

Usporedba specifične energije rezanja, bušenja i piljenja arhitektonsko-građevnog kamena Plano

Zeko, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:169:433707>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-07**



Repository / Repozitorij:

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



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

**USPOREDBA SPECIFIČNE ENERGIJE REZANJA, BUŠENJA I PILJENJA
ARHITEKTONSKO – GRAĐEVNOG KAMENA „PLANO“**

Diplomski rad

Filip Zeko

R329

Zagreb, 2024.g



KLASA: 602-01/24-01/33
URBROJ: 251-70-11-24-2
U Zagrebu, 14.02.24

Filip Zeko, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/33, URBROJ: 251-70-11-24-1 od 13.02.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

USPOREDBA SPECIFIČNE ENERGIJE REZANJA, BUŠENJA I PILJENJA ARHITEKTONSKO – GRAĐEVNOG KAMENA „PLANO“

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Trpimir Kujundžić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Trpimir Kujundžić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

USPOREDBA SPECIFIČNE ENERGIJE REZANJA, BUŠENJA I PILJENJA ARHITEKTONSKO –
GRAĐEVNOG KAMENA „PLANO“

Filip Zeko

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

Sažetak

Za eksploataciju mineralnih sirovina koriste se razni procesi razrušavanja stijene među koje spadaju rezanje, bušenje i piljenje. Sva tri procesa se javljaju u nekom obliku u kamenolomima arhitektonsko – građevnog kamena, gdje se primarni blokovi dobivaju kombinacijom lančane sjekačice, hidraulične rotacijske bušilice i dijamantne žične pile. Navedeni strojevi imaju različite radne veličine ali im je mehanika razrušavanja stijene gotova ista, pa je temeljem toga postavljena hipoteza kako su i specifične energije rezanja, bušenja i piljenja iste, jedina razlike je u putanji reznog elementa. U literaturi su pronađeni znanstveni radovi i doktorske disertacije u kojima su izvedena ispitivanja u kojima su se odredile specifične energije rezanja, bušenja i piljenja ali nije pronađen nijedan rad koji pokušava usporediti specifične energije sva tri procesa. U disertaciji Antoljak (2019) provedeno je terensko ispitivanje na kamenolomu Redi pored mjesta Plano u kojem su uz fizikalno-mehanička svojstva stijenskih uzoraka dobiveni i iznosi specifičnih energija rezanja i bušenja u ovisnosti o CERCHAR indeksu abrazivnosti. U znanstvenom radu Bagherpour i dr. (2020) izvedeno je ispitivanje specifične energije piljenja te je dobivena relacija u kojoj je abrazivnost izražena preko Schimazekovog faktora abrazivnosti. U literaturi su pronađena ispitivanja u kojima se iskazuju ovisnost CERCHAR i Schimazekovog faktora abrazivnosti, pomoću tih radova iznosi svih triju specifičnih energija se mogu izraziti preko Schimazekovog faktora abrazivnosti, preko tih relacija i podataka o svojstvima stijenskih uzoraka sa kamenoloma Redi iznosi za sve tri specifične energije se mogu uspoređivati.

Ključne riječi: Specifična energija, CERCHAR faktor abrazivnosti, Schimazekova F vrijednost

Završni rad sadrži: 22 stranice, 9 tablica, 5 slika i 6 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF
Dr.sc. Tomislav Korman, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Zlatko Briševac, izvanredni profesor RGNF

COMPARISON OF SPECIFIC ENERGIES FOR CUTTING , DRILLING AND SAWING „PLANO“
DIMENSION STONES

Filip Zeko

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of mining and geotechnonology
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In order to excavate mineral resources some sort of rock disintegration process has to be utilized, for example cutting, drilling or sawing. All three of the processes are present in some way, shape, or form in a dimension stone quarry, where the primary blocks are obtained through the usage of chainsaws, hydraulic rotary drills and diamond wire saws. These machines have vastly different work parameters, but the way they operate on a basic level is similar, so based on that a hypothesis can be made that the specific energies of cutting, drilling, and sawing are also similar, the only difference being in the trajectories of the cutting element. Scientific papers, in which the specific energies of cutting, drilling and sawing were individually being experimented on, were observed but no scientific paper was found where an author tried to compare all three of these specific energies at once. In a doctoral thesis by Antoljak (2019.) extensive laboratory tests and field measurements were carried out at a dimension stone quarry Redi near Plano, the result of which was data about the physical and mechanical properties of rock samples from the same quarry along with equations describing the relation between cutting and drilling specific energies as a function of CERCHAR factor of abrasivity. In a scientific paper by Bagherpour and others (2020) similar laboratory tests were carried out and the result was an equation that describes the relation between specific energy for sawing with various rock characteristics including Schimazek's factor of abrasivity. Papers made by other various authors which detail the relation between CERCHAR and Schimazek's factors of abrasivity were observed. All three specific energies were expressed as a function of Schimazek's factor of abrasivity and together with the field data from Redi quarry can be further compared.

Keywords: Specific energy, CERCHAR factor of abrasivity, Schimazek factor of abrasivity

Thesis contains: 22 pages, 9 tables, 5 figures, and 6 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Full Professor Trpimir Kujundžić, PhD.

Reviewers: Full Professor Trpimir Kujundžić, PhD
Associate Professor Tomislav Korman, PhD.
Associate Professor Zlatko Briševac, PhD.

Defence date: February 22, 2024, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. MEHANIKA RAZRUŠENJA STIJENE REZANJEM , ROTACIJSKIM BUŠENJEM I PILJENJEM	2
2.1. Lančana sjekačica	2
2.2. Hidraulična rotacijska bušilica	3
2.3. Dijamantna žična pila.....	4
2.4. Mehanike razrušavanja stijena	5
3. ODREĐIVANJE SPECIFIČNIH ENERGIJA REZANJA, BUŠENJA I PILJENJA.....	6
3.1. Specifične eneregije rezanja i bušenja	6
3.2. Specifična energija piljenja.....	9
3.3. Usklađivanje izraza specifičnih energija rezanja, bušenja i piljenja.....	11
4. USPOREDBA SPECIFIČNIH ENERGIJA REZANJA, BUŠENJA I PILJENJA	19
5. ANALIZA REZULTATA.....	22
6. ZAKLJUČAK.....	23
7. LITERATURA	24

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Lančana sjekačica Pellegrin Ch-60.....	2
Slika 2-2. Hidraulična rotacijska bušilica (Michelleti machine) Error! Bookmark not defined.	
Slika 2-3. Dijamantna žična pila Error! Bookmark not defined.	
Slika 3-1. Dijagram ovisnosti CERCHAR faktora abrazivnosti i Schimazekove F vrijednosti.....	13
Slika 3-2. Dijagram ovisnosti CERCHAR faktora abrazivnosti i Schimazekove F vrijednosti	15

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Usporedba vrijednosti CERCHAR i Schimazekovog faktora.....	10
Tablica 3-2. Dobivene vrijednosti faktora abrazivnosti (1/2)	11
Tablica 3-3. Dobivene vrijednosti faktora abrazivnosti (2/2)	12
Tablica 3-4. Rezultati ispitivanja stijenskih uzoraka	14
Tablica 3-5. Vrijednosti gustoća stijenskih uzoraka i Schimazekovih faktora abrazivnosti (Bagherpour i dr. 2020)	16
Tablica 4-1. Ulazni podatci za izračun specifičnih energija rezanja, bušenja i piljenja..	18
Tablica 4-2. Proračun specifičnih energija rezanja i bušenja.....	19
Tablica 4-3. Proračun specifičnih energija piljenja.....	20
Tablica 5-1. Rezultati proračuna specifičnih energija rezanja, bušenja i piljenja	22

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>BTS</i>	MPa	vlačna čvrstoća dobivena Brazilskim testom
<i>CAI</i>		CERCHAR indeks abrazivnosti
<i>D</i>	g/cm ³	gustoća stijene
<i>EQC</i>	%	ekvivalent sadržaja kvarca
<i>E_{uk}</i>	J	ukupna energija za razrušavanje jediničnog volumena stijene
<i>F</i>	N/mm	F vrijednost Schimazekovog faktora abrazivnosti
<i>G_s</i>	mm	medijan veličine zrna
<i>PA</i>	A	amperaža dijamantne žične pile
<i>P_w</i>	m/s	brzina P valova
<i>SE</i>	J/m ³	specifična energija
<i>SE_B</i>	MJ/m ³	specifična energija bušenja
<i>SE_R</i>	MJ/m ³	specifična energija rezanja
<i>SE_P</i>	MJ/m ³	specifična energija piljenja
<i>V_r</i>	m ³	jedinični volumen razrušene stijene

1. UVOD

U rudarstvu se mineralna sirovina eksploatira razrušavanjem stijenske mase što se može postići na mnogo različitih načina. Najčešći primjeri mehaničkih procesa koji se tada javljaju uključuju rezanje, bušenje i piljenje. Sva tri procesa se često javljaju u eksploataciji arhitektonsko – građevnog kamena gdje se često koristi kombinacija lančane sjekačice i dijamantne žične pile. Bušenje se u takvim kamenolomima osim za eksploataciju koristi i u fazi istraživanja prilikom utvrđivanja količine i kakvoće rezervi. U svakom od ta tri procesa rezni elementi tih alata stupaju u kontakt sa stijenskom masom te dolazi do njihova trošenja i otupljenja, te zbog toga velik dio troškova u eksploataciji predstavlja njihova zamjena i nastanak prekida u radu uslijed istih. Lanačna sjekačica, hidraulična rotacijska bušilica i dijamantna žična pila su strojevi s različitim radnim i konstrukcijskom veličinama ali im je mehanika razrušenja stijene slična, glavna razlika među njima je u trajektorijama reznih elemenata.

Specifična energija je definirana kao omjer utrošene energija naspram jediničnog volumena razrušene stijene, te služi kao poveznica radne veličine stroja i svojstva stijenske mase u jednu cjelinu:

$$SE = \frac{\sum E_{uk}}{V_r} \quad (1-1)$$

gdje je:

SE – specifična energija (J/m^3)

E_{uk} – ukupna energija za razrušavanje jediničnog volumena stijene (J)

V_r – jedinični volumen razrušene stijene (m^3)

Posebice je zanimljiva veza između specifične energije i operativnih troškova, jer ako je moguće odrediti specifičnu energiju rezanja, bušenja ili piljenja iz svojstava stijene i radnih veličina samog stroja to uvelike olakšava procjenu troškova i efikasnosti ovih procesa. Za kamenolome koji još nisu otvoreni te su u fazi istraživanja uvelike bi se i olakšao proces odabira najoptimalnijeg stroja za pojedine procese u ovisnosti o svojstvima stijene koje bi se iskapale.

2. MEHANIKA RAZRUŠENJA STIJENE REZANJEM, ROTACIJSKIM BUŠENJEM I PILJENJEM

Jedna od najčešćih metoda pridobivanja primarnih blokova arhitektonsko–građevnog kamena jest korištenje kombinacije lančane sjekačice i dijamantne žične pile. Lančana sjekačica se koristi za izradu horizontalnih rezova, a pomoću hidrauličke rotacijske bušilice izrađuju se vertikalne bušotine kroz koje se provlači žica dijamantne žične pile. Horizontalne bušotine nisu potrebne u ovakvom procesu jer je širina reza napravljen lančanom sjekačicom veća od širine reza dijamantne žične pile te je moguće provući žicu dijamantne žične pile kroz horizontalan rez napravljen lančanom sjekačicom. Rotacijske bušilice se još koriste i za jezgrovanje kamena u fazi istražnog bušenja kako bi se potvrdile kakvoća i količina zaliha arhitektonsko-građevnog kamena.

2.1. Lančana sjekačica

Lančane sjekačice su nastale preinakom podsjskačica, jednih od najstarijih rudarskih strojeva. Podsjskačice su se koristile za izradu horizontalnih i vertikalnih rezova u rudnicima ugljena i soli. Lančana sjekačica se koristi kod eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena, kada se kombinira s dijamantnom žičnom pilom koriste se za izradu horizontalnih rezova pomoću kojih se formiraju primarni blokovi arhitektonsko-građevnog kamena.



Slika 2-1. Lančana sjekačica (Pellegrini Ch 60)

Radni organ lančane sjekačice je mač po kojem klizi beskonačni lanac na kojem se nalaze rezne pločice. Lanac se sastoji od članaka, na svakom od kojih se nalazi rezna pločica i nosač pločice. Prva rezna pločice služi za otvaranje reza, dok slijedeće pločice služe za proširenje reza. Raspored i položaj pločica u seriji nosača pločica te sam broj serija ovisiti će o karakteristikama stijenske mase koja se reže. Lanac se pokreće preko lančanika reduktorom spojenog na glavni pogonski motor. Sam mač se zakreće u ravninu rezanja pomoći motora za posmak mača. Tijekom rada sjekačice motor sa pumpom za podmazivanje podmazuje rezne elemente, te pomoću motora za posmak stroja stroj se giba po tračnicama postavljenim u poziciju za rezanje, za premještanje tračnica se koriste hidraulične stope ili dizalice.

2.2. Hidraulična rotacijska bušilica

U kamenolomina arhitektnosko - građevnog kamena hidraulične rotacijske bušilice se uglavnom koriste za bušenje pretežno vertikalnih bušotina kroz koje se provlači žica dijamantne žične pile. Odgovarajuća pozicija bušilice se geodetski locira, te se ona učvršćuje „nogama“ i upornim klinovima. Rad bušilice se obavlja pomoću dva motora: motora za pogon hidrauličnog agregata i elektromotora za pogon rotacijske stezne glave. Motor za pogon hidrauličnog agregata pogoni pumpu koja tlači ulje do hidrauličnih cilindra te nastaje potisak koji se preko bušaćih šipki prenosi na bušaću krunu. Elektromotorom se ostvaruje rotacijsko gibanje bušaće krune preko bušaćih šipki pogonom rotacijske stezne glave preko zupčanika.



Slika 2-2. Hidraulična rotacijska bušilica (Michelleti machine)

2.3. Dijamantna žična pila

Dijamantna žična pila je jedan od najčešće korištenih strojeva za dobivanje blokova arhitektnosko-građevnog kamena, zbog svoje mogućnosti da reže gotovu bilo koju stijenu uz velik broj aranžmana mogućih položaja ima široku rasprostranjenu uporabu diljem svijeta. Sastoji se od pogonskog i komandnog dijela. Pogonski dio se nalazi u kućištu unutar konstrukcije na četiri kotača, komandni dio je radi zaštite rukovatelja odvojen od pogonskog dijela.



Slika 2-3. Dijamantna žična pila (promidžbeni materijal tvrtke Xiamen Bestlink)

Rezni element pile je abrazivna dijamantna žica koja se spaja u beskonačnu petlju oko pogonskog kotača trenja. Rezni element žice su dijamantna zrnca nanošena na dijamantne perle koje čine jedan do dijelova žice. Prije početka rada pile dijamantna žica se mora obaviti oko površine koja se reže kroz bušotine ili rez lančane sjekačice te je potrebno uspostaviti dotok vode u rez, u protivnom će dijamantna zrnca uslijed visokih pritisaka i temperatura koja se javljaju tijekom piljenja biti podvrgnuta procesu grafitizacije u kojem ona prelaze u grafit i time gube svoja tražena svojstva. Tijekom piljenja pila se kreće po tračnicama te kada dođe do kraja dijamantna žica se skraćuje za

jednu od standardnih sekcija, pila se pomiče na početak tračnica i proces se ponavlja sve dok se ne dobije blok arhitektonsko-građevnog kamena.

2.4. Mehanike razrušavanja stijena

Do mehaničkog razrušavanja stijenskog materijala dolazi kada se uslijed djelovanja reznog alata premaši granična vrijednost tlačne, vlačne ili posmične čvrstoće stijene. Vrsta loma stijene i način formiranja stijenskih odlomaka ovisiti će o prvoj premašenoj graničnoj čvrstoći stijene uslijed djelovanja reznih elemenata. Mehanike razrušavanja stijene pa tako i kinematika i dinamika reznog elementa tijekom rezanja, bušenja i piljenja su vrlo slične iako sva tri stroja imaju međusobno različite radne i konstrukcijske veličine, kod sva tri procesa rezni elementi se gibaju paralelno s površinom stijene koja se obrađuje. Proces piljenja i rezanja imaju različite rezne elemente u reznim pločicama i dijamntnim zrcima ali im je putanja u tijeku rada jednaka, slično tome rezni element kod procesa bušenja i piljenja su dijamantna zrnca u vezivu na bušaćoj kruni i dijamantnoj perli te je jedina razlika u putanjama koja ta zrnca prolaze. Rezni elementi lančane sjekačice i dijamantne žične pile se gibaju translatorno, dok rezni elementi hidraulične rotacijske bušilice uz translatorno gibanje se gibaju i rotacijski gdje dijamantna zrnca opisuju helikoidalnu putanju u smjeru napretka bušenja.

U literaturi postoji niz analitičkih i empirijskih modela koji pokušavaju objasniti mehaniku rezanja i rotacijskog bušenja stijene, svaki od njih ima određene pretpostavke s kojima se model pojednostavljuje ali time se i ograničava mogućnost praktične uporabe tog modela. Pregledom modela dolazi se do zaključka da niti jedan od analiziranih modela ne može potpuno objasniti složen proces mehaničkog razrušavanja stijene, za izradu dovoljno preciznog modela potrebna su laboratorijska i terenska ispitivanja (Korman, 2014).

3. ODREĐIVANJE SPECIFIČNIH ENERGIJA REZANJA, BUŠENJA I PILJENJA

U prethodnom poglavlju je uspostavljeno da analitički i empirijski modeli mehaničkog razrušavanja stijena nisu dovoljno precizni te ne mogu u potpunosti objasniti proces razrušavanja stijene, pa je potrebno provesti laboratorijska i terenska ispitivanja nad interakcijama između sila koja se javljaju između reznog elementa i stijene kako bi se došlo do specifičnih energija.

3.1. Specifične energije rezanja i bušenja

Kako bi se potvrdila hipoteza o sličnostima mehaničkog razrušavanja stijena rezanjem i bušenjem uspoređivale su se kinematika i dinamika lančane sjekačice i rotacijske bušilice te njihovih reznih elemenata. Analizom puta i brzine reznog elementa lančane sjekačice i rotacijske bušilice primijećena je sličnost u slučaju kada kut između mača sjekačice i pravca rezanja iznosi 90° , izrazi za rezultantu puta i brzine reznog elementa imaju vidljivu sličnost te je time potvrđena hipoteza da su mehanike razrušavanja stijena rezanjem i bušenjem međusobno slične (Antoljak, 2019).

U sklopu doktorske disertacije, Antoljak (2019), izvedena su ispitivanja u kojima su se mjerila i uspoređivale specifične energije rezanja i bušenja. U laboratorijima Rudarsko - Geološko - Naftnog fakulteta ispitivanja specifičnih energija rezanja i bušenja izvodilo su se na preinačenoj blanjalici za metal te na laboratorijskoj rotacijskoj bušilici. Terensko ispitivanje se izvodilo na eksploatacijskom polju arhitektonsko – građevnog kamena Redi kraj Trogira na lančanoj sjekačici i hidrauličnoj rotacijskoj bušačoj garnituri. U doktorskom radu Korman (2014) je dokazao da se specifične energije ispitivane u laboratoriju na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena (blanjalici) vrlo dobro podudaraju s specifičnim energijama ispitivanim na terenu na lančanoj sjekačici te se takvim laboratorijskim ispitivanjem može simulirati lančane sjekačice na terenu. Laboratorijska i terenska ispitivanja izvedena u sklopu doktorske disertacije Antoljak (2019) su se sastojala od niza postupaka i proračuna kod kojih su se koristili različiti mjerni sustavi kojima su se mjerile različite veličine potrebne za proračun specifičnih energija rezanja i bušenja. Mjernim sustavima s mjernim pretvornikom sile i okretnog momenta te za mjerenje snage mjere se veličine potrebne za

izračun energije rezanja ili bušenja odnosno ukupna snaga rezanja ili bušenja. Uz ta mjerenja potrebna su bila još i mjerenja fizikalnih i geometrijskih veličina pomoću kojih se izračunao obujam razrušenih stijenskih odlomaka prilikom rezanja ili bušenja. Za ispitivanje prikupilo se 26 stijenskih uzoraka sedimentnih stijena s tri različita eksploatacijska polja na području Republike Hrvatske. Na 24 od 26 uzoraka provedeno je i ispitivanje abrazivnosti CERCHAR metodom, po dobivenim vrijednostima CERCHAR indeksa abrazivnosti (CAI) svi uzorci su klasificirani u nisko abrazivne stijene. Laboratorijsko ispitivanje se odradilo na svih 26 uzoraka dok je terensko ispitivanje odrađeno samo na nekim od uzoraka. Analizom rezultata laboratorijskih ispitivanja zaključeno je da postoji umjerena linearna zavisnost specifične energije rezanja od specifične energije bušenja te umjerena linearna zavisnost specifične energije rezanja jednog reznog elementa od specifične energije bušenja jednog eksponiranog dijamantnog zrna. Također rezultati laboratorijskih i terenskih ispitivanja rađenih na grupi uzoraka iz istog kamenoloma se vrlo dobro podudaraju što bi ukazivalo na mogućnost upotrebe ovakve metode za određivanje specifičnih energija rezanja i bušenja. Osim određivanja zavisnosti specifične energije rezanja stijene od specifične energije bušenja stijene izrađen je i model koji prikazuje korelaciju CERCHAR indeksa abrazivnosti sa specifičnim energijama rezanja i bušenja (jednadžbe 3-1, 3-2 i 3-3). Za specifičnu energiju bušenja podatci su dobiveni pomoću dva različita mjerna sustava pa su dobivene dvije relacije za njen izračun.

Relacija koja prikazuje zavisnost specifične energije rezanja sa CERCHAR indeksom zavisnosti prikazana je jednadžbom (3-1)

$$SE_R = 153,93 \cdot CAI + 158,91 \quad (3-1)$$

gdje je:

SE_R – specifična energija rezanja (MJ/m^3)

CAI – CERCHAR indeks abrazivnosti

Izračunati koeficijent determinacije iznosi 0.05 što ukazuje na odsutnost korelacijske veze.

Podatci pomoću koje su dobiveni podatci za izradu relacije specifične energije bušenja o CERCHAR indeksu abrazivnosti su dobiveni pomoću dva različita mjerna sustava (mjernog sustava za mjerenje snage i mjernog sustava s mjernim pretvornikom sile i okretnog momenta), pa prema tome su dobivene dvije relacije koje prikazuju njihov odnos.

$$SE_B = 703,64 \cdot CAI + 688,53 \quad (3-2)$$

$$SE_B = 857,78 \cdot CAI + 397,43 \quad (3-3)$$

gdje je:

SE_B – specifična energija bušenja (MJ/m^3)

CAI – CERCHAR indeks abrazivnosti

Jednadžbom 3-2 prikazana je relacija dobivena iz podataka mjernog sustava za mjerenje snage, a jednadžbom 3-3 prikazana je relacija dobivena iz podataka mjernog sustava s mjernim pretvornikom sile i okretnog momenta. Izračunati koeficijenti determinacije iznosi 0.10 (jednadžba 3-2) i 0.36 (jednadžba 3-3) koji ukazuju na odsutnost odnosno na slabu korelacijsku vezu.

3.2. Specifična energija piljenja

Pregledom prijašnjih istraživanja u literaturi može se zaključiti da specifična energija piljenja ovisi o puno različitih svojstava koje se daju svrstati u četiri grupe: petrografska i fizikalno – mehanička svojstva stijene koja se reže, svojstva dijamantne žice te uvjeti korištenja dijamantne žične pile poput udaljenosti pile od stijene, vrsta reza i dr.

U sklopu znanstvenog rada, Bagherpour i dr. (2020), izvedeno je ispitivanje u kojem se pokušalo doći do izraza za specifičnu energiju piljenja. Autori su izveli niz ispitivanja na 11 uzoraka magmatskih stijena iz kamenoloma diljem Irana pomoću kojih su dobili vrijednosti vlačnih i tlačnih čvrstoća, Youngovog modula elastičnosti, udjela kvarca, gustoće, brzine P – valova te prosječnih vrijednosti veličine zrna mineralnih konstituenata. Abrazivnost stijenskih uzoraka se iskazala preko vrijednosti Schimazekovog faktora abrazivnosti, za čiji izračun su se koristile vrijednosti vlačne čvrstoće, udjela kvarca i prosječne veličine zrna mineralnih konstituenata (jednadžba 3-4).

$$F = \frac{(EQC \cdot BTS \cdot Gs)}{100} \quad (3-4)$$

gdje je:

F – vrijednost Schimazekovog faktora abrazivnosti (N/mm)

EQC – ekvivalent sadržaja kvarca

Gs – medijan veličine zrna (mm)

BTS – vlačna čvrstoća dobivena Brazilskim testom (MPa)

U idućoj fazi ispitivanja uzorci su bili podvrgnuti procesu piljenja tijekom kojeg se mjerila utrošena energija dijamantne žične pile, njena amperaža te učinkovitost piljenja kao funkcija vremena piljenja specifične površine. Za izračun specifične energije, utrošena energija dijamantne žične pile se izračunala preko iznosa snage motora u wattima te vremena piljenja u sekundama. Volumen reza je izračunat kao umnožak duljine i visine reza sa širinom dijamantnog zrna. Dijeljenjem utrošene energije pile sa volumenom reza dobiveni su iznosi specifičnih energija piljenja za svaki od 11 uzoraka. Dobiveni iznosi specifičnih energija su se dalje koristili za proučavanje njihovog odnosa sa pojedinim fizikalno –

mehaničkih svojstvima stijene i dijamantne žične pile. Svojstva koja su najviše ovisila o specifičnoj energiji su gustoća stijene, Schimazekov faktor abrazivnosti, brzina P – valova te amperaža pile. Podatci od osam uzoraka su korišteni u višestrukoj regresiji pomoću koje je dobivena poveznica specifične energije piljenja sa svojstvima stijene i dijamantne žične pile (jednadžba 3-5)

$$SE_p = (0,085 \cdot F - 0,444 \cdot PA + 19,324 \cdot D + 0,001 \cdot P_w - 15,202) \cdot 1000$$

(3-5)

gdje je:

SE_p – specifična energija piljenja (MJ/m³)

F – Schimazekov faktor abrazivnosti (N/mm)

PA – amperaža dijamantne žične pile (A)

D – gustoća stijene (g/cm³)

P_w – brzina P valova (m/s)

Iz izraza se može uočiti kako svojstva stijene koje se najbolje podudaraju sa specifičnom energijom imaju pozitivan odnos s njom, dok svojstvo same pile u njenoj amperaži ima negativan odnos sa specifičnom energijom tj. iznos specifične energije opada s povećanjem amperaže pile. Amperaža pile se mjerila s panela žične pile a ovisi o učinkovitosti piljenja, ako je učinkovitost piljenja veća manja je potrošnja energije i to zato jer je veći volumen razrušenih komadića stijene pa to smanjuje specifičnu energiju (vidi izraz u poglavlju 1. Uvod)

3.3. Usklađivanje izraza specifičnih energija rezanja, bušenja i piljenja

Usporedbom izraza iz prethodnih poglavlja za specifične energije rezanja, bušenja i piljenja može se uočiti kako iznosi specifične energije ovise o abrazivnosti stijene, međutim izraz za specifičnu energiju piljenja je izražen pomoću Schimazekovog faktora abrazivnosti dok su druga dva prethodno spomenuta izraza izražena preko Cercharovog faktora abrazivnosti. Kako bi se specifične energije mogle uspoređivati potrebno je izraze međusobno uskladiti. U literaturi su pronađeni znanstveni radovi autora Abu Bakar, Mayeed (2016), Aydin i dr. (2018) te Bagherpur i dr. (2020) u kojima su pronađene korelacije između CERCHAR faktora abrazivnosti i F – vrijednosti Schimazekovog faktora abrazivnosti. U tablici 3-1. prikazan je odnos između vrijednosti CERCHAR i Schimazekovog faktora abrazivnosti prema naputcima Bamford Rock Testing Services laboratorija (Bamford, B.).

Tablica 3-1. Usporedba vrijednosti CERCHAR i Schimazekovog faktora (Bamford B.)

CERCHAR		SCHIMAZEKOV
FAKTOR	KATEGORIJA ABRAZIVNOSTI	FAKTOR
ABRAZIVNOSTI		TROŠENJA
0,3 – 0,5	Nisko abrazivno	0,001 – 0,01
0,5 – 1,0	Nisko do srednje abrazivno	0,01 – 0,1
1,0 – 2,0	Srednje abrazivno do abrazivno	0,1 – 0,4
2,0 – 4,0	Vrlo abrazivno	0,4 – 1,8
4,0 – 6,0	Ekstremno abrazivno	1,8 – 4,9
6,0 – 7,0	Kvarcna stijena	4,9 – 7,3

U sklopu znanstvenog rada, Majeed i Abu Bakar (2015), 46 uzoraka magmatskih, sedimentnih i metamorfnih stijena dobivenih iz kamenoloma diljem Pakistana su bila podvrgnuta detaljnom programu laboratorijskih ispitivanja u koje je i spadalo određivanje CERCHAR indeksa abrazivnosti te mjerenje svojstava stijena potrebnih za određivanje F vrijednosti Schimazekovog faktora. Ispitivanje u kojem se određuje CERCHAR faktor abrazivnosti se sastoji od mjerenja trošenja vrha čelične igle vlačne čvrstoće 2000 MPa koja se kretala po ravnini koja je okomita površini stijenskog uzorka duž udaljenosti od 10 mm tijekom jedne sekunde pod opterećenjem od 70 N. Nakon ispitivanja otupljena igla se promatrala pomoću mikroskopa i to s pogledom odozgo i sa strane na vrh igle. Iznos

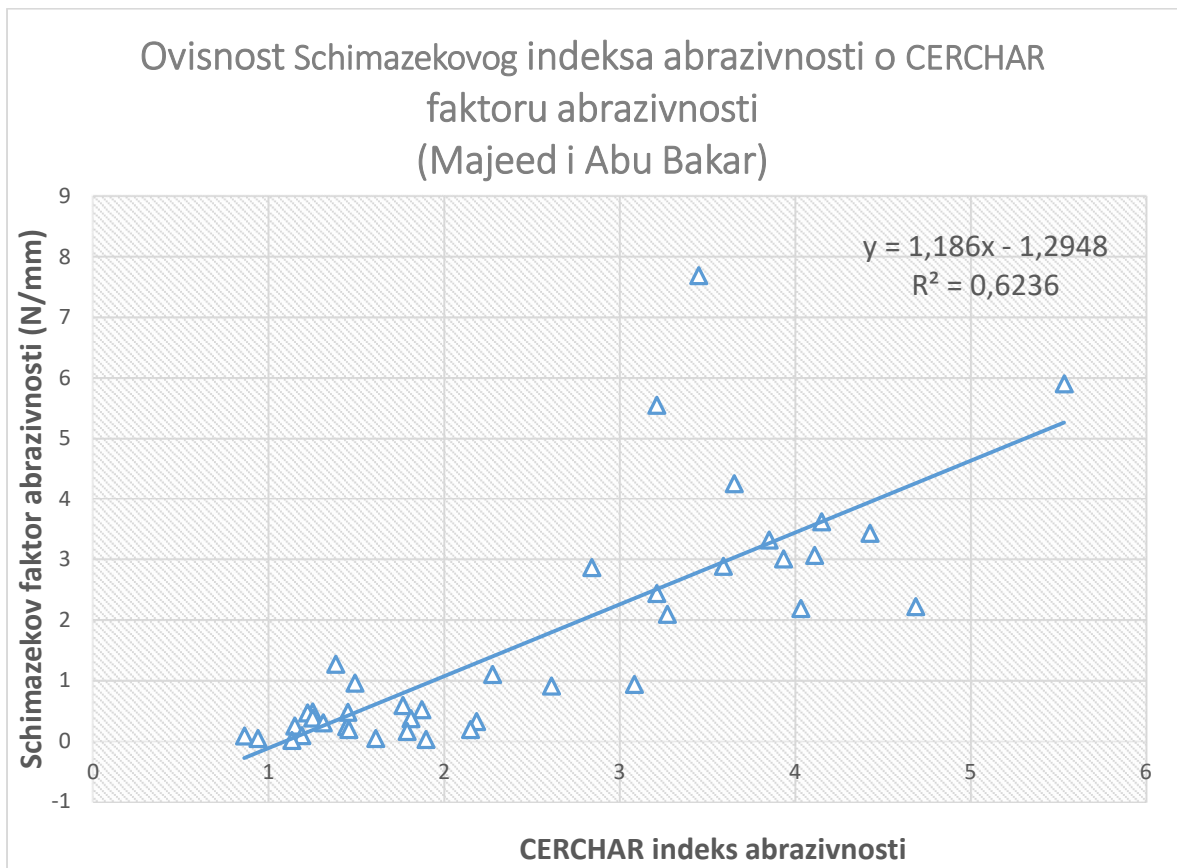
CERCHAR indeksa abrazivnosti predstavlja iznos prosječnog promjera otupljenog vrha igle koji se mjeri s točnošću od 0.1 mm. U idućoj fazi ispitivanja napravljene su usporedbe dobivenih vrijednosti faktora abrazivnosti s obzirom na pogled igle pod mikroskopom. Zaključeno je da vrijednosti dobivene pogledom odozgo su 17 – 19 % veće od vrijednosti dobivenih pogledom sa strane igle, te one nisu dovoljno pouzdane za određivanje faktora abrazivnosti. Od dobivenih vrijednosti CERCHAR faktora abrazivnosti pogledom sa strane i Schimazekove F vrijednosti za 40 od 46 uzoraka čije vrijednosti su prikazane u tablicama 3-2. i 3-3., napravljen je dijagram te je dobiven izraz za njihovu međusobnu ovisnost (jednadžba 3-6).

Tablica 3-2. Dobivene vrijednosti faktora abrazivnosti (1/2)

<i>Broj uzorka</i>	Vrsta Stijene	CAI	F vrijednost
1	Dolerit - 1	3-083	0.939
2	Dolerit - 3	3-85	3-326
3	Dolerit - 4	3-59	2-89
4	Granit - 2	4-11	3-069
5	Granit - 3	4-15	3-623
6	Granit - 4	4-031	2-193
7	Granit - 5	3-45	7.697
8	Granit - 6	4-687	2-224
9	Migmatit	3-21	2-44
10	Andezit	4-425	3-437
11	Granitični gnajs	3-27	2-095
12	Filit	2-184	0.324
13	Kvarcit - 1	3-932	3-009
14	Kvarcit - 2	3-652	4-257
15	Muljnjak - 1	1.25	0.484
16	Muljnjak - 2	1.872	0.517
17	Pješčenjak - 1	1.764	0.588
18	Pješčenjak - 2	0.86	0.086
19	Pješčenjak - 3	2-84	2-87
20	Pješčenjak - 4	1.22	0.468

Tablica 3-3. Dobivene vrijednosti faktora abrazivnosti (2/2)

Broj uzorka	Vrsta stijene	CAI	F vrijednost
21	Pješčenjak - 5	2-275	1.099
22	Pješčenjak - 6	3-21	5-554
23	Pješčenjak - 7	1.38	1.27
24	Pješčenjak - 8	1.25	0.38
25	Pješčenjak - 9	2-61	0.909
26	Pješčenjak - 10	1.443	0.241
27	Pješčenjak - 11	1.49	0.958
28	Pješčenjak - 12	1-147	0.249
29	Pješčenjak - 13	1.81	0.37
30	Pješčenjak - 14	1.31	0.305
31	Pješčenjak - 15	1.45	0.476
32	Pješčenjak - 16	5-532	5-907
33	Dolomit - 1	1.608	0.041
34	Dolomit - 2	1.787	0.162
35	Dolomit - 3	1.895	0.0249
36	Dolomit - 4	2-149	0.193
37	Vapnenac - 1	0.938	0.042
38	Vapnenac - 2	1.455	0.189
39	Vapnenac - 3	1-188	0.093
40	Vapnenac - 4	1-13	0.012



Slika 3-1. Dijagram ovisnosti Schimazekovog faktora abrazivnosti i CERCHAR indeksa abrazivnosti

Ovisnost Schimazekovog faktora abrazivnosti i CAI prikazana je izrazom 3-6.

$$F = 1,186 \cdot CAI - 1,2948$$

(3-6)

gdje je :

F – Schimazekov faktor abrazivnosti (N/mm)

CAI – CERCHAR indeks abrazivnosti

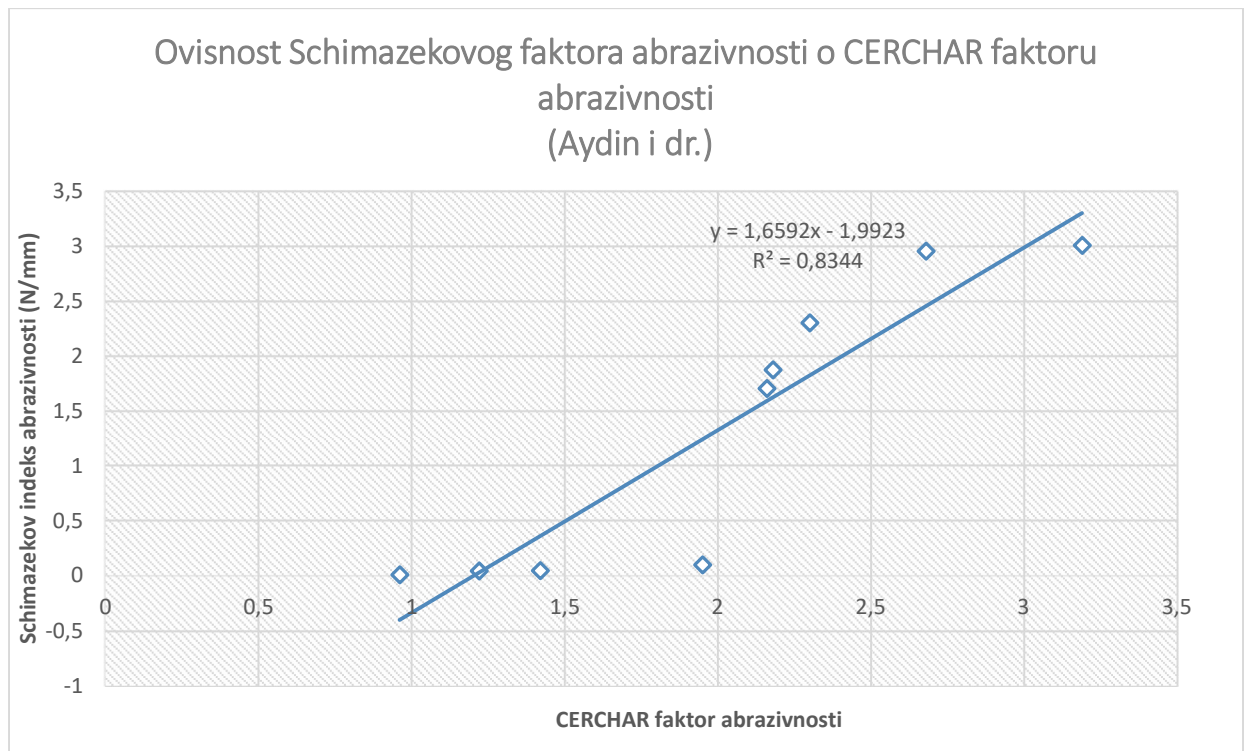
Dobiven koeficijent determinacije iznosi 0,62 koji ukazuje na umjereno jaku korelacijsku vezu.

U literaturi je pronađen još jedan znanstveni rad turskih autora Yarail i dr. (2018), u kojem su se na devet uzoraka magmatskih i sedimentnih stijena odredili CERCHAR indeks abrazivnosti, vrijednost norveškog testa abrazivnosti (u daljnjem tekstu NAV) i Schimazekovog faktora abrazivnosti. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 3-4.

Tablica 3-4. Rezultati ispitivanja stijenskih uzoraka

<i>Broj uzorka</i>	Vrsta stijene	CAI	F vrijednost	NAV
1	Vapnenac - 1	0.96	0.010	0.70
2	Vapnenac - 2	1.42	0.047	1.05
3	Vapnenac - 3	1.22	0.043	0.77
4	Vapnenac - 4	1.95	0.099	1.22
3	Andezit – 1	2-16	1.703	3-75
6	Andezit – 2	3-19	3-005	6.80
7	Andezit – 3	2-18	1.874	4-72
8	Andezit – 4	2-30	2-300	5-09
9	Andezit – 5	2-68	2-954	5-47

Iz gore navedenih podataka napravljen je dijagram u kojem je prikazana ovisnost CERCHAR faktora abrazivnosti i Schimazekovog faktora abrazivnosti prikazan na slici 3-2.



Slika 3-2. Dijagram ovisnosti CERCHAR faktora abrazivnosti i Schimazekove F vrijednosti

Ovisnost CERCHAR faktora abrazivnosti i Schimazekove F vrijednosti je prikazana jednadžbom 3-7.

$$F = 1,6592 \cdot CAI - 1,9923$$

(3-7)

gdje je :

F – Schimazekov faktor abrazivnosti (N/mm)

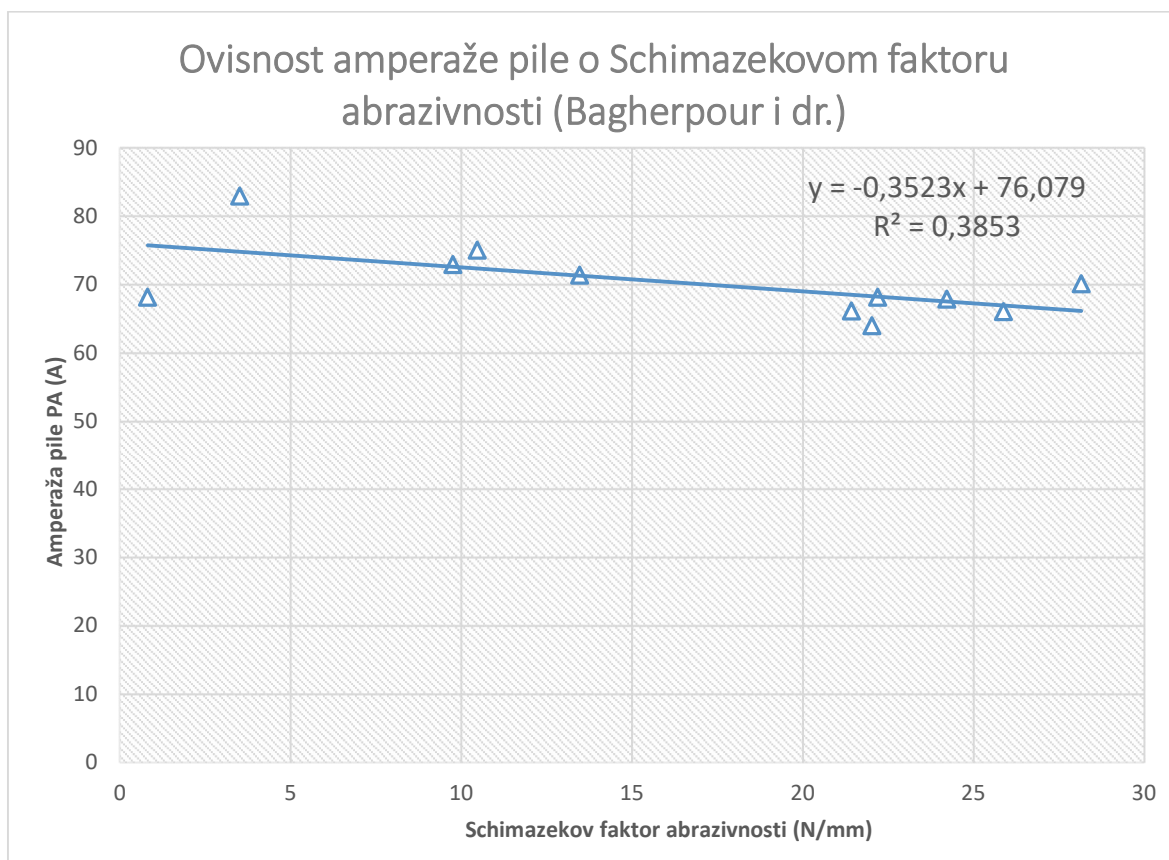
CAI – CERCHAR indeks abrazivnosti

Dobiven koeficijent determinacije iznosi 0.83 koji ukazuje na jaku korelacijsku vezu.

Kako bi se izrazi za specifične energije rezanja, bušenja i piljenja mogli međusobno uspoređivati u izrazu za specifičnu energiju piljenja (jednadžbe 3-5) iznos Schimazekovog faktora abrazivnosti će se dobiti preko iznosa CERCHAR indeksa abrazivnosti stijenskih uzoraka (jednadžbe 3-6 i 3-7). Pošto se u sklopu doktorske disertacije Antoljak (2019) nije izvodilo ispitivanje specifične energije piljenja, iznos amperaže pile iz jednadžbe 3-5 odrediti će se na način da se u lineranu zavisnost stave iznosi Schimazekovih faktora abrazivnosti stijenskih uzoraka i amperaže pile dobivenih iz znanstvenog rada Bagherpour i dr. (2020) čije vrijednosti su prikazane u tablici 3-5., u dobivenu linearnu zavisnost (jednadžba 3-8) će se prilikom izračuna specifične energije piljenja uvrštavati preračunate vrijednosti CERCHAR indeksa abrazivnosti stijenskih uzoraka s kamenoloma Redi (tablica 4-1.).

Tablica 3-5. Vrijednosti gustoća stijenskih uzoraka i amperaže pile (Bagherpour i dr. 2020)

<i>Broj uzorka</i>	<i>Vrsta stijene</i>	<i>Amperaža pile PA (A)</i>	<i>Schimazekov faktor abrazivnosti Sfa (N/mm)</i>
<i>1</i>	Granit	68.16	22-2
<i>2</i>	Granit	67.87	24-22
<i>3</i>	Andezit	68.14	0.81
<i>4</i>	Granit	63-98	22-03
<i>5</i>	Gabro	75-05	10.47
<i>6</i>	Granit	72-91	9.75
<i>7</i>	Diorit	66.05	25-88
<i>8</i>	Sijenit	70.13	28.16
<i>9</i>	Diorit	66.11	21.43
<i>10</i>	Granit	71.37	13-47
<i>11</i>	Andezit	83	3-51



Slika 3-3. Dijagram ovisnosti amperaže pile o Schimazekovim faktorima abrazivnosti stijenskih uzoraka

Iako dobiveni koeficijent determinacije iznosi 0.385 što ukazuje na slabu korelacijsku vezu, izraz prikazan jednadžbom 3-8 daje grubu procjenu iznosa amperaže pile potrebne za proračun specifične energije piljenja stijenskih uzoraka s kamenoloma Plano.

$$PA = -0,3523 \cdot Sfa + 76,079 \quad (3-8)$$

gdje je:

PA – amperaža dijamantne žične pile (A)

F – Schimazekov faktor abrazivnosti (N/mm)

4. USPOREDBA SPECIFIČNIH ENERGIJA REZANJA, BUŠENJA I PILJENJA

Stijenski uzorci čije specifične energije će se uspoređivati su prikupljeni na eksploatacijskom polju arhitektonsko – građevnog kamena „Redi“ pored mjesta Plano, uzorci su određeni kao rekristalizirani vapnenci organskog podrijetla. Nad tim uzorcima su provedena laboratorijska ispitivanja fizikalno – mehaničkih svojstava i abrazivnosti stijene CERCHAR metodom. U tablici 4-1. prikazani su podatci dobiveni ispitivanjima potrebni za izračun specifičnih energija rezanja, piljenja i bušenja, iznosi procjena amperaže pile dobiveni su kombinacijom relacija 3-6 i 3-8 odnosno 3-7 i 3-8 te neovisno koja kombinacija relacija je odabrana rezultati procjene amperaže su gotovi jednakih iznosa.

Tablica 4-1. Ulazni podatci za izračun specifičnih energija rezanja, bušenja i piljenja

Broj uzorka (Redi, Trogir)	CERCHAR indeks abrazivnosti CAI	Shimazekov faktor abrazivnosti Sfa (N/mm) (jednadžba 3-6)	Shimazekov faktor abrazivnosti Sfa (N/mm) (jednadžba 3-7)	Gustoća D (g/cm ³)	Brzina širenja P valova Pw (m/s)	Procjena amperaže pile PA (A) (Jednadžbe 3-6 i 3-8)	Procjena amperaže pile PA (A) (Jednadžbe 3-7 i 3-8)
1	1,61	0,61	0,68	2,695	4150	75,86	75,83
2	1,51	0,49	0,51	2,695	4150	75,90	75,89

Pomoću ulaznih podataka iz tablice 4-1. proveden je proračun specifičnih energija rezanja i bušenja prikazan u tablici 4-2. Za proračun su se koristile relacije prikazane jednadžbama 3-1, 3-2 i 3-3.

Tablica 4-2. Proračun specifičnih energija rezanja i bušenja

Broj Uzorka	CERCHAR faktor abrazivnosti	Specifična energija rezanja	Specifična energija bušenja (jednadžba 3-2)	Specifična energija bušenja (jednadžba 3-3)
		(MJ/m ³)	(MJ/m ³)	(MJ/m ³)
1	1,61	406,74	1821,39	1778,46
2	1,51	391,34	1751,03	1692,68

Iz tablice 4-2. može se uočiti kako su iznosi specifičnih energija rezanja u prosjeku oko 4 puta manji od iznosa specifičnih energija bušenja, razlog tome je što se kod rezanja specifična energija mjeri na samo jednom reznom elementu a kod bušenja je broj reznih elemenata znatno veći i pretpostavljalo se da svaki od njih jednako doprinosi specifičnoj energiji bušenja. Pošto su dijamantna zrna nepravilno raspoređena unutar matriksa bušaće krune raspodjela specifične energije bušenja nije jednolika po svim dijamantnim zrnima jer nemaju jednaku efektivnu dubinu rezanja (Antoljak, 2019).

Za proračun specifične energije piljenja koristile su se dvije različite relacije koje prikazuju odnos CERCHAR i Schimazekovog faktora abrazivnosti (jednadžbe 3-6 i 3-7). Iznos amperaže pile se dobio iz linearne zavisnosti amperaže pile i Schimazekovog faktora abrazivnosti uzoraka prikazan jednadžbom 3-8, rezultati procjene amperaže prikazani su u tablici 3-1. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 4-3.

Tablica 4-3. Proračun specifičnih energija piljenja

Broj uzorka	Jednadžbe 3-5 i 3-6		Jednadžbe 3-5 i 3-7	
	Schimazekov faktor abrazivnosti (N/mm)	Specifična energija piljenja (MJ/m ³)	Schimazekov faktor abrazivnosti (N/mm)	Specifična energija piljenja (MJ/m ³)
1	0,61	7152,9	0,68	7168,5
2	0,49	7124,3	0,51	7128,4

Iz tablice 4-3. može se uočiti kako su iznosi specifičnih energija piljenja međusobno gotovo jednaki neovisno o tome koja relacija između CERCHAR i Schimazekovog faktora abrazivnosti se koristila.

5. ANALIZA REZULTATA

Uspoređujući iznose specifičnih energija piljenja s ostalim specifičnim energijama prikazanih u tablici 5-1. vidljivo je kako specifične energije piljenja imaju višestruko veće iznose. Velika razlika u iznosima se javlja zbog razloga što dobiven iznos specifične energije piljenja nije mjereno na jednom reznom elementu dijamantne žice nego za dio žice koji je bio u kontaktu s stijenom. Dijamantna žica korištena u ispitivanju imala je duljinu od 5 metara sa 36 dijamantnih perli po metru žice. Uz podatak koliko perli je u kontaktu sa stijenom te s pretpostavkom kako je svaka perla jednako doprinosila specifičnoj energiji piljenja, gruba procjena specifične energije piljenja bi se mogla dobiti dijeljenjem iznosa specifičnih energija piljenja iz tablice 5-1. sa brojem perli u kontaktu sa stijenom. Tako dobiven iznos specifičnih energija piljenja bi se mogao uspoređivati s dobivenim iznosima specifičnih energija rezanja i bušenja. U sklopu znanstvenog rada Bagherpour i dr. (2020) u kojem je opisan postupak ispitivanja specifične energije piljenja nema podataka o dimenzijama reza niti o broju perli u kontaktu sa stijenom. Kao što je i slučaj kod bušenja dijamantna zrnca na perli ne sudjeluju jednako u procesu piljenja jer zbog svojeg nasumičnog rasporeda po perli nemaju jednaku efektivnu dubinu reza, te bi dolazilo do sličnih odstupanja vrijednosti ako bi se išlo u proračun specifične energije piljenja dijamantnog zrnca na dijamantnoj perli.

Tablica 5-1. Rezultati proračuna specifičnih energija rezanja, bušenja i piljenja

Broj uzorka	Specifična energija rezanja	Specifična energija bušenja			Specifična energija piljenja	
		Jednadžba (3-1)	Jednadžba (3-2)	Jednadžba (3-3)	Jednadžbe (3-5-i 3-6)	Jednadžbe (3-5 i 3-7)
				(MJ/m ³)		
1	406,74	1821,39	1778,46	7152,9	7168,5	
2	391,34	1751,03	1692,68	7124,3	7128,4	

6. ZAKLJUČAK

U uvodu ovog rada iznesena je hipoteza prema kojoj su mehanizmi razrušavanja stijene kod rezanja, bušenja i piljenja jednaki, razlike međusobno postoje u izvedbi reznih elemenata i njihovih trajektorija tijekom rada strojeva, pa prema tome su i iznosi specifičnih energija jednakih iznosa makar oni imaju različite radne veličine. Lančana sjekačica, hidraulična rotacijska bušilica i dijamantna žična pila su primjeri takvih strojeva, sva tri koja se javljaju u kamenolomima arhitektonsko – građevnih kamena tijekom faza istraživanja ili eksploatacije.

Kako bi se postavljena hipoteza potvrdila potrebno je usporediti iznose specifičnih energija rezanja, bušenja i piljenja jednog reznog elementa. U doktorskim radovima Korman (2014) i Antoljak (2019) je dokazano da se pomoću uređaja za pravolinijsko rezanje stijene i laboratorijske bušilice mogu simulirati radovi lančane sjekačice odnosno hidraulične rotacijske bušilice. Antoljak (2019) je ispitivanjima i potvrdio umjerenu linearnu zavisnost specifične energije rezanja jednog reznog elementa sa specifičnom energijom bušenja dijamantnog zrnca. U znanstvenom radu Bagherpour i dr. (2020) izvedeno je ispitivanje specifične energije piljenja, uspoređivanjem dobivenih iznosa specifičnih energija može se zaključiti kako je ispitivanje provedeno za određivanje specifične energije na jednoj sekciji dijamantne žice a ne za jedan rezni element. U radu nisu spomenute dimenzije reza, dijamantnih perli, broj perli u kontaktu s stijenom iz kojih bi se mogla dobiti gruba procjena specifične energije piljenja jednog reznog elementa.

Kako bi se predložena hipoteza mogla u potpunosti verificirati potrebno je provesti daljnja laboratorijska i terenska ispitivanja svih triju specifičnih energija na stijenskim uzorcima iz kamenoloma Redi na kojima su se izvodila ispitivanja specifičnih energija rezanja i bušenja, rezultate mjerenja usporediti s prethodnim ispitivanjima. Nadalje potrebno je odrediti i ispitati što više fizikalno – mehaničkih i mineraloško – petrografskih svojstava stijena i radnih veličina stroja te odrediti kakva im je zavisnost sa specifičnim energijama rezanja, bušenja i piljenja. Formiranjem tih ovisnosti iznosi specifičnih energija bi se mogli procijeniti iz svojstava stijene i radnog stroja bez potrebe za dodatnom opremom.

7. LITERATURA

1. Korman, T. 2014. *Utjecaj konstrukcijskih i radnih veličina na učinak lančane sjekačice*. Doktorski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
2. Abu Bakar, M. Z., Majeed, Y. 2016. *Statistical evaluation of CERCHAR abrasivity index (CAI) measurement methods and dependance on petrographic and mechanical properties of selected rocks of Pakistan*. Bull eng Geol environ, 75, str. 1341-1360.
3. Bamford, B. 2020. *Laboratory tests for hardness and abrasiveness – explanatory notes*. URL: <https://bamfordrocks.com.au/wp-content/uploads/2020/05/TEST-DESCRIPTIONSHardness-Abrasiveness.pdf>
4. Aydin H., Bulut, S., Duru, H., Saki, U., Yarail, O. 2018. *Determination of abrasiveness of rocks with three different test methods*. The publication of the Chamber of mining engineers of Turkey, 57(1), str. 45-56.
5. Antoljak, D. 2019. *Zavisnost specifične energije rezanja stijena od specifične energije bušenja*. Disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
6. Bagherpour, R., Hossein Jalalian, M., Khoshouei, M. 2020. *The effect of geological properties of dimension stones on the prediciton of Specific energy (SE) during diamond wire cutting operations*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik i autori, str. 17-27.