Utjecaj abrazivnosti stijena na sile rezanja pri radu lančane sjekačice

Anušić, Fran

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:169:019750

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 ABRAZIVNOSTI STIJENA NA SILE REZANJA PRI RADU LANČANE SJEKAČICE

Diplomski rad

Fran Anušić

R-149

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

UTJECAJ ABRAZIVNOSTI STIJENA NA SILE REZANJA PRI RADU LANČANE SJEKAČICE

Fran Anušić

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

Sažetak

U diplomskom radu prikazan je razvoj i namjena lančanih sjekačica te njihove konstrukcijske veličine. Na temelju dosadašnjih istraživanja analizirani su čimbenici koji utječu na sile rezanja koje se javljaju pri radu lančane sjekačice. Laboratorijskim ispitivanjima, pomoću uređaja za pravolinijsko rezanje stijena, izmjerene su vrijednosti sila na reznom alatu lančane sjekačice u prirodnoj veličini za pet uzorka različitih fizikalno-mehaničkih svojstava. Ispitivanja su provedena za pozitivni i negativni napadni kut rezne pločice pri različitim dubinama reza. Statističkom obradom podataka određena je zavisnost horizontalne i vertikalne sile rezanja o CERCHAR indeksu abrazivnosti (*CAI*). Također je ustanovljena zavisnost *CAI* o tlačnoj čvrstoći, vlačnoj čvrstoći, tvrdoći i lomnoj žilavosti.

Ključne riječi: lančana sjekačica, sile rezanja, abrazivnost, CERCHAR indeks abrazivnosti

Završni rad sadrži: 56 stranica, 6 tablica, 39 slika i 29 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: 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

Masters's Thesis

THE INFLUENCE OF ROCK ABRASIVITY ON CHAIN SAW CUTTING FORCES

Fran Anušić

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

Abstract

Graduate thesis presents development and purpose of chain saws and their constructional parameters. Based on results of present research, factors affecting the cutting forces that occur during the operation of the chain saw had been analyzed. Force values of chain saw cutting tool in full-scale size were measured by laboratory tests preformed by linear stone cutting machine, for five samples with different physical-mechanical properties. Tests were carried out for the positive and negative rake angle of the cutting tool at different cutting depths. The dependence of horizontal and vertical cutting forces on the CERCHAR abrasivity index (*CAI*) were determined by statistical data analysis. Dependence of *CAI* on compressive strength, tensile strength, hardness, and fracture toughness was also established.

Key words: chain saw, cutting forces, abrasivity, CERCHAR abrasivity index

Thesis contains: 56 pages, 6 tables, 39 figures and 29 references.

Original in: Croatian

Thesis deposed at: Library of the Faculty of Mining,
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: PhD Tomislav Korman, Assistant Professor RGNF

Evaluation Committee: PhD Tomislav Korman, Assistant Professor RGNF

PhD Mario Klanfar, Assistant Professor RGNF

PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor RGNF

Defence date: 21 September 2017.

SADRŽAJ

I. POPIS TABLICA III
II. POPIS SLIKA IV
III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA VI
1. UVOD 1
2. LANČANA SJEKAČICA 3
2.1. Razvoj i namjena lančanih sjekačica 3
2.2. Konstrukcijske veličine lančane sjekačice 7
3. SILE PRI REZANJU STIJENA 11
3.1. Modeli rezanja 13
4. ABRAZIVNOST 15
4.1. Metode za procjenu abrazivnosti 16
5. CERCHAR INDEKS ABRAZIVNOSTI 22
5.1. Područje primjene 22
5.2. Uređaj 23
5.3.Postupak 25
5.4. Mjerenje trošenja igle 25
5.5. Izračun 27
5.6. Klasifikacija 28
6. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA 29
6.1. Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena 29
6.1.1. Mjerni pretvornik sile 31
6.1.2. Konstrukcija mjernog pretvornika sile 31
6.1.3. Umjeravanje pretvornika sile 33
6.2. Westov modificirani dizajn uređaja 34
6.3.Opis uzoraka 37
6.4. Metode ispitivanja 38
6.4.1. Mjerenje sila na reznom alatu 38
6.4.2. Metoda ispitivanja CERCHAR indeksa abrazivnosti 40
6.5. Analiza rezultata 40
6.5.1. Analiza rezultata sila rezanja 40
6.5.2. Analiza rezultata CERCHAR indeksa abrazivnosti 42

6.5.3. Utjecaj fizičko-mehaničkih svojstava na CERCHAR indeks abrazivnosti 43
6.5.4. Utjecaj CERCHAR indeksa abrazivnosti na sile rezanja 46
7. ZAKLJUČAK 51
LITERATURA 53

POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Primjer CERCHAR testa abrazivnosti s pet ponavljanja i četiri mjerenja istrošene površine bočnim prikazom (Alber et al. 2013)..... 28
Tablica 5-2. Klasifikacija abrazivnosti stijene (Alber et al. 2013)..... 28
Tablica 6-1. Fizičko-mehanička svojstva uzoraka..... 38
Tablica 6-2. Rezultati ispitivanja sila rezanja za negativni napadni kut..... 41
Tablica 6-3. Rezultati ispitivanja sila rezanja za pozitivni napadni kut 41
Tablica 6-4. Rezultati ispitivanja CERCHAR indeksa abrazivnosti (Grgurić 2017) 43

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Podsjekačica s ozubljenim kotačem (lijevo) i s ozubljenim lancem (desno) (Kujundžić et al. 2003) 4
Slika 2-2. Lančana sjekačica francuske tvrtke Perrier pri piljenju horizontalnog reza u kamenolomu (Kujundžić et al. 2003) 5
Slika 2-3. Laganija izvedba lančane sjekačice Fantini pri radu na početnom otvaranju usjeka, tj. pri početku rada na otvaranju dubinskog kamenoloma (Kujundžić et al. 2003) .. 6
Slika 2-4. Osnovni dijelovi lančane sjekačice (Korman 2014)..... 8
Slika 2-5. Segment reznog lanca lančane sjekačice (Korman 2014) 9
Slika 2-6. Geometrijske veličine reznog alata, a) α=-20°, γ=0°, δ=0°, β =20°, b) α=0°, γ=15°, δ=0°, β=0° (Korman 2014) 10
Slika 2-7. Načini rezanja, a) ukliješteni uvjeti, b) neukliješteni uvjeti (Korman 2014) 10
Slika 2-8. Rezne pločice, a) kvadratičnog oblika, b) kružnog oblika, c) zvjezdastog oblika (Primavori 2005) 10
Slika 3-1. Rezultantna sila rezanja i njene komponente (Korman 2014)..... 11
Slika 3-2. Tipovi loma i amplitude sila za vrijeme rezanja (Mohamad 1992)..... 12
Slika 4-1. Rotirajući bubanj za ispitivanje abrazivnosti u sklopu LA metode (Pavia systems 2012)..... 17
Slika 4-2. Uređaj za provođenje LCPC testa (Labaš et al. 2012) 19
Slika 4-3. Uređaj za ispitivanje abrazije dubljenjem (Golovanevskiy, Bearman 2008) 21
Slika 5-1. Osnovni mehanizmi i skice dvaju glavnih oblika ispitnih uređaja. Lijevo - originalni CERCHAR dizajn, desno - Westov dizajn (Alber et al. 2013)..... 23
Slika 5-2. Mjerenje s bočnim (a) i gornjim prikazom (b, c). Metode prikazane u (a) i (b) preporučene su za optička mjerenja, dok je metoda pod (c) preporučena za digitalna mjerenja (Alber et al. 2013)..... 26
Slika 5-3. Prikaz mjerenja s bočnim prikazom na: (a) ispravan način i (b) neispravan način (Alber et al. 2013)..... 26
Slika 5-4. Standardni istrošeni profili (a) i (b) i njihova odgovarajuća duljina površine trošenja, (c) primjer nestandardnog profila u čijem slučaju treba odbaciti mjerenje (Alber et al. 2013)..... 27

Slika 6-1. Shema kratkohodne blanjalice za metal (Nedić i Lazić, 2007) 30
Slika 6-2. Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena i mjerni sustav (Korman 2014) 30
Slika 6-3. Konstrukcija troosnog mjernog pretvornika sile (Korman 2014) 32
Slika 6-4. Mjerni sustav za ispitivanje rezivosti stijenske mase (Korman 2014) 33
Slika 6-5. Uređaj za umjeravanje pretvornika sile (Korman 2014) 34
Slika 6-6. Westov modificirani dizajn uređaja za ispitivanje indeksa abrazivnosti (Grgurić 2017) 35
Slika 6-7. Digitalni mikroskop Dino - Lite Pro 2 (Grgurić 2017) 36
Slika 6-8. Uvećani bočni prikaz načina mjerenja promjera površine trošenja mjerne igle (Grgurić 2017) 36
Slika 6-9. Uzorci stijena na kojima su obavljena ispitivanja. 37
Slika 6-10. Nosač rezne pločice lančane sjekačice Pellegrini CH60 39
Slika 6-11. Nosač rezne pločice proizvođača Korfmann 39
Slika 6-12. Povećanje horizontalne komponente sile uslijed povećanja dubine reza 42
Slika 6-13. Utjecaj tlačne čvrstoće na *CAI* 44
Slika 6-14. Utjecaj vlačne čvrstoće na *CAI* 44
Slika 6-15. Utjecaj odskoka Schmidtovog čekića (tvrdoće) na *CAI* 45
Slika 6-16. Utjecaj lomne žilavosti na *CAI* 45
Slika 6-17. Utjecaj *CAI* na horizontalnu silu za negativni kut 46
Slika 6-18. Utjecaj *CAI* na horizontalnu silu za pozitivni kut 47
Slika 6-19. Utjecaj *CAI* na vertikalnu silu za negativni kut 48
Slika 6-20. Utjecaj *CAI* na vertikalnu silu za pozitivni kut 48
Slika 6-21. Usporedba negativnog i pozitivnog kuta kod horizontalne komponente sile prema *CAI* pri dubini reza 0,2 mm 49
Slika 6-22. Usporedba negativnog i pozitivnog kuta kod vetikalne komponente sile prema *CAI* pri dubini reza 0,2 mm 50

POPIS OZNAKA I KORIŠTENIH JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
α	Napadni kut rezne pločice	°
β	Kut otklona rezne pločice	°
δ	Bočni kut rezne pločice	°
γ	Bočni napadni kut rezanja rezne pločice	°
F_c	Tangencijalna ili horizontalna	N
F_n	Normalna ili vertikalna sila	N
F_f	Bočna sila	N
F_{maks}	Maksimalna sila kod plastičnog loma	N
F_m	Srednja sila kod plastičnog loma	N
CAI	CERCHAR indeks abrazivnosti	
ABR	Indeks abrazivnosti u LCPC testu	
DRI	Indeks brzine bušenja	
BWI	Indeks trošenja komada	
CLI	Indeks vijeka rezača	
AV	Indeks abrazivnosti u NTNU testu	
AVS	Indeks abrazivnosti čelika u NTNU testu	
d	Promjer istrošene površine igle	mm
d_1	Veći promjer istrošene igle	mm
d_2	Manji promjer istrošene igle	mm
d_s	Srednja vrijednost promjera istrošene igle	mm
σ_t	Tlačna čvrstoća	MPa
σ_v	Vlačna čvrstoća	MPa
d_s	Odskok Schmidtovog čekića	
σ_L	Lomna žilavost	$MPa \cdot m^{1/2}$
Sd	Specifična energija drobljenja	kJ/kg
R^2	Koeficijent korelacije	
$F_c(0,2)$	Horizontalna sila za dubinu reza 0,2 mm	N
$F_c(0,4)$	Horizontalna sila za dubinu reza 0,4 mm	N
$F_c(0,6)$	Horizontalna sila za dubinu reza 0,6 mm	N

Simbol	Značenje	Jedinica
$F_n(0,2)$	Vertikalna sila za dubinu reza 0,2 mm	N
$F_n(0,4)$	Vertikalna sila za dubinu reza 0,4 mm	N
$F_n(0,6)$	Vertikalna sila za dubinu reza 0,6 mm	N

1. UVOD

Dijamantne žične pile i lančane sjekačice glavni su strojevi koji se koriste kod eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena. Razlog tome je što se želi primijeniti način otkopavanja koji u najmanjoj mogućoj mjeri izaziva naprezanja i deformacije u stijenskoj masi, a upravo dijamantne žične pile i lančane sjekačice isključuju nastanak naprezanja i deformacija. Arhitektonsko-građevni kamen, izuzetno dekorativan, koristi se kao blokovski, za unutarnja i vanjska horizontalna oblaganja, za arhitekturu spomen obilježja i groblja te za kiparstvo i mnoge druge zanatske djelatnosti. Eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena ne uključuje uporabu eksploziva, osim u nekim slučajevima i to samo za skidanje otkrivke.

Radni organ lančane sjekačice je mač po kojem klizi lanac na kojem se nalaze nosači s reznim pločicama. Prilikom piljenja primarnih blokova lančanom sjekačicom javlja se sila na reznom alatu koja uvelike ovisi o fizičko-mehaničkim svojstvima stijene. Pored navedenog, sila rezanja ovisi o dubini reza i geometrijskim veličinama reznih pločica koje su određene položajem i orijentacijom pločica na lancu. Rezultantnu silu rezanja moguće je rastaviti na horizontalnu, bočnu i vertikalnu komponentu. Predloženi su različiti analitički i numerički modeli za proračun sile rezanja. S obzirom na to da je proces rezanja vrlo kompleksan i ovisi o velikom broju čimbenika, navedeni modeli nadaju dovoljno precizne rezultate. Upravo stoga se provode laboratorijska ispitivanja na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena koji omogućuje mjerenje pojedinih komponenti sile rezanja. Rezultantnu silu rezanja moguće je rastaviti na horizontalnu, bočnu i vertikalnu komponentu.

Jedno od fizičko-mehaničkih svojstava koje bitno utječe na učinak sjekačice je abrazivnost. Abrazivnost je sposobnost stijene da troši radni alat prilikom interakcije sa stijenom, odnosno pri njegovom radu. Trošenje alata može uvelike utjecati na brzinu napredovanja radova, npr. bušenja ili rezanja stijene. Osim što utječe na brzinu bušenja i miniranja, utječe i na radni vijek alata. Postoji više metoda za određivanje abrazivnosti stijena, a jedina od njih je metoda preporučena od strane Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM) kojom se određuje CERCHAR indeks abrazivnosti (*CAI)*. Ispitivanje se sastoji od povlačenja čelične igle, koja simulira radni alat, preko površine stijenskog uzorka. *CAI*

ovisi o istrošenom promjeru vrha igle, a što je indeks veći to će trošenje radnog alata biti veće, i obrnuto.

Cilj ovog rada je utvrditi utjecaj CERCHAR indeksa abrazivnosti na sile rezanja. Hipoteza koja je postavljena glasi da će se povećanjem *CAI* povećavati i sile rezanja. U svrhu potvrđivanja hipoteze provedena su laboratorijska ispitivanja horizontalne, bočne i vertikalne komponente sile rezanja na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena na pet uzoraka različitih fizičko-mehaničkih svojstava. Ispitivanja su provedena za pozitivni i negativni napadni kut rezne pločice pri različitim dubinama reza. Na temelju dobivenih podataka provedena je statistička analiza kojom je određena zavisnost sila rezanja o indeksu abrazivnosti. Pored navedenog, određena je zavisnost indeksa abrazivnosti o tlačnoj čvrstoći, vlačnoj čvrstoći, tvrdoći i lomnoj žilavosti.

2. LANČANA SJEKAČICA

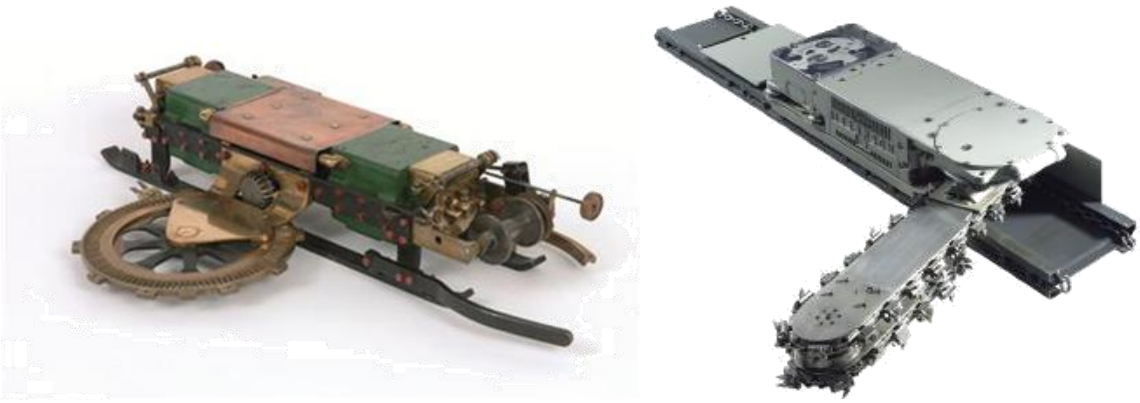
Otkopavanje arhitektonsko-građevnog kamena vrlo je specifično s obzirom na konačni proizvod eksploatacije u odnosu na eksploataciju drugih mineralnih sirovina. Za razliku od tehničko-građevnog kamena, kod arhitektonsko-građevnog kamena proizvod kamenoloma je masivni blok pa se kakvoća kamena (fizikalno-mehaničke značajke) ne mogu razdvojiti od značajki njegovog ležišta. Stoga ležište mora imati takav strukturni sklop koji omogućuje vađenje ekonomski značajnih količina zdravih blokova, pogodnih za industrijsku preradu u ploče i elemente spomeničke i memorijalne arhitekture (Kujundžić et al. 2003).

Za izradu horizontalnih i vertikalnih rezova kod eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena danas se primjenjuju lančane sjekačice i dijamantne žične pile. Dijamante žične pile ostvaruju veće učinke i manje gubitke s obzirom na širinu reza, koja je tri do četiri puta manja nego u lančanih sjekačica. Međutim, pripremne radnje za rad dijamantnih žičnih pila uključuju izradu bušotina za provlačenje dijamantne žice. Kod lančanih sjekačica pripremne radnje svode se na učvršćivanje i horizontiranje tračnica po kojima se giba stroj. Iz tog razloga učinkovit način eksploatacije blokova kamena ostvaruje se kombiniranjem lančane sjekačice i dijamantne žične pile, zbog mogućnosti korištenja prednosti jednog ili drugog stroja (Korman et al. 2015).

2.1. Razvoj i namjena lančanih sjekačica

Preteče sjekačica nazivaju se podsjekačice i zasjekačice. One se ubrajaju među najstarije rudarske strojeve. Koristile su se kao pomoćni strojevi za izradu horizontalnog ili vertikalnog reza u mekanim materijalima, naročito u ugljenu, radi lakšeg odvajanja materijala pri otkopavanju. Služile su se za izradu podsjeka (horizontalno ispiljena ploha) te za izradu zasjeka (okomita ili kosa ispiljena ploha). Podsjekačice su se upotrebljavale uglavnom na frontalnim, čelnim otkopima ugljena i soli, a zasjekačice pri izradi hodnika u rudnicima ugljena i soli, te mjestimice na otkopima. Pojavom suvremenih sjekačica koje imaju mogućnost rezanja svih vrsta rezova ne koristi se više podjela na podsjekačice i zasjekačice, već se govori samo o sjekačicama (Kujundžić et al. 2003).

Povijesno gledano, prve su se pojavile podsjekačice s ozubljenim kotačem (**Slika 2-1.**), a zatim podsjekačice s ozubljenim lancem ili polugom (**Slika 2-1.**). Kod podsjekačica s ozubljenim lancem širina reza je manja pa time i gubitak zbog zdrobljenog materijala. Osim toga imala je veći učinak, a i zupci su se mogli lakše mijenjati. Dijelovi podsjekačica s ozubljenim lancem: pogonski motor ugrađen u zatvoreno kućište, pokretna pogonska glava za pogon lanca, vodilice s ozubljenim lancem i vitlo za pomicanje. Pomicala se naprijed vlastitim pogonom tako da se jedan kraj čeličnog užeta pričvrstio na gornjem kraju otkopa, a drugi kraj na vitlo koje namotava uže. Lanac leži između vodilja tako da vani proviruju samo noževi koji su bili raspoređeni na lancu u 5 do 9 redova te su se mogli mijenjati (Kujundžić et al. 2003).



Slika 2-1. Podsjekačica s ozubljenim kotačem (lijevo) i s ozubljenim lancem (desno) (Kujundžić et al. 2003).

Razvoj klasične rudarske podsjekačice doveo je do razvoja sličnog stroja koji se primjenjivao kod piljenja horizontalnih i vertikalnih rezova pri eksploataciji kamena. Radni element (mač), dužine 1 do 3,25 m, omogućava dubinu piljenja do 3 m. Sječivo se nalazi na lancu koji klizi po žlijebu ruke sjekačice. Ono se sastoji od pločica napravljenih od tvrdog (widia) metala. Pločice su pričvršćene za zube vijcima kako bi se što lakše zamijenile u slučaju istrošenosti. Lanac se kreće pomoću lančanika koji je preko reduktora spojen s glavnim pogonskim motorom. Kretanje stroja je po tračnicama, a brzina posmaka se automatski regulira ovisno o veličini naprezanja (vrsta materijala, veličina reza i sl.) (Kujundžić et al. 2003).

Za prvu izvedbu podsjekačice za kamen zaslužna je njemačka tvrtka Korfmann. Primjenu je našla u Njemačkoj 1928. g. u kamenolomu travertina (također meki materijal kao i ugljen). Imala je rez debljine 80 mm te je mogla piliti maksimalne dubine od 75 cm,

kasnije i do 130 cm. Kasnije, poslije drugog svjetskog rata, sjekačica Korfmann primjenjuje se u kamenolomu vapnenca Comblanche u Francuskoj. Dužina ruke ostaje do 200 cm, ali se debljina reza smanjuje na 50 mm (Kujundžić et al. 2003).

Radi rane primjene Korfmann sjekačice u Francuskoj dolazi do pojave novog proizvođača ovih strojeva na tim prostorima, tvrtke Perrier. Njihova izvedba sjekačice prikazana je na **slici 2-2.** U novije vrijeme na najvećem broju naših kamenoloma primjenjuju se različite izvedbe lančanih sjekačica talijanske tvrtke Fantini (**slika 2-3.**) (Kujundžić et al. 2003).



Slika 2-2. Lančana sjekačica francuske tvrtke Perrier pri piljenju horizontalnog reza u kamenolomu (Kujundžić et al. 2003).



Slika 2-3. Laganija izvedba lančane sjekačice Fantini pri radu na početnom otvaranju usjeka, tj. pri početku rada na otvaranju dubinskog kamenoloma (Kujundžić et al. 2003).

Danas postoji nekoliko proizvođača lančanih sjekačica. Radni element (mač) razvio se od nekadašnjih 75 cm na 4,5 m za horizontalni rez i čak 7,4 m za vertikalni rez. Debljina reza smanjena je sa nekadašnjih 80 mm na 42 mm za veće duljine mača, dok je kod manjih duljina mača debljina reza smanjena na 27 mm (Primavori 2005). Kod većine današnjih sjekačica način gibanja ostao je isti međutim tračnice se premještaju pomoću hidrauličkih stopa. Takav način pomicanja tračnica u potpunosti je istisnuo upotrebu dizalica i dodatnih sekcija tračnica. Kada je iskazana potreba za većom mobilnosti sjekačica koriste se samohodne sjekačice. Podvozje samohodnih sjekačica može biti na gusjenicama ili kotačima. Postoji i takozvana traktorska sjekačica bez vlastitog podvozja (odnosno pogona) montirana na hidraulički sklop traktora. Prednost je traktorske sjekačice pred uobičajenim modelima u mobilnosti što je izrazito pogodno kada je potrebno odrezati manji nepravilni dio bloka (Korman 2014).

Primjena lančanih sjekačica je u površinskoj i podzemnoj eksploataciji, na otklanjanju otkrivke, na izradi usjeka te dobivanju primarnih i komercijalnih blokova u cjelovitim ležištima s blagim zalijeganjem sloja. Prednost piljenja sjekačicom sastoji se u kraćim i

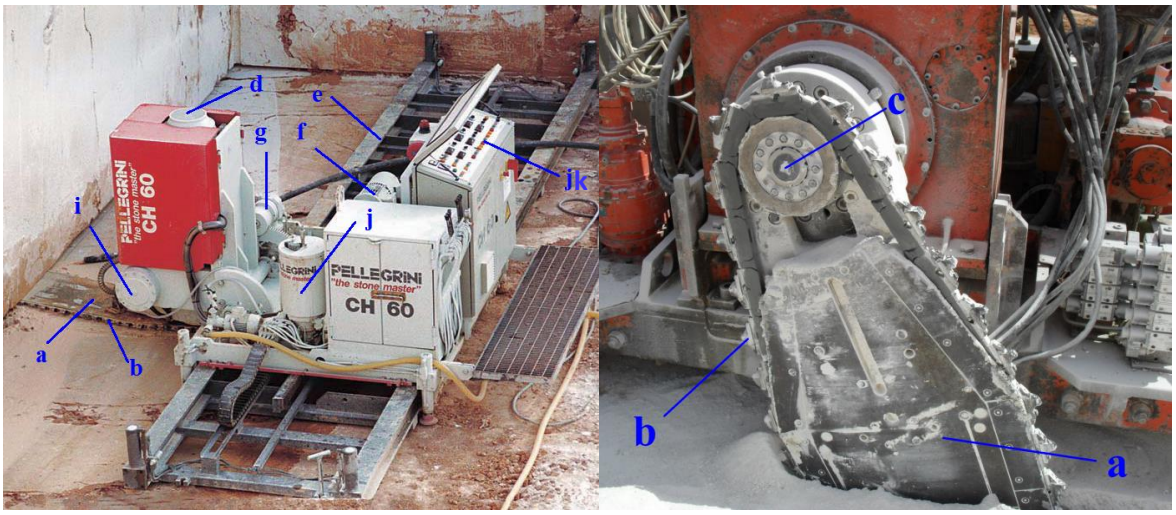
jednostavnijim pripremnim radnjama. Osim rada u dubinskom tipu kamenoloma, sjekačica je naročito učinkovita u kombinaciji s dijamantnom žičnom pilom, kada se sjekačicom pile horizontalni, a dijamantnom žičnom pilom vertikalni rezovi. Kod takve eksploatacije za piljenje dijamantne žične pile ne treba bušiti horizontalne bušotine, već samo vertikalne, jer se horizontalni rez lančane sjekačice i vertikalne bušotine čime je omogućeno piljenje dvije bočne i preostale zadnje stranice. Takav je rad poglavito pogodan pri izradi usjeka. Kada se za dobivanje primarnih blokova koristi isključivo sjekačica, odnosno kad se etaža formira po dubini reza ostvarenog duljinom ruke sjekačice, pripremne radnje se svode isključivo na niveliranje tračnica i premještanje stroja (Korman 2014).

2.2. Konstrukcijske veličine lančane sjekačice

Konstrukcija sjekačice određuje snagu pogonskih motora, duljinu mača pa i geometrijske veličine reznih pločica na lancu. Duljina mača ključna je veličina pri odabiru sjekačice koja ovisi o metodi eksploatacije, odnosno projektiranoj dubini reza. Sa povećanjem duljine mača, povećava se ukupna snaga i masa sjekačice čime su određene maksimalne vrijednosti brzine posmaka i brzine lanca (Korman 2014).

Osnovni dijelovi lančane sjekačice (**slika 2-4.**):

a) radni organ (mač),
b) lanac i rezni element,
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 sa pumpom za podmazivanje,
k) upravljačka ploča (Kujundžić et al. 2003).



Slika 2-4. Osnovni dijelovi lančane sjekačice (Korman 2014).

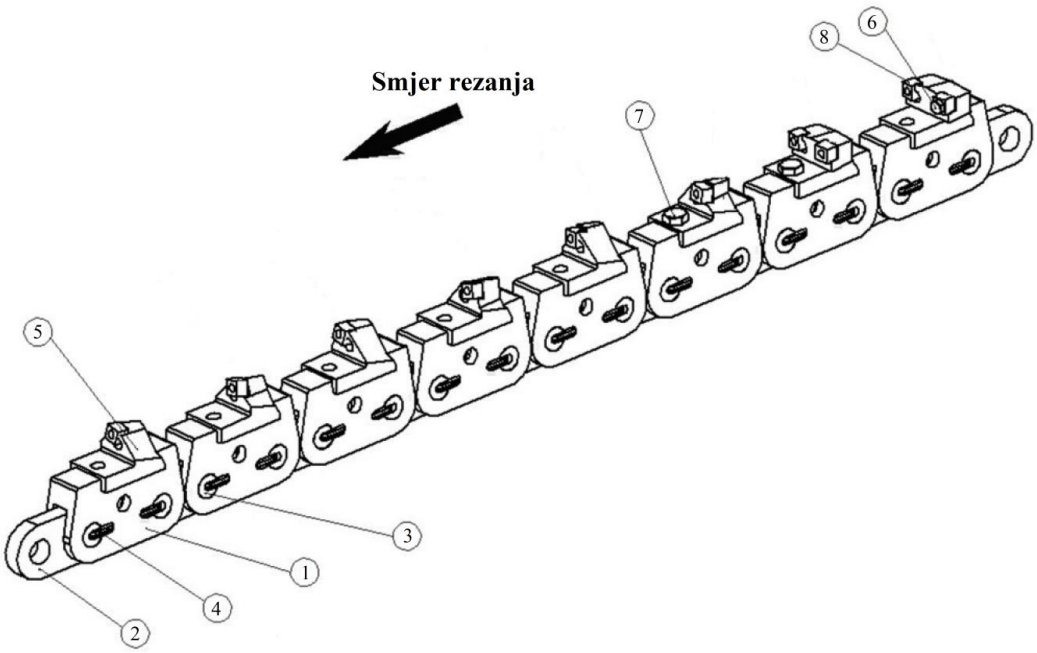
Radni organ lančane sjekačice je mač po kojem klizi beskonačni lanac sa nosačima na kojima su učvršćene rezne pločice. U današnjim izvedbama sjekačica, rezne pločice se pričvršćuju vijcima tako da se u slučaju istrošenosti ne mijenjaju nosači već samo rezne pločice. Lanac se pokreće pomoću lančanika koji je preko reduktora spojen s glavnim pogonskim motorom. Stroj se giba po tračnicama pomoću motora za posmak stroja. Motor za posmak mača služi za zakretanje mača u ravnini rezanja, a motor za postavljanje mača u horizontalni odnosno vertikalni položaj. Motor sa pumpom za podmazivanje služi za podmazivanje reznih elemenata tijekom rada sjekačice. Brzina posmaka sjekačice, brzina lanca i položaj mača regulira se pomoću regulatora koji se nalaze na upravljačkoj ploči (Sariisik 2000).

Lanac se sastoji od članaka koji su međusobno povezani spojnicama. Zatik učvršćuje spojnice, a osigurač osigurava. Nosači pločica se učvršćuju pomoću vijaka na članak lanca, a pločice pomoću vijaka na nosače. Na lanac se pričvršćuje serija nosača pločica od 5 do 8 komada, ovisno o vrsti stijene i načinu piljenja (suhi ili mokri postupak). **Slika 2-5.** prikazuje segment reznog lanca od 8 nosača i 10 reznih pločica. Prvih šest nosača imaju po jednu pločicu, dok ostala dva nosača zbog širine reza imaju po dvije. Serija reznih segmenata na lancu ponavlja se naizmjenično, a njihov broj ovisi o duljini mača (Korman 2014).

Osnovni djelovi reznog lanca lančane sjekačice:

1. članak lanca,

2. spojnica,
3. zatik,
4. osigurač zatika,
5. nosač pločice,
6. vijak rezne pločice,
7. vijak nosača,
8. rezna pločica (Korman 2014).

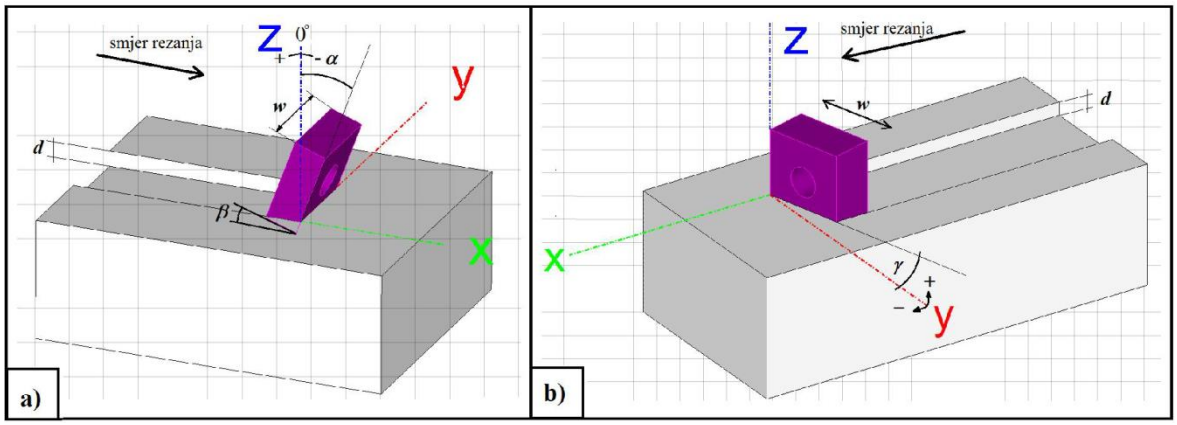


Slika 2-5. Segment reznog lanca lančane sjekačice (Korman 2014).

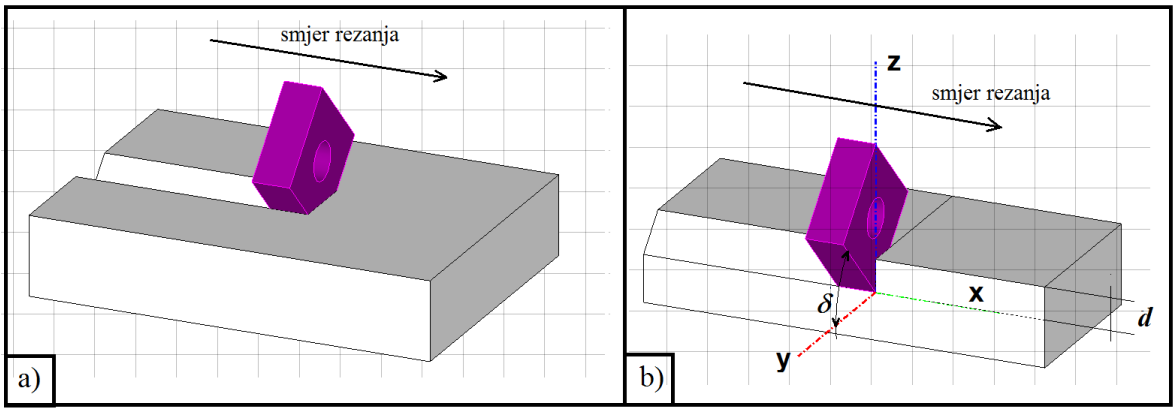
Prva rezna pločica u seriji služi sa otvaranje reza, a svaka slijedeća služi za proširivanje. Raspodjela ukupnih naprezanja, odnosno smanjenje naprezanja po nosaču, postiže se simetričnim postavljanjem reznih pločica što bitno utječe na neravnomjerno piljenje i smanjenje opterećenja stroja. Karakteristike stijenske mase diktiraju raspored i položaj reznih pločica na reznom lancu, koji naravno ovise o konstrukciji reznog lanca koja se razlikuje ovisno o proizvođaču (Korman 2014).

Geometrijske veličine reznih pločica određene su njihovom orijentacijom u prostoru. Sve geometrijske veličine su prikazane na **slikama 2-6.** i **2-7.** Razlikujemo sljedeće veličine:

- napadni kut rezne pločice α,
- kut otklona β,
- bočni kut rezne pločice δ,
- bočni napadni kut rezanja γ (Korman 2014).



Slika 2-6. 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. Načini rezanja, a) ukliješteni uvjeti, b) neukliješteni uvjeti (Korman 2014).

Nekoć su se pločice pričvršćivale varenjem, dok se danas izbjegava kruta veza, te se pločice pričvršćuju vijcima (smanjeno otkidanje pločica). Rezne pločice razlikuju se po materijalnom sastavu i obliku. **Slika 2-8.** prikazuje različite izvedbe reznih pločica. Kada dođe do pojave istrošenosti pločica, tj. vrhova kod kvadratičnog i zvjezdastog oblika, za rezanje se mogu koristiti drugi vrhovi pločice (Korman 2014).



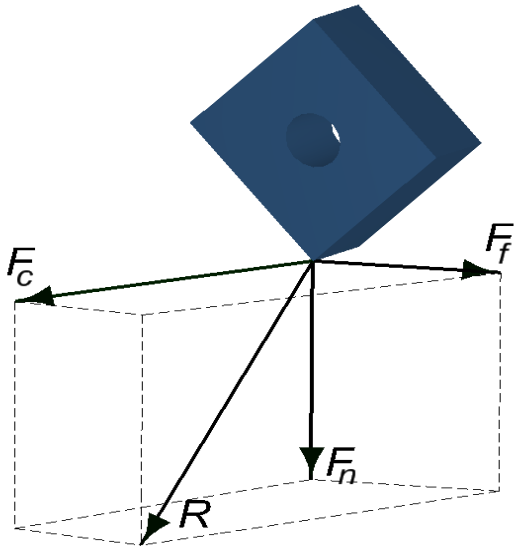
Slika 2-8. Rezne pločice, a) kvadratičnog oblika, b) kružnog oblika, c) zvjezdastog oblika (Primavori 2005).

3. SILE PRI REZANJU STIJENA

Pri razmatranju učinaka pojedenih rudarskih strojeva koji iskopavaju rezanjem odnosno struganjem (npr. tuneleri za sukcesivni iskop, tuneleri za punoprofilni iskop, lančane sjekačice, strojevi za kontinuirani iskop na površini itd.) neophodno je poznavanje mehanike rezanja. Mehanika rezanja stijena istražuje utjecaj uvjeta rezanja na tijek i način nastajanja odvojene čestice, te sile, naprezanja i deformacije koje se pri tome javljaju. Sile koje se javljaju pri rezanju imaju presudan utjecaj na konstrukciju i trajnost reznih alata. Fizikalno-mehaničke i strukturne značajke stijenske mase te geometrijske veličine reznog alata i uvjeti rezanja ključni su čimbenici koji utječu na intenzitet, pravac i smjer sile rezanja (Korman 2014).

Rezultantna sila R koja se javlja tijekom rezanja uslijed interakcije stijene i reznog alata može se rastaviti na tri ortogonalne komponente (**slika 3-1.**):

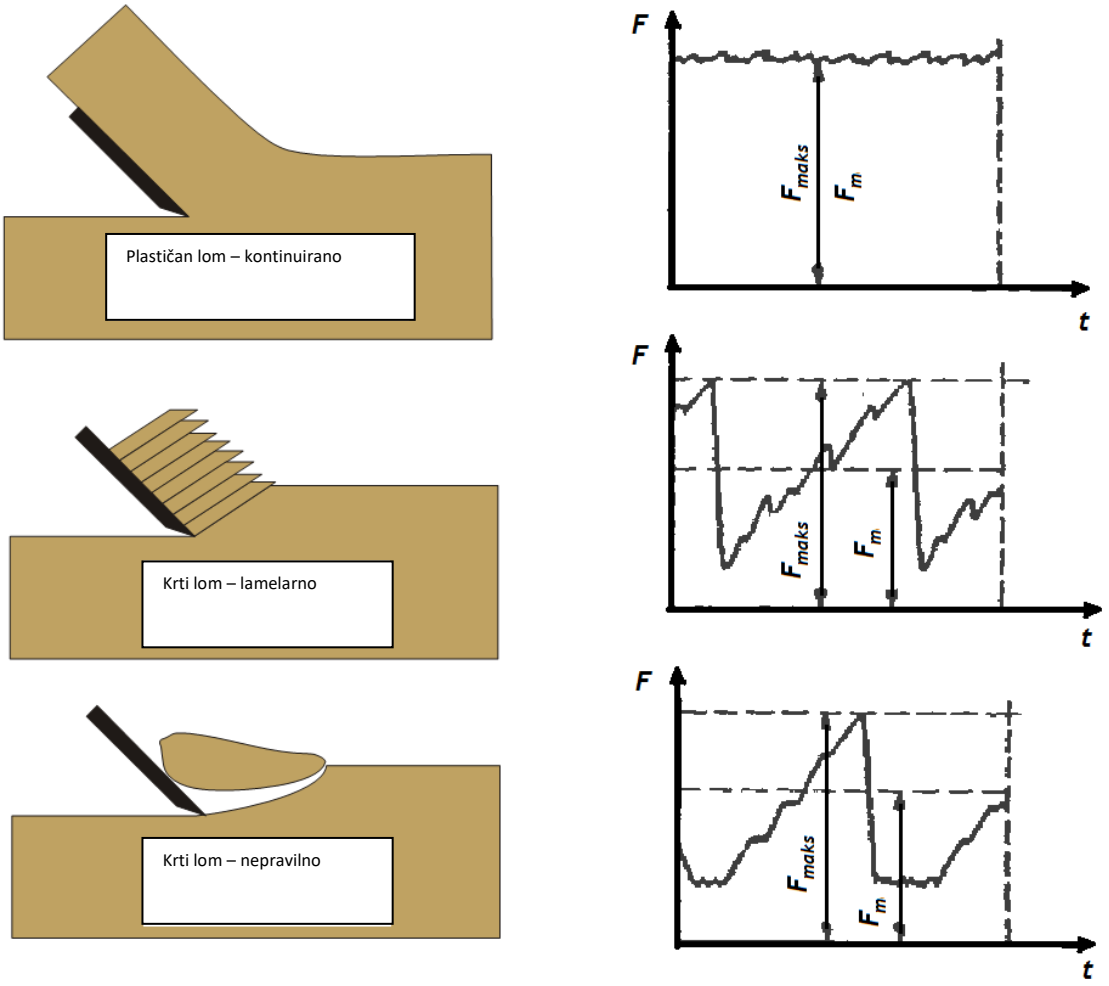
- tangencijalna ili horizontalna sila F_c, djeluje u smjeru paralelno s trajektorijom alata,
- normalna ili vertikalna sila F_n, djeluje okomito na trajektoriju alata,
- bočna sila F_f, djeluje okomito na ravninu koja je određena prethodnim dvjema silama (Korman 2014).



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

Istraživanjima je također ustanovljeno da svojstva stijena i geometrijske veličine reznog alata utječu na oblik odlomka pri rezanju. Generalno, mogu se razlikovati dvije vrste loma,

plastični i krti lom, naravno uz pretpostavku da je stijena intaktna. Kod plastičnog loma dolazi do kontinuiranog odvajanja odlomaka, dok kod krtog loma dolazi do lamelarnog odvajanja odlomaka po smičnoj ravnini. Prilikom rezanja stijena dolazi do velike promjene rezne sile, a odlomci stijene se formiraju diskontinuirano (Nishimatsu 1972). Uzeći u obzir da stijena nije intaktna, prilikom rezanja dolazi do krtog loma po pukotinama, a odlomci su nepravilnog oblika (**slika 3-2.**).



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

Vidljivo je da tip loma značajno utječe i na vrijednost amplitude sile za vrijeme rezanja. Maksimalna sila F_{maks} kod plastičnog loma približno je jednaka srednjoj vrijednosti sile F_m, stoga je amplituda sile za vrijeme rezanja mala. Nasuprot tome, kod krtog loma amplituda sile za vrijeme rezanja je vrlo velika. Velika promjena sila je posljedica diskontinuiranog odvajanja odlomaka što u konačnici rezultira većim vibracijama i dinamičkim naprezanjima na reznim alatima (Korman 2014).

Do razvoja različitih modela dovela je težnja za razumijevanjem mehanizma rezanja stijena. Brojni autori su predložili razne modele kako bi opisali veličine koje utječu na učinkovitost rezanja. Uz pomoć vrijednosti sila koje se pojavljuju na reznom alatu i energije koja se utroši na rezanje može se odrediti rezivost stijene. Sile koje se javljaju na reznom alatu pri rezanju mogu se odrediti grafičkim i analitičkim postupcima, numeričkim metodama ili laboratorijskim ispitivanjima mjerenjem sile na reznom alatu (Korman 2014).

3.1. Modeli rezanja

Prvi model za proračun sila koje se javljaju na reznom alatu pri obradi metala predstavio je Merchant 1945. g. Ta teorija služila je mnogima kako bi razvili modele koji preciznije opisuju mehanizme rezanja. Merchant-ov model primjenjiv je za rezne alate s oštricom u obliku klina, uz pretpostavku da do sloma dolazi po smičnoj ravnini, gdje je vrh reznog alata okomit na pravac gibanja alata. Merchant-ov model temelji se na pretpostavci da je dubina reza znatno manja od širine reznog alata, a model je primjenjiv i za određene vrste ugljena (Merchant 1945).

Evans je 1962. g. ustanovio da prilikom rezanja ugljena ne dolazi do kontinuiranog odvajanja odlomaka, već se odlomci ugljena odvajaju diskontinuirano po kružnom luku uslijed vlačnih naprezanja. Na temelju ispitivanja i teoretskih razmatranja razvio je model za rezanje stijena za rezne alate u obliku klina (Evans 1962).

Nishimatsu je 1972. g. predložio model za rezanje stijena temeljen na Merchant-ovom. Pretpostavio je da do sloma materijala dolazi po posmičnoj ravnini te da oblik loma ima geometrijski oblik klina. Na temelju oblika odlomljenih čestica, zaključio je da pri rezanju stijena ne dolazi do plastičnih deformacija (Nishimatsu 1972).

Detournay-ev i Defourny-ev model se zasniva na činjenici da se preko specifične energije koja se utroši na rezanje uzorka može procijeniti tlačna čvrstoća. Specifična energija određuje se pomoću uređaja za linearno rezanje, koji se sastoji od postolja na kojem je smješten pokretni dio uređaja. Na postolju uređaja nalazi se i prihvat za uzorak i pogonski motor. Detournay i Defourny su 1992. g. predložili model za rezanje stijena kvadratičnim reznim pločicama. Primjenjiv je samo za male dubine rezanja te za oštre i istrošene rezne pločice, tj. uzima u obzir stupanj istrošenosti reznog alata (Detournay i Defourny 1992).

Vrsta stijene, dubina rezanja i kut reznih pločica određuju intenzitet sila koje se javljaju pri rezanju. Na temelju brojnih ispitivanja napadnog kuta na sile koje se javljaju na reznim alatima strojeva za iskop stijena vidljivo je da se prosječne horizontalne i vetikalne sile smanjuju s povećanjem napadnog kuta. Za negativne napadne kutove, vrijednosti sila mogu biti i do tri puta veće od vrijednosti sila za pozitivne napadne kutove. U pogledu učinkovitosti rezanja optimalni napadni kut reznog alata iznosi 20°. Daljnjim povećanjem vrijednosti napadnog kuta dolazi do minimalnih poboljšanja, no vjerojatnost pucanja alata znatno se povećava (Hood i Roxborough 1992).

Kod otklonskih kuteva koji su blizu nuli ili su joj jednaki, dolazi do pojave velikih sila na reznom alatu obzirom na to da se trenje između stijene i reznog alata povećava. Ako bi kut otklona bio povećan do 5° sile bi se smanjile, no daljnje povećanje kuta ne bi utjecalo na vrijednosti sila (Hood i Roxborough 1992).

4. ABRAZIVNOST

Abrazivnost je sposobnost stijene da troši radni alat tijekom međusobne interakcije između radnog alata i stijene u mehaničkom procesu rezanja. Kako se alat rezanja izlaže trošenju, mijenja svoje geometrijske dimenzije te se dodirno područje između alata i površine stijene povećava. Promjena ovih dimenzija dovodi do promjene brzine napredovanja stroja za bušenje i specifične energije rezanja (Labaš et al. 2012).

Mehaničko rezanje stijena, bilo bušenje ili tuneliranje, bitno utječe na svojstva stijene. Također, mehanička i tehnološka svojstva stijena izravno utječu na proces rezanja, od kojih je svojstvo čvrstoće stijena dominantno fizičko-mehaničko svojstvo. Snaga zasijecanja, koja pokazuje dobru korelaciju s brzinom rezanja, jedno je od svojstava čvrstoće važnih za mehaničko rezanje stijena. Tehnološka svojstva stijena predstavljaju tvrdoću, bušivost i abrazivnost stijene. Abrazivnost stijene utječe na trošenje alata za rezanje. Trošenje alata rezultira smanjenjem trenutačne brzine bušenja te povećanjem specifične energije rezanja, a one izravno utječu na ekonomska pitanja mehaničkog rezanja (Labaš et al. 2012).

Intenzitet i brzina trošenja ovise o nekoliko istodobno djelujućih čimbenika u interakciji alata i stijene. Najvažniji od njih su:

- tip i svojstva površine trenja,
- režim rada alata rezanja (kombinacija ulaznih varijabli procesa rezanja),
- svojstva radne sredine (Labaš et al. 2012).

Abrazija se može definirati kao trošenje ili kidanje čestica s površine alata. Abrazija je učinak fizičko-mehaničkih svojstava stijena u dodiru s reznim alatom. Kako se svojstva alata razmatraju u interakciji alata i stijena, abrazivnost stijene je značajka koja ovisi o stanju rezanog alata. Zbog toga se učinak svojstava alata mora eliminirati tijekom određivanja abrazivnosti stijene laboratorijskim metodama. Odabir jedne vrste alata s unaprijed određenim fizikalnim i mehaničkim svojstvima za laboratorijsko ispitivanje, donosi rezultate abrazivnosti, karakterizirajući određenu vrstu stijene. Radna sredina gdje se interakcija odvija također utječe na proces međusobne interakcije između alata i stijene. Učinak radne sredine nije zanemariv, stoga se mora osigurati stabilno okruženje u laboratorijskim uvjetima kako bi se eliminirao njegov sustavni učinak na globalne

rezultate, uglavnom tijekom ispitivanja abrazivnosti različitih tipova stijena (Labaš et al. 2012).

4.1. Metode za procjenu abrazivnosti

Postoji nekoliko metoda za procjenu abrazivnosti stijena i minerala, od kojih su neke uspješnije i relevantnije. Podijeljene su u tri kategorije:

- holistički pristupi - procjena abrazivnosti kombinacijom temeljnih svojstava stijena i različitih procesnih parametara i uvjeta okoline,
- neizravne metode - procjena abrazivnosti kroz kombinaciju tvrdoće, tlačne čvrstoće i drugih temeljnih svojstava stijena,
- izravne metode - procjena abrazivnosti iz laboratorijskih ispitivanja pomoću pomicanja uzorka stijene i alata rezanja koji su u kontaktu, pod standardnim kontroliranim ispitnim uvjetima (Labaš et al. 2012).

Holistički pristup uzima u obzir strojne parametre, strukturu površine trošenja, raspodjelu veličine čestica, mehanička svojstva stijene, promjenu režima habanja, učinak temperature i vlage itd. Holistički pristupi za procjenu abrazivnosti stijene su specifični za određenu opremu ili procese te su stoga ograničeni za druge primjene (Labaš et al. 2012).

Prednost neizravnih metoda je ta što koriste podatke koji su ili lako dostupni ili relativno jednostavni za dobivanje. Međutim, one ne uzimaju u obzir procesne varijable za određene načine trošenja. Kod neizravnih mjerenja abrazivnost stijene procjenjuje se pomoću standardnih ispitivanja mehaničkih svojstava, kao što su: Schmidtov čekić, Shoreov sklerometar, statički penetracijski pokus, jednoosna tlačna čvrstoća, indirektna vlačna čvrstoća, tvrdoća i žilavost stijene ili Vickersov test tvrdoće, Mopsove skala tvrdoće i volumni omjeri različitih minerala u stijeni (Labaš et al. 2012).

Izravne metode koriste se standardnim uvjetima za određivanje abrazivnosti stijene u određenom načinu trošenja, bilo da se radi o niskim ili visokim naprezanjima, ili abraziji uslijed udaraca. Ispitivanja proučavaju relativno kretanje uzorka stijene i alata koji se troši pri njihovom kontaktu. Ova ispitivanja primjenjuju se na uzorak stijene bilo statički ili dinamički, uz nisku relativnu brzinu uzorka/trošnog alata, te u mnogim slučajevima koriste

abrazivne uvjete pri slabom kontaktu (slabim udarcima) uzorka stijene i alata (Labaš et al. 2012).

Ispitivanja abrazivnosti koja se danas koriste za ispitivanje stijena i tla podijeljeni su u tri skupine (ISRM):

- udarna ispitivanja - Los Angeles metoda, pijesak test, Burbank metoda,
- tlačna ispitivanja - Dorry test, ASTM 2-241-51 test, modificirani Dorry test, ispitivanje bušenjem, Taber Abraser model 143,
- abrazijska ispitivanja - Devalov test (Golovanevskiy i Barmen 2008).

Los Angeles metoda za ispitivanje abrazivnosti bazira se na interakciji uzoraka stijene i čeličnih kugli u rotirajućem bubnju (**slika 4-1.**). Pijesak test uključuje čelične oštrice od isprobane legure koje rotiraju brzinom od 632 o/min unutar bubnja koji sadrži uzorke stijene. Brzina bubnja iznosi 74 o/min (Labaš et al. 2012).



Slika 4-1. Rotirajući bubanj za ispitivanje abrazivnosti u sklopu LA metode (Pavia systems 2012).

Dorry test, ASTM 2-241-51 test i modificirani Dorry test koriste uzorke stijene smještene na rotirajući čelični disk s abrazivnim sredstvom (kvarcni pijesak, prašak Al_2O_3) koje je dodano na kontaktnu površinu. Ispitivanje bušenjem određuje trošenje bušačih kruna u određenom vremenskom intervalu ili po bušenoj duljini u zadanim uvjetima. Taber Abraser Model 143 osigurava ispitivanje uzoraka debljine od 6 mm. Uzorak je u obliku diska te je smješten u NX jezgru koja se okreće 400 puta pod metalnim kotačem opterećenim masom od 250 g. Krhotine se uklanjaju vakuumskim sustavom. Gubitak mase uzorka je zapravo otpornost stijene na abraziju, dok je gubitak mase čeličnog kotača mjera abrazivnosti stijene. Test se koristi za određivanje bušivosti stijena kod strojeva za izradu tunela (Labaš et al. 2012).

Deval test se sastoji od polaganog mljevenja uzoraka stijene u bubnju korištenog u Los Angeles metodi, ali bez čeličnih kuglica, što znači da se uzorci melju međusobno. Određuje se samo otpornost na abraziju, ne i abrazivnost stijene (Labaš et al. 2012).

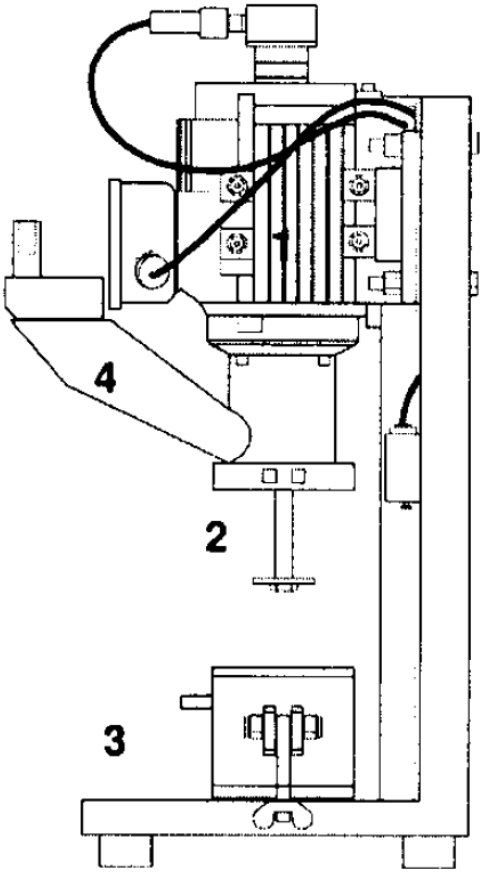
Slijedeća ispitivanja najčešće se koriste za procjenu abrazivnosti stijene pri mehaničkom rezanju stijena:

- CERCHAR test abrazivnosti,
- LCPC test abrazivnosti,
- NTNU test abrazivnosti,
- ispitivanje abrazivnosti dubljenjem (Krepelka et al. 2000).

CERCHAR test koristi se za određivanje abrazivnosti stijena, mjerenjem trošenja vrha čelične igle prilikom prolaska po površini uzorka. Ispitivanje CERCHAR indeksa abrazivnosti (CERCHAR abrasivity index - *CAI*) preporučeno je od strane Međunarodnog društva za mehaniku stijena (The International Society for Rock Mechanics - ISRM) kao metoda ispitivanja za iskopavanje, bušivost i rezivost stijena (Yarali et al. 2008). CERCHAR test abrazivnosti detaljnije je opisan u poglavlju 5.

LCPC test koristi se na uzorcima stijena, tla ili sintetičkih materijala veličine zrna od 4 - 6,3 mm. Metoda je razvijena u Centralnom laboratoriju za mostove i nasipe u Francuskoj (LCPC - Laboratoire Central de ponts et Chaussées, France). Krupniji materijal mora biti zdrobljen i prosijan. Uređaj koji se koristi kod LCPC testa abrazivnosti (**slika 4-2.**) sastoji

se od motora na koji je ugrađen metalni propeler. On rotira u metalnoj posudi (ø 93 mm · 100 mm) koja služi za uzimanje zrnatih uzoraka. Uzorak osušen na zraku, granulacije 4 - 6,3 mm, mase 500 ± 2 g, dodaje se u cilindričnu posudu kroz cijev za doziranje. Pravokutni metalni propeler, veličine 50 · 25 · 5 mm, rotira u vremenskom periodu od 5 min brzinom od 4500 o/min u cilindričnoj posudi. Tvrdoća propelera po Rockwellu iznosi B 60-75. Propeler se mora izvagati prije i poslije testiranja. Gubitak mase metalnog propelera mjera je abrazivnosti uzorka. LCPC test daje LCPC indeks abrazivnosti (*ABR*). Koeficijent *ABR* se izračunava tako da se odredi koliki je gubitak mase metalnog propelera, u g, po toni uzorka. *ABR* je izrazito nizak za meke, slabo abrazivne stijene, dok kod vrlo tvrdih i abrazivnih stijena premašuje 1500 g/t (Labaš et al. 2012).



Slika 4-2. Uređaj za provođenje LCPC testa (Labaš et al. 2012).

Glavni dijelovi LCPC uređaja:

1. motor,
2. metalni propeler,
3. posuda s uzorkom,
4. cijev za doziranje (Labaš et al. 2012).

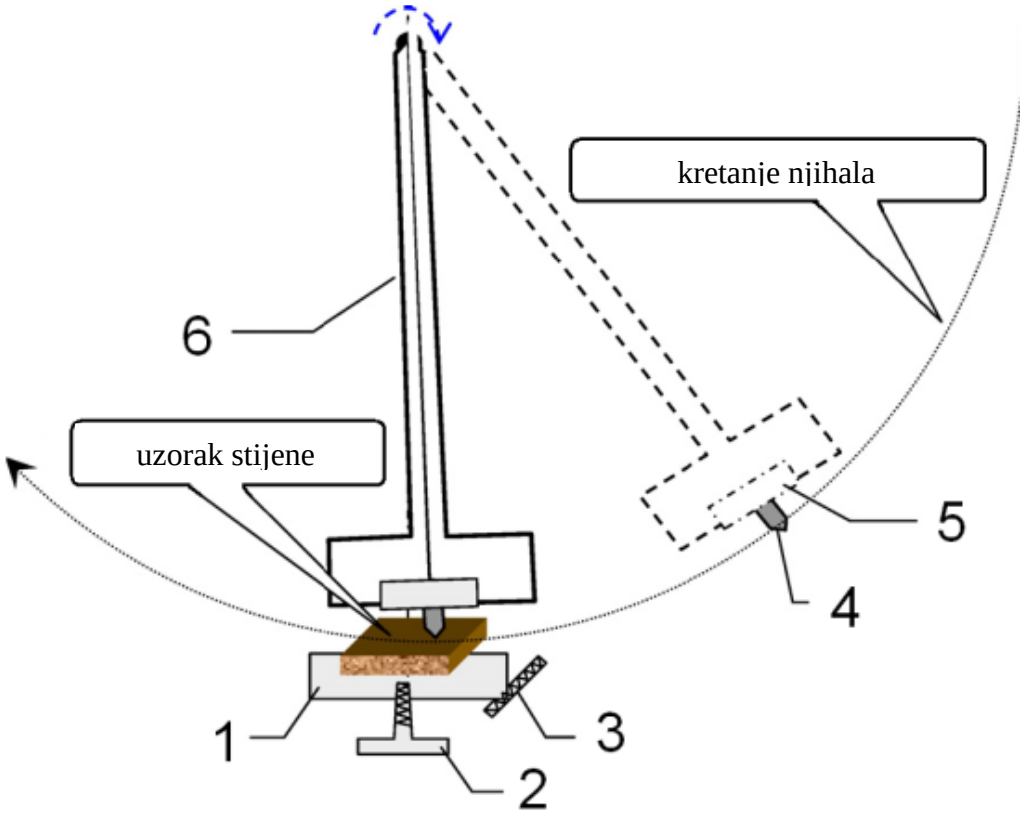
NTNU test abrazivnosti služi za procjenu bušivosti stijena pri udarnom bušenju. Razvijen je u Inženjersko-geološkom laboratoriju norveškog tehnološkog instituta (NTH) (kasnije preimenovan u NTNU - Norveško sveučilište znanosti i tehnologije). Ispitivanje abrazivnosti čestica zdrobljenih stijena (veličina čestica < 1,0 mm), kao što je prikazano na **slici 4-3.**, uvedeno je zajedno s testom krtosti i Sievers-J testom za bušenje u svrhu procjene parametara bušivosti, indeksa brzine bušenja (*DRI* - Index Drilling Rate) i indeksa trošenja komada (*BWI* - Bit Wear Index). Kasnije su testovi korišteni za predviđanje trošenja tvrđih stijena koje su bušene TBMom, prema metodi koju je razvio NTH. Za predviđanje trošenja čeličnog rezača TBMa koristi se ispitni komad čelika skinutog s prstena rezača koji se koristi u ispitivanju umjesto ispitnog komada volfram karbida (korišten za procjenu udarnog bušenja). Također, umjesto *BWI* indeksa, izračunava se indeks vijeka rezača (*CLI* - Cutter Life Index). Abrazivne vrijednosti *AV/AVS* predstavljaju abrazivnost volfram karbida/čeličnog rezača, koja ovisi o vremenu. Isti uređaj koji se koristi za mjerenje indeksa abrazivnosti (Abrasion Value - *AV*), koristi se i za mjerenje indeksa abrazivnosti čelika (Abrasion Value Steel - *AVS*). Dva su ispitivanja definirana kao:

- *AV* - aritmetička sredina izmjerenih gubitaka težine volfram karbida, u mg, u 2 do 4 ispitivanja, nakon 5 minuta, tj. 100 okretaja uređaja,
- *AVS* - isto kako je opisano za *AV*, ali nakon 1 minute, tj. 20 okretaja uređaja (Labaš et al. 2012).

Novi NTNU test abrazivnosti za tla (SAT - Soil Abrasion Test) predstavlja daljnji razvoj postojećih testova abrazivnosti tla. U usporedbi s testom za mjerenje *AVS* promijenjen je samo jedan detalj: umjesto zdrobljenog kamenog praha (< 1 mm) u SAT testu koristi se prosijan uzorak tla (< 4 mm) (Labaš et al. 2012).

Test abrazivnosti rezanjem simulira abraziju pod vrlo velikom naprezanju te pri jakim udarnim uvjetima. Razvijen je u Centru za naprednu proizvođačku tehnologiju u Australiji (Advanced Manufacturing Technologies Centre). Plosnati pravokutni uzorak stijene postavljen je u držač uzorka. Čelični trošeni alat s oštrim konusom (90°) pričvršćen je na ruku njihala te je njegova putanja podešena tako da rezni alat prolazi preko površine kamenog uzorka pri njihanju. Dizajn ispitnog prikazan je na **slici 4-3.** Uzorak stijene pričvršćen je u držaču uzorka. Držač uzorka može se pomicati vertikalno pomoću prijenosnog vijka, a vodoravno preko opružnog mehanizma. Trošeni rezni alat čvrsto je

postavljen u držač ruke njihala. Ruka njihala oslobađa se iz početnog položaja te njezin vrh prelazi preko površine stijenskog uzorka pri padu njihala. Ispitni uzorci su pravokutni, duljine 80 ± 0,5 mm, a površina je ravna i glatka. Rezni alati izrađeni su od čelika, Rockwellove tvrdoće od HRC 40/42. Slično kao i kod određivanja abrazivnosti u CERCHAR testu, izračunava se indeks abrazivnosti rezanjem (Gouging Abrasion Index - *Gi*) koji se dobiva kao aritmetička sredina promjera potrošenog alata, u mm, pomnožena s faktorom 10. Svaka od stijena testirana je tri do pet puta. Vrijednosti *Gi* variraju od 0,5 do 22 za testirane australske stijene. Rezultati ispitivanja mogu se koristiti za predviđanje brzina trošenja drobilica, alata u interakciji s tlom i diskova TBMa (Golovanevskiy i Bearman 2008).



Slika 4-3. Uređaj za ispitivanje abrazije rezanjem (Golovanevskiy i Bearman 2008).

Glavni dijelovi uređaja:

1. držač uzorka,
2. prijenosni vijak,
3. opružni mehanizam,
4. rezni alat,
5. držač alata,
6. ruka njihala (Golovanevskiy i Bearman 2008).

5. CERCHAR INDEKS ABRAZIVNOSTI

Abrazivnost stijene igra važnu ulogu u karakteriziranju stijenskog materijala za potrebe iskopa. Abrazija se može definirati kao trošenje ili kidanje čestica s površine, tj. proces koji uzrokuje uklanjanje ili premještanje materijala s čvrste površine, što će dovesti do trošenja, posebno na alatima koji se koriste u rudarstvu, bušenju i tunelogradnji. CERCHAR test abrazivnosti je metoda za određivanje indeksa nazvanog CERCHAR indeks abrazivnosti (*CAI* – CERCHAR abrasivity index), a koristi se za određivanje abrazivnosti stijene (Alber et al. 2013).

Test je razvijen u Laboratoriju Centra za studije i istraživanja o rudnicima ugljena smještenog u Francuskoj (Laboratoire du Centre d'E′ tudes et Recherches des Charbonnages - CERCHAR), a primjenu nalazi kod eksploatacije ugljena. Test je široko korišten u istraživanjima i praksi. Postoje dva tipa uređaja za ispitivanje: originalni, koji je razvijen u CERCHAR centru (Valantin 1973) i modificirani od strane Westa (West 1989). Dok je dizajn kod oba tipa sličan, postoje neke razlike i nejasnoće u uvjetima ispitivanja koje uključuju: korištenje opreme, svojstva materijala ispitne igle i pripremu uzorka (Plinninger et al. 2003).

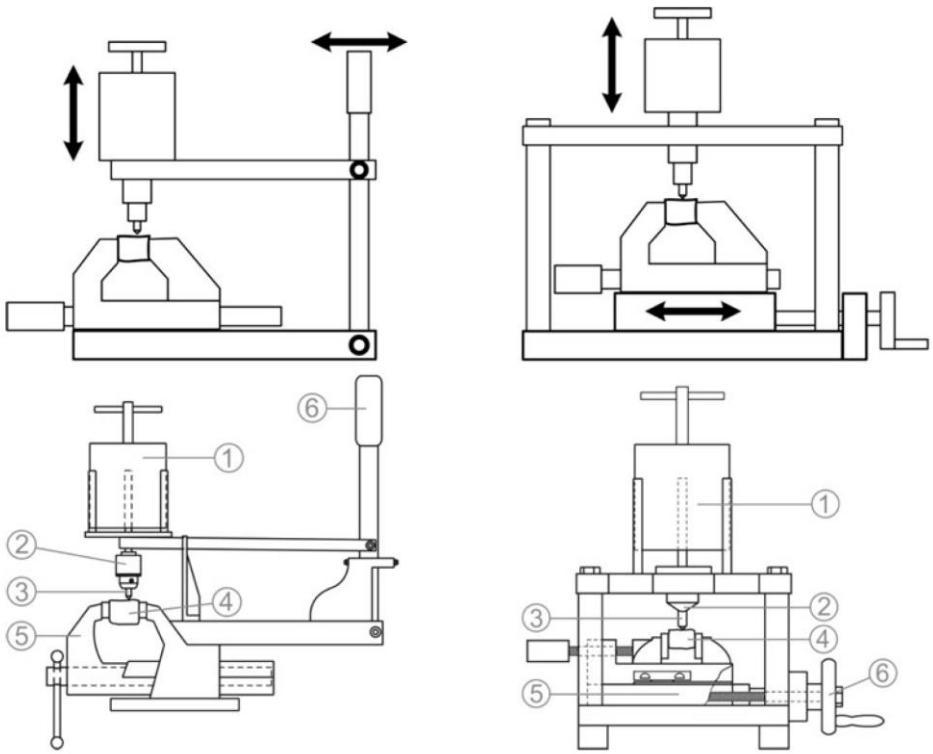
5.1. Područje primjene

CERCHAR test abrazivnosti namijenjen je za klasificiranje abrazivnosti stijenskog materijala. Ispitivanje mjeri trošenje na vrhu čelične igle. Tvrdoća igle iznosi HRC 55 po Rockwellu. Uzorak stijene, nepravilnog oblika ili u obliku diska, učvršćuje se u ispitni uređaj. Igla se pažljivo spušta na površinu stijene. Dok je pod normalnim opterećenjem od 70 N, iglom se struže po stijeni. Udaljenost koju igla prevali iznosi 10,0 mm. Istrošena površina vrha igle mjeri se pod mikroskopom preciznošću od 0,01 mm. CERCHAR indeks abrazivnosti *(CAI*) vrijednost je bez dimenzija i izračunava se množenjem istrošene površine prikazane u jedinicama od 0,01 mm sa 10. Npr., ako istrošena površina vrha igle iznosi 0,25 mm, treba navesti odgovarajuću vrijednost *CAI* u iznosu od 2,5 (Alber et al. 2013).

5.2. Uređaj

Postoje dva temeljno različita mehanizma koji stvaraju relativni pomak između igle i površine stijene. U izvornom CERCHAR dizajnu, igla i teret kreću se preko stacionarne površine stijene. U slučaju Westovog dizajna, uzorci stijene kreću se ispod stacionarne igle. **Slika 5-1.** shematski prikazuje način djelovanja u oba nacrta. Uz način djelovanja prikazane su i glavne značajke dvaju ispitnih uređaja te njihovi djelovi. Razlike u konstrukciji dovode do razlika u trajanju ispitivanja. Pokretanje poluge u CERCHAR dizajnu deseterostruko je brže u usporedbi s polaganim pokretanjem vijaka u Westovom dizajnu (Alber et al. 2013).

Oba stroja koriste kruti prihvat za učvršćivanje uzorka stijene. Važno je dobro učvrstiti uzorak kako bi se smanjilo bilo kakvo bočno kretanje tijekom ispitivanja. Opterećenje (uteg), koje se nalazi na vrhu igle, predstavlja statičnu silu od 70 N. Igla treba biti pažljivo spuštena na površinu stijene te treba stajati okomito s obzirom na površinu uzorka. Trajanje ispitivanja koje uključuje pomicanje igle za 10 mm trebalo bi završiti unutar 1 ± 0,5 s za CERCHAR tip uređaja te 10 ± 2 s za Westov tip uređaja (Alber et al. 2013).



Slika 5-1. Osnovni mehanizmi i skice dvaju glavnih oblika ispitnih uređaja. Lijevo - originalni CERCHAR dizajn, desno - Westov dizajn (Alber et al. 2013).

Djelovi dvaju glavnih oblika ispitnih uređaja:

1. opterećenje (uteg),
2. stezaljka,
3. igla,
4. uzorak,
5. prihvat,
6. poluga za pokretanje (Alber et al. 2013).

Igla je izrađena od krom-vanadij legiranog čelika. Koriste se igle sa Rockwellovom tvrdoćom od HRC 55 ± 1. Budući da se vrijednosti tvrdoće čeličnih igli ostvarenih tijekom toplinske obrade mogu razlikovati, stvarna tvrdoća svake igle mora se mjeriti i snimiti barem jednom prije prve uporabe. Ne smije se koristiti igla s tvrdoćom iznad granica tolerancije HRC ± 1. Promjer igle mora biti najmanje 6 mm, dok duljina mora biti najmanje 15 mm između stezaljke i površine stijene. Vrh igle mora imati konusni kut od 90°. Istrošene igle koje se planiraju koristiti u daljnjim ispitivanjima potrebno je ponovno naoštriti te provjeriti konusni kut pod mikroskopom. Statična sila koja djeluje na iglu mora iznositi 70 N (Alber et al. 2013).

Svaka korištena igla treba se ponovno naoštriti pomoću brusilice koja mora biti izrađena od finih zrna kako bi se izbjeglo ostavljanje grubih površina na vrhu igle. Obavezna je uporaba odgovarajuće tekućine za hlađenje, koja će spriječiti bilo kakvu promjenu tvrdoće igle (Alber et al. 2013).

Uzorak stijene može biti nepravilnog oblika ili u obliku diska. Preporučuje se ispitivanje na svježoj površini stijene. Hrapave površine mogu se dobiti Brazilskim testiranjem ili čvrstim udarcima čekića na stijenskoj jezgri ili uzorku stijene. Alternativno, površina se može pripremiti dijamantnom pilom s vodenim hlađenjem. S ispitne površine treba ukloniti krhotine ili labava zrna. Uzorak može biti zasićen, s prirodnim sadržajem vode, ili osušen na zraku ili u peći. Na putu igle na smije biti vidljivih pora. Nema ograničenja s obzirom na veličinu zrna. Međutim, za stijene veličine zrna veće od 2 mm, treba razmotriti veći broj ispitivanja. U uzorku s većim mineralnim zrnima pet pojedinačnih ispitivanja neće biti dovoljno da se obuhvati puni mineralni sastav stijene. Veličina površine stijene trebala bi biti dovoljna da dopusti pet ispitivanja koja su udaljena najmanje 5 mm od ruba uzorka. Također, udaljenost između pojedinačnih ispitivanja trebala bi biti 5 mm. Kod

anizotropnih stijena posebnu pažnju treba posvetiti smjeru u kojem će se obaviti ispitivanje. Predlažu se ispitivanja okomita na anizotropno svojstvo (Alber et al. 2013).

5.3. Postupak

Prije testa, iglu treba pregledati pod mikroskopom. Također, treba provjeriti radi li uređaj pravilno. Uzorak treba pričvrstiti u obod uzimajući u obzir željeni smjer ispitivanja. Površina stijene mora, u najvećoj mogućoj mjeri, biti horizontalna. Iglu treba pažljivo spustiti na površinu stijene kako bi se izbjegla šteta na vrhu igle. Ona mora biti postavljena tako da je okomita na ispitnu površinu. Duljina puta igle mora biti točno 10,0 mm. Ovisno o izvedbi uređaja, trajanje ispitivanja trebalo bi biti 1 s kod CERCHAR tipa ili 10 s kod Westovog tipa. Tijekom ispitivanja treba postojati konstantna interakcija između igle i stijene. U suprotnom, rezultat će biti pogrešan te se test mora ponoviti koristeći novu iglu. Nakon ispitivanja igla se pažljivo podigne s površine stijene te se uklanja. Na površini stijene mora se napraviti najmanje pet ponovljenih testova, svaki put novom ili ponovno oštrenom iglom (Alber et al. 2013).

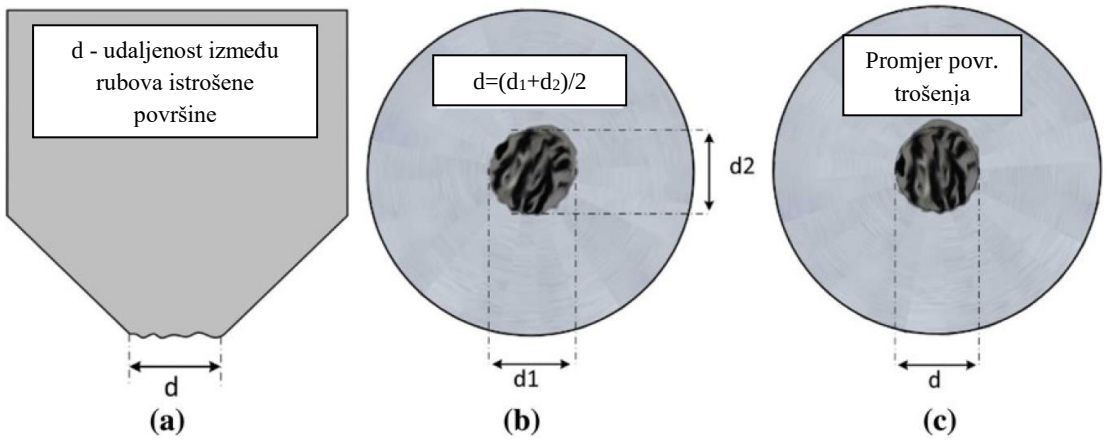
5.4. Mjerenje trošenja igle

Duljina ili promjer istrošene površine *d,* mora se temeljiti na optičkim i digitalnim metodama koje se određuju pomoću mikroskopa s minimalnim uvećanjem od 259. Razlučivost mjerenja mora biti najmanje ± -0,005 mm s očitanjima najbliže do 0,01 mm. Mjerenja mogu biti izvršena bočnim ili gornjim prikazom kao što je prikazano na **slici 5-2.** (Alber et al. 2013).

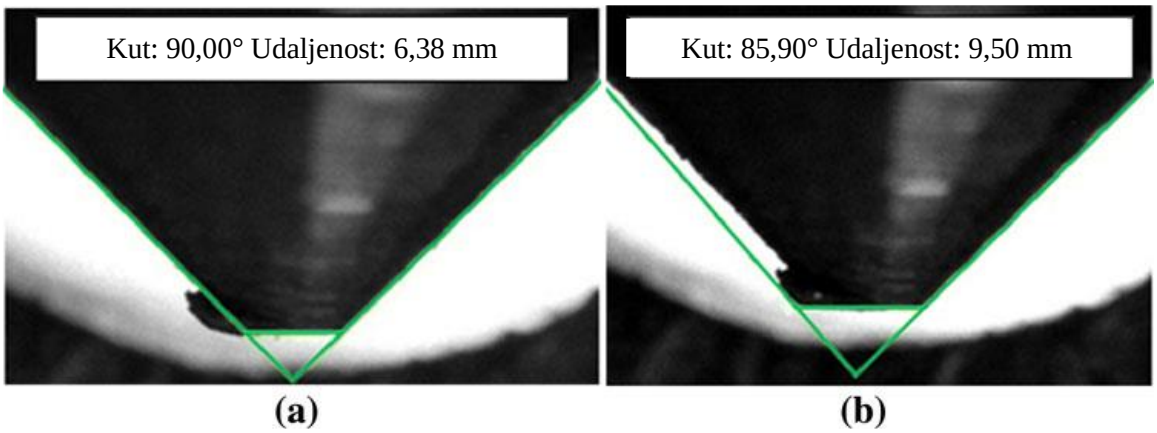
Međutim, za precizno mjerenje preporuča se bočni prikaz igle. Kod ispitivanja svježe površine stijene, naročito kod čvršćih tipova, trošenje može imati asimetrični oblik s krhotinama ili brazdama čelika koji se protežu izvan istrošene površine (kao što je prikazano na **slici 5-3.**). To može utjecati na mjerenja otežavajući određivanje promjera površine trošenja pomoću gornjeg prikaza igle. Određivanje početnih i krajnjih točaka površine trošenja, od ključne je važnosti za točnost ispitivanja te može doprinijeti velikim razlikama u rezultatima između različitih ispitivača i laboratorija (Rostami et al. 2005).

Profil istrošene površine može otežati procjenu mjerenja. Stoga se trebaju koristiti samo mjerenja dobivena iz standardnih površinskih profila (**slika 5-4.** pod (a) i (b)). Ako je došlo do pojave nestandardnog površinskog profila (**slika 5-4.** pod (c)) mjerenje treba ponoviti (Alber et al. 2013).

Kada se koristi metoda bočnog prikaza, trebalo bi obaviti četiri mjerenja tako da se pri svakom mjerenju mikroskop rotira za 90°. Mjerenja trebaju biti paralelna i okomita na smjer kretanja igle. Kod metode gornjeg prikaza, trebalo bi provesti dva mjerenja, ako se koristi optička oprema, kao što je prikazano na **slici 5-2.** pod (b). Kada se koristi digitalna oprema, dostatno će biti samo jedno mjerenje iz gornjeg prikaza kao što je prikazano na **slici 5-2.** pod (c) (Alber et al. 2013).

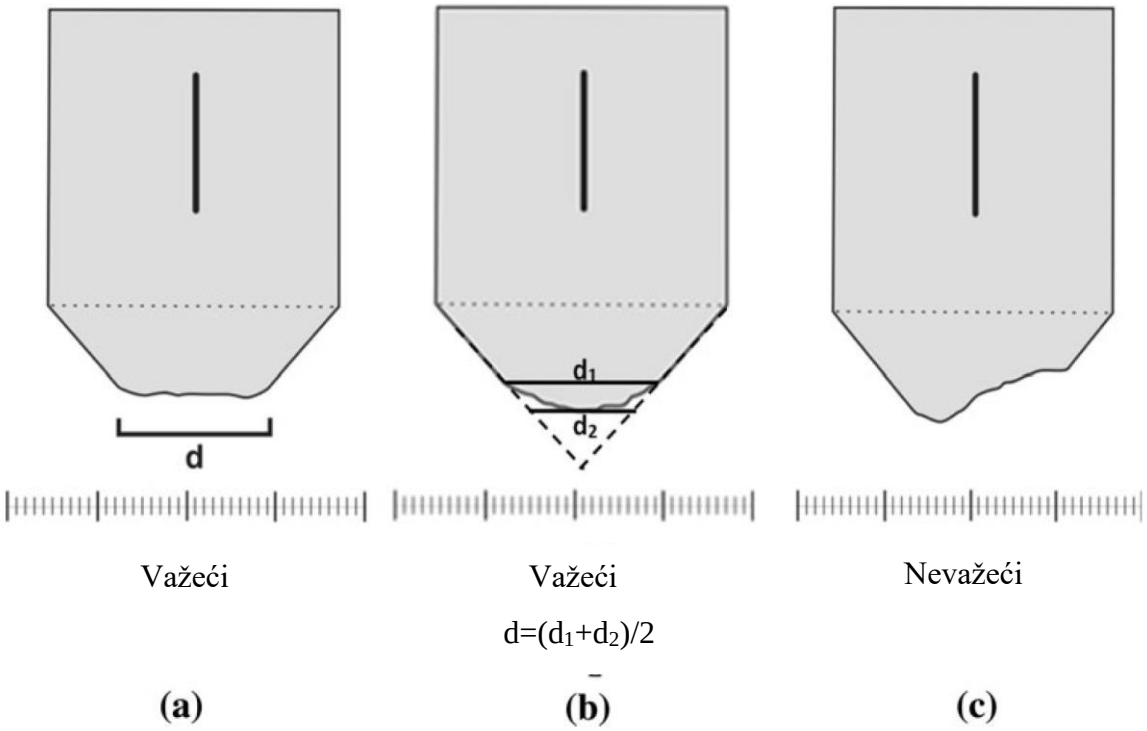


Slika 5-2. Mjerenje s bočnim (a) i s gornjim prikazom (b, c). Metode prikazane u (a) i (b) preporučene su za optička mjerenja, dok je metoda pod (c) preporučena za digitalna mjerenja (Alber et al. 2013).



Slika 5-3. Prikaz mjerenja s bočnim prikazom na: (a) ispravan način i (b) neispravan način (Alber et al. 2013).

Kod mjerenja s metodom gornjeg prikaza može doći do precjenjivanja površine trošenja igle kao što je prikazano na **slici 5-3.** pod (b).



Slika 5-4. Standardni istrošeni profili (a) i (b) i njihova odgovarajuća duljina površine trošenja, (c) primjer nestandardnog profila u čijem slučaju treba odbaciti mjerenje (Alber et al. 2013).

5.5. Izračun

Za svako mjerenje istrošene površine igle *d*, izračunava se CAI prema **formuli (5-1)**:

$$CAI = d \cdot 10, \qquad \textbf{(5-1)}$$

gdje je *d* površina vrha igle izmjerena uz točnost od 0,01 mm (Alber et al. 2013).

Vrijednost CAI aritmetička je sredina od pet ili više ponavljanja ispitivanja zajedno sa standardnom devijacijom (**Tablica 5-1.**).

Tablica 5-1. Primjer CERCHAR testa abrazivnosti s pet ponavljanja i četiri mjerenja istrošene površine bočnim prikazom (Alber et al. 2013).

Br. ispitivanja	1	2	3	4	5
Tvrdoća igle (HRC)	55	55	55	55	55
Mjerenje d_1 (mm)	0,40	0,42	0,42	0,40	0,39
Mjerenje d_2 (mm)	0,41	0,44	0,40	0,41	0,38
Mjerenje d_3 (mm)	0,40	0,42	0,41	0,40	0,39
Mjerenje d_4 (mm)	0,42	0,41	0,41	0,44	0,39
Mjerenje d_M (mm)	0,41	0,42	0,41	0,41	0,39
Aritmetička sredina (mm)					0,41
CERCHAR indeks abrazivnosti (CAI)					4,10
Standardna devijacija					0,11

5.6. Klasifikacija

Klasifikacija abrazivnosti stijene prikazana je u **tablici 5-2.** Ova klasifikacija temelji se na CERCHAR indeksu abrazivnosti (CAI) pri Rockwelloj tvrdoći igle od HRC 55 i hrapavoj površini stijene. Klasifikacija se ne smije koristiti za druge vrijednosti tvrdoće igle (Alber et al. 2013).

Tablica 5-2. Klasifikacija abrazivnosti stijene (Alber et al. 2013).

Aritmetička sredina CAI	Klasifikacija
0,1-0,4	Ekstemno nisko
0,5-0,9	Vrlo nisko
1,0-1,9	nisko
2,0-2,9	Srednje
3,0-3,9	Visoko
4,0-4,9	Vrlo visoko
≥5	Ekstremno visoko

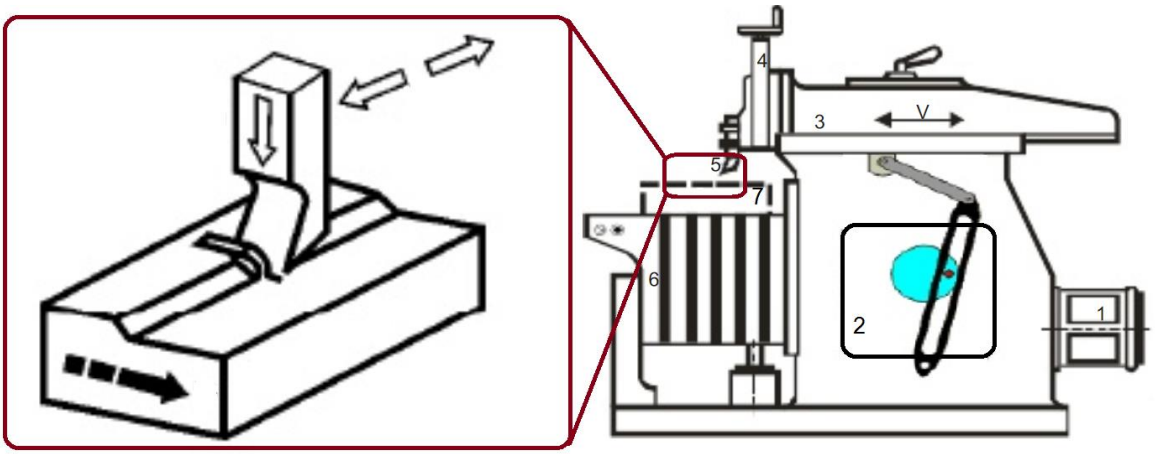
6. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Laboratroijska ispitivanja su provedena sa ciljem određivanja zavisnosti sila rezanja o CERCHAR indeksu abrazivnosti. Za mjerenje sila pri rezanju stijena korišten je uređaj za pravolinijsko rezanje stijena kojim se može simulirati proces rezanja lančane sjekačice. Ispitivanja su provedena pri različitim dubinama reza na pet uzorka različitih fizičko-mehaničkih značajki. Vrijednosti CERCHAR indeks abrazivnosti uzoraka nisu određivani u sklopu ovoga rada već su preuzete iz laboratorijskih ispitivanja provedenih u sklopu završnog rada Domagoja Grgurića (Grgurić 2017). Za određivanje CERCHAR indeksa abrazivnosti korišten je Westov modificirani dizajn uređaja.

6.1. Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena

Uređaj za linearno rezanje stijena je zapravo modificirana blanjalica za metal. Blanjanje (eng. *shaping*) je postupak obrade odvajanjem čestica ravnih površina obratka, a izvodi se na alatnim strojevima kod kojih je glavno gibanje pravocrtno (Slade 2012). Nož određene geometrije predstavlja alat za blanjanje, koji prilikom rezanja obavlja pravocrtno glavno gibanje. Alat se vraća u početni položaj po istoj putanji. Nakon povratka slijedi posmak koji je okomit na glavno gibanje i kod kratkohodnih blanjalica ga obavlja radni stol. Spuštanjem ili podizanjem noža u držaču alata određuje se dubina reza. **Slika 6-1.** sadrži shematski prikaz kratkohodne blanjalice za metal i prikaz osnovnih gibanja alata i obratka pri kratkohodnom blanjanju. Princip rada blanjalice je slijedeći: rotacija pogonskog elektromotora prenosi se pomoću prijenosnika do mehanizma za pretvaranje rotacijskog u pravocrtno gibanje. Pravocrtno gibanje prenosi se na konzolu na kojoj se nalazi nosač alata na kojem je učvršćen rezni alat. Time je omogućeno glavno pravocrtno gibanje. Na radnom stolu, koji se giba pomoću mehanizma posmaka, nalazi se predmet obrade (Nedić i Lazić 2007). Glavni djelovi blanjalice za metal:

1. pogonski elektromotor,
2. mehanizam za pretvaranje rotacijskog u pravocrtno gibanje,
3. konzola,
4. nosač alata,
5. rezni alat,
6. radni stol,
7. predmet obrade (Korman 2014).



Slika 6-1. Shema kratkohodne blanjalice za metal (Nedić i Lazić, 2007).

Kod uređaja za linearno rezanje, rezna pločica od volfram-karbida zamjenjuje nož za obradu metala, a na nosaču alata postavlja se mjerni pretvornik sile koji se povezuje s mjernim sustavom na računalo. Pretvornik sile omogućuje bilježenje jedne ili više komponenti sile rezanja. Na **slici 6-2.** prikazan je uređaj za pravolinijsko rezanje stijena sa troosnim mjernim pretvornikom sile i mjerni sustav (Korman 2014).



Slika 6-2. Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena i mjerni sustav (Korman 2014).

6.1.1. Mjerni pretvornik sile

Osnovni zahtjevi koji se postavljaju pri konstrukciji reznog alata su mjerenje sila prilikom rezanja stijena i razumijevanje mehanizma rezanja. Za razumijevanje mehanizma rezanja mogu poslužiti analitički modeli za proračun sila na reznom alatu, međutim nisu dovoljno precizni u usporedbi s eksperimentalnim ispitivanjima. Razlika u vrijednostima sile rezanja, dobivene analitičkim i eksperimentalnim ispitivanjima, posljedica je velikog broj čimbenika koji utječu na proces rezanja i činjenice da se intenzitet sile mijenja u vremenu rezanja (Yaldız 2005). Budući da je prilikom rezanja mjerenje sila izrazito važno, razvijeni su različiti tipovi mjernih pretvornika sile. Većinom su razvijeni u svrhu mjerenja sila pri obradi metala, no moguća je primjena i u području rezanja stijena, naravno uz određene modifikacije. Budući da se sile na reznom alatu ne mogu se mjeriti izravno, mjere se samo deformacije materijala od kojeg je izrađen, kao posljedica djelovanja rezultantne sile. Sile se mogu mjeriti uslijed deformacije ili pomaka mjernog elementa, ovisno o izvedbi pretvornika sile. Dva su načina mjerenja deformacije mjernog elementa: pomoću elektrootpornih traka ili piezoelektričnih senzora. Mjerenja pomoću piezoelektričnih senzora rade na principu piezoelektričnog efekta pri kojem dolazi do stvaranja električnog naboja (Youssef i El-Hofy 2008). Mjerenje elektrootpornim trakama temelji se na osnovnom svojstvu metalnih vodiča, koje glasi da dolazi do relativnih promjena duljine uslijed mehaničkih deformacija (rastezanja kod vlačnog ili skupljanja kod tlačnog djelovanja), a time i do površine poprečnog presjeka, što za posljedicu rezultira promjenom otpora takvog vodiča (Kujundžić 2002).

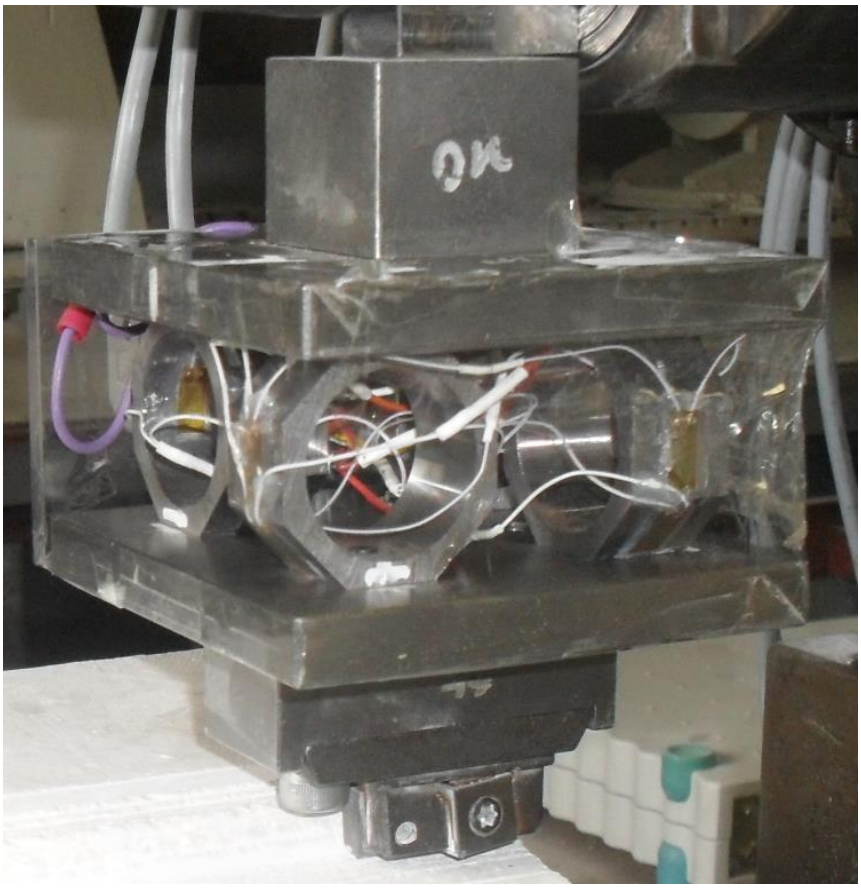
6.1.2. Konstrukcija mjernog pretvornika sile

Budući da trenutno ne postoji mjerni pretvornik sile komercijalne izvedbe koji bi odgovarao specifičnostima ovih ispitivanja, za potrebe ispitivanja korištern je troosni pretvornik sile s elektrootpornim trakama koji je konstruiran za potrebe doktorskog rada Tomislava Kormana. Oblik i dimenzije nosača reznih pločica koji se koriste kod lančanih sjekačica bili su glavni razlog za izradu pretvornika sile, stoga su za izradu korišteni nosači lančane sjekačice i rezne pločice u prirodnoj veličini (Korman 2014).

Osjetljivost, točnost i pouzdanost ovise o konstrukciji pretvornika sile. Dva zahtjeva koji se postavljaju pri odabiru materijala i dimenzija mjernih elementa su krutost i osjetljivost. To

nije jednostavno jer krutost mora biti dovoljno velika kako bi mjerni elementi podnijeli dinamička naprezanja koja nastaju uslijed rezanja, no ne smije biti prevelika s obzirom na to da osjetljivost pretvornika sile upravo ovisi o deformaciji elastičnog elementa u mjernom pretvorniku (Korman 2014).

Mjerni pretvornik sile (**slika 6-3.**) sastoji se od krutih i elastičnih elemenata. U elastične elemente pretvornika sile spadaju osmerokutni prsteni, koji su učvršćeni vijcima između dvije krute ploče. Sila koja djeluje na prsten mjeri se indirektno mjerenjem deformacija pomoću elektrootpornih mjernih traka na prstenu (Korman 2014).



Slika 6-3. Konstrukcija troosnog mjernog pretvornika sile (Korman 2014).

Za mjerenje sila korišten je uređaj Hbm Spider 8 sa četiri kanala koji komuniciraju s računalom preko paralelnog sučelja. Programsko sučelje Catman, instalirano na računalu, omogućava upravljanje uređajem Hbm Spider 8 te prikaz i bilježenje podataka, kao i kompletan nadzor nad uređajem tijekom ispitivanja. Također, program Catman omogućuje vizualno praćenje tijeka ispitivanja, tj. promjenu sile duž reza, na monitoru računala. Mjerni sustav prikazan je na **slici 6-4.** (Korman 2014).



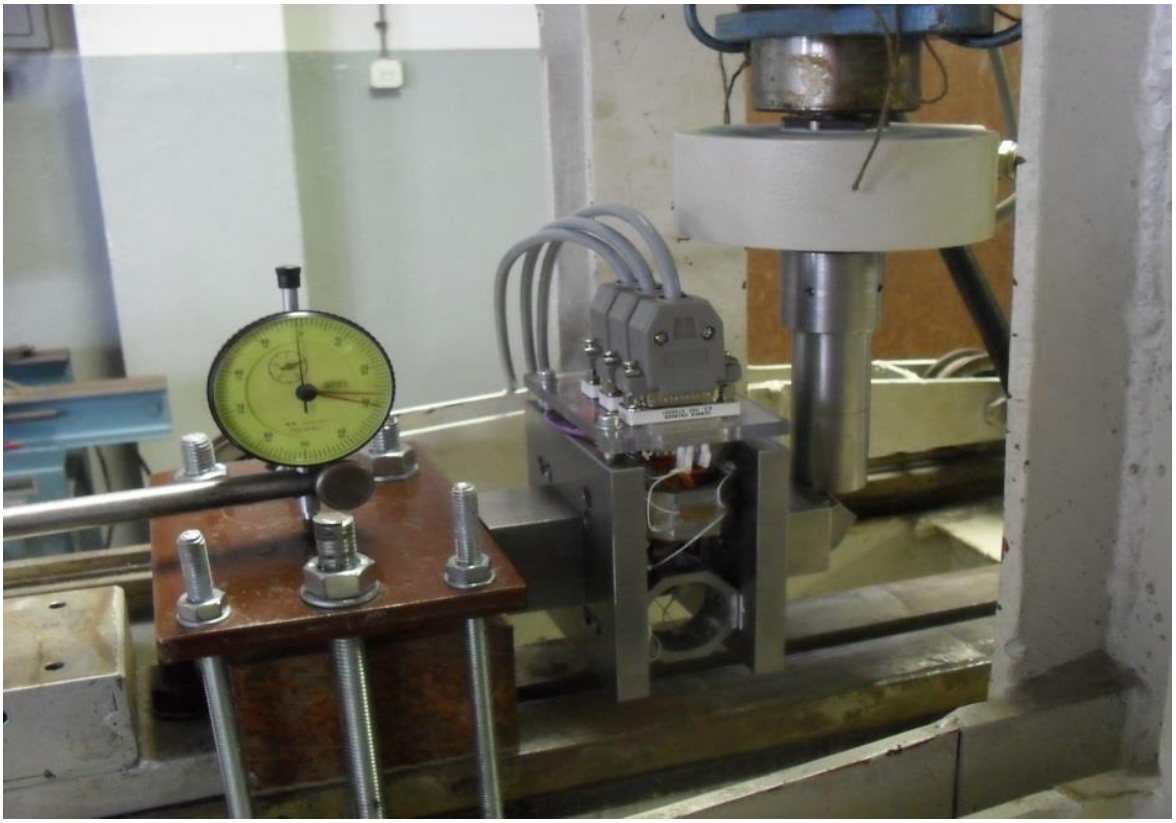
Slika 6-4. Mjerni sustav za ispitivanje rezivosti stijenske mase (Korman 2014).

6.1.3. Umjeravanje pretvornika sile

Potrebno statičko umjeravanje provedeno je kako bi se odredila veza između sile koja se nanosi na mjerni pretvornik sile i električnog signala na izlazu pretvornika. Umjeravanje je provedeno za sve tri osi pretvornika sile F_c, F_t, i F_f, pri čemu se sila kontinuirano nanosila od 0 N do 2000 N. Umjeravanje pretvornika sile provedeno je na laboratorijskom uređaju za ispitivanje skošenja krajeva osovine valjaka transportnih traka opterećenih na savijanje. Kako bi se uređaj mogao upotrijebiti za umjeravanje, bilo je potrebno izraditi nekoliko jednostavnih modifikacija, prvenstveno u pogledu izrade prihvata za mjerni pretvornik sile. Tlačna sila postiže se pomoću hidrauličnog cilindra i ručne hidraulične pumpe. Hidraulični cilindar sastoji se od vanjske cijevi cilindra, klipa s klipnjačom i opruga pomoću kojih se klip vraća u početni položaj, a učvršćen je na osnovnu konstrukciju uređaja okomito na horizontalnu ravninu postolja uređaja. Hidraulična pumpa ostvaruje gibanje klipa preko koje je moguće regulirati brzinu i intenzitet nanošenja sile (Kujundžić 2002).

Za vrijeme umjeravanja prirast sile bio je kontinuiran, a intenzitet sile je registriran na računalu pomoću umjerenog pretvornika sile i uređaja za prikupljanje podataka Spider8. Za umjeravanje korišten je mjerni pretvornik sile proizvođača HBM model Z4A, klase točnosti 00 i mjernog područja 0 N do 20 kN. Mjerene su promjene izlaznog napona na sva tri kanala neovisno o osi na koju se nanosi sila prilikom umjeravanja. Razlog tome je poprečna osjetljivost pretvornika sile. Inače, kod idealnih višeosnih pretvornika sile ne bi trebalo dolaziti do promjene izlaznog signala kod preostalih kanala kada dođe do promjene intenziteta sile u jednoj osi koja uzrokuje promjenu izlaznog napona. No, neovisno o konstrukciji pretvornika sile uvijek postoji određena poprečna osjetljivost. Veličina

poprečne osjetljivosti ovisi o tome koliko su mjerne trake precizno postavljane i međusobnom položaju prstena. Na **slici 6-5.** prikazan je uređaj za umjeravanje mjernog pretvornika sile. Iako je mjerni pretvornik sile dimenzioniran za sile veće od 2000 N, umjeravanje nije provedeno iznad navedenih vrijednosti s obzirom na to da je pri većim vrijednostima sila zamijećen određen pomak u točki učvršćenja na uređaju za umjeravanje. Tijekom umjeravanja na mjestu učvršćenja pretvornika sile postavljena je mikroura pomoću koje je kontroliran pomak u točki učvršćenja (Korman 2014).

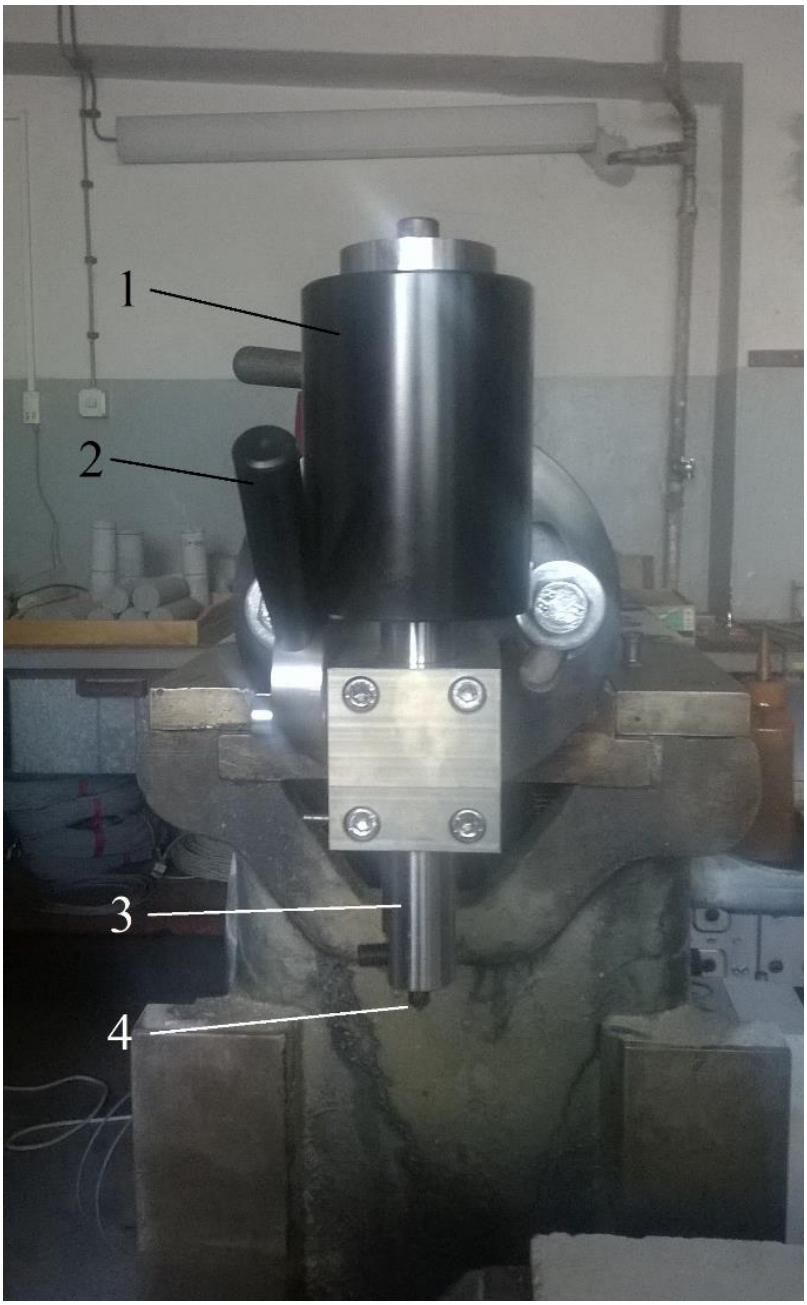


Slika 6-5. Uređaj za umjeravanje pretvornika sile (Korman 2014).

6.2. Westov modificirani dizajn uređaja

Laboratorijska ispitivanja CERCHAR indeksa abrazivnosti provedena su u sklopu završnog rada Domagoja Grgurića (Grgurić 2017). Za određivanje *CAI* korišten je Westov tip uređaja prikazan na **slici 6-6.** Osnovni djelovi uređaja:

1. uteg od 70 N,
2. ručica za spuštanje mjerne igle na uzorak stijene,
3. držač igle,
4. igla.

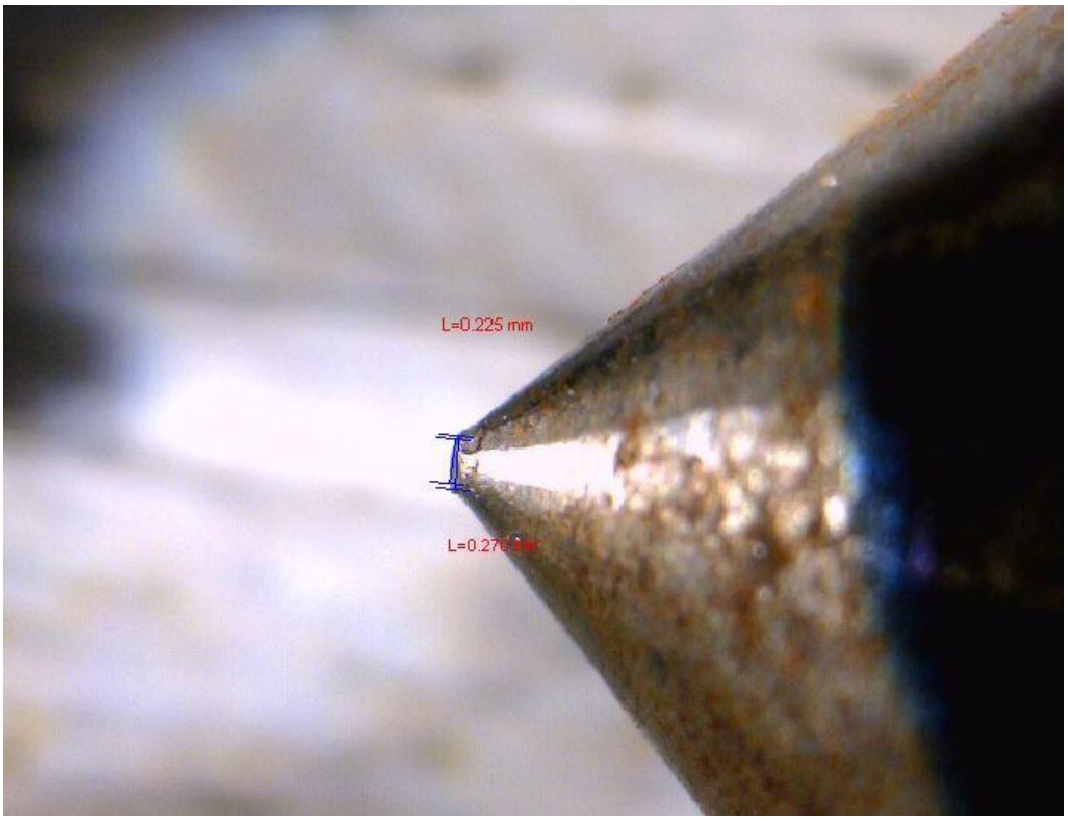


Slika 6-6. Westov modificirani dizajn uređaja za ispitivanje indeksa abrazivnosti (Grgurić 2017).

U svrhu određivanja promjera istrošene površine igle korišten je digitalni mikroskop Dino - Lite Pro 2, serije AM4000 (**slika 6-7.**). Rezolucija mikroskopa je 1280x1024, odnosno 1.3 megapiksela. Maksimalno povećanje slike iznosi 200x. Na računalu je korišten software Dino - Capture koji ima mogućnosti mjerenja udaljenosti između dvije točke. Mjerenje se vrši točnošću od 0,01 mm, a za pomoć pri određivanju zatupljenja iglice u software-u se koristi alat Magnifier (povećalo). Pomoću navedenog uređaja prikazani su vrhovi istrošenih igli te su izmjerene površine trošenja bočnim prikazom. Primjer jednog prikaza mjerne igle nalazi se na **slici 6-8.** (Grgurić 2017).



Slika 6-7. Digitalni mikroskop Dino - Lite Pro 2 (Grgurić 2017).



Slika 6-8. Uvećani bočni prikaz načina mjerenja promjera površine trošenja mjerne igle (Grgurić 2017).

6.3. Opis uzoraka

Za potrebe ispitivanja odabrano je pet uzoraka koji se međusobno razlikuju po svojim fizičko-mehaničkim svojstvima (**Tablica 6-1.**). Uzorci su prikupljeni na eksploatacijskim poljima: Špica, Vukov dol, Kraljev vrh, Bremsberg i Lasinja. Na **slici 6-9.** prikazano je svih pet uzoraka na kojima su obavljena ispitivanja.



Slika 6-9. Uzorci stijena na kojima su obavljena ispitivanja.

Kamenolom Špica smješten je na sjevernim obroncima Kalnika, u Varaždinskoj županiji, pokraj Ljubeščice. Navedeni kamenolom ležište je vapnenca trijaske starosti, a prevladavaju stromatolitni vapnenci, sitnozrnati vapnenci i dolomitizirani vapnenci. Kamenolom Vukov dol, nalazi se otprilike 3 km sjeverno od mjesta Kašina. U ležištu se razlikuje nekoliko vrsta metamorfnih stijena: mramor, brečasti i kataklazirani mramor, kvarc-kalcitni filit, kataklazirani kvarc-kalcitni filit i argilošist. Ležište dijabaza, Bremzberg-Točak, nalazi se oko 4 km jugozapadno od Orahovice. Magmatskog je postanka, nastalo kao intruzivno tijelo oblika sila utisnuto u metaklastite. Kamenolom Kraljev vrh (Jelenje vode) nalazi se na Medvednici. U ležištu se eksploatira magmatska stijena dijabaz, koja se zbog dobrih fizičko-mehaničkih znajački koristi primarno u proizvodnji asfaltnih masa i habajućih slojeva u cestogradnji. Kamenolom Lasinja (Kamešnica) nalazi se kod Karlovca. U ležištu se eksploatira bazična žična stijena spilit.

Tablica 6-1. Fizičko-mehanička svojstva uzoraka (Korman 2008).

Uzorak	Vrsta stijene	Čvrstoća ispitana na uzorcima u obliku kocke $d = 5$	Tlačna čvrstoća $h/d = 2,5$, σ_t (MPa)	Vlačna čvrstoća, σ_v (MPa)	Odskok Schmidtovog čekića, d_s (ISRM)	Lomna žilavost, σ_L	Specifična energija drobljenja, Sd (kJ/kg)
Bremsberg	Dijabaz	219,1	189,9	13,11	60	4,12	3,51
Kraljev vrh	Dijabaz	205,43	178,06	12,83	63	4,14	2,56
Lasinja	Spilit	206	178,6	11,36	62	3,24	3,45
Špica	Vapnenac	141	122,2	10,62	53	3,02	1,65
Vukov dol	Mramor	172	149,1	5,77	54	2,14	3,09

6.4. Metode ispitivanja

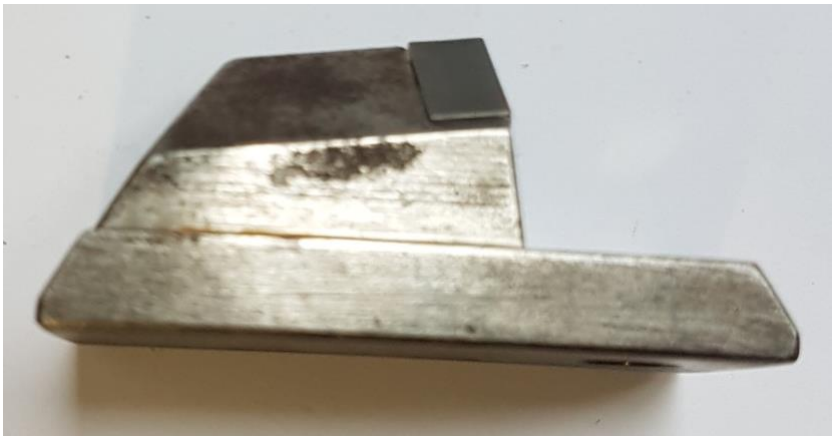
Provedena laboratorijska ispitivanja podijeljena su u dva dijela. Uključuju ispitivanja na pet uzoraka, navedenih u **tablici 6-1.**, u svrhu određivanja horizontalne, vertikalne i bočne komponente sile rezanja pri različitim dubinama reza te ispitivanja u svrhu određivanja CERCHAR indeksa abrazivnosti na istim uzorcima provedenih u sklopu završnog rada Domagoja Grgurića (Grgurić 2017).

6.4.1. Mjerenje sila na reznom alatu

Ispitivanja su provedena na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena na uzorcima kojima je prethodno određen CERCHAR indeks abrazivnosti. Uzorci stijene valjkastog oblika, obrađeni su kako bi mogli biti smješteni u nosač za prihvat uzorka. Ispiljeni su sa četiri strane kako bi se dobile četiri ravne površine od kojih tri služe kako bi se osigurao čvršći prihvat, dok je četvrta, ona na kojoj se obavlja ispitivanje, slobodna. Prilikom svakog ispitivanja mjerena je horizontalna, vertikalna i bočna komponenta sile za različite dubine reza (0,2, 0,4 i 0,6 mm). Za svaku dubinu reza mjerenja su ponovljena sedam puta, a između različitih dubina reza uzorak je ponovno ispiljen kako bi se dobila što povoljnija površina za novo ispitivanje pri različitoj dubini reza. Tijekom svih laboratorijskih ispitivanja brzina rezanja bila je konstantna i približno jednaka 0,4 m/s. Vrijednosti pojedinačnih komponenti sile izmjerene su pomoću troosnog mjernog pretvornika sile. Izlazni signal pretvornika bilježen je brzinom od 4800 uzoraka u sekundi. Vrijednosti izlaznog signala se pohranjuju u datoteku pri čemu je veličina električnog signala izražena kao omjer napona u mV/V. U programu Microsoft Office Excel programirana je rutina koja na temelju kompenzacijske matrice vrijednosti električnog signala transformira u

veličine sile izražene u njutnima. Pored navedene rutine, u programu se proračunavaju prosječne i maksimalne vrijednosti sile.

Ispitivanja su provedena za negativni i pozitivni napadni kut rezne pločice. Rez za negativni napadni kut izrađen je pomoću nosača rezne pločice lančane sjekačice Pellegrini CH60, oznake PM0 (**slika 6-10.**). Geometrijske veličine rezne pločice za negativni napadni kut su sljedeće: napadni kut α = -8,6°, bočni kut δ = 45,0°, bočni napadni kut γ = 0,0°. Rez za pozitivni napadni kut izrađen je pomoću nosača rezne pločice proizvođača Korfmann (**slika 6-11.**). Geometrijske veličine rezne pločice za pozitivni napadni kut su sljedeće: napadni kut α = 5,1°, bočni kut δ = 45°, bočni napadni kut γ = 0,0°.



Slika 6-10. Nosač rezne pločice lančane sjekačice Pellegrini CH60.



Slika 6-11. Nosač rezne pločice proizvođača Korfmann.

6.4.2. Metoda ispitivanja CERCHAR indeksa abrazivnosti

Za iste uzorke na kojima je provedeno ispitivanje sila rezanja određen je CERCHAR indeks abrazivnosti. Ispitivanje je provedeno na modificiranom Westovom tipu uređaja za određivanje indeksa abrazivnosti u sklopu završnog rada Domagoja Grgurića (Grgurić 2017). Za svaki uzorak ispitivanje je ponovljeno pet puta, odnosno s pet ispitnih igli. Mjerenja su međusobno bila udaljena minimalno 5 mm. Nakon što je ispitano svih pet igli pristupilo se mjerenju promjera istrošenog vrha tako da se sve četiri strane igle (međusobno pod 90°) snime pomoću digitalnog mikroskopa. Mjerenje se vršilo s točnošću od 0,01 mm, a za pomoć pri određivanju zatupljenja igle u software-u se koristio alat Magnifier (povećalo). Obrada podataka sastojala se od određivanja aritmetičke sredine promjera istrošenog vrha igle sa sve, kao što je prikazano na **slici 5-4.** pod (b), sa sve četiri strane. Nakon toga je određena aritmetička sredina za sve četiri strane, a na kraju i svih pet ispitivanja. Za dobivenu srednju vrijednost izračunata je korekcija zbog ispitivanja na piljenoj površini.

Korekcija zbog ispitivanja na piljenoj površini se računa po **formuli (6-1)**:

$$d = 1{,}14 \cdot d_s, \qquad \textbf{(6-1)}$$

gdje je: d - korekcija promjera istrošene igle ispitivanog na piljenoj površini uzorka (mm), d_s - srednja vrijednost promjera istrošene igle (mm) (Grgurić 2017).

CERCHAR indeks abrazivnosti računa se množenjem dobivene korekcije promjera sa 10.

6.5. Analiza rezultata

6.5.1. Analiza rezultata sila rezanja

Rezultati provedenih laboratorijskih ispitivanja sila rezanja za negativni napadni kut, te za različite dubine reza prikazani su u **tablici 6-2.** U tablici su prikazane mjerene horizontalne, bočne i vertikalne komponente sile, tj. njihove prosječne i maksimalne vrijednosti.

Tablica 6-2. Rezultati ispitivanja sila rezanja za negativni napadni kut.

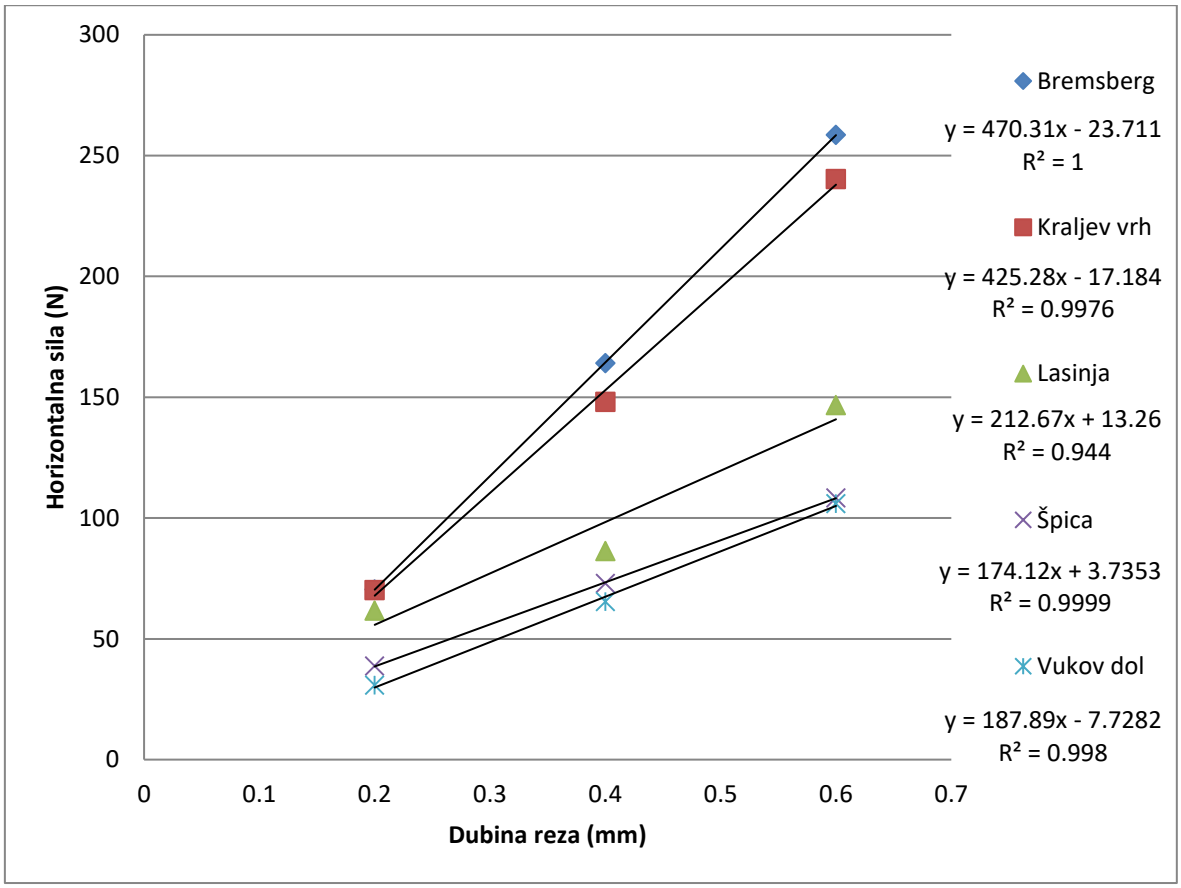
Uzorak	Dubina reza (mm)	Negativni kut					
		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
		Horizontalna (N)	Bočna (N)	Vertikalna (N)	Horizontalna (N)	Bočna (N)	Vertikalna (N)
Bremsberg	0,2	70,48	11,33	143,14	293,91	94,18	433,77
	0,4	164,16	31,53	274,56	715,93	160,28	653,98
	0,6	258,60	52,82	383,60	1151,26	198,99	797,61
Kraljev vrh	0,2	70,26	7,29	143,30	271,04	75,76	280,36
	0,4	148,15	23,08	265,64	605,53	140,94	516,19
	0,6	240,38	34,33	337,20	1188,67	170,06	682,16
Lasinja	0,2	61,78	13,59	160,37	209,68	81,87	337,31
	0,4	86,36	10,32	131,92	371,38	93,97	348,53
	0,6	146,85	21,28	198,98	684,44	135,46	495,26
Špica	0,2	38,77	4,72	60,66	147,50	37,68	117,68
	0,4	72,95	12,12	95,58	290,10	79,36	198,35
	0,6	108,42	20,08	128,03	485,03	103,21	284,37
Vukov dol	0,2	30,82	4,34	52,93	112,58	37,89	107,57
	0,4	65,50	14,33	90,83	262,50	61,19	186,25
	0,6	105,97	22,88	123,08	434,90	96,20	270,14

Za pozitivni napadni kut, rezultati prosječnih i maksimalnih komponenti sile nalaze se u **tablici 6-3.**

Tablica 6-3. Rezultati ispitivanja sila rezanja za pozitivni napadni kut.

Uzorak	Dubina reza (mm)	Pozitivni kut					
		Prosječne vrijednosti sila			Maksimalne vrijednosti sila		
		Horizontalna (N)	Bočna (N)	Vertikalna (N)	Horizontalna (N)	Bočna (N)	Vertikalna (N)
Bremsberg	0,2	50,49	42,56	270,99	279,25	160,94	635,71
	0,4	83,81	71,08	424,41	430,68	213,00	854,26
	0,6	110,84	95,39	526,68	539,68	290,39	1058,29
Kraljev vrh	0,2	42,41	56,22	382,47	195,57	144,52	623,57
	0,4	63,34	91,55	588,69	316,82	214,95	1005,84
	0,6	133,58	167,86	903,52	666,44	362,51	1600,18
Lasinja	0,2	61,03	58,33	372,50	309,46	163,86	750,13
	0,4	81,21	81,93	498,49	417,80	217,56	910,13
	0,6	119,98	126,56	687,09	624,90	305,52	1358,29
Špica	0,2	25,85	33,21	193,64	158,77	90,47	317,32
	0,4	53,05	66,29	306,34	283,12	145,31	502,26
	0,6	74,86	93,16	383,77	373,35	210,74	635,60
Vukov dol	0,2	26,82	29,16	187,56	147,41	89,01	317,99
	0,4	46,82	51,31	279,66	231,54	124,86	432,78
	0,6	64,13	71,73	351,93	308,23	159,77	557,18

Iz **tablica 6-2.** i **6-3.** je vidljivo da se povećanjem dubine reza povećavaju i komponente sile, kako one prosječne tako i maksimalne. Na **slici 6-12.** prikazano je povećanje horizontalne sile uslijed povećanja dubine reza za negativni napadni kut za sve uzorke. Vidljivo je kako je krivulja regresije sile linearna.



Slika 6-12. Povećanje horizontalne komponente sile uslijed povećanja dubine reza.

6.5.2. Analiza rezultata CERCHAR indeksa abrazivnosti

Rezultati provedenih laboratorijskih ispitivanja za određivanje CERCHAR indeksa abrazivnosti u sklopu završnog rada Domagoja Grgurića prikazani su u **tablici 6-4.** Po tim rezultatima, prema klasifikaciji u **tablici 5-2.**, vidljivo je da mramor iz kamenoloma Vukov dol i vapnenac iz kamenoloma Špica spadaju u nisko abrazivne stijene, dijabaz iz kamenoloma Kraljev vrh spada u srednje abrazivne stijene, dok spilit iz kamenoloma Lasinja i dijabaz iz kamenoloma Bremsberg spadaju u visoko abrazivne stijene (Grgurić 2017).

Tablica 6-4. Rezultati ispitivanja CERCHAR indeksa abrazivnosti (Grgurić 2017).

Uzorak	Vrsta stijene	CERCHAR indeks abrazivnosti, *CAI*
Bremsberg	Dijabaz	3,35
Kraljev vrh	Dijabaz	2,53
Lasinja	Spilit	3,46
Špica	Vapnenac	1,42
Vukov dol	Mramor	1,45

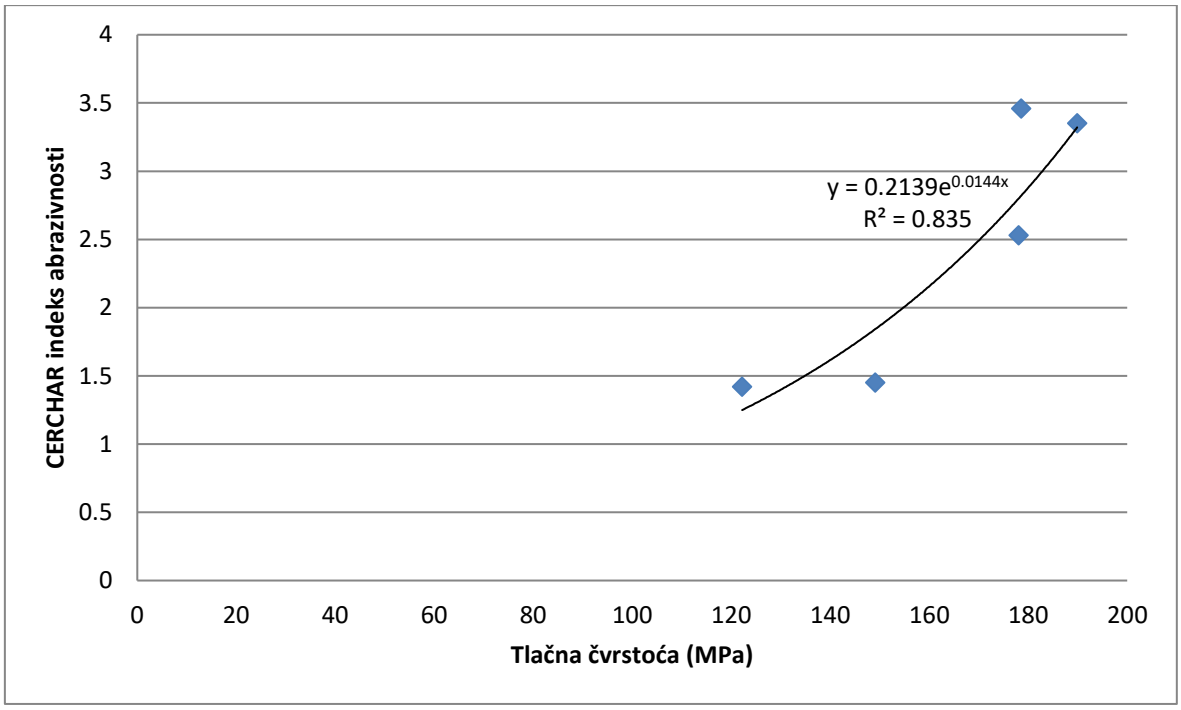
Glavni problemi kod ispitivanja javljali su se zbog nedorečenosti CERCHAR metode. Naime, u metodi nisu predviđena dozvoljena odstupanja sile kojom igla djeluje na uzorak stijene. Uteg kojim se djelovalo na iglu tijekom ispitivanja ostvario je silu od 69,85 N, dok je propisana sila 70 N. Isto tako, rezultati bi bili precizniji da je digitalni mikroskop imao veću rezoluciju, a njegov software mogućnost većeg povećanja slike te preciznijeg očitanja udaljenosti između dvije točke (Grgurić 2017).

Također, treba napomenuti kako uzorak spilita iz kamenoloma Lasinja ima vrlo veliku standardnu devijaciju CERCHAR indeksa abrazivnosti. On se kreće od 2,8 do 3,7, te bi zbog toga trebalo napraviti veći broj ispitivanja kako bi se *CAI* preciznije izmjerio.

6.5.3. Utjecaj fizičko-mehaničkih svojstava na CERCHAR indeks abrazivnosti

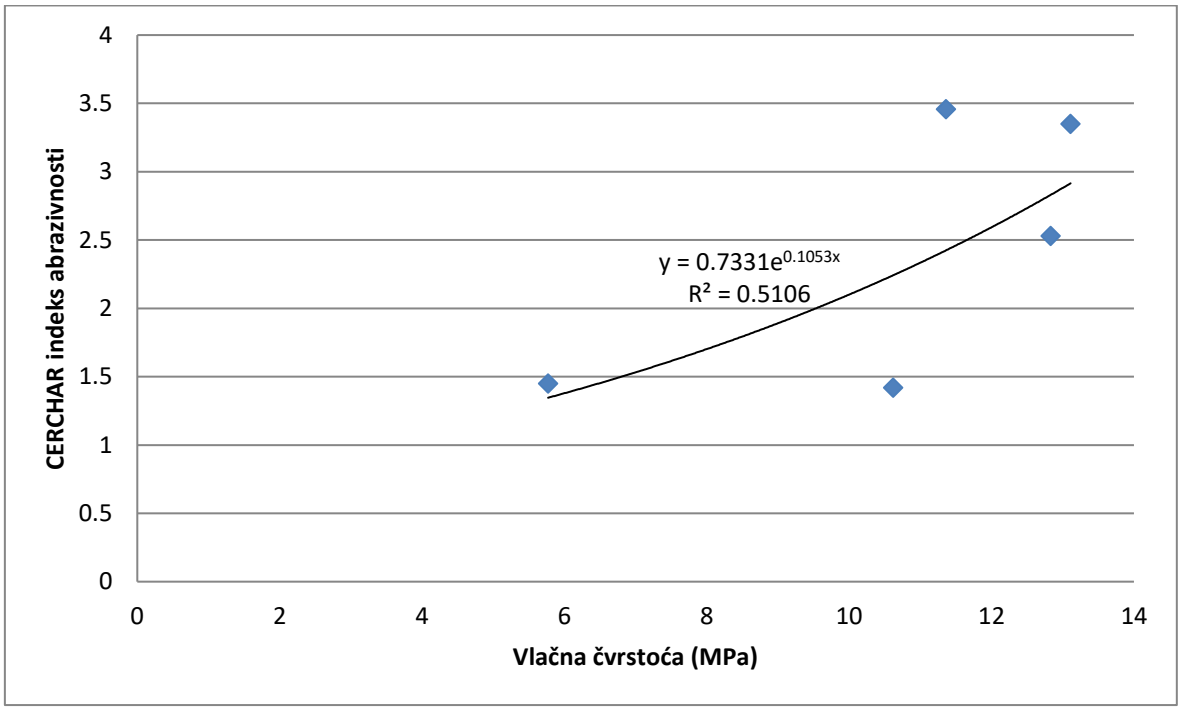
Prilikom analize utjecaja fizičko-mehaničkih svojstava, navedenih u **tablici 6-1.**, na CERCHAR indeks abrazivnosti uzeta su u obzir četiri sljedeća svojstva: tlačna i vlačna čvrstoća, tvrdoća odskokom Schmidtovog čekića i lomna žilavost.

Na **slici 6-13.** prikazani su indeksi abrazivnosti za sve uzorke u zavisnosti o tlačnoj čvrstoći. Po krivulji regresije ($CAI = 0{,}2139e^{0{,}0144\sigma t}$) vidljivo je da *CAI* raste eksponencijalno sa povećanjem tlačne čvrstoće. Također, prema koeficijentu korelacije R^2 koji iznosi 0,835, može se zaključiti kako postoji značajna korelacija između *CAI* i tlačne čvrstoće, jer njegova vrijednost premašuje vrijednost od 0,75.

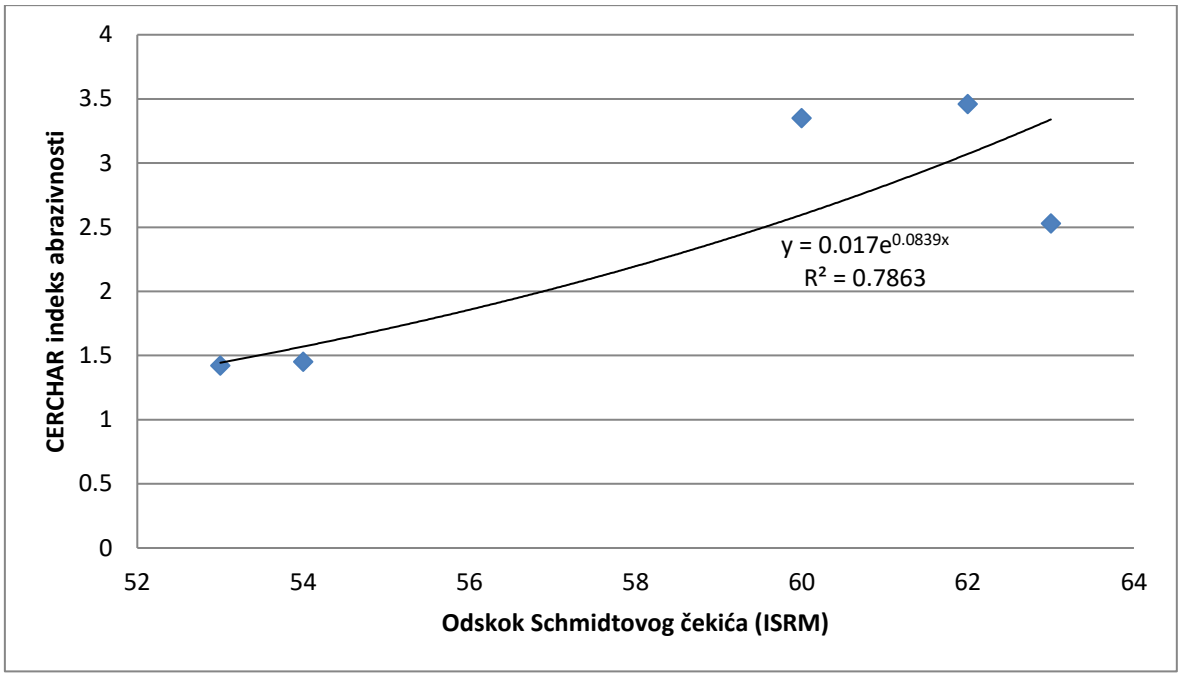


Slika 6-13. Utjecaj tlačne čvrstoće na *CAI*.

Na **slici 7-14.** prikazan je dijagram zavisnosti *CAI* o vlačnoj čvrstoći. Krivulja regresije ($CAI = 0{,}7331e^{0{,}1053\sigma v}$) također je eksponencijalna, ali je koeficijent korelacije R^2 puno manji i iznosi 0,5106. Iz dijagrama je moguće zaključiti da *CAI* relativno malo ovisi o vlačnoj čvrstoći.

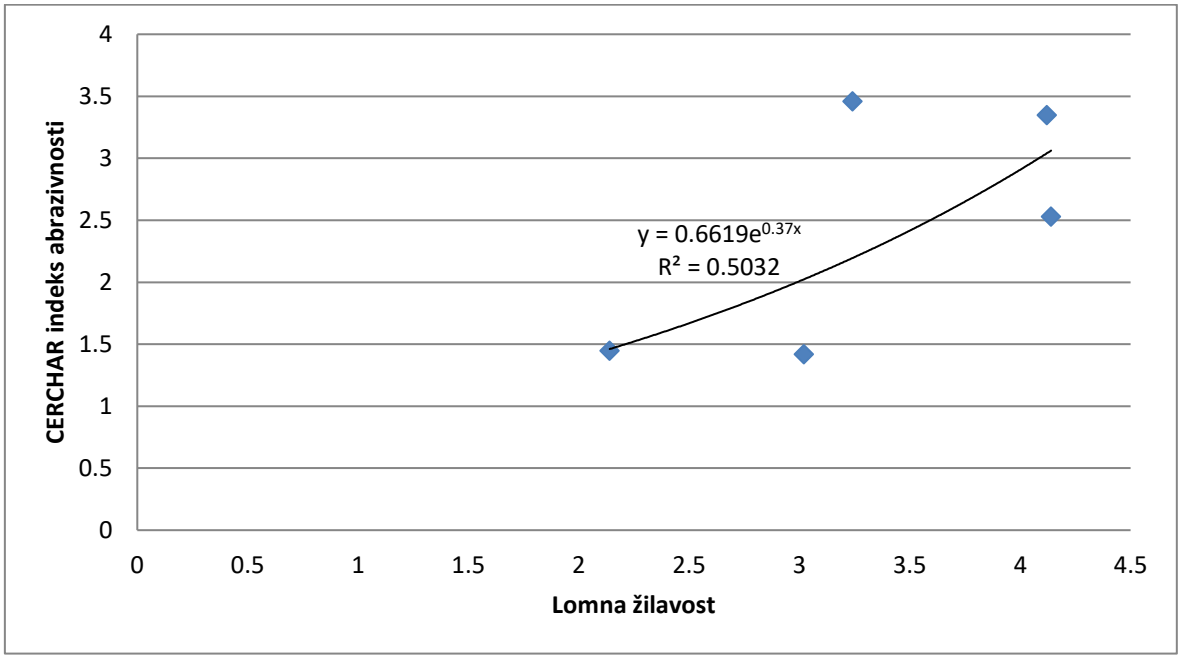


Slika 6-14. Utjecaj vlačne čvrstoće na *CAI*.



Slika 6-15. Utjecaj odskoka Schmidtovog čekića (tvrdoće) na *CAI*.

Na **slici 6-15.** prikazan je utjecaj tvrdoće mjerene Schmidtovim čekićem na *CAI*. Korelacija ova dva svojstva veća je od korelacije *CAI* i vlačne čvrstoće te se može zaključiti da *CAI* više ovisi o tvrdoći nego o vlačnoj čvrstoći. Koeficijent korelacije R^2 od 0,7863 (> 0,75) ukazuje na značajnu zavisnost *CAI* o tvrdoći te raste eksponencijalno prema krivulji regresije, $CAI = 0{,}017e^{0{,}0839ds}$.



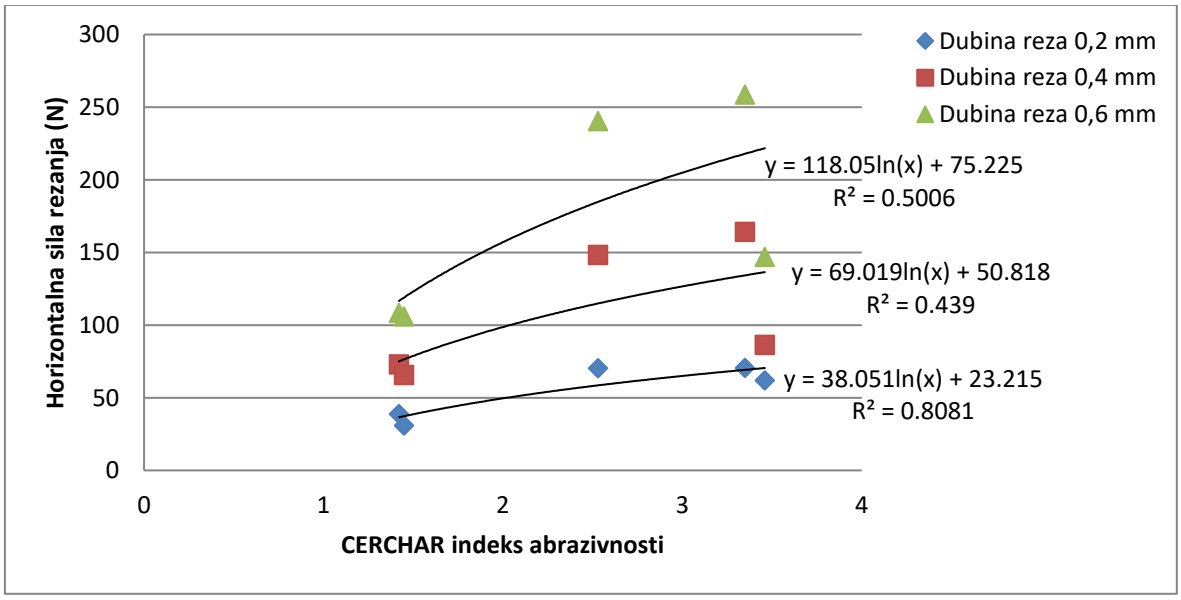
Slika 6-16. Utjecaj lomne žilavosti na *CAI*.

Graf na **slici 6-16.** prikazuje promjenu *CAI* obzirom na lomnu žilavost. Kako je koeficijent korelacije R^2 dosta nizak (0,5032) može se zaključiti kako *CAI* ne zavisi o lomnoj žilavosti koliko zavisi o nekim drugim fizičko-mehaničkim svojstvima (tlačna čvrstoća, tvrdoća). Krivulja regresije, $CAI = 0{,}6619e^{0{,}37\sigma L}$, kod lomne žilavosti također raste eksponencijalno.

Iz danih grafova na **slikama 6-13.**, **6-14.**, **6-15.** i **6-16.**, na kojima su prikazani utjecaji nekih fizičko-mehaničkih svojstava na CERCHAR indeks abrazivnosti, može se zaključiti kako *CAI* najviše ovisi o tlačnoj čvrstoći, a najmanje o lomnoj žilavosti. Odnosno, *CAI* moguće je nabolje procijeniti na temelju tlačne čvrstoće i tvrdoće, čiji je koeficijent korelacije mjerodavniji, za razliku od vlačne čvrstoće i lomne žilavosti, $R^2 < 0{,}75$. Prijašnjim je ispitivanjima ustanovljeno da navedena svojstva znatno utječu na *CAI* (Er i Tuğrul 2016). Također, primjećuje se kako sve krivulje regresije rastu, i to eksponencijalno. Treba spomenuti da je velika standardna devijacija *CAI* kod uzorka Lasinja mogući razlog slabije korelacije sa nekim fizičko-mehaničkim svojstvima.

6.5.4. Utjecaj CERCHAR indeksa abrazivnosti na sile rezanja

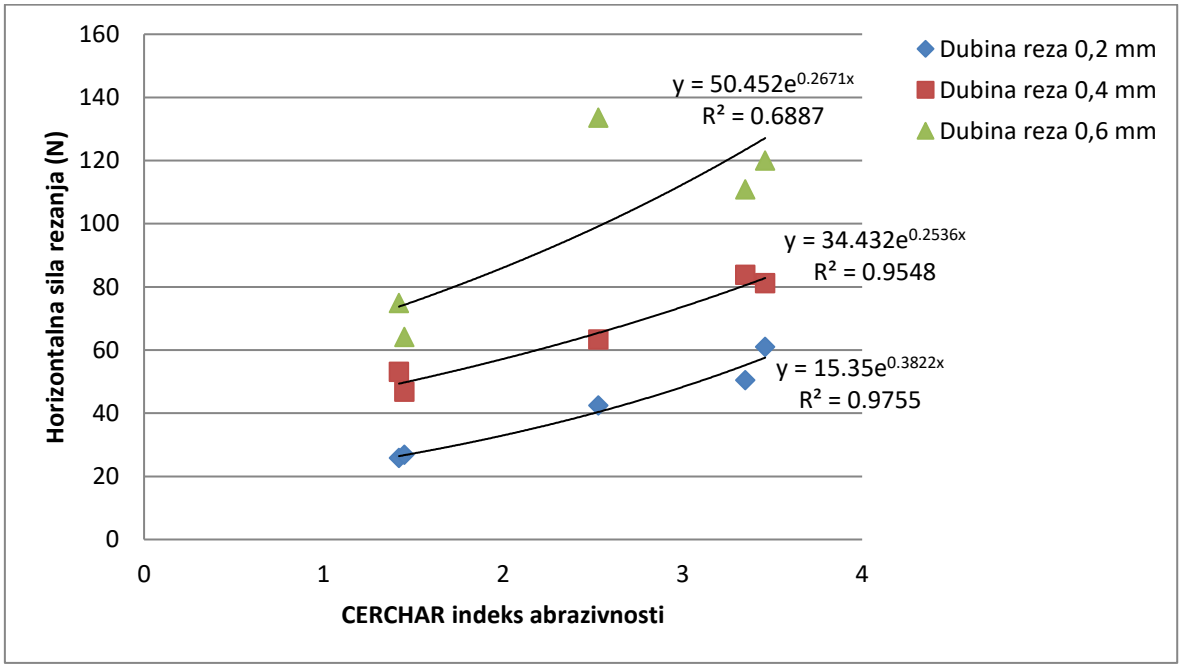
Nakon fizičko-mehaničkih svojstava utvrđena je zavisnost CERCHAR indeksa abrazivnosti o komponentama sile koje su izmjerene laboratorijskim ispitivanjima i navedene u **tablicama 6-2.** i **6-3.** U tu svrhu analizirana je zavisnost *CAI* o horizontalnoj i vertikalnoj sili za različite dubine reza, te za pozitivni i negativni kut.



Slika 6-17. Utjecaj *CAI* na horizontalnu silu za negativni kut.

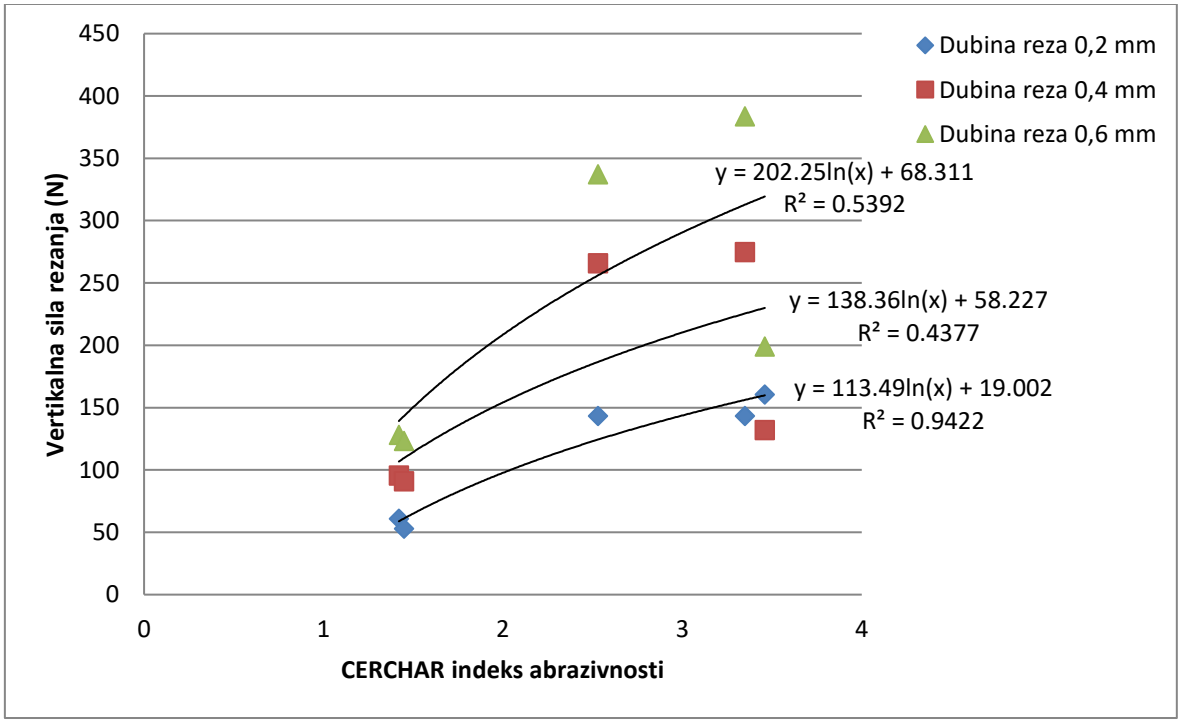
Dijagram na **slici 6-17.** prikazuje zavisnost horizontalne komponente rezne sile o *CAI* pri negativnom napadnom kutu, te pri različitim dubinama reza. Vidljivo je kako povećanje *CAI* dovodi do povećanja horizontalne komponente rezne sile. Što se tiče dubine reza, s njezinim povećanjem dolazi i do povećanja sile, kao što je prethodno prikazano na **slici 6-12.**, no korelacija *CAI* i horizontalnih sila rezanja smanjuje se uslijed povećanja iste. Dolazi se do zaključka da se pri dubini reza 0,2 mm, i krivulji regresije $F_c(0,2)$ = 38,051ln(*CAI*) + 23,215, može procijeniti sila rezanja, no pri većim dubinama reza, zbog manjih koeficijenta korelacije R^2 (0,439 i 0,5006), tako nešto nije moguće. Sve krivulje regresije rastu logaritamski.

Isto kao i za negativni kut, napravljena je korelacija između *CAI* i horizontalne komponente sile za pozitivni kut (**slika 6-18.**). Prvo što se primjećuje da vrijednost horizontalne sile obzirom na *CAI* ne raste logaritamski već eksponencijalno. Pomoću koeficijenata korelacije R^2 za dubine 0,2 i 0,4 mm moguće je procijeniti sile rezanja jer su njihove vrijednosti dovoljno velike (0,9755 i 0,9548), no kod dubine 0,6 mm taj koeficijent opada (0,6887). Zaključuje se, isto kao i kod negativnog napadnog kuta, s porastom dubine reza smanjuje se zavisnost *CAI* i horizontalne sile rezanja. Krivulje regresije, kao što je već spomenuto, rastu eksponencijalno i glase: za dubinu reza 0,2 mm - $F_c(0,2) = 15{,}35e^{0{,}3822CAI}$, za dubinu reza 0,4 mm - $F_c(0,4) = 34{,}432e^{0{,}2536CAI}$, dubinu reza 0,6 mm - $F_c(0,6) = 50{,}452e^{0{,}2671CAI}$.

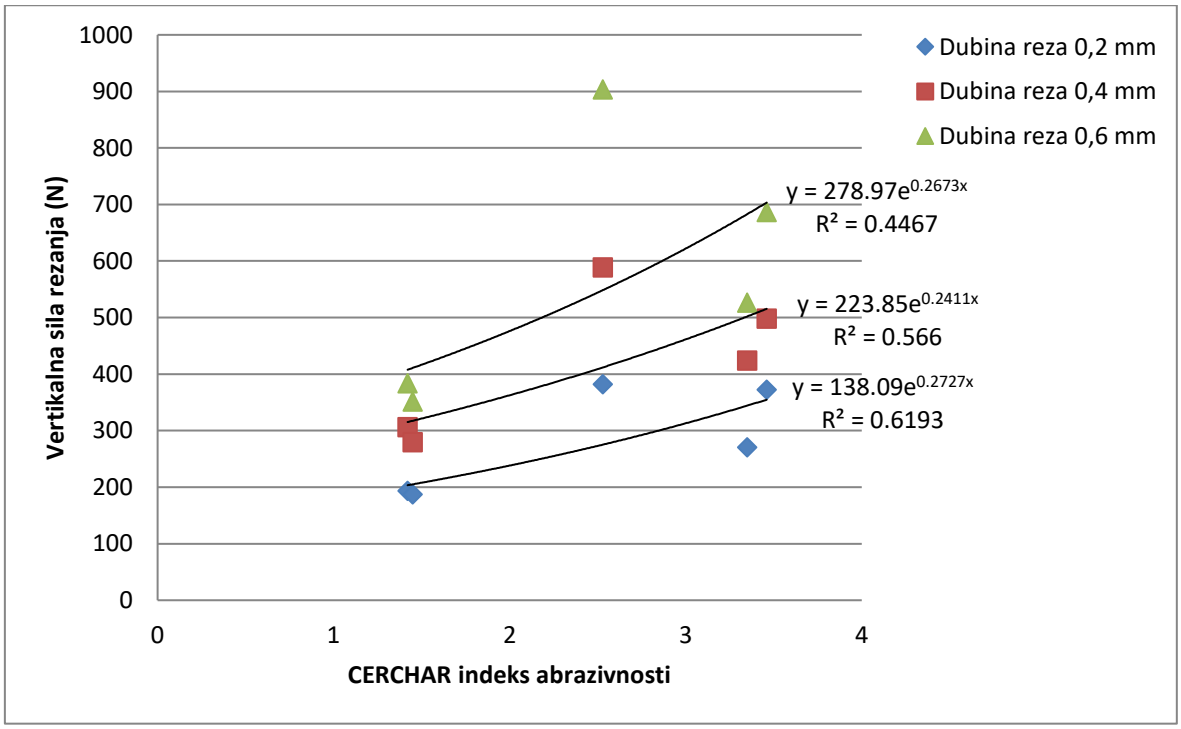


Slika 6-18. Utjecaj *CAI* na horizontalnu silu za pozitivni kut.

Istovjetna analiza napravljena je i za vertikalnu komponentu sile. Na **slikama 6-19.** i **6-20.** prikazane su zavisnosti *CAI* s vertikalnom komponentom sile, također za negativni i pozitivni napadni kut.



Slika 6-19. Utjecaj *CAI* na vertikalnu silu za negativni kut.



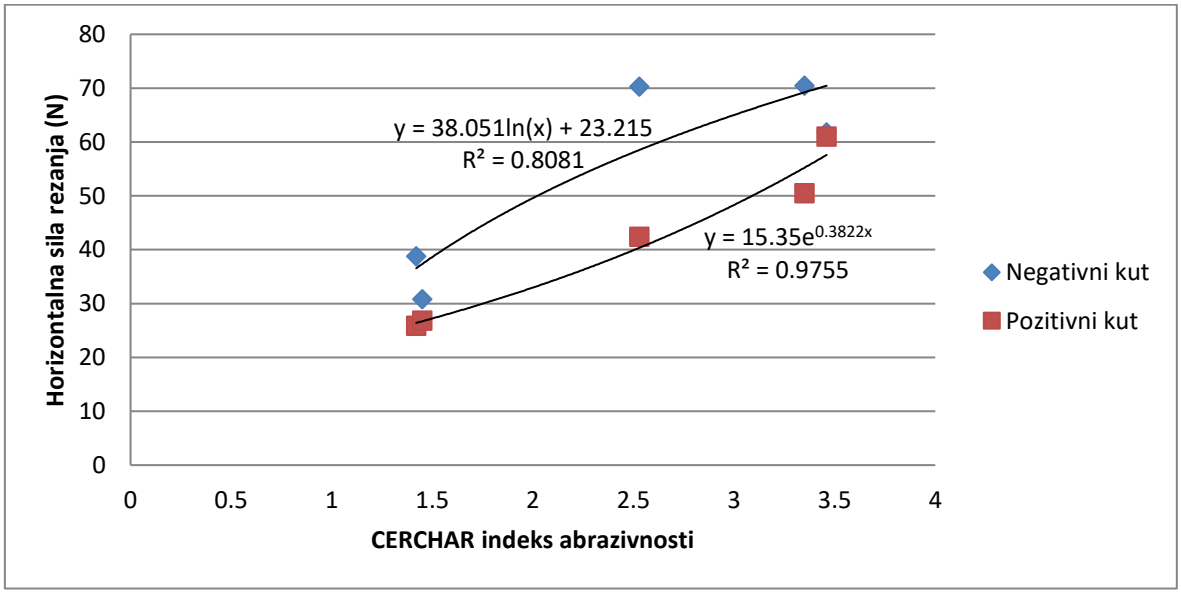
Slika 6-20. Utjecaj *CAI* na vertikalnu silu za pozitivni kut.

Kod **slike 6-19.** primjećuje se slični trend kao i kod negativnog kuta za horizontalnu silu. Samo kod dubine reza 0,2 mm postoji korelacija između *CAI* i vertikalne komponente sile. Koeficijent korelacije za dubinu 0,2 mm iznosi 0,9422, dok za veće dubine 0,4 i 0,6 mm iznosi mnogo manje (0,4377 i 0,5392). Primjećuje se da krivulje regresije rastu logaritamski, isto kao i kod negativnog kuta za horizontalnu komponentu sile. Krivulja regresije za dubinu reza 0,2 mm glasi: $F_n(0,2) = 138,09e^{0,2727CAI}$.

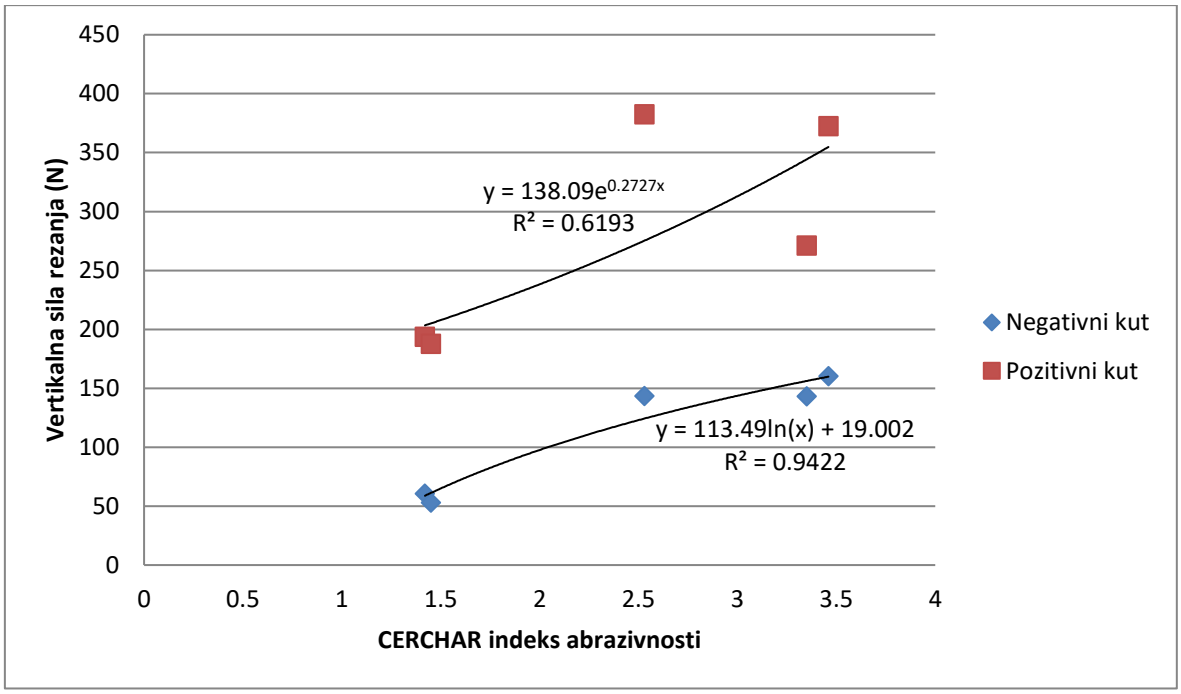
Utjecaj *CAI* na vertikalnu komponentu sile za pozitivni kut (**slika 6-20.**) ne pokazuje značajnu korelaciju. Kod najmanje dubine reza 0,2 mm koeficijent korelacije jest najveći, ali iznosi samo 0,6193, a sa povećanjem dubine reza još više opada. Primjećuje se eksponencijalni rast kod krivulja regresije isto kao i kod **slike 6-18.** na kojoj je prikazana korelacija horizontalne sile i *CAI*, također za pozitivni kut.

Kako uzorak spilita iz kamenoloma Lasinja ima vrlo veliku standardnu devijaciju CERCHAR indeksa abrazivnosti (od 2,8 do 3,7), moguće je da su zbog tog podatka dobivene korelacije između *CAI* i sila pri rezanju stijene slabije od stvarnih.

Za usporedbu negativnog i pozitivnog napadnog kuta kod horizontalne i vertikalne komponente sile dani su grafovi na **slikama 6-21.** i **6-22.** Dubina reza kod oba grafa iznosi 0,2 mm.



Slika 6-21. Usporedba negativnog i pozitivnog kuta kod horizontalne komponente sile prema *CAI* pri dubini reza 0,2 mm.



Slika 6-22. Usporedba negativnog i pozitivnog kuta kod vetikalne komponente sile prema *CAI* pri dubini reza 0,2 mm.

Usporedbom sila pri pozitivnom i negativnom kutu na **slikama 6-21.** i **6-22.** dolazi se do zaključka kako je horizontalna komponenta sile veća za negativni kut nego za pozitivni, no zato je vertikalna komponenta znatno manja. Prema svim provedenim analizama moguće je zaključiti da dubina reza i CERCHAR indeks abrazivnosti značajno utječu na intenzitet vertikalne i horizontalne komponentu sile.

7. ZAKLJUČAK

Potreba za korištenjem lančanih sjekačica javlja se kod eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena. Kako bi eksploatacija bila što učinkovitija potrebno je odabrati optimalne konstrukcijske veličine lančane sjekačice za određenu metodu eksploatacije. Pod konstrukcijskim veličinama ponajprije se misli na snagu pogonskih motora, duljinu mača i geometrijske veličine reznih pločica. Osim konstrukcijskih veličina samog stroja potrebno je i poznavati radnu sredinu u kojoj se obavlja eksploatacija te određena fizičko-mehanička svojstva stijene koja se eksploatira.

U radu je analiziran utjecaj fizičko-mehaničkih svojstava na CERCHAR indeks abrazivnosti. Iz provedenih analiza je vidljivo kako *CAI* raste povećanjem svih analiziranih fizičko-mehaničkih svojstava, a krivulja regresije je eksponencijalna. Koeficijenti korelacije za određena svojstva (vlačna čvrstoća i lomna žilavost) nisu prelazili vrijednost od 0,75 što znači da ne postoji značajna korelacija navedenih svojstava o *CAI*. Iz provedenih analiza proizlazi da *CAI* najmanje ovisi o lomnoj žilavosti, a najviše o tlačnoj čvrstoći na što upućuju koeficijenti korelacije. Pored tlačne čvrstoće, također je ustanovljena značajna zavisnost CAI o tvrdoći. Prema tome CAI je moguće najbolje procijeniti na temelju vrijednosti tlačne čvrstoće i tvrdoće mjerene Schmidtovim čekićem. Treba napomenuti da je velika standardna devijacija *CAI* kod uzorka Lasinja mogući razlog slabije korelacije sa nekim fizičko-mehaničkim svojstvima.

Iz analize laboratorijskih ispitivanja koja su provedena u svrhu određivanja utjecaja *CAI* na sile rezanja vidljivo je da povećanjem *CAI* dolazi i do povećanja svih komponenti sile rezanja. Primjećuje se da je trend rasta i horizontalne i vertikalne komponente sile za negativni napadni kut logaritamski, dok je za pozitivni napadni kut taj trend eksponencijalan. Što se tiče utjecaja dubina reza reznih pločica, kod manjih dubina (0,2 mm, negdje i 0,4 mm) koeficijent korelacije između *CAI* i sila rezanja mnogo je veći i mjerodavniji nego kod većih dubina reza (0,6 mm, negdje i 0,4 mm). To govori kako bi se sile rezanja mogle procijeniti pomoću *CAI* kod manjih dubina reza, točnije za dubinu reza od 0,2 mm, a ponegdje i za 0,4 mm, dok za veće dubine, one od 0,6 mm, a ponegdje i za 0,4 mm, tako nešto nije moguće. Razlog tome također može biti velika standardna devijacija *CAI* kod uzorka Lasinja. Analiza utjecaja *CAI* na vertikalnu silu za pozitivni kut ne pokazuje značajnu korelaciju između ta dva svojstva.

Ovim istraživanjima određena je zavisnost sile rezanja o CERCHAR indeksu abrazivnosti, a budućim istraživanjima potrebno je analizirati utjecaj abrazivnosti na učinak lančane sjekačice i to prvenstveno na potrošnju reznog alata.

LITERATURA

ALBER, M., YARALI, O., DAHL, F., BRULAND, A., KÄSLING, H., MICHALAKOPOULOS, T., CARDU, M., HAGAN, P., 2013. *ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test.* Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(1), str. 261-266.

DETOURNAY, E., DEFOURNEY, P., 1992. *A phenomenological model for the drilling action of drag bits.* International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 29, str. 13-23.

ER, S., TUĞRUL, A., 2016. *Correlation of physico-mechanical properties of granitic rocks with Cerchar Abrasivity Index in Turkey*. Measurement, 91, str. 114-123.

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.

GOLOVANEVSKIY, V.A., BEARMAN, R.A, 2008. *Gouging abrasion test for rock abrasiveness testing.* International Journal of Mineral Processing 85, Elsevier, Amsterdam, str. 111-120.

GRGURIĆ, D., 2017. *Ispitivanje abrazivnosti stijena cerchar metodom*. Završni rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

HOOD, M. C., ROXBOROUGH, F. F., 1992. *Rock breakage: mechanical.* SME mining engineering handbook, 1, str. 680-721.

KORMAN, T., 2008. *Utjecaj fizičko mehaničkih svojstava stijena na mehaničko usitnjavanje*. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KORMAN, T., 2014. *Utjecaj konstrukcijskih i radnih veličina na učinak lančane sjekačice.* Doktorski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KORMAN, T., KUJUNDŽIĆ, T., KLANFAR, M., 2015. *Analiza konstrukcijskih i radnih veličina lančane sjekačice*. The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 30(1), str. 45-54.

KREPELKA, F., LABAŠ, M., KRAJECOVÁ, O., MIKLÚŠOVÁ, V., 2000. *Určovanie abrazivity hornín pre razenie tunelov plnoprofilovými raziacimi strojmi.* Acta Montanistica Slovaca, 5(3), FBERG TU Košice, str. 225-227.

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

KUJUNDŽIĆ, T., DUNDA, S., GLOBAN, M., MATOŠIN, V., 2003. *Ekspoatacija arhitektonsko građevnog kamena*. Digitalni udžbenik. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

LABAŠ, M., KREPELKA, F., IVANIČOVÁ, L., 2012. *Assessment of abrasiveness for research of rock cutting*. Acta Montanistica Slovaca, 17(1), str. 65-73.

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

MOHAMAD, Z., 1992. *The use of fracture mechanics analysis in rock tunnelling machines assessment.* Doktorska disertacija. Sveučilište Teknologi Mara.

NEDIĆ, B., LAZIĆ, M., 2007. *Proizvodne tehnologije - Obrada metala rezanjem.* Mašinski fakultet, Kragujevac.

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

PAVIA SYSTEMS, 2012. *Los Angeles Abrasion*. URL: http://www.pavementinteractive.org/los-angeles-abrasion/ (2.9.2017.)

PLINNINGER, R., KÄSLING, H., THURO, K., SPAUN, G., 2003. *Testing conditions and geomechanical properties influencing the Cerchar abrasiveness index (CAI) value.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40, str. 259–263.

PRIMAVORI, P., 2005. *Il manuale della tagliatrice a catena.* Fantini Sud s.p.a., Strada Prov.le 12, no.52 – 03012 Anahni (FR).

ROSTAMI, J., ÖZDEMIR, L., BRULAND, A., DAHL, F., 2005. *Review of issues related to Cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates*. Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Seattle, WA, USA. str. 15–29.

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.

SLADE, I., 2012. *Obrada materijala II.* Digitalni udžbenik. URL: http://www.cnt.tesla.hr.

VALANTIN, A., 1973. *Examen des diffe´rents proce´de´s classiques de de´termination de la nocivite´ des roches vis-a`-vis de l'abattage me´canique.* Expose Presente´ Aux Journe´es d'information Techniques de Creusement, les 28–29 Novembre 1973, Luxemburg, str. 133–140.

WEST, G., 1989. *Rock abrasiveness testing for tunnelling.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 26, str. 151–160.

YALDIZ, S., 2005. *Development and Testing of a Cutting Force Dynamometer for Milling.* Journal of Polytechnic, 8(1), str. 61-68.

YARALI, O., YAŞAR, E., BACAK, G., RANJITH, P.G., 2008. *A study of rock abrasivity and tool wear in Coal Measures Rocks*. International Journal of Coal Geology, 74, Elsevier, Amsterdam, str. 53-66.

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