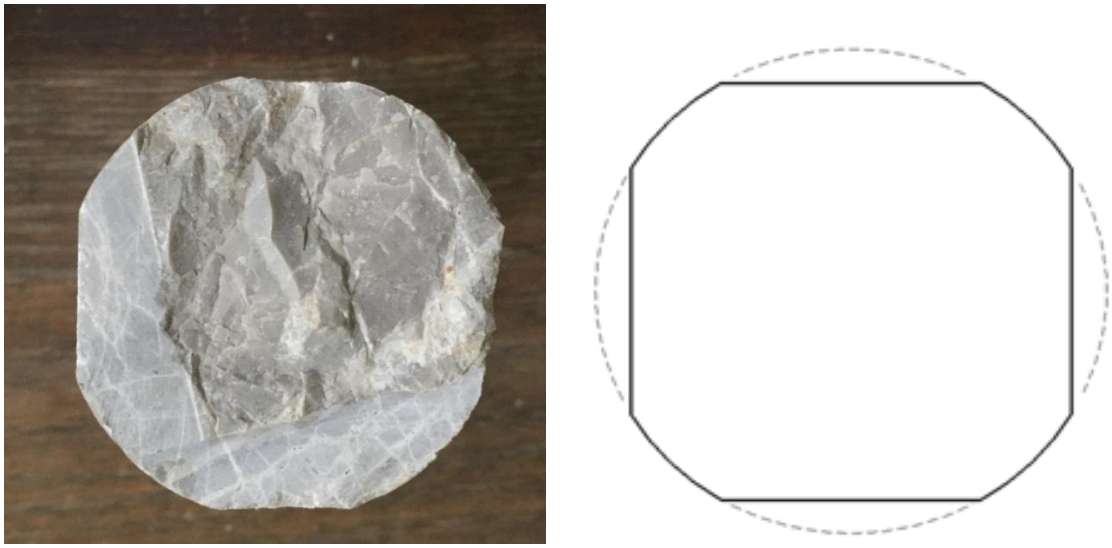
Za potrebe laboratorijskih ispitivanja odabrano je pet uzoraka sa različitim fizičko mehaničkim svojstvima, sa različitih ležišta. Uzorci su prikupljeni na sljedećim eksploatacijskim poljima: Brenzberg, Kraljev vrh, Lasinja, Špica i Vukov dol. Ležište

dijabaza „Brenzberg“ se nalazi oko 4 km udaljenosti jugozapadno od Orahovice. Ležište je magmatskog postanka i iz njega se eksploatira tehničko-građevni kamen. Kamenolom „Kraljev vrh“ se nalazi neposredno u blizini Zagreba na obroncima Medvednice. U ležištu se eksploatira magmatska stijena dijabaz koja se primarno koristi u proizvodnji asfaltnih masa i habajućih slojeva u cestogradnji. U kamenolomu „Lasinja“ se eksploatira bažična žična stijena spilit, koja se koristi kao tehničko-građevni kamen. Kamenolom se nalazi u blizini Karlovca. Eksploatacijsko polje „Špica“ se nalazi na sjevernim obroncima Kalnika, u općini Ljubešćica, u Varaždinskoj županiji. U kamenolomu prevladavaju stomatolitni vapnenci, sitnozrnati vapnenci i dolomitizirani vapnenci. Kamenolom „Vukov Dol“ nalazi se na 3 km udaljenosti od Kašine, na istočnim obroncima Zagrebačke gore. Ležište se sastoji od nekoliko vrsta metamorfnih stijena: mramor, brečasti i kataklazirani mramor, kvarc-kalcitni filit, argilošist i kataklazirani kvarc-kalcitni filit.

Dimenzije uzoraka, korištenih u laboratorijskim ispitivanjima, su odabrane prema dimenzijama prihvata i maksimalnom hodu uređaja za pravolinijsko rezanje stijena. Uzorci su u obliku valjka, a prije početka ispitivanja bilo je potrebno poravnavanje uzoraka sa sve četiri strane, kako bi se postigao što bolji prihvat čeljusti uređaja za pravolinijsko rezanje i kako bi napravio potreban broj rezova na uzorku. Tri poravnate strane uzorka su se koristile za što bolji prihvat na čeljust uređaja za pravolinijsko rezanje, a na četvrtoj strani su se izvodila ispitivanja. Na slici 4-8 su prikazani uzorci za ispitivanje. Drugi razlog za poravnavanje uzoraka je bio taj što sa poravnavanjem uzoraka ravnina rezanja postaje paralelna sa trajektorijom alata, pa se na jednoj poravnatoj strani uzorka može ponoviti više rezanja na istoj dubini rezanja. Na slici 4-9 prikazan je primjer uzorka poravnatog sa sve četiri strane i pripremljenog za ispitivanje.



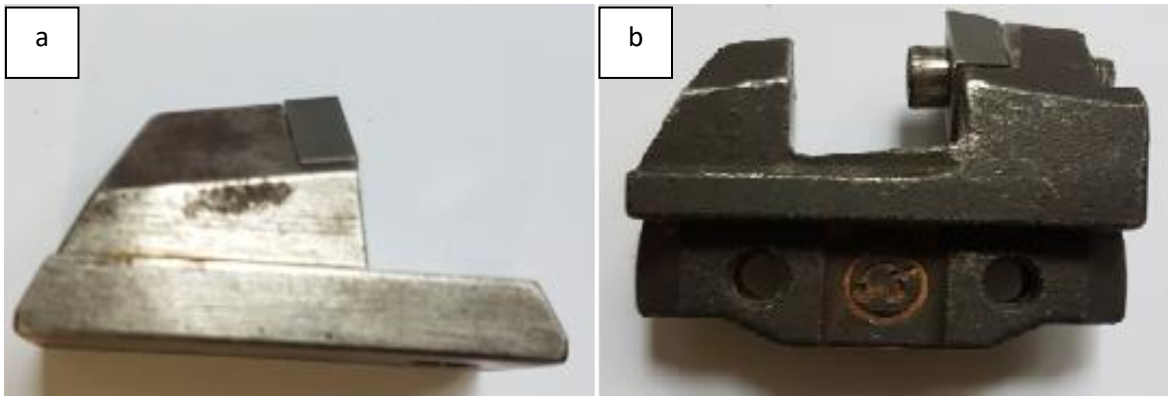
Slika 4-8 Uzorci za ispitivanje



Slika 4-9 Uzorak pripremljen za ispitivanje

4.4. Metoda ispitivanja

Ispitivanja su provedena na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena na pet uzoraka valjkastog oblika sa četiri poravnate strane. Ispitivanje se provodilo tako da se prvi uzorak učvrstio u čeljust uređaja za pravolinijsko rezanje stijena, nakon čega je površina uzorka poravnata paralelno s trajektorijom alata. Za negativni napadni kut rezne pločice, korišten je rezni element lančane sjekačice „*Pellegrini Ch-60*“. Nosač rezne pločice koji je korišten pri ispitivanju ima oznaku PM0. Na slici 4-10 a) prikazan je korišteni nosač i rezna pločica s negativnim kutem.

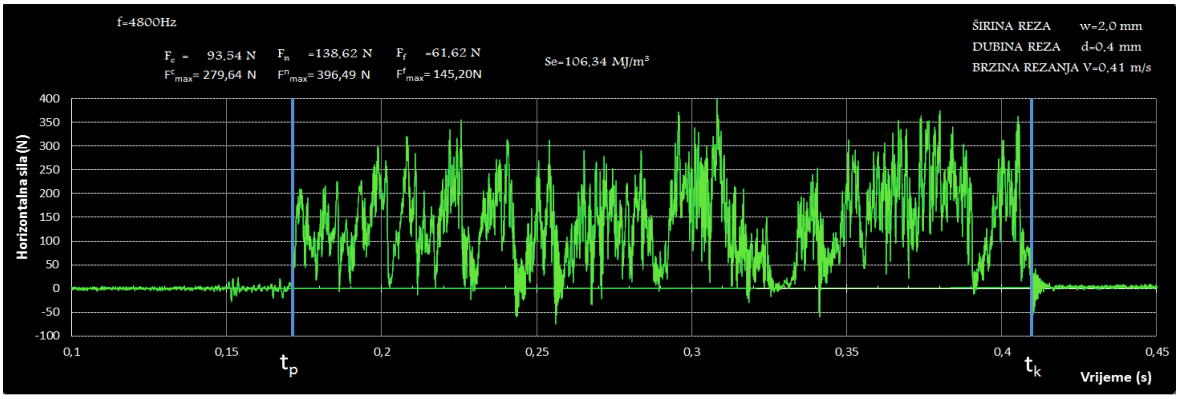


Slika 4-10 a) nosač rezne pločice za negativni napadni kut b) nosač rezne pločice za pozitivni napadni kut

Geometrijske veličine reznog elementa za negativni napadni kut su: napadni kutα = -8,6°, bočni kut δ = 45°, bočni napadni kut γ = 0°. Za pozitivni napadni kut rezne pločice

korišten je nosač proizvođača „*Korfmann*“, prikazan na slici 4-10 b), geometrijskih veličina: napadni kutα = 5,06°, bočni kut δ = 45°, bočni napadni kut γ = 0°.

Ispitivanja su podijeljena u tri serije za negativni napadni kut i u tri serije za pozitivni napadni kut, odnosno proces rezanja uzoraka proveden je pri tri različite dubine sa oba napadna kuta, na svih pet uzoraka. Dubine na kojima se rezalo su 0,2 mm, 0,4 mm i 0,6 mm. Za svaku dubinu rezanja provedeno je sedam rezova na svakom uzorku. Serija ispitivanja počinje podešavanjem dubine od 2 mm i postavljanjem nosača na mjerni pretvornik sile, te se radi minimalno sedam rezanja za svaku dubinu reza. Nakon toga se ploha uzorka ponovo poravnava, te se uređaj za pravolinijsko rezanje stijena namješta na sljedeću dubinu rezanja od 0,4 mm i počinje se sa rezanjem. Isti postupak se obavlja i za dubinu od 0,6 mm, te za pozitivni kut napada na svih pet uzoraka. Prilikom ispitivanja, pomoću mjernog pretvornika sile, izmjerene su vrijednosti normalnih, horizontalnih i bočnih sila za svaki napravljeni rez na uzorcima. Izlazni signal pretvornika bilježen je brzinom od 4800 uzoraka u sekundi. Vrijednosti izlaznog signala pohranjuju se u datoteku pri čemu je veličina električnog signala izražena kao omjer napona u milivoltima/voltu. U programskom paketu „*Microsoft office Excel*“ programirana je rutina koja na temelju kompenzacijske matrice vrijednosti električnog signala transformira u veličine izražene u njutnima (Korman, 2014). Program proračunava i prosječne i maksimalne vrijednosti sila. Na slici 4-11 prikazan je primjer rezultata mjerenja koji prikazuje zabilježene promjene normalne sile u vremenu rezanja. Tijekom svih laboratorijskih ispitivanja brzina rezanja bila je konstantna i iznosila je približno 0,4 m/s.



Slika 4-11 Primjer obrade rezultata ispitivanja (Korman, 2014).

4.5. Analiza rezultata

Na temelju provedenih laboratorijskih ispitivanja na svih pet uzoraka, u tablici 4-1 prikazani su rezultati mjerenja prosječnih i maksimalnih vrijednosti komponenti sila rezanja za negativni napadni kut, a u tablici 4-2 za pozitivni napadni kut rezne pločice. Rezultati pojedinačnih ispitivanja sila za svaki uzorak prikazani su u prilozima od 1 do 10. Iz navedenih tablica vidljivo je da vrijednosti sila ovise o dubini reza ali isto tako i vrsti uzorka. Kako bi se odredio utjecaj napadnog kuta i dubine reza na vrijednosti sile rezanja, provedena su ispitivanja korelacijske zavisnosti.

Tablica 4-1 Prikaz rezultata mjerenja sila za negativni napadni kut reznog elementa.

Uzorak	Dubina reza (mm)	Negativni kut					
		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
		Horizontalna (N)	Bočna (N)	Normalna (N)	Horizontalna (N)	Bočna (N)	Normalna (N)
Brenzberg	0,2	70,47	11,32	143,14	293,90	94,17	433,77
	0,4	164,15	31,53	274,56	715,92	160,27	653,98
	0,6	258,60	52,81	383,60	1151,26	198,98	797,60
Kraljev vrh	0,2	70,26	7,28	143,29	271,04	75,76	280,36
	0,4	148,14	23,08	265,63	605,53	140,93	516,19
	0,6	240,37	34,33	337,20	1188,67	170,06	682,15
Lasinja	0,2	61,77	13,59	160,37	209,68	81,87	337,30
	0,4	86,36	10,31	131,91	371,38	93,97	348,53
	0,6	146,84	21,27	198,98	684,44	135,46	495,25
Špica	0,2	38,77	4,71	60,66	147,50	37,67	117,68
	0,4	72,94	12,11	95,57	290,09	79,36	198,34
	0,6	108,42	20,07	128,02	485,02	103,20	284,37
Vukov dol	0,2	30,81	4,33	52,92	112,57	37,88	107,56
	0,4	65,49	14,33	90,82	262,49	61,19	186,25
	0,6	105,97	22,88	123,08	434,89	96,19	270,14

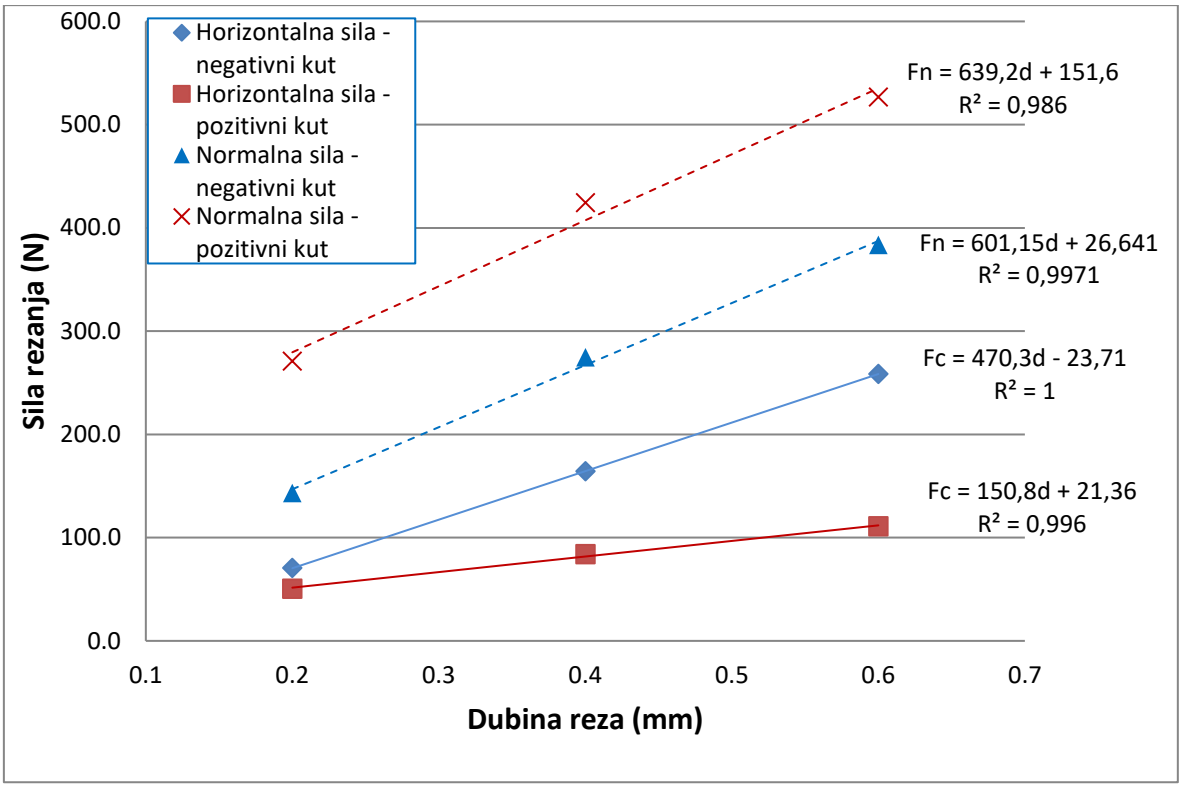
Cilj ispitivanja korelacijske zavisnosti je određivanje zavisnosti neke pojave o više varijabli uz uvjet da veza između tih varijabli nije funkcionalna (Pauše, 1993). Takva veza naziva se stohastička veza, a zavisnost varijabli određena je prema zakonu vjerojatnosti. Računanjem koeficijenta korelacije, moguće je ustanoviti jačinu stohastičke veze između nezavisnih varijabli, pomoću faktora korelacije R^2, koji služi kao mjera jačine stohastičke veze u linearnoj korelaciji. Raspon faktor korelacije R^2 je između nula i jedan. Ukoliko je

faktor korelacije R^2<0,5 kaže se da podaci korelacije slabo koreliraju, a ako je faktor korelacije R^2>0,5 kaže se da podaci znatno koreliraju. Što je R^2 bliži jedinici, veća je veza između nezavisnih varijabli. Ispitivanja su provedena pomoću programa „*Microsoft Excel*“ (Korman, 2008).

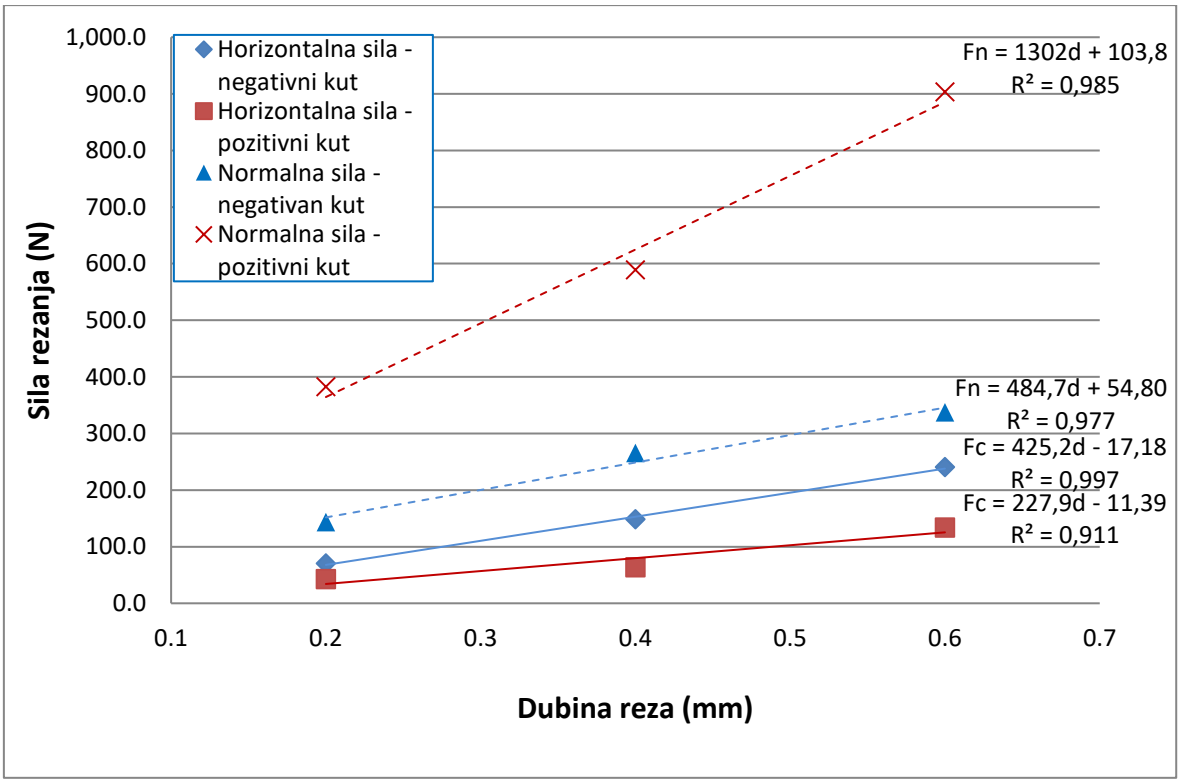
Tablica 4-2 Prikaz rezultata mjerenja za pozitivni napadni kut reznog elementa.

Uzorak	Dubina reza (mm)	Pozitivni kut					
		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
		Horizontalna (N)	Bočna (N)	Normalna (N)	Horizontalna (N)	Bočna (N)	Normalna (N)
Brenzberg	0,2	50,48	42,55	270,98	279,24	160,94	635,70
	0,4	83,80	71,08	424,40	430,67	212,99	854,25
	0,6	110,83	95,39	526,68	539,68	290,38	1058,28
Kraljev vrh	0,2	42,41	56,21	382,47	195,56	144,52	623,56
	0,4	63,33	91,54	588,68	316,82	214,95	1005,83
	0,6	133,57	167,86	903,51	666,44	362,51	1600,17
Lasinja	0,2	61,03	58,33	372,49	309,46	163,85	750,13
	0,4	81,21	81,92	498,49	417,79	217,55	910,12
	0,6	119,97	126,5	687,09	624,90	305,52	1358,29
Špica	0,2	25,84	33,20	193,63	158,76	90,46	317,32
	0,4	53,05	66,28	306,33	283,12	145,30	502,25
	0,6	74,85	93,16	383,77	373,35	210,73	635,60
Vukov dol	0,2	26,82	29,15	187,56	147,41	89,00	317,99
	0,4	46,81	51,30	279,63	231,54	124,85	432,77
	0,6	64,13	71,72	351,93	308,23	159,77	557,17

Na dijagramu (slika 4-12) prikazan je utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile rezanja za uzorak Brenzberg. Iz dijagrama je vidljivo da se povećanjem dubine reza povećavaju i vrijednosti horizontalne i normalne sile, te se može zaključiti da povećanje dubine reza ima veliki utjecaj na vrijednosti horizontalne i normalne sile i kod pozitivnog i kod negativnog napadnog kuta, na što ukazuju vrlo visoki faktori korelacije R^2, za sve četiri sile. Isto tako je vidljivo da su vrijednosti horizontalnih sila kod pozitivnog napadnog kuta značajno manje nego kod negativnog napadnog kuta, međutim situacija kod normalnih sila je obrnuta, odnosno vrijednost normalne sile kod pozitivnog kuta je znatno veća nego vrijednosti normalne sile kod negativnog kuta.



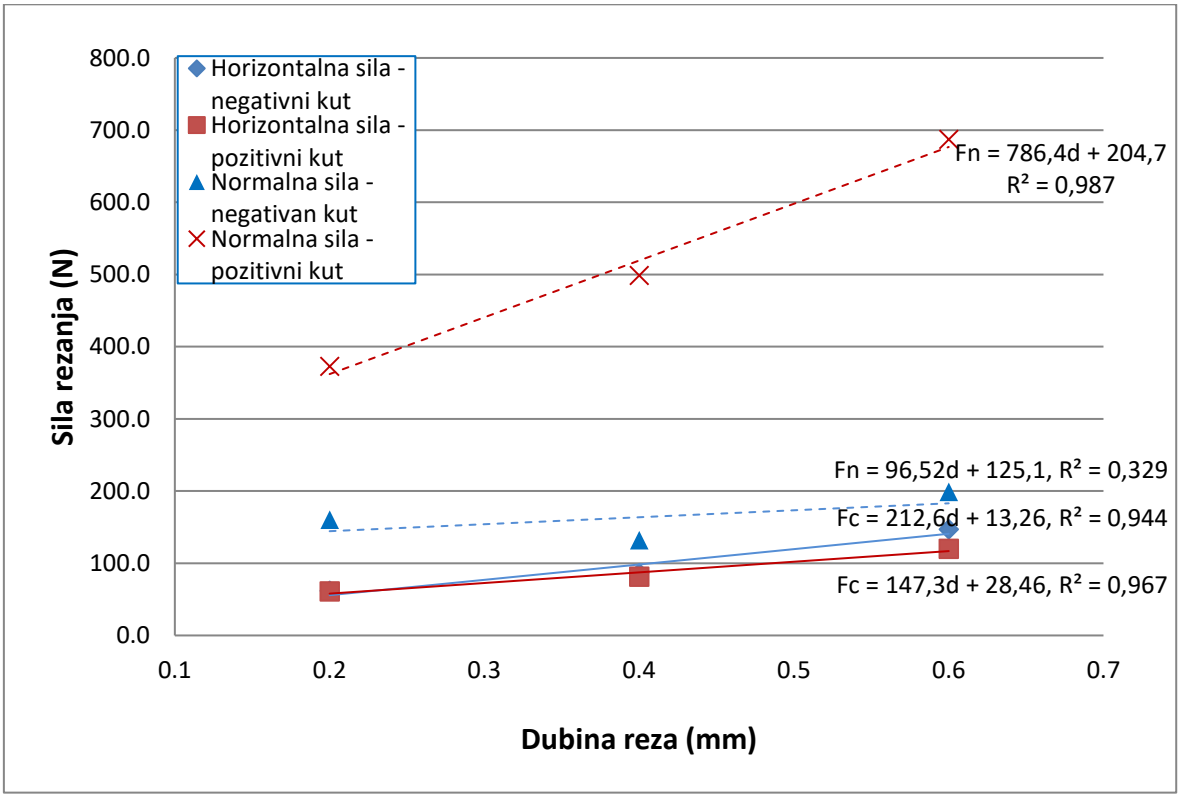
Slika 4-12 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile rezanja za uzorak Brenzberg.



Slika 4-13 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile rezanja za uzorak Kraljev vrh.

Na dijagramu (slika 4-13) prikazan je utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile rezanja za uzorak Kraljev vrh. Iz dijagrama je vidljivo da su faktori korelacije R^2, također visoki između vrijednosti horizontalnih i normalnih sila i dubina rezanja, kao i na prethodnom dijagramu. Isto tako su vrijednosti horizontalnih sila manje kod pozitivnog kuta, a vrijednosti normalnih sila veće kod pozitivnog kuta.

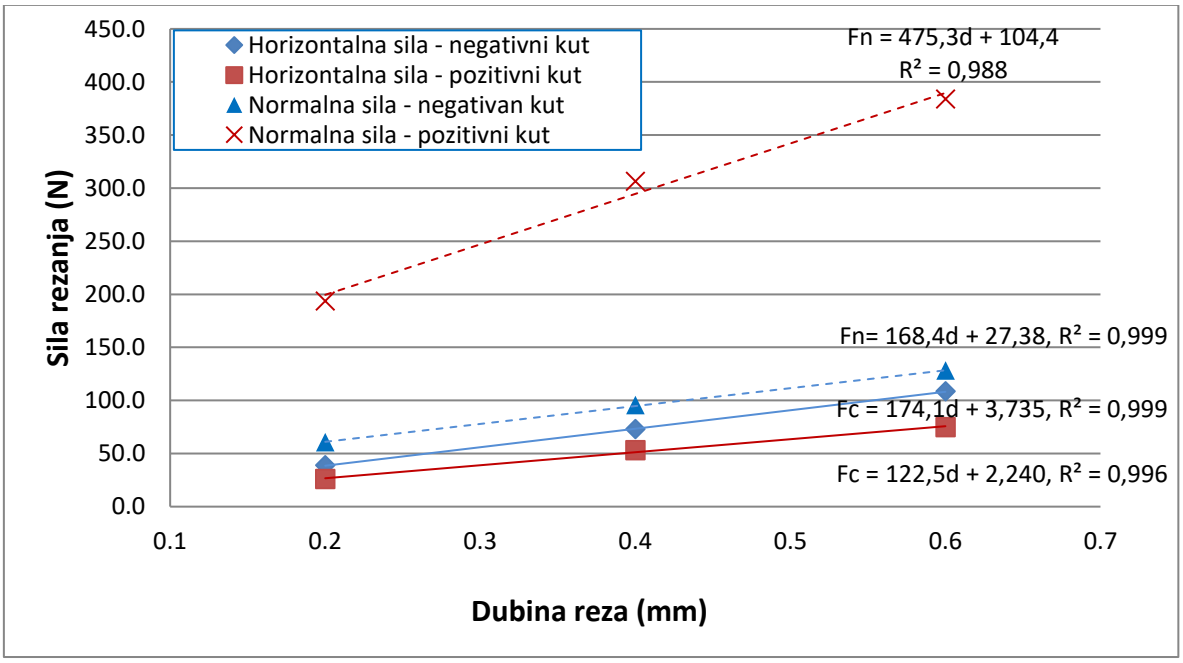
Na dijagramu (slika 4-14) prikazan je utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile rezanja za uzorak Lasinja. Iz dijagrama se vidi da su faktori korelacije R^2 također visoki, osim za normalnu silu negativnog kuta. Prema rezultatima ispitivanja vidljivo je da je vrijednost normalne sile negativnog kuta niža pri dubini rezanja od 0,4 mm u odnosu na dubinu rezanja od 0,2 mm. Faktor korelacije za navedenu silu iznosi R^2 = 0,329, što ukazuje na slabu vezu između dubine rezanja i normalne sile negativnog kuta. Pretpostavka je da je uzorak, na mjestu mjerenja sile oslabljen ili je sadržavao primjesu materijala manje tvrdoće, pa je iz tog razloga vrijednost sile niža.



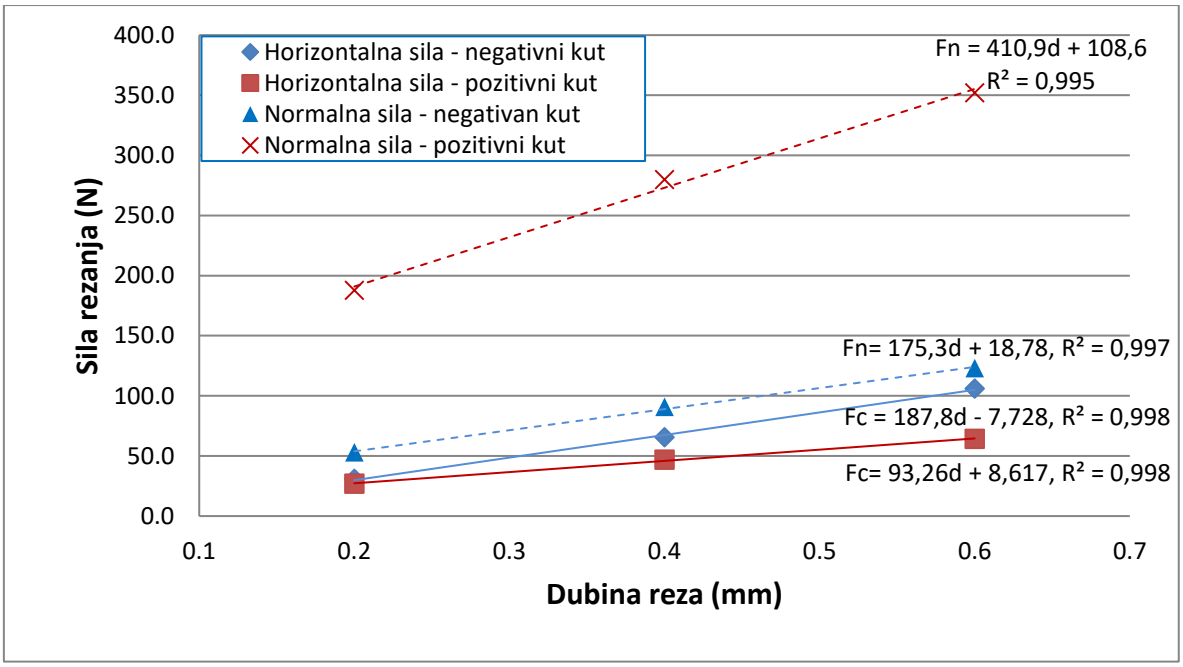
Slika 4-14 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile rezanja za uzorak Lasinja.

Na dijagramu (slika 4-15) prikazan je utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile rezanja za uzorak Špica. Faktor korelacije je također visok kao i kod slika 4-12 i 4-13, za sva četiri pravca. Te je još jednom potvrđeno da vrijednosti sila rastu sa dubinama rezanja

bez obzira na pozitivan ili negativan napadni kut. Posljednji uzorak na kojem je rađeno ispitivanje je Vukov Dol. Dijagram (slika 4-16) prikazan je utjecaj napadnog kuta i dubine rezanja na sile rezanja za uzorak Vukov dol. Zaključci dobiveni iz dijagrama su također jednaki, zaključcima iz prethodna četiri uzorka, što je potvrđeno i sa ovim posljednjim uzorkom.



Slika 4-15 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile rezanja za uzorak Špica.



Slika 4-16 Utjecaj napadnog kuta i dubine reza na sile rezanja za uzorak Vukov Dol.

Tablica 4-3 Prikaz omjera normalne i horizontalne vrijednosti sile za negativni i pozitivni napadni kut

Uzorak	Dubina reza (mm)	Omjer normalne i horizontalne vrijednosti sile za pozitivni kut	Omjer normalne i horizontalne vrijednosti sile za negativni kut
Brenzberg	0,2	5,36	2,03
	0,4	5,06	1,67
	0,6	4,75	1,48
Kraljev vrh	0,2	9,01	2,03
	0,4	9,29	1,79
	0,6	6,76	1,4
Lasinja	0,2	6,1	2,59
	0,4	6,13	1,52
	0,6	5,72	1,35
Špica	0,2	7,49	1,56
	0,4	5,77	1,31
	0,6	5,12	1,18
Vukov Dol	0,2	6,99	1,71
	0,4	5,97	1,38
	0,6	5,48	1,16

U tablici 4-3 prikazani su omjeri normalne i horizontalne vrijednosti sile za negativni i pozitivni napadni kut za svaku dubinu reza, za svih pet uzoraka. Prema rezultatima ispitivanja vidljivo je da se iznosi omjera, kod negativnog kuta, smanjuju povećavanjem dubine reza. Odnosno vrijednosti normalne i horizontalne sile se približavaju jedna drugoj povećanjem dubine reza. Isto tako kod pozitivnog kuta omjeri vrijednosti normalne i horizontalne sile se također smanjuju povećanjem dubine reza, osim kod uzoraka Kraljev vrh i Lasinja, gdje je omjer vrijednosti sila pri dubini reza od 0,4 mm veći od omjera vrijednosti sila pri dubini reza od 0,2 mm. Također je vidljivo da su omjeri vrijednosti normalne i horizontalne sile kod negativnog kuta višestruko manji nego kod pozitivnog kuta, za iste dubine rezanja.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu cilj je bio analizirati utjecaj napadnog kuta reznog elementa lančane sjekačice na sve tri komponente sila. Ispitivanja su provedena na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena sa mjernim pretvornikom sila. Ispitivanje se provelo na pet uzoraka različitih fizičko mehaničkih svojstava, te pri različitim dubinama rezanja, 0,2 mm, 0,4 mm i 0,6 mm. Koristili su se stvarni rezni elementi lančane sjekačice u prirodnoj veličini. Tijekom ispitivanja mjerene su sve tri komponente sile rezanja pri različitim dubinama i napadnim kutevima, a statističkom obradom podatka određena je njihova međusobna zavisnost. Na temelju provedenih laboratorijskih ispitivanja i teoretskih razmatranja doneseni su sljedeći zaključci:

- Vrijednosti sila koje se javljaju prilikom rezanja stijena, rastu linearno sa povećanjem dubine rezanja, neovisno o napadnom kutu reznog elementa. Rezultati ispitivanja su dali vrlo visoki faktor korelacije R^2 između dubine rezanja i vrijednosti sila kod svih uzoraka stijena.
- Normalna sila i kod pozitivnog i kod negativnog napadnog kuta reznog elementa je prema rezultatima ispitivanja veća od horizontalne vrijednosti sile, što vrijedi kod svih pet uzoraka.
- Vrijednost horizontalne sile kod pozitivnog napadnog kuta je manja od vrijednosti horizontalne sile kod negativnog napadnog kuta. Isto tako je vrijednost normalne sile kod pozitivnog napadnog kuta veća od vrijednosti normalne sile kod negativnog napadnog kuta, što vrijedi za svih pet uzoraka prema rezultatima ispitivanja.
- Iz dijagrama sila i dubina rezanja je vidljivo da je omjer normalne i horizontalne vrijednosti sile, kod pozitivnog napadnog kuta značajno veći nego omjer normalne i horizontalne vrijednosti sila kod negativnog napadnog kuta rezanja, za sve uzorke i dubine reza, što je i prikazano u tablici 4-3.
- Kod negativnog napadnog kuta omjeri vrijednosti normalne i horizontalne sile se smanjuju povećanjem dubine reza, kod svih pet uzoraka, dok se kod pozitivnog napadnog kuta također smanjuju omjeri vrijednosti sila, osim na uzorcima Kraljev vrh i Lasinja

Na temelju ovih zaključaka i rezultata ispitivanja u radu, moguće je zaključiti da napadni kut reznog elementa ima značajan utjecaj na učinak lančane sjekačice. Daljnja

istraživanja bilo bi poželjno usmjeriti na ispitivanje ostalih geometrijskih veličina reznog alata i njihove međusobne zavisnosti na učinak rezanja stijena.

6. POPIS LITERATURE

1. 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. 104-120.

2. 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, 2, str. 269-282.

3. DAGRAIN, F., DETOURNAY, E., RICHARD, T. (2001): Influence of the cutter geometry in rock cutting. Proceedings of the Rock mechanicsinthenationalinterest, str. 927-934.

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., 2, str. 761-798.

7. HOOD, M. C., ROXBOROUGH, F. F. (1992): Rock breakage: mechanical. SME mining engineeringhandbook, 1, str. 680-721.

8. KENNY, P., JOHNSON, S. N. (1976): Aninvestigation of the abrasive wear of mineral cutting tools. Wear, 36(3), str. 337-361.

9. KORMAN, T., 2014., Utjecaj konstrukcijskih i radnih veličina na učinak lančane sjekačice, Doktorski rad, Zagreb, RGN fakultet.

10. KORMAN, T., 2008. Utjecaj fizičko mehaničkih svojstava stijena na mehaničko usitnjavanje, Diplomski 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. T., KUJUNDŽIĆ T., LUKAČIĆ H., MARTINIĆ M., 2015. Utjecaj površine i oblika reza reznih pločica na učinak lančane sjekačice, TheMining-Geology-Petroleum EngineeringBulletin, RGN fakultet, Zagreb.

13. KUJUNDŽIĆ, T. (2002): Utjecajne veličine pri iskopu stijena hidrauličkim čekićem. Disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

14. MAMMEN, J., SAYDAM, S., HAGAN, P. (2009): A study of the effect of moisture contenton rock cutting performance, Coal 2009, Proceedings 9th Underground Coal Operators Conference, AusIMM, Melbourne, str. 340-347.

15. MELLOR, M. (1976): Mechanics of cutting and boring, Part 3: kinematics of continuous Belt machines. Br. CRREL-76-11. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.

16. MERCHANT, M.E. (1945): Basic mechanics of the metal cutting process. J. Appl. Mech., 66: str. 168-175.

17. MITSUBISHI MATERIALS. Function of toolfeatures 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 (25.08.2017.)

18. NEDIĆ, B.,LAZIĆ, M. (2007): Proizvodne tehnologije - Obrada metala rezanjem. Mašinski fakultet, Kragujevac.

19. NISHIMATSU, Y. (1972): The mechanics of rock cutting, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9 , str. 261- 270.

20.PAUŠE, Ž., 1993. Uvod u matematičku statistiku, Zagreb, Školska knjiga

21.PRIMAVORI, P. (2005): Il manuale della tagliatrice a catena. Fantini Sud s.p.a., Strada

Prov.le 12, no.52 – 03012 Anahni (FR).

22. RICHARD, T. (1999): Determination of Rock Strength from Cutting Tests, Disertacija, Sveučilište Minnesota.

23. RICHARD, T., COUDYZER, C., DESMETTE, S. (2010): Influence of Groove Geometry And Cutter Inclination In Rock Cutting. 44th US Rock Mechanics Symposiumand 5th USCanada Rock Mechanics Symposium.

24. ROXBOROUGH, F.F. (1987): The Role of Some Basic Rock Propertiesin Assessing Cuttability, Proceedings of Seminar on Tunnels, Wholly Engineered Structures, Sydney, I. E. Aust./ AFCC, April, P122.

25. 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.

26. 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.

27. SLADE, I. (2012): Obrada materijala II. Digitalni udžbenik, 2012. URL:http://www.cnt.tesla.hr. (4/2013).

28. YOUSSEF, H. A., EL-HOFY, H. (2008): Machining technology: machine tools and operations. CRC Press.

PRILOZI

Prilog 1. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Brenzberg

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza		**Horizontlana**	**Bočna**	**Normalna**	**Horizontlana**	**Bočna**	**Normalna**
(mm)	R.B.	**(N)**	**(N)**	**(N)**	**(N)**	**(N)**	**(N)**
0,20	1	71,52	7,77	142,45	329,41	77,57	438,27
	2	73,21	9,98	138,87	327,89	99,56	362,55
	3	65,06	10,50	131,59	243,42	111,23	363,75
	4	69,20	12,21	149,24	253,06	88,93	439,70
	5	71,03	12,05	142,82	386,00	102,96	490,81
	6	69,12	12,66	144,43	292,39	90,32	477,50
	7	74,21	14,11	152,59	225,16	88,67	463,81
	Prosjek	**70,48**	**11,33**	**143,14**	**293,91**	**94,18**	**433,77**
0,40	1	177,75	29,89	295,68	864,36	130,64	657,41
	2	162,55	32,23	286,04	615,37	161,75	564,40
	3	162,68	29,05	251,00	750,97	150,75	542,13
	4	176,52	31,07	294,60	726,11	178,83	704,50
	5	146,41	35,66	264,58	754,25	179,27	702,11
	6	166,22	36,59	283,84	634,76	163,57	672,29
	7	156,97	26,23	246,21	665,68	157,11	735,02
	Prosjek	**164,16**	**31,53**	**274,56**	**715,93**	**160,28**	**653,98**
0,60	1	270,46	58,28	383,32	1185,30	225,72	723,32
	2	244,98	51,89	372,95	1132,51	195,98	761,36
	3	269,27	56,74	375,13	1034,87	198,23	837,75
	4	273,32	54,57	389,66	1190,94	195,03	785,05
	5	264,95	55,24	376,67	1304,48	205,25	788,61
	6	261,84	46,81	399,83	1048,32	183,99	955,55
	7	225,39	46,18	387,66	1162,43	188,71	731,62
	Prosjek	**258,60**	**52,82**	**383,60**	**1151,26**	**198,99**	**797,61**

Prilog 2. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Kraljev vrh

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza		Horizontlana	Bočna	Normalna	Horizontlana	Bočna	Normalna
(mm)	R.B.	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
0,20	1	66,06	5,80	131,97	263,48	69,07	249,90
	2	61,84	5,02	137,24	221,48	63,28	255,79
	3	71,88	5,16	139,28	347,55	74,93	287,63
	4	69,86	5,20	141,82	269,74	76,95	263,95
	5	70,34	6,98	146,83	238,56	72,98	288,24
	6	73,96	9,93	144,32	290,75	81,54	291,84
	7	77,91	12,93	161,62	265,74	91,58	325,20
	Prosjek	**70,26**	**7,29**	**143,30**	**271,04**	**75,76**	**280,36**
0,40	1	143,59	26,30	249,37	561,67	148,14	469,87
	2	156,79	26,79	250,20	799,14	130,20	513,91
	3	135,44	21,57	246,48	498,06	137,15	484,11
	4	142,74	16,15	266,98	641,37	130,19	537,38
	5	134,91	21,06	270,69	513,46	150,76	497,41
	6	175,46	30,73	290,30	683,00	160,39	531,16
	7	148,11	18,96	285,44	542,02	129,73	579,49
	Prosjek	**148,15**	**23,08**	**265,64**	**605,53**	**140,94**	**516,19**
0,60	1	245,84	35,33	312,12	1185,94	179,35	679,74
	2	239,15	34,28	349,98	1143,16	149,45	681,40
	3	230,53	37,01	332,06	1227,11	190,37	709,58
	4	217,24	29,84	326,88	1228,81	152,56	650,53
	5	259,44	33,87	341,90	1229,72	165,38	689,07
	6	266,00	43,95	342,50	1433,65	205,21	687,23
	7	224,44	26,04	355,00	872,33	148,14	677,58
	Prosjek	**240,38**	**34,33**	**337,20**	**1188,67**	**170,06**	**682,16**

Prilog 3. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Lasinja

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza (mm)	R.B.	Horizontlana (N)	Bočna (N)	Normalna (N)	Horizontlana (N)	Bočna (N)	Normalna (N)
0,20	1						
	2	68,74	12,65	173,58	247,58	70,86	336,42
	3	60,37	13,12	165,94	180,96	72,56	317,31
	4	61,47	11,17	160,00	246,51	101,74	397,70
	5	59,06	16,44	156,14	192,90	91,00	344,14
	6	61,44	14,44	153,38	202,29	84,66	340,04
	7	59,58	13,72	153,19	187,86	70,42	288,26
	Prosjek	**61,78**	**13,59**	**160,37**	**209,68**	**81,87**	**337,31**
0,40	1	74,66	11,13	112,18	373,61	76,95	271,20
	2	74,00	5,68	136,12	307,39	70,07	351,57
	3	80,49	6,01	121,51	399,72	90,87	341,10
	4	81,64	10,21	136,18	341,72	102,62	334,06
	5	85,35	10,01	133,34	300,33	88,62	387,20
	6	112,07	16,14	137,94	417,42	120,17	366,06
	7	96,33	13,04	146,16	459,50	108,50	388,53
	Prosjek	**86,36**	**10,32**	**131,92**	**371,38**	**93,97**	**348,53**
0,60	1	161,46	26,53	213,83	968,00	149,86	449,43
	2	137,65	21,79	197,32	548,61	129,44	458,59
	3	138,60	21,42	206,37	642,40	144,80	538,59
	4	141,98	19,02	206,79	649,87	150,49	497,74
	5	145,99	19,14	190,67	714,56	141,44	477,60
	6	139,57	21,51	176,28	581,91	117,96	469,54
	7	162,69	19,50	201,60	685,75	114,25	575,33
	Prosjek	**146,85**	**21,28**	**198,98**	**684,44**	**135,46**	**495,26**

Prilog 4. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Špica

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza		Horizontlana	Bočna	Normalna	Horizontlana	Bočna	Normalna
(mm)	R.B.	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
0,20	1	31,13	3,90	52,93	137,74	28,17	102,38
	2	38,46	3,55	62,15	138,11	42,14	110,55
	3	40,34	4,96	66,45	150,54	35,31	118,25
	4	38,92	4,44	59,32	157,46	41,63	117,36
	5	41,92	5,58	62,87	155,32	40,51	131,55
	6	40,58	6,08	62,63	133,75	40,77	118,25
	7	40,08	4,51	58,28	159,59	35,20	125,43
	Prosjek	**38,77**	**4,72**	**60,66**	**147,50**	**37,68**	**117,68**
0,40	1	76,43	8,02	92,37	303,57	67,91	190,93
	2	75,13	13,57	97,80	288,15	69,05	197,55
	3	76,16	12,59	102,43	286,84	82,59	202,16
	4	72,26	15,76	95,31	336,45	82,97	206,77
	5	72,23	12,49	99,97	276,87	84,05	197,73
	6	74,47	12,55	99,05	265,88	90,58	206,02
	7	63,96	9,83	82,09	272,94	78,40	187,25
	Prosjek	**72,95**	**12,12**	**95,58**	**290,10**	**79,36**	**198,35**
0,60	1	111,58	21,48	126,37	547,32	98,98	276,14
	2	102,45	18,41	118,24	460,32	108,57	286,91
	3	112,16	21,13	139,95	443,99	110,49	277,75
	4	108,63	18,64	122,33	515,68	99,51	293,71
	5	112,46	21,08	129,64	441,95	94,45	284,35
	6	106,66	19,11	132,90	493,54	100,22	290,41
	7	105,01	20,69	126,77	492,41	110,24	281,36
	Prosjek	**108,42**	**20,08**	**128,03**	**485,03**	**103,21**	**284,37**

Prilog 5. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod negativnog napadnog kuta za uzorak Vukov Dol

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza		Horizontlana	Bočna	Normalna	Horizontlana	Bočna	Normalna
(mm)	R.B.	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
0,20	1	31,56	4,60	51,19	104,01	28,70	94,64
	2	28,87	4,06	51,77	124,54	60,97	103,82
	3	27,56	3,52	54,02	101,86	53,33	108,51
	4	33,85	5,48	55,79	116,73	35,62	101,70
	5	34,14	4,26	55,46	101,32	31,05	102,90
	6	33,25	4,04	52,58	142,04	27,18	113,61
	7	26,48	4,41	49,68	97,55	28,38	127,79
	Prosjek	**30,82**	**4,34**	**52,93**	**112,58**	**37,89**	**107,57**
0,40	1	63,78	15,62	91,66	264,10	61,95	166,09
	2	65,17	14,11	94,98	229,08	56,23	166,39
	3	64,12	15,13	91,84	256,62	60,41	174,71
	4	64,33	14,52	93,32	242,22	57,38	167,82
	5	68,33	14,12	90,45	299,64	60,24	194,55
	6	67,82	13,06	90,04	270,40	68,69	254,77
	7	64,95	13,76	83,51	275,39	63,43	179,45
	Prosjek	**65,50**	**14,33**	**90,83**	**262,50**	**61,19**	**186,25**
0,60	1	106,69	21,41	128,77	412,61	84,60	257,27
	2	99,45	22,16	117,65	425,69	90,59	265,26
	3	85,26	18,66	99,32	427,28	94,13	258,62
	4	111,06	25,16	125,42	407,24	101,81	259,50
	5	113,00	25,01	129,83	418,00	100,51	264,86
	6	113,95	22,69	126,72	518,39	94,39	289,67
	7	112,41	25,08	133,87	435,08	107,34	295,82
	Prosjek	**105,97**	**22,88**	**123,08**	**434,90**	**96,20**	**270,14**

Prilog 6. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Brenzberg

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza		Horizontlana	Bočna	Normalna	Horizontlana	Bočna	Normalna
(mm)	R.B.	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
0,2	1	49,98	40,00	282,37	208,59	139,15	720,84
	2	58,79	48,32	298,22	284,05	176,04	647,92
	3	54,87	44,23	293,03	379,06	149,31	658,54
	4	47,18	50,73	306,47	257,24	165,69	634,71
	5	48,74	42,71	280,97	332,93	181,69	604,79
	6	48,52	30,96	224,66	255,90	152,02	625,02
	7	45,34	40,93	211,20	236,97	162,71	558,13
	Prosjek	**50,49**	**42,56**	**270,99**	**279,25**	**160,94**	**635,71**
0,4	1	78,29	69,99	427,46	389,09	193,60	802,50
	2	75,77	69,18	409,51	464,81	257,83	816,95
	3	90,33	80,02	430,19	408,50	228,35	1020,27
	4	84,54	64,88	425,22	459,88	202,84	858,16
	5	84,15	73,94	438,94	530,71	205,27	858,87
	6	86,17	66,84	421,85	349,02	187,72	820,63
	7	87,39	72,72	417,67	412,74	215,36	802,41
	Prosjek	**83,81**	**71,08**	**424,41**	**430,68**	**213,00**	**854,26**
0,6	1	120,70	107,27	569,88	641,67	267,75	1108,04
	2	121,13	91,13	508,62	592,84	283,31	1049,61
	3	106,33	94,21	515,21	530,97	305,52	1019,73
	4	102,88	97,20	526,66	421,75	255,17	1028,99
	5	103,42	85,28	496,95	577,25	344,00	1058,85
	6	103,92	96,69	532,66	505,86	300,99	1087,88
	7	117,50	95,94	536,80	507,44	275,96	1054,93
	Prosjek	**110,84**	**95,39**	**526,68**	**539,68**	**290,39**	**1058,29**

Prilog 7. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Kraljev vrh

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza		Horizontlana	Bočna	Normalna	Horizontlana	Bočna	Normalna
(mm)	R.B.	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
0,2	1	42,54	49,56	387,50	162,90	132,82	685,05
	2	51,90	56,50	394,48	182,04	146,32	657,41
	3	47,23	56,80	401,03	227,30	163,32	626,03
	4	42,33	58,43	392,59	221,96	121,71	604,42
	5	41,70	57,87	390,73	222,01	148,77	611,16
	6	38,10	59,53	397,54	214,99	146,59	658,22
	7	33,08	54,84	313,43	137,78	152,11	522,67
	Prosjek	**42,41**	**56,22**	**382,47**	**195,57**	**144,52**	**623,57**
0,4	1	57,77	96,34	614,23	248,87	208,59	941,94
	2	61,69	99,60	656,74	257,48	221,86	977,02
	3	69,50	97,77	593,76	575,32	236,32	1061,88
	4	58,08	90,99	575,55	250,44	219,75	1016,56
	5	73,15	85,54	541,28	369,52	195,17	1061,31
	6	59,76	88,04	591,93	240,90	224,02	1002,71
	7	63,40	82,56	547,31	275,24	198,96	979,43
	Prosjek	**63,34**	**91,55**	**588,69**	**316,82**	**214,95**	**1005,84**
0,6	1	125,08	144,31	872,85	517,97	304,34	1500,55
	2	163,24	183,00	952,46	749,73	363,72	1559,39
	3	146,15	199,12	1017,48	868,97	409,30	1657,51
	4	128,23	173,57	940,10	782,96	348,31	1602,09
	5	133,67	179,07	888,40	590,39	414,75	1656,67
	6	143,32	156,98	827,72	646,94	403,18	1566,47
	7	95,36	138,97	825,62	508,12	293,98	1658,56
	Prosjek	**133,58**	**167,86**	**903,52**	**666,44**	**362,51**	**1600,18**

Prilog 8. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Lasinja

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza		Horizontlana	Bočna	Normalna	Horizontlana	Bočna	Normalna
(mm)	R.B.	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
0,2	1	51,66	60,85	391,60	212,32	178,02	697,89
	2	68,90	53,54	368,06	359,01	152,74	849,90
	3	63,49	59,73	381,92	329,64	167,66	735,21
	4	75,71	68,34	385,65	346,01	186,75	719,71
	5	58,77	62,47	382,80	296,28	173,81	700,72
	6	56,21	53,53	350,60	310,26	147,07	758,64
	7	52,49	49,88	346,88	312,71	140,94	788,88
	Prosjek	**61,03**	**58,33**	**372,50**	**309,46**	**163,86**	**750,13**
0,4	1	75,86	83,95	491,93	420,85	183,48	821,09
	2	72,02	75,80	518,46	423,21	207,78	932,15
	3	85,47	86,20	541,01	365,82	219,50	1030,60
	4	91,90	108,97	579,44	400,81	290,53	1089,23
	5	87,85	76,06	453,14	470,55	204,68	804,15
	6	81,54	77,39	451,32	482,72	235,87	926,84
	7	73,86	65,12	454,14	360,63	181,07	766,83
	Prosjek	**81,21**	**81,93**	**498,49**	**417,80**	**217,56**	**910,13**
0,6	1	125,56	163,50	786,13	422,18	406,18	1387,02
	2	117,89	135,53	696,33	619,90	372,19	1377,62
	3	131,94	134,56	776,91	793,16	278,98	1469,09
	4	126,64	129,17	729,08	780,15	276,17	1400,92
	5	104,96	110,27	604,13	493,01	241,37	1244,71
	6	121,57	110,60	601,26	599,48	310,36	1287,97
	7	111,29	102,26	615,80	666,42	253,43	1340,71
	Prosjek	**119,98**	**126,56**	**687,09**	**624,90**	**305,52**	**1358,29**

Prilog 9. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Špica

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza		Horizontlana	Bočna	Normalna	Horizontlana	Bočna	Normalna
(mm)	R.B.	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
0,2	1	22,20	32,79	203,27	154,24	98,50	310,80
	2	24,80	31,52	196,46	140,94	89,36	306,19
	3	23,55	33,31	205,36	115,64	92,56	315,40
	4	26,83	34,28	189,02	175,34	81,07	324,10
	5	32,70	31,95	192,75	211,23	81,76	313,61
	6	24,98	34,62	190,57	173,32	91,29	342,61
	7	25,87	33,96	178,02	140,67	98,74	308,56
	Prosjek	**25,85**	**33,21**	**193,64**	**158,77**	**90,47**	**317,32**
0,4	1	55,97	65,24	306,98	340,44	137,93	503,35
	2	57,88	70,10	325,18	301,64	143,84	521,11
	3	54,76	71,09	330,13	231,01	137,86	507,41
	4	54,32	75,55	335,66	304,85	145,60	518,04
	5	49,41	65,58	297,21	235,78	158,88	507,12
	6	45,98	50,14	242,86	285,03	147,72	456,52
	7						
	Prosjek	**53,05**	**66,29**	**306,34**	**283,12**	**145,31**	**502,26**
0,6	1	81,18	96,65	395,58	424,95	199,80	619,11
	2	76,89	88,73	371,91	380,97	212,53	639,22
	3	71,68	91,18	404,26	411,50	205,66	634,52
	4	78,20	93,46	367,05	352,99	224,62	656,94
	5	71,11	99,04	405,38	290,73	208,71	617,45
	6	72,98	96,39	383,75	375,59	212,06	629,26
	7	71,98	86,70	358,46	376,73	211,78	652,70
	Prosjek	**74,86**	**93,16**	**383,77**	**373,35**	**210,74**	**635,60**

Prilog 10. Rezultati pojedinačnih ispitivanja kod pozitivnog napadnog kuta za uzorak Vukov Dol

		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
Dubina reza		Horizontlana	Bočna	Normalna	Horizontlana	Bočna	Normalna
(mm)	R.B.	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
0,2	1	26,29	29,64	185,38	143,90	93,67	359,76
	2	29,02	28,77	179,81	180,52	95,03	303,34
	3	27,16	29,39	193,69	156,02	101,82	326,28
	4	27,12	28,50	192,49	137,83	83,38	291,67
	5	25,11	29,06	193,20	132,95	79,78	325,20
	6	27,26	28,74	184,75	147,14	74,47	302,27
	7	25,82	30,01	183,59	133,55	94,91	317,43
	Prosjek	**26,82**	**29,16**	**187,56**	**147,41**	**89,01**	**317,99**
0,4	1	44,86	50,16	275,68	206,00	120,13	418,34
	2	56,07	53,35	280,36	241,86	120,75	449,34
	3	45,36	51,79	284,38	227,36	161,70	434,90
	4	44,13	49,74	284,13	252,14	116,78	432,01
	5	49,57	48,33	272,87	216,01	128,80	432,11
	6	44,00	55,94	281,39	242,92	119,47	422,33
	7	43,73	49,83	278,83	234,51	106,36	440,39
	Prosjek	**46,82**	**51,31**	**279,66**	**231,54**	**124,86**	**432,78**
0,6	1	63,99	71,51	357,56	285,09	177,39	582,30
	2	70,01	81,92	354,87	293,01	180,26	564,75
	3	68,62	67,76	345,51	469,49	166,95	587,22
	4	60,16	70,70	364,28	276,31	161,49	516,63
	5	65,70	71,54	357,69	305,61	157,90	574,76
	6	59,71	69,67	343,64	233,84	142,47	567,84
	7	60,72	68,99	339,98	294,29	131,96	506,74
	Prosjek	**64,13**	**71,73**	**351,93**	**308,23**	**159,77**	**557,18**