

# Utrošak električne energije pri radu dijamantne žične pile

---

Vrandečić, Šime

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*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:169:878973>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**UTROŠAK ELEKTRIČNE ENERGIJE PRI RADU DIJAMANTNE ŽIČNE PILE**

Završni rad

Šime Vrandečić

R - 4250

Zagreb, 2021.

## UTROŠAK ELEKTRIČNE ENERGIJE PRI RADU DIJAMANTNE ŽIČNE PILE

Šime Vrandečić

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

### Sažetak

U završnom radu opisan je princip rada dijamantne žične pile i utjecaj fizikalno mehaničkih svojstava, parametara reznog alata te radnih parametara dijamantne žične pile na utrošak električne energije pri rezanju. U poglavlju dosadašnjih istraživanja dat je pregled ispitivanja vezanih uz učinkovitost dijamantne žične pile. Na temelju rezultata dosadašnjih istraživanja analiziran je utjecaj najznačajnijih svojstava na utrošak električne energije pri radu dijamantne žične pile.

Ključne riječi: Dijamantna žična pila, utrošak energije, specifična energija, radni parametri

Završni rad sadrži: 27 stranica, 4 tablice, 25 slika,

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF  
Dr. sc. Ime Prezime, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF  
Dr.sc. Trpimir Kujundžić, redovni profesor RGNF  
Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA .....	2
3. DIJAMANTNA ŽIČNA PILA.....	9
3.1. Princip rada.....	10
3.2. Dijamantna žica .....	12
4. UTJECAJNI ČIMBENICI NA ENERGIJU REZANJA DIJAMANTNE ŽIČNE PILE 13	
4.1. Utjecaj fizikalno-mehaničkih svojstava stijenske mase.....	13
4.2. Karakteristike dijamantne žice.....	17
4.3. Utjecaj radnih parametara.....	19
5. ZAKLJUČAK .....	25
6. LITERATURA .....	26

## POPIS SLIKA:

Slika 2-1: Laboratorijski stroj za rezanje (Khoshouei i dr., 2020.) .....	4
Slika 2-2: Ilustracija dijamantne žice i presjek dijamantne perle (Ozcelik, 2004.).....	5
Slika 2-3: Upravljačka ploča (Cai i dr., 2007.).....	7
Slika 2-4: Laboratorijski stroj za rezanje (Mikaeil i dr., 2018.) .....	7
Slika 3-1: Postrojenje dijamantne žične pile ( <a href="https://www.xmsinostar.com/wp-content/uploads/Diamond-Wire-saw-machine-for-marble-granite-quarry.jpg">https://www.xmsinostar.com/wp-content/uploads/Diamond-Wire-saw-machine-for-marble-granite-quarry.jpg</a> ) .....	9
Slika 3-2: Automatska regulacija napinjanja žice (Dunda i Kujundžić, 2003.) .....	10
Slika 3-3: Dijamantna žična pila pri radu ( <a href="https://www.xmsinostar.com/wp-content/uploads/p2-diamond-wire-saw-machine-for-marble-quarry-cutting.jpg">https://www.xmsinostar.com/wp-content/uploads/p2-diamond-wire-saw-machine-for-marble-quarry-cutting.jpg</a> ) .....	11
Slika 3-4: Piljenje vertikalnog reza (Dunda i Kujundžić, 2003.) .....	11
Slika 3-5: Formiranje dijamantne žice (Dunda i Kujundžić, 2003.) .....	12
Slika 4-1: Odnos specifične energije i svojstava stijene Odnos specifične energije i svojstava stijene (Khoshouei i dr., 2020.): .....	14
Slika 4-2: Usporedba predviđene i izmjerene specifične energije (Khoshouei i dr., 2020.)	15
Slika 4-3: Usporedba izmjerene i predviđene SE (Khoshouei i dr., 2020.) .....	16
Slika 4-4: Učinak dijamantnih perli u životnom vijeku za blokove različitih veličina (Bagherpour i dr., 2014.) .....	18
Slika 4-5: Efikasnost dijamantne žice sa različitim brojem perli (Bagherpour i dr., 2014.)	18
Slika 4-6: Veza obodne brzine i efikasnosti rezanja za meke mramore (Jain i dr., 2013.) .	19
Slika 4-7: Veza obodne brzine i efikasnosti rezanja za srednje tvrde mramore (Jain i dr., 2013.).....	19
Slika 4-8: Veza obodne brzine i efikasnosti rezanja za tvrde mramore (Jain i dr., 2013.)..	20
Slika 4-9: Veza obodne brzine i brzine trošenja perli za meke mramore (Jain i dr., 2013.) .....	20
Slika 4-10: Veza obodne brzine i brzine trošenja perli za srednje tvrde mramore (Jain i dr., 2013.).....	21
Slika 4-11: Veza obodne brzine i brzine trošenja perli za tvrde mramore (Jain i dr., 2013.) .....	21
Slika 4-12: Veza utroška energije i brzine rezanja (Cai i dr., 2007.) .....	22
Slika 4-13: Veza utroška energije i ulaznog kuta žice (Cai i dr., 2007.).....	22
Slika 4-14: Promjena utroška energije u odnosu na brzinu posmaka pri različitim dubinama reza (Mikaeil i dr., 2018.).....	23

Slika 4-15: Promjena specifične energije u odnosu na dubinu reza pri različitim brzinama posmaka (Mikaeil i dr., 2018.) .....	24
Slika 4-16: Promjena specifične energije u odnosu na brzinu posmaka pri različitim dubinama reza (Mikaeil i dr., 2018.) .....	24

**POPIS TABLICA:**

Tablica 2-1: Radni parametri reznog stroja (Khoshouei i dr., 2020.).....	6
Tablica 4-1: Predviđene i izmjerene vrijednosti specifične energije koristeći model višestruke linearne regresije (Khoshouei i dr. 2020.).....	15
Tablica 4-2: Izmjerena i predviđena SE za testne uzorke korištenjem linearne regresije (Khoshouei i dr., 2020.).....	16
Tablica 4-3: Odnos između utrošenih dijamantnih perli, brzine rezanja i kapaciteta rezanja perli (Bagherpour i dr., 2014.).....	17

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$SE_{cut}$	$J/mm^3$	<i>Specifična energija rezanja</i>
$E_t$	$Ws$	<i>Ukupna energija utrošena tijekom procesa rezanja</i>
$Q$	$mm^3$	<i>Volumen odrezanog dijela stijene</i>
$F$	$n/mm$	<i>Schimazek-ov faktor habanja</i>
$EQC$		<i>Ekvivalentni udio kvarca</i>
$\Phi$	$mm$	<i>Srednja veličina zrna</i>
$PA$	$A$	<i>Snaga posmaka stroja</i>
$UCS$	$MPa$	<i>Jednoosna tlačna čvrstoća</i>
$BTS$	$MPa$	<i>Vlačna čvrstoća (Brazilski test)</i>
$PL$	$MPa$	<i>Čvrstoća pri opterećenju u točki</i>
$YM$	$GPa$	<i>Young-ov modul elastičnosti</i>
$D$	$g/cm^3$	<i>Gustoća</i>
$P_w$	$m/s$	<i>Brzina P-vala</i>
$S_{fa}$	$N/mm$	<i>Schimazek-ov faktor habanja</i>
$V_p$	$m/s$	<i>Obodna brzina žice</i>
$D_c$	$mm$	<i>Dubina reza</i>

## 1. UVOD

Još od antičkih vremena kamen predstavlja čovjekov osnovni materijal za upotrebu u svakodnevnom životu, najviše u građevini i kamenoklesarstvu. Iako se u prošlosti kamen koristio kao nosivi element, danas prvenstveno ima dekorativno-funkcijsku ulogu te se koristi u pločama kao zaštitna obloga raznih konstrukcija. Također se koristi i u arhitekturi, kiparstvu te za mnoge različite proizvode zanatske djelatnosti (Dunda i Kujundžić, 2003.). Eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena na našim prostorima ima bogatu prošlost ali je i danas nezaobilazan dio industrije u Republici Hrvatskoj, uzimajući u obzir velik broj aktivnih eksploatacijskih polja. Neovisno o namjeni, cilj eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena je dobiti što više zdravih komercijalnih blokova iz jednog bloka velikih dimenzija, to jest primarnog bloka.

Samo otkopavanje, odnosno dobivanje primarnih blokova, predstavlja krajnje delikatan proces prilikom kojeg se koristi velik broj različitih metoda i strojeva. Jedan od najčešćih strojeva za dobivanje primarnih blokova, uz lančanu sjekačicu, je i dijamantna žična pila. Zbog velike površine rezanja, visoke fleksibilnosti i lakoće upravljanja, upotreba dijamantne žične pile predstavlja apsolutnu nužnost u skoro svakom kamenolomu. Upotreba svih strojeva pri eksploataciji naravno iziskuje i nemale količine energije. Tome u prilog ide i podatak godišnjeg energetskeg pregleda za 2019. godinu, koji govori da se najveći udio u potrošnji energije odnosi na industriju nemetalnih minerala, s oko 32%. Pri čemu, doduše, najveći udio ima cementna industrija (EIHP, 2019.).

Stopa potrošnje energije, uz nužne troškove popravaka i održavanja strojeva, predstavlja najvažniji čimbenik koji utječe na troškove rezanja. Ovime se zaključuje da su spomenuti čimbenici direktno povezani sa stopom proizvodnje, stoga je upotreba optimalnih parametara u korištenju dijamantne žične pile od iznimnog značaja (Mikaeil i dr., 2018.).

Zbog navedenog, cilj ovog rada je, na temelju dosadašnjih istraživanja, procijeniti glavne čimbenike koji utječu na utrošak električne energije pri radu dijamantne žične pile te predstaviti način na koji se sam utrošak energije može predvidjeti. Sve u svrhu optimiziranja izvedbe strojeva i olakšanja planiranja daljnjih rudarskih zahvata.



## 2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Procesi rezanja su glavna tema brojnih istraživanja kojima je cilj bio predvidjeti razinu istrošenosti alata, optimizaciju procesa rezanja, ocijeniti performanse dijamantne žice te analizirati rizike koji se vežu uz rezanje (Norling, 1971). Tako postoje i razne metode analize troškova i planiranja proizvodnje. Jedna od metoda je predviđanje potrošnje energije rezanja tako da se procijeni specifična energija rezanja (Mirahmadi i dr., 2017.).

Yurdakul i dr. (2014.) definiraju specifičnu energiju kao energiju utrošenu u razrušavanje odnosno rezanje jediničnog obujma stijene te navode kako je specifična energija važan element mnogih parametara, osobito fizikalno-mehaničkih svojstva stijena, radnih uvjeta procesa rezanja i karakteristika reznog alata.

Specifična energija može se dobiti iz slijedećeg izraza (Yurdakul i suradnici, 2014.):

$$SE_{cut} = E_t/Q \quad (2-1)$$

Gdje je:

$SE_{cut}$  – Specifična energija rezanja [ $J/mm^3$ ],

$E_t$  – Ukupna energija utrošena tijekom procesa rezanja [ $Ws$ ],

$Q$  - Volumen odrezanog dijela stijene [ $mm^3$ ].

Općenito, na performanse dijamantne žice i procesa rezanja utječe nekoliko čimbenika, koji se mogu podijeliti u tri kategorije (Wu, 2016.):

- Parametri vezani uz fizikalno-mehaničke značajke stijenske mase
- Parametri vezani uz karakteristike rezanja
- Radni parametri

Za pouzdanu procjenu specifične energije rezanja, nikako se ne smije izostaviti utjecaj svojstva stijene u kojoj se rezanje izvodi.

Utjecaj fizikalno-mehaničkih svojstava stijena na rezanje tema je mnogih znanstvenih i stručnih radova, osobito zbog direktnog učinka na potrošnju alata, brzinu i efikasnost rezanja, pa tako i na potrošnju energije. Khoshouei i suradnici (2020.) su proveli niz ispitivanja na 11 različitih magmatskih stijena, u svrhu izrade modela za predviđanje specifične energije rezanja dijamantnom žičnom pilom. U prvom koraku su uzorke dimenzija 35x35x15 cm pripremili za ispitivanja vezana uz mehaniku stijena, prateći ISRM protokole.

Testiranja su obuhvaćala određivanje:

- Jednoosne tlačne čvrstoće
- Čvrstoće pri opterećenju u točki (Point Load Test)
- Indirektne vlačne čvrstoće (Brazilski test)
- Young-ovog modula elastičnosti
- Ekvivalentnog udjela kvarca
- Prosječne veličine zrna
- Gustoće
- Brzine P-valova
- Habanja (Koristeći Schimazek-ov faktor habanja)

Schimazek-ov faktor habanja je veličina koja se dobije iz slijedećeg izraza:

$$F = (EQC \times BTS \times \varphi) / 100 \quad (2-2)$$

Gdje je:

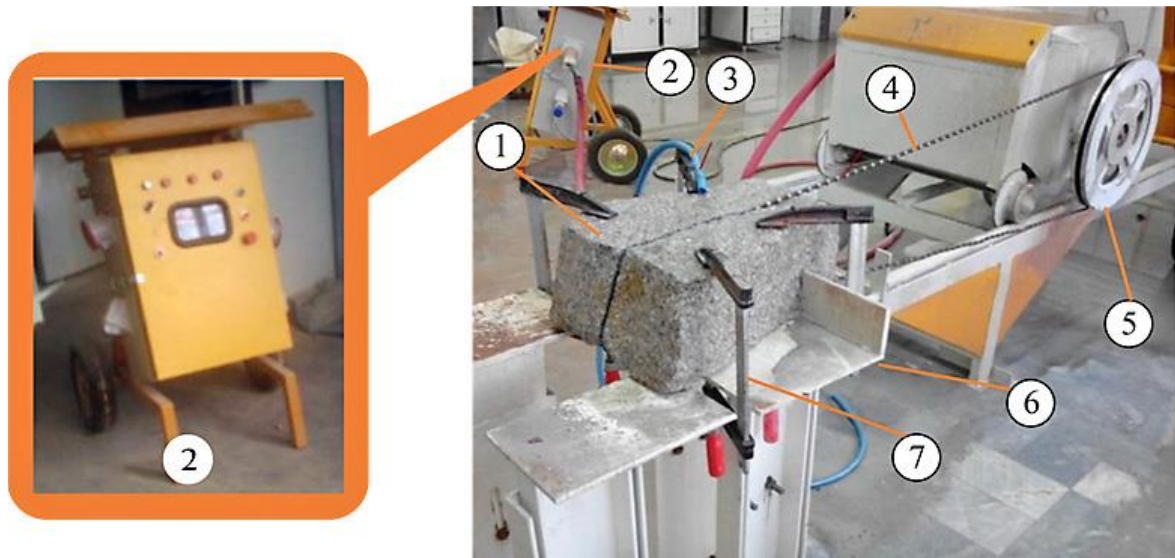
F – Schimazek-ov faktor habanja [N/mm],

EQC – Ekvivalentni udio kvarca,

$\varphi$  – Srednja veličina zrna [mm],

BTS – Indirektna vlačna čvrstoća [MPa].

U drugom koraku, pažnja je posvećena samom procesu rezanja žicom te mjerenju utrošene energije i dokumentiranju dobivenih podataka. Za ovaj pokus, konstruiran je poseban laboratorijski stroj za rezanje dijamantnom žicom (Slika 2-1).

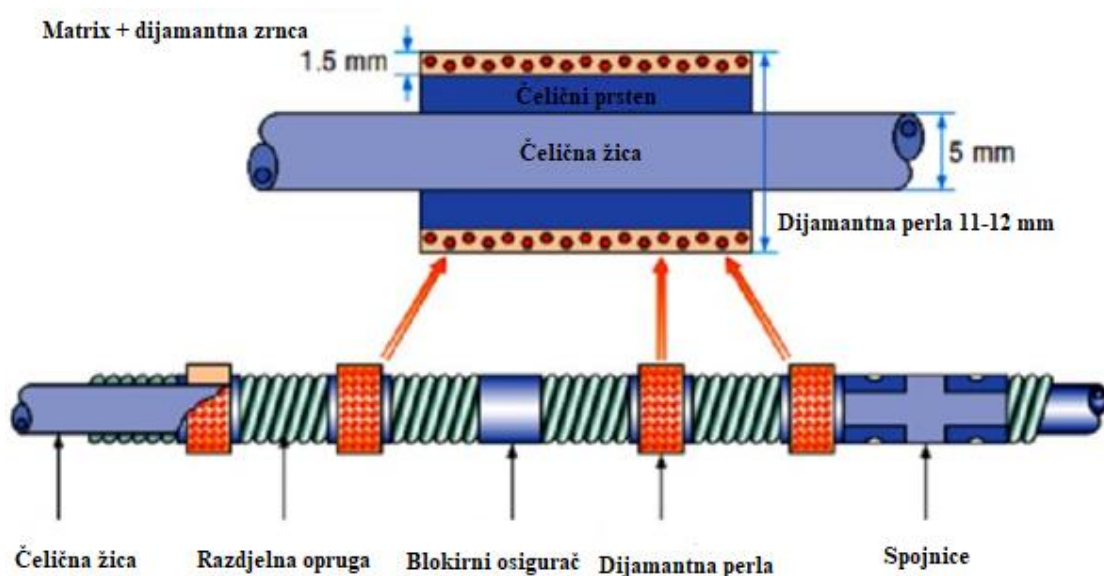


Slika 2-1: Laboratorijski stroj za rezanje (Khoshouei i dr., 2020.): 1 – Uzorak stijene; 2 – Jedinica za mjerenje potrošnje energije; 3 – Jedinica za dotok vode; 4 – Dijamantna žica; 5 – Pogonski kotač

Kao što je prikazano na slici 2-1, uzorak se stavi na postolje, podesi se odgovarajuće napinjanje žice i može se početi sa ispitivanjem. Naravno, obavezno je konstantno hlađenje uzorka vodom tokom procesa rezanja.

Bitno je naglasiti kako su radni parametri kao brzina dotoka vode te konstrukcija dijamantne žice i dijamantnih perli, u ovom slučaju uzete kao konstanta. Tokom cijelog vremena rezanja, dokumentirani su podaci poput vremena rezanja specifične dužine reza i snaga posmaka stroja. Ukupna energija rezanja ( $J$ ) se izračuna množenjem snage stroja ( $W$ ) i prosječnog vremena rezanja ( $s$ ), dok se volumen odrezanog dijela stijene dobije množenjem širine dijamantnih perli te dužine i visine reza. Specifična energija rezanja je količnik ukupne energije rezanja i volumena odrezanog dijela uzorka, za svaki uzorak posebno.

Osim fizikalno-mehaničkih značajki stijenske mase koje spadaju u parametre koje ne možemo kontrolirati, važan utjecaj na rezanje ima i struktura dijamantne žice. Najvažniji parametar koji se tiče strukture dijamantne žice, jest broj perli u jednoj jedinici duljine. Zbog velikog utjecaja na efikasnost i troškove rezanja a samim time i na trošenje alata te utrošak energije, važno je precizno znati kako ovaj parametar utječe na proces rezanja. U tu svrhu, Bagherpour i suradnici (2014.) su napravili niz ispitivanja u kojima su istraživali utjecaj gustoće dijamantnih perli i to u realnim uvjetima u kamenolomu travertina. Glavni cilj istraživanja je bio odrediti optimalni broj perli u strukturi dijamantne žice.



Slika 2-2: Ilustracija dijamantne žice i presjek dijamantne perle (Ozcelik, 2004.)

Da bi odredili optimalan broj dijamantnih perli u jedinici duljine, Bagherpour i suradnici (2014.) su podijelili istraživanje na dva dijela. Prvo su odradili ispitivanja sa konstantnim dimenzijama površine rezanja i duljinom žice a različitim brojem dijamantnih perli. Zatim su sa istim dimenzijama površine rezanja mijenjali i duljinu žice i broj dijamantnih perli. Važan parametar koji je bio potreban za kasnije iskazivanje rezultata testiranja jest kapacitet rezanja dijamantne perle. On se definira kao količina stijenske površine koja je dobivena rezanjem od strane pojedinačne dijamantne perle. Sva ispitivanja rezanja su rađeni na jednakoj vrsti stijene sa jednakim mehaničkim karakteristikama. Također je korišten isti tip reznog stroja s jednakim radnim parametrima. Neke od tih karakteristika opisane su u tablici 2-1.

Tablica 2-1: Radni parametri reznog stroja (Khoshouei i dr., 2020.)

<b>Parametar</b>	<b>Opis</b>
Snaga glavnog motora	45 KW
Obodna brzina žice	30 m/s
Napon	440 V
Promjer zamašnjaka	600 mm
Sila posmaka	930 N

Radni parametri predstavljaju veliki dio onih parametara koje tijekom procesa rezanja možemo kontrolirati. Pod tim se misli na sve karakteristike stroja koje direktno utječu na efikasnost rezanja a time i potrošnju električne energije. Jain i suradnici (2013.) navode kako obodna brzina žice i posmak stroja imaju važnu ulogu u cjelokupnom učinku rezanja.

Da bi pobliže prikazali utjecaj ovih parametara, obavili su ispitivanja na uzorcima mekih, srednje tvrdih i tvrdih dolomitskih mramora. Eksperimenti su rađeni vertikalnim rezovima sa različitim obodnim brzinama pile. Preciznije, mjerili su učinak rezanja ali i trošenje dijamantnih perli tako da su mijenjali obodnu brzinu pile od 26 do 30 m/s pod različitim silama potiska. Iznosi sile potiska su iznosile 850, 930 i 1010 N, na tri različite vrste mramora. Također su, pomoću statističke metode regresije, utvrdili i optimalnu obodnu brzinu žice za svaku grupu uzoraka, na temelju njihovih fizičko-mehaničkih karakteristika.

Cai i suradnici (2007.) su također ispitivali utjecaj obodne brzine žice. U svim ispitivanjima su dodatno mjerili i ulazne i izlazne kutove, težinu žice (zbog utvrđivanja stupnja trošenja), odrezanu površinu, vrijeme rezanja i promjenu potrošnje struje. Na slici 2-3 prikazana je upravljačka ploča laboratorijskog stroja za rezanje.



Slika 2-3: Upravljačka ploča (Cai i dr., 2007.)

Još jednu studiju su proveli i Mikaeil i suradnici (2018.) u kojoj su istraživali vezu radnih parametara stroja sa utroškom energije. Bitno je naglasiti da nisu koristili dijamantnu žičnu pilu već je alat za rezanje bila laboratorijska pila sa dijamantnim diskom. Almasi i suradnici (2015.) navode: „Iako je dijamantna žična pila slabije zastupljena u istraživanjima za razliku od dijamantnog diska, povijest njihovih korištenja je gotovo ista“.

Zbog sličnosti mehanizama rezanja ova dva stroja se može navesti i studija koju su proveli Mikaeil i suradnici (2018.), koja je u kasnijoj analizi rezultata poslužila kao odličan primjer veze radnih parametara stroja i utroška električne energije.

Za ispitivanje je konstruirana laboratorijska pila sa dijamantnim diskom te je spojena sa opremom za mjerenje potrošnje električne energije. Stroj se može vidjeti na slici 2-4:



Slika 2-4: Laboratorijski stroj za rezanje (Mikaeil i dr., 2018.)

Kao i do sad, radni parametri stroja se mogu slobodno podešavati i mijenjati. U slučaju ovog stroja to su: Brzina pomaka diska, dubina reza i obodna brzina. Za potrebe istraživanja koristili su 7 uzoraka karbonatnih stijena odnosno preciznije, travertina.

Prilikom testiranja su fiksirali brzinu rotacije vretena pile na 1770 okretaja u minuti dok su mijenjali vrijednosti dubine reza i brzine pomaka diska, kako bi zabilježili promjene u utrošku energije.

### 3. DIJAMANTNA ŽIČNA PILA

Dijamantna žična pila je sastavljena od pogonskog dijela i komandnog dijela a kao rezni element koristi dijamantnu žicu (Dunda i Kujundžić, 2003.).

Pogonska jedinica sa zamašnjakom je smještena u kućište, na poluosovinu unutar okvirne konstrukcije koja je postavljena na metalne kotače. Kotači služe da bi se stroj za vrijeme rada mogao pomicati uzduž tračnica u smjeru piljenja, najčešće preko zupčanika i zupčaste letve između tračnica. Osim pogonskog kotača tj. zamašnjaka, na okviru se nalaze još dva orijentacijska kotura koji onemogućavaju ispadanje žice tijekom rada te povećavaju kut obuhvata dijamantne žice. Pogonski kotač se zakretanjem poluosovine može dovesti u bilo koji položaj. Na njemu se nalazi i zaštitna guma u svrhu zaštite kotača i žice od trošenja ali i ostvarivanja potrebnog koeficijenta trenja. Danas se najviše koriste pile s električnim pogonom, dok se na radilištima gdje nije provedena električna mreža koriste i žične pile sa dizelskim motorom.

Komandni dio je odvojen od pogonskog te se najčešće postavlja desetak metara bočno od stroja, zbog zaštite radnika (Dunda i Kujundžić, 2003.). Primjer dijamantne žične pile sa komandnim dijelom vidi se na slici 3-1.



Slika 3-1: Postrojenje dijamantne žične pile (<https://www.xmsinostar.com/wp-content/uploads/Diamond-Wire-saw-machine-for-marble-granite-quarry.jpg>)



Jedna od karakteristika dijamantne žične pile je i automatska regulacija napinjanja žice ovisno o naprezanjima u stijeni te regulacija obodne brzine žice (Slika 3-2). To znači da je posmak stroja obrnuto proporcionalan naprezanjima u stijeni, odnosno da će posmak stroja biti sporiji što su naprezanja u stijeni veća. Kod velikih naprezanja, normalno je i da će stroj raditi s većom silom, no bez velikih opterećenja jer će pogonski motor uvijek raditi na istom optimalnom režimu.



Slika 3-2: Automatska regulacija napinjanja žice (Dunda i Kujundžić, 2003.)

### 3.1. Princip rada

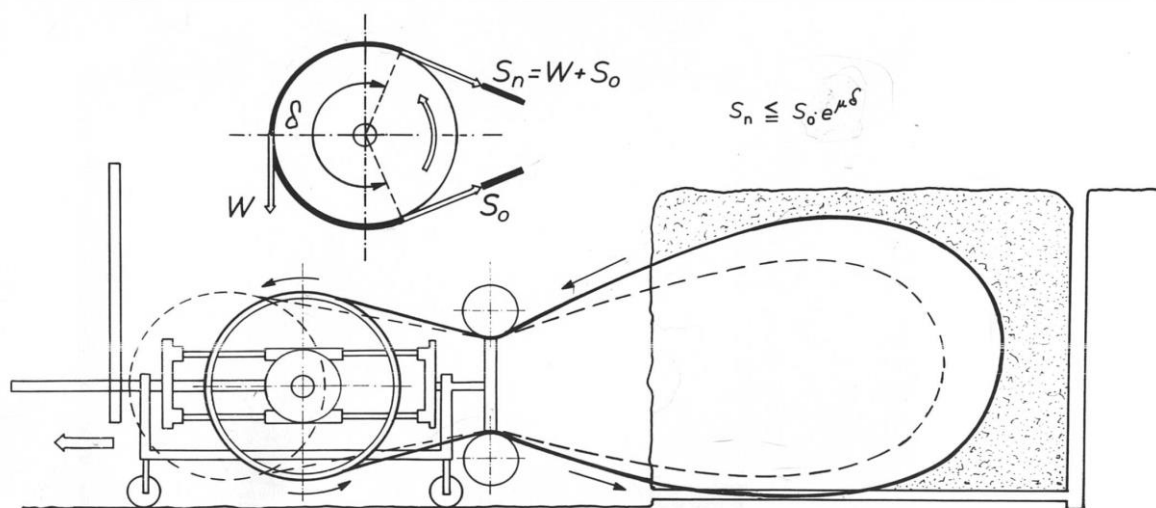
Dunda i Kujundžić (2003.) navode kako je princip rada kod svih pila identičan. Međutim, prije korištenja dijamantne žične pile u svrhu odvajanja primarnog bloka, nužno je na banku imati barem dvije slobodne vertikalne stranice, no isto tako je i potrebno obaviti pripremne radnje. One uključuju bušenje međusobno okomitih horizontalnih i vertikalnih bušotina oko površine koju treba ispiliti, kako bi se kroz njih mogla provući dijamantna žica koja se zatvori u beskonačnu petlju. Bušotine koje se međusobno spajaju sačinjavaju kružni tijek žice, naravno uključujući i dvije slobodne stijenke bloka.

Zamašnjak pokreće žicu a prijenos sile sa kotača na dijamantnu žicu se postiže trenjem. Zatvaranjem žice oko zamašnjaka i nakon obaveznog omogućavanja dotoka vode, stroj se uključuje i može se početi sa radom. Za vrijeme rezanja stroj se po tračnicama odmiče od rezne površine, konstantno opterećujući mjesto rezanja. (Slika 3-3)

Kao što je već spomenuto, zbog mogućnosti postavljanja zamašnjaka u bilo koji položaj, najčešće se izvode vertikalni i horizontalni rezovi, dok je rezanje pod kosinom rjeđa pojava u kamenolomima (Slika 3-4).



Slika 3-3: Dijamantna žična pila pri radu (<https://www.xmsinostar.com/wp-content/uploads/p2-diamond-wire-saw-machine-for-marble-quarry-cutting.jpg>)



Slika 3-4: Piljenje vertikalnog reza (Dunda i Kujundžić, 2003.)

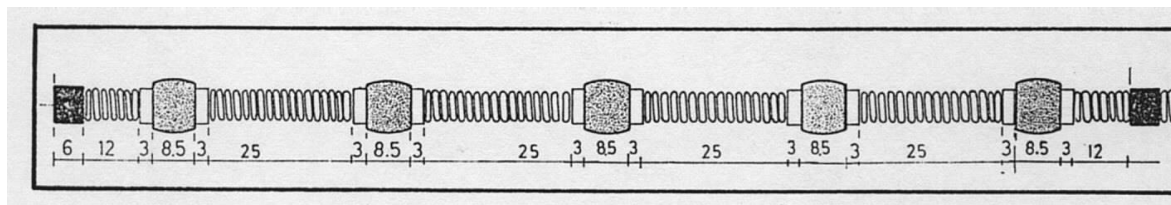
### 3.2. Dijamantna žica

Dijamantna žica je rezni element dijamantne žične pile. Sastoji se od čeličnog užeta na koje su naslagane dijamantne perle, čelični zaštitni prstenovi, blokirni osigurači, razdjelne opruge te muško-ženske spojnice.

Čelično uže je jedan od bitnijih dijelova alata jer su na njega nanizani svi ostali dijelovi, što znači da se ne smije dogoditi pucanje užeta. Mora biti otporno na koroziju, biti savitljivo te mora imati visoku čvrstoću na vlak. Promjer užeta je oko 5 mm tako da se bez problema može provući kroz perlu, koja ima jednak promjer. Najčešće je korišteno uže sa 61 žicom. Možda najbitniji dio žice su dijamantne perle. Ona ima glavnu ulogu rezanja i o njihovim svojstvima ovise potrošnja i učinak alata. Razlikujemo perle cilindričnog i koničnog oblika. Bitan dio perle je dijamantni sloj, na kojemu se nalaze dijamantna zrnca koja mogu biti povezana na različite načine te mogu imati različitu koncentraciju i granulaciju. Korištenje i izbor ovih parametara dijamantnog sloja najčešće ovisi o vrsti stijene u kojoj se izvodi rezanje. Tako se za vapnence uglavnom koriste sintetizirane perle cilindričnog oblika dok se za tvrde stijene koriste galvanske perle.

Najčešći način formiranja dijamantne žice je slijedeći;

Sa svake strane perle se stavlja zaštitni prsten dok se razdjelna opruga postavlja nakon zaštitnog prstena. Opruga se također postavlja i sa svake strane blokirnog osigurača koji služi da se, u slučaju pucanja žice, ne izgube sve dijamantne perle (Slika 3-5).



Slika 3-5: Formiranje dijamantne žice (Dunda i Kujundžić, 2003.)

## 4. UTJECAJNI ČIMBENICI NA ENERGIJU REZANJA DIJAMANTNE ŽIČNE PILE

### 4.1. Utjecaj fizikalno-mehaničkih svojstava stijenske mase

Rezultati pokusa rezanja 11 različitih uzoraka tvrdih magmatskih stijena prezentirani su u dva koraka (Khoshouei i suradnici, 2020.). Prvi korak je bio analizirati vezu specifične energije rezanja i svakog svojstva stijene zasebno, kao što je prikazano sa slici 4-1.

Za potrebu izrade modela predviđanja specifične energije rezanja i definiranja najboljih mogućih ulaznih podataka za taj model, sva izmjerena odnosno određena svojstva stijene su podijeljena u četiri grupe:

- Fizički parametri
- Mehanički parametri
- Teksturalni parametri
- Radni parametri stroja

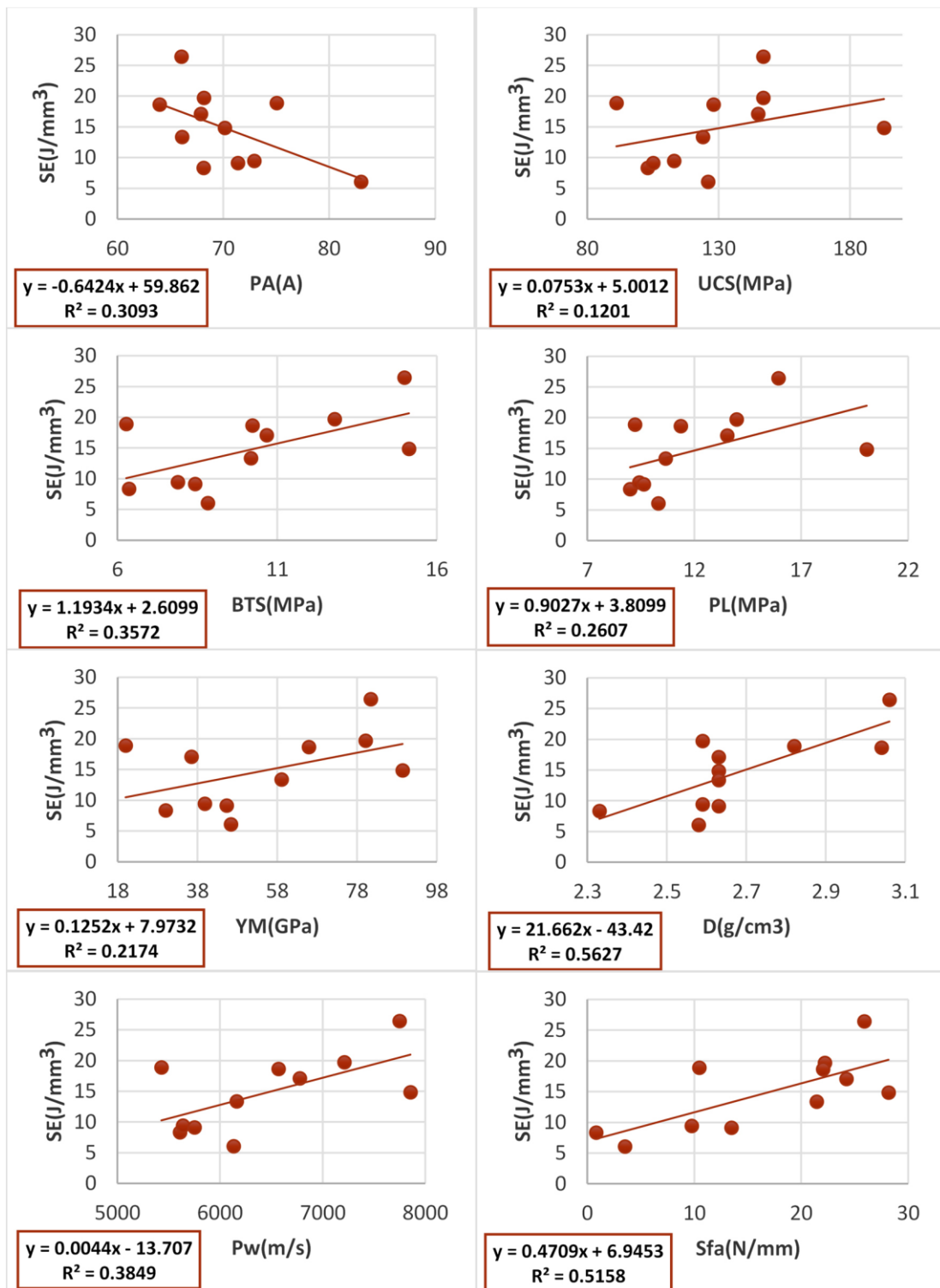
Kao što je i prikazano na slici 4-1, svojstva stijene koja su najdirektnije vezana uz specifičnu energiju su gustoća stijene, Schimazek-ov faktor habanja i brzina P-valova. Upravo ova svojstva (uz snagu posmaka stroja, koji pripada radnim parametrima), uzeta su kao ulazni podaci za izradu modela predviđanja specifične energije rezanja. Za istraživanje veze specifične energije i najvažnijih svojstava stijene te radnih parametara, korištena je metoda višestruke linearne regresije.

Višestruka linearna regresija je metoda koja se koristi za određivanje stupnja u kojem je više neovisnih varijabli (prediktora) i više ovisnih varijabli (respondera) linearno povezano (Brilliant.org, 2021.).

Veza između specifične energije i navedenih ulaznih podataka može se prikazati jednadžbom:

$$SE = 0,085 \times Sfa - 0,444 \times PA + 19,324 \times D + 0,001 \times Pw - 15,202 \quad (4-1)$$

$$R^2=85,8\%$$



Slika 4-1: Odnos specifične energije i svojstava stijene Odnos specifične energije i svojstava stijene (Khoshouei i dr., 2020.):

PA – Snaga posmaka stroja; UCS – Jednoosna tlačna čvrstoća; BTS – Vlačna čvrstoća;

PL – Čvrstoća pri opterećenju u točki; YM – Young-ov modul elastičnosti; D – gustoća;

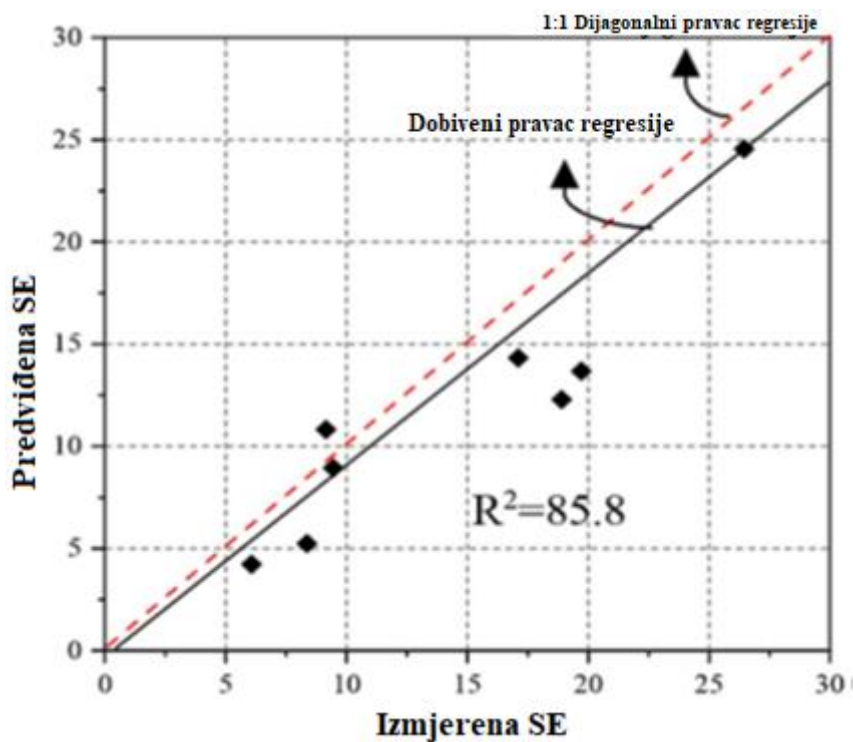
Pw – Brzina P-vala; Sfa – Schimazek-ov faktor habanja

Pomoću ovog izraza, autori su odredili predviđenu specifičnu energiju svakog uzorka na osnovu njihovih fizikalno-mehaničkih svojstava i prikazali rezultate u tablici 4-1:

Tablica 4-1: Predviđene i izmjerene vrijednosti specifične energije koristeći model višestruke linearne regresije (Khoshouei i dr. 2020.)

Uzorak	Ulazni podaci				Izmjerena SE	Predviđena SE
	D	Pw	Sfa	PA		
1	2,59	7210	22,2	68,16	19,71	13,68
2	2,63	6777	24,22	67,87	17,1	14,32
3	2,33	5608	0,81	68,14	8,36	5,24
4	2,82	5427	10,47	75,05	18,9	12,29
5	2,59	5637	9,75	72,91	9,45	8,94
6	3,06	7750	25,88	66,05	26,45	24,55
7	2,63	5751	13,47	71,37	9,15	10,82
8	2,58	6133	3,51	83	6,07	4,23

Rezultati su također prikazani i slikom 4-2:



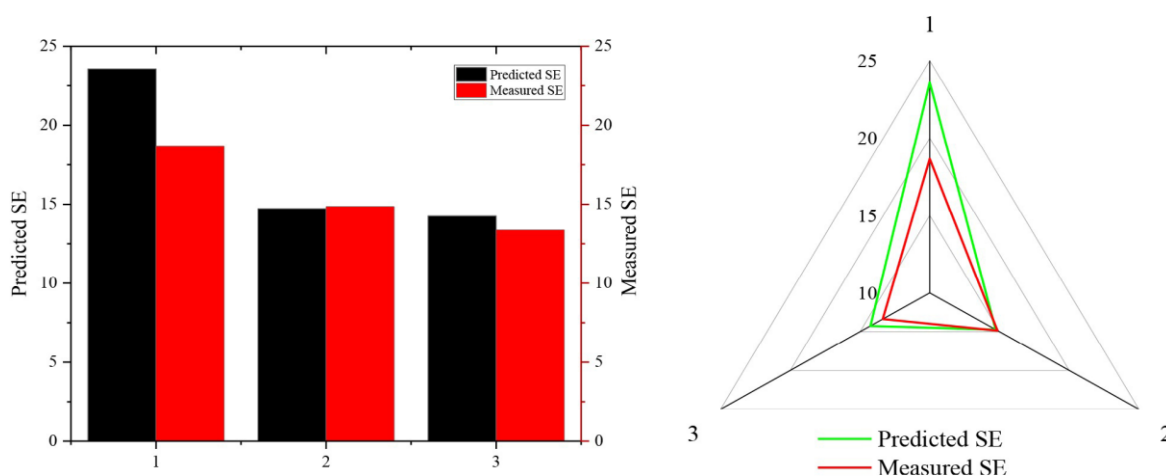
Slika 4-2: Usporedba predviđene i izmjerene specifične energije (Khoshouei i dr., 2020.)

U idealnom slučaju bi predviđena i izmjerena specifična energija bile jednake. Odnosno dobiveni pravac regresije bi se pružao simetrično od ishodišta koordinatnog sustava (Sve točke bi bile na pravcu  $X=Y$ ). U praksi to nije slučaj zbog različitih radnih uvjeta.

Da je ovaj model precizan, govori nam odnos pravaca predviđene i izmjerene specifične energije, to jest, njihova „blizina“. Zbog dodatne provjere i potvrđivanja preciznosti ovog modela, tri uzorka su rezervirana da bi ih upotrijebili kao probne podatke u novom testu predviđanja specifične energije i uspoređivanja tih rezultata sa stvarnim vrijednostima specifične energije (Tablica 4-2, slika 4-3).

Tablica 4-2: Izmjerena i predviđena SE za testne uzorke korištenjem linearne regresije (Khoshouei i dr., 2020.)

Uzorak Stijene	Parametri				Izmjerena SE	Predviđena SE	R <sup>2</sup>
	D	Pw	Sfa	PA			
1	2,59	7210	22,2	68,16	19,71	13,68	0,9474
2	2,63	6777	24,22	67,87	17,1	14,32	
3	2,33	5608	0,81	68,14	8,36	5,24	



Slika 4-3: Usporedba izmjerene i predviđene SE (Khoshouei i dr., 2020.)

Autori su zaključili kako je specifična energija rezanja u pozitivnoj korelaciji sa gustoćom, habanjem i brzinom P-valova dok je u suprotnoj vezi sa snagom posmaka stroja. Također, ova usporedba pokazuje kako se ovim modelom predviđela specifična energija rezanja novih uzoraka sa korelacijskim faktorom  $R^2=0,9474$  što dokazuje mogućnost vrlo preciznog predviđanja specifične energije rezanja samo na osnovu fizičko-mehaničkih značajki stijene i reznog stroja.

#### 4.2. Karakteristike dijamantne žice

Zanimljivo otkriće testiranja koje su proveli Bagherpour i suradnici jest činjenica da rezanje srednjih veličina blokova daje najbolje rezultate u postizanju optimalnog kapaciteta rezanja.

Naime, autori su prethodno sve eksploatirane blokove podijelili prema veličini na;

- Manje blokove (48 do 64 m<sup>2</sup>)
- Srednje blokove (70 do 90 m<sup>2</sup>)
- Velike blokove (120 do 144 m<sup>2</sup>)

Veza između veličine blokova i utrošenih perli prikazana je u tablici 4-3.

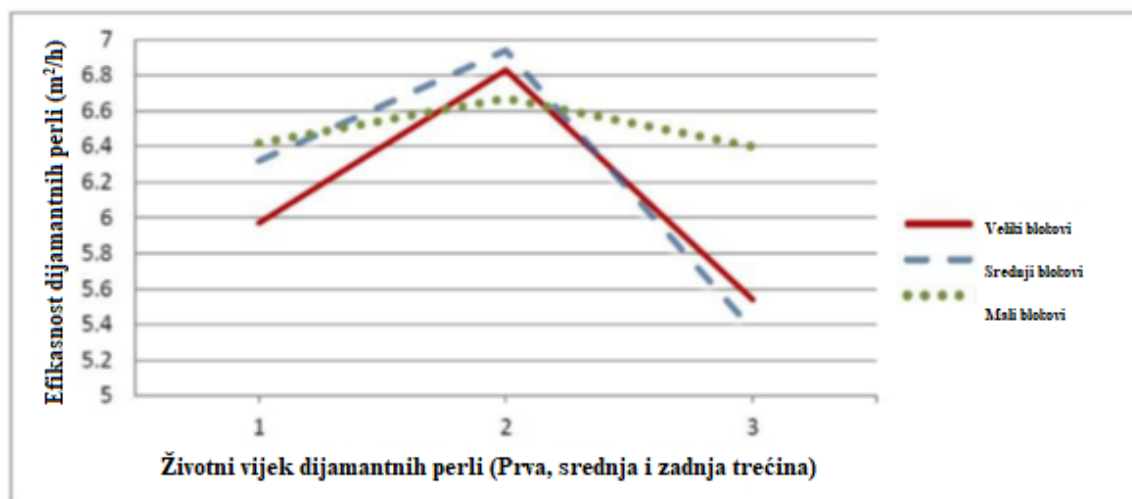
Tablica 4-3: Odnos između utrošenih dijamantnih perli, brzine rezanja i kapaciteta rezanja perli (Bagherpour i dr., 2014.)

Broj rezanja	Broj perli	Površina rezanja (m <sup>2</sup> )	Ukupna površina rezanja	Ukupno vrijeme rezanja	Efikasnost perli/ brzina rezanja (m <sup>2</sup> /h)	Kapacitet rezanja perli
69	1530	120 do 144	9180	1510,75	6,1	6
98	1260	70 do 90	7800	1236,5	6,3	6,19
122	1140	48 do 64	6968	1072,5	6,5	6,11

Još jedno otkriće je opovrgavanje teorije prema kojoj je efikasnost i brzina rezanja dijamantnih perli najveća u prvoj trećini njihovog vijeka trajanja. To se može zaključiti iz rezultata istraživanja u kojem se mjerila brzina rezanja perli za svaku trećinu njihovog vijeka trajanja posebno. Podaci nam govore kako je upravo druga trećina vijeka trajanja perli ona u kojoj su perle najefikasnije, za razliku od prve i zadnje trećine. Logički bi se dalo zaključiti kako bi najveća efikasnost bila u prvoj trećini vijeka trajanja dok su perle još nove, međutim autori sumnjaju da su „glavni krivci“ za ovakvo ponašanje perli upravo oštri dijelovi novopostavljenih perli, osobito njihovi kutovi.

Rezultati su najbolje prikazani na slici 4-4.

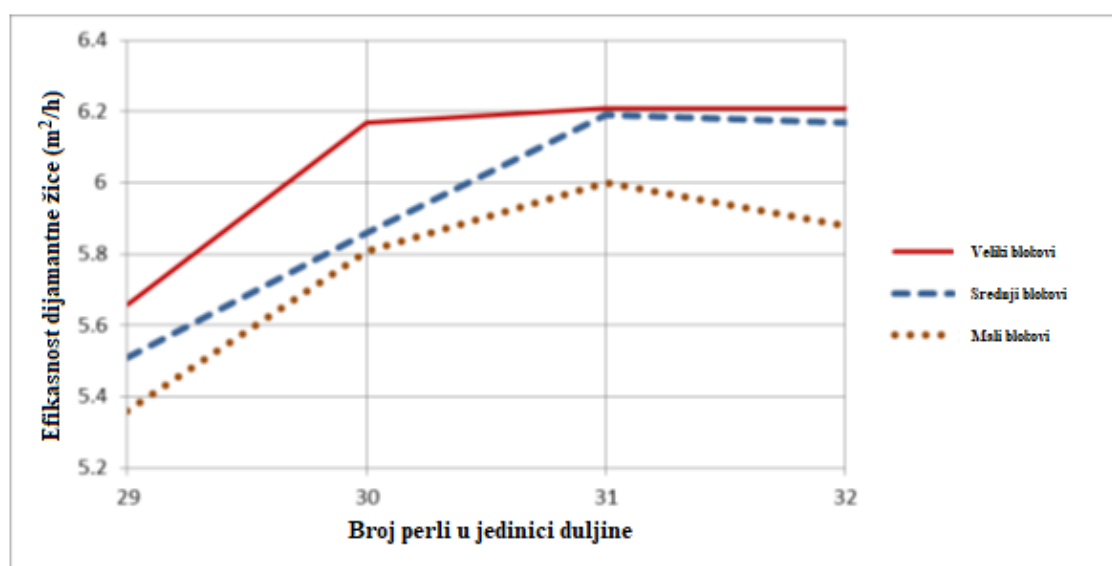




Slika 4-4: Učinak dijamančnih perli u životnom vijeku za blokove različitih veličina (Bagherpour i dr., 2014.)

Slika 4-4 također potvrđuje prethodnu tvrdnju o najvećoj efikasnosti kod blokova srednje veličine, iako manji i veliki blokovi po rezultatima nisu daleko.

Rezultati glavnog istraživanja predstavljena su na slici 4-5:



Slika 4-5: Efikasnost dijamančne žice sa različitim brojem perli (Bagherpour i dr., 2014.)

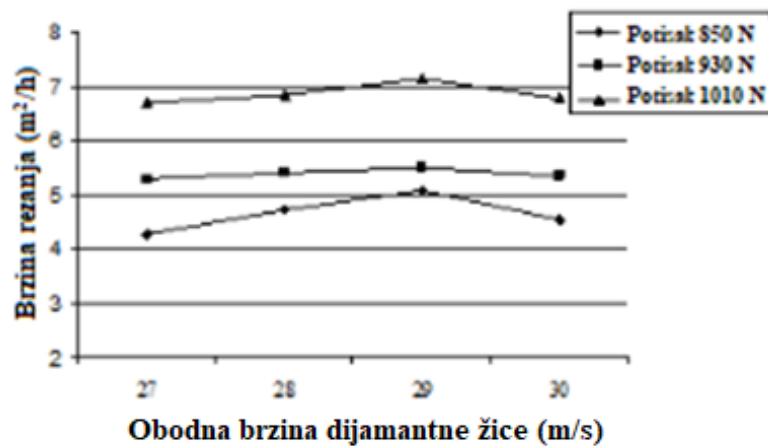
Rezultati ispitivanja optimalnog broja dijamančnih perli na jedinici duljine pokazuju najveću efikasnost perli kod velikih i srednjih blokova, i to kad je na jedan metar žice složena točno 31 dijamančna perla. Isto tako se može primijetiti da za velike i srednje blokove visoku efikasnost ima i 30, odnosno 32 perle na metar dužni dok je za manje blokove efikasnost

najviša samo kod 31 perle po metru dužnom žice. Bagherpour i suradnici (2014.) navode kako je razlog ovome smanjenje krutosti žice i zbijanja perli kako se dimenzije blokova povećavaju.

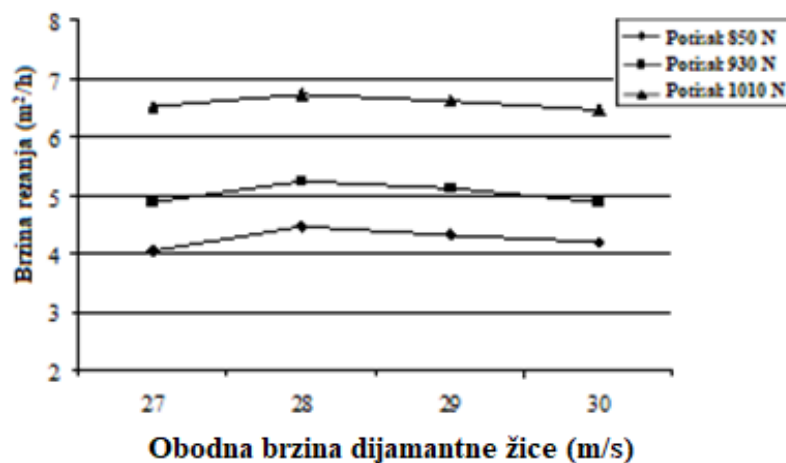
Naime, ako se dogodi da je broj perli po metru dužnom žice veći od optimalnog, opruge postaju zbijenije i time se povećava krutost žice. U suprotnom slučaju se povećava mogućnost pucanja žice zbog većeg razmaka među komponentama. Time se također smanjuje i sama efikasnost.

#### 4.3. Utjecaj radnih parametara

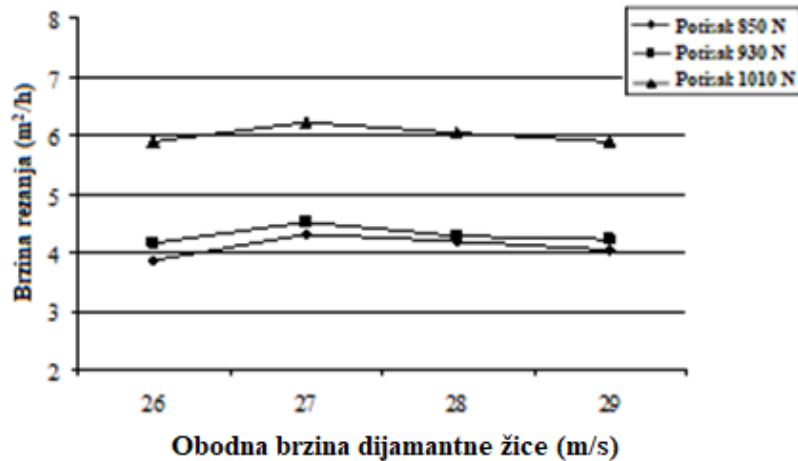
Rezultati studije koju su proveli Jain i suradnici a koja se odnosi na vezu obodne brzine i efikasnosti rezanja, grafički je prikazana slikama 4-6, 4-7 i 4-8. Slika 4-6 se odnosi na meke mramore, slika 4-7 na srednje tvrde i slika 4-8 na tvrde mramore.



Slika 4-6: Veza obodne brzine i efikasnosti rezanja za meke mramore (Jain i dr., 2013.)



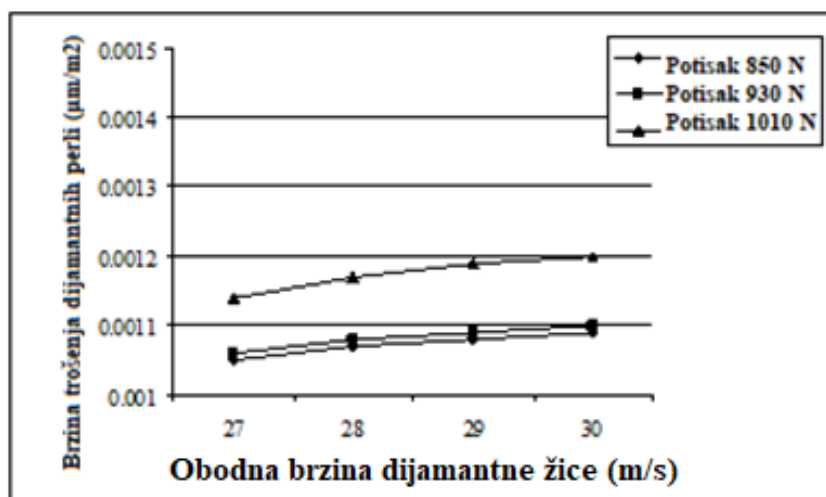
Slika 4-7: Veza obodne brzine i efikasnosti rezanja za srednje tvrde mramore (Jain i dr., 2013.)



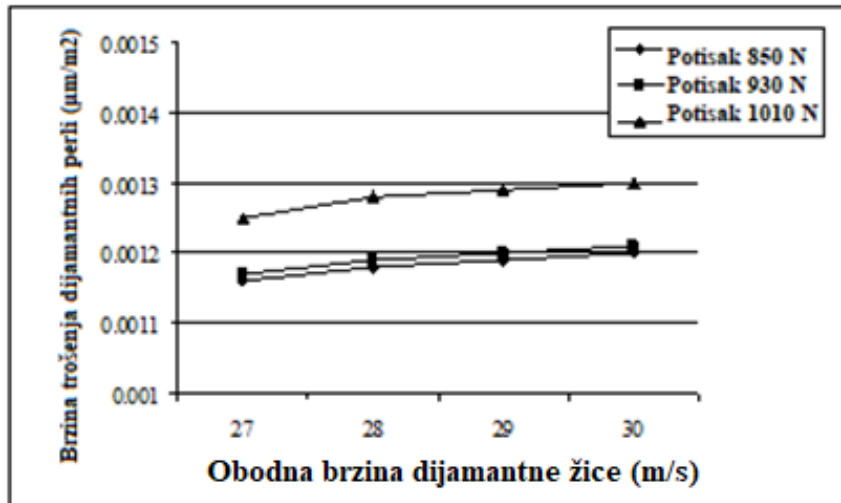
Slika 4-8: Veza obodne brzine i efikasnosti rezanja za tvrde mramore (Jain i dr., 2013.)

U svim grupama uzoraka primjećuje se ista pojava. To jest, zaključuje se kako se efikasnost rezanja povećava rastom sile pritiska. Ono što se razlikuje jest optimalna obodna brzina za svaku skupinu uzoraka. Za meke stijene ona iznosi 29 m/s, za srednje tvrde 28 m/s, dok za tvrde mramore ona iznosi 27 m/s.

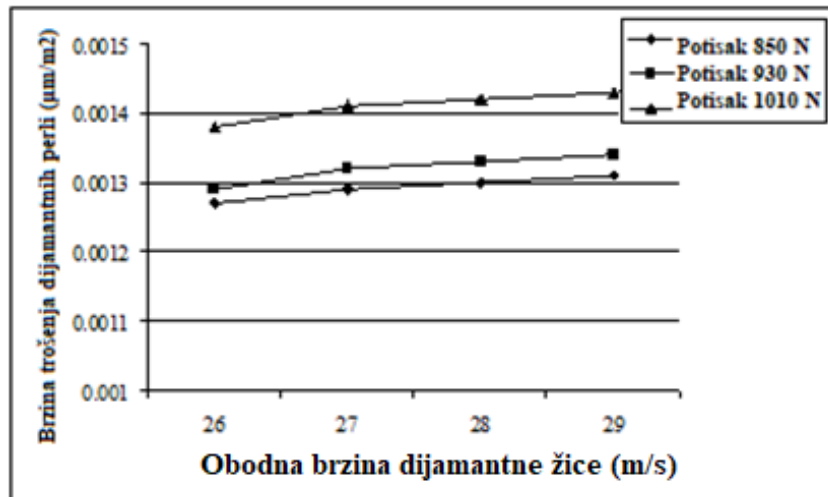
Drugi dio istraživanja se odnosio na vezu obodne brzine i brzine trošenja dijamentnih perli i rezultati tog istraživanja su prikazani na slikama 4-9, 4-10 i 4-11. Rezultati se odnose na meke, srednje tvrde i tvrde mramore, tim redoslijedom.



Slika 4-9: Veza obodne brzine i brzine trošenja perli za meke mramore (Jain i dr., 2013.)



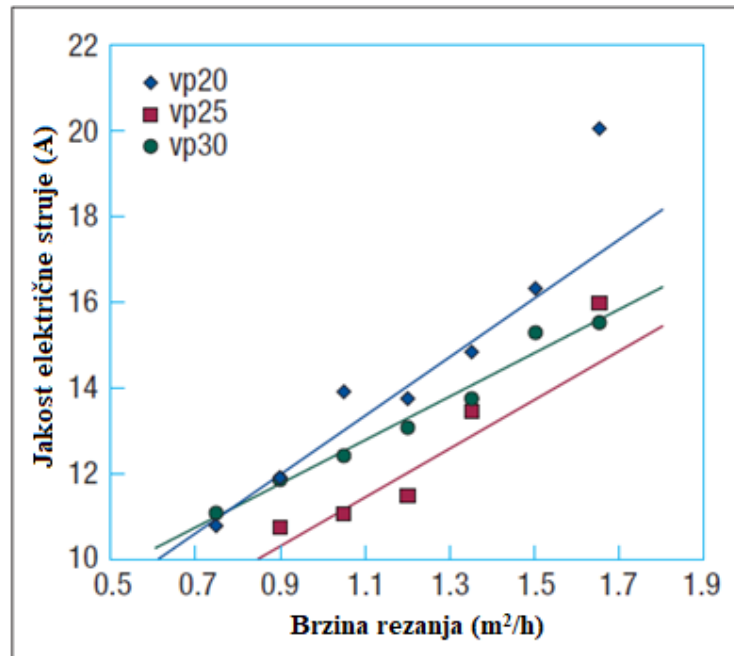
Slika 4-10: Veza obodne brzine i brzine trošenja perli za srednje tvrde mramore (Jain i dr., 2013.)



Slika 4-11: Veza obodne brzine i brzine trošenja perli za tvrde mramore (Jain i dr., 2013.)

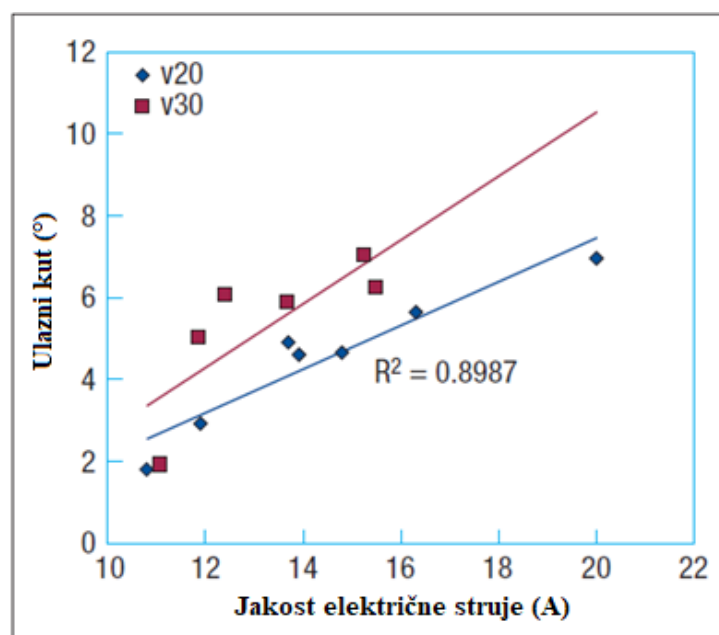
I u ovom slučaju svaka skupina uzoraka jednako reagira na promjenu parametara. Povećanjem obodne brzine raste postotak trošenja dijamančnih perli. Međutim, postotak trošenja je mnogo veći pri većoj sili potiska, odnosno pri sili od 1010 N. Također se vidi kako je trošenje perli najveće kod tvrdih mramora. Razlog je veća prisutnost kvarca u tvrdim dolomitnim mramorima.

Rezultati istraživanja koje su proveli Cai i suradnici (2007.) nam približe objašnjavaju kako radni parametri utječu na sam utrošak električne energije. Slika 4-12 prikazuje odnos brzine rezanja i utrošene električne energije pri različitim obodnim brzinama. Vidljivo je kako je utrošak energije najveći pri najmanjoj obodnoj brzini žične pile.



Slika 4-12: Veza utroška energije i brzine rezanja (Cai i dr., 2007.)

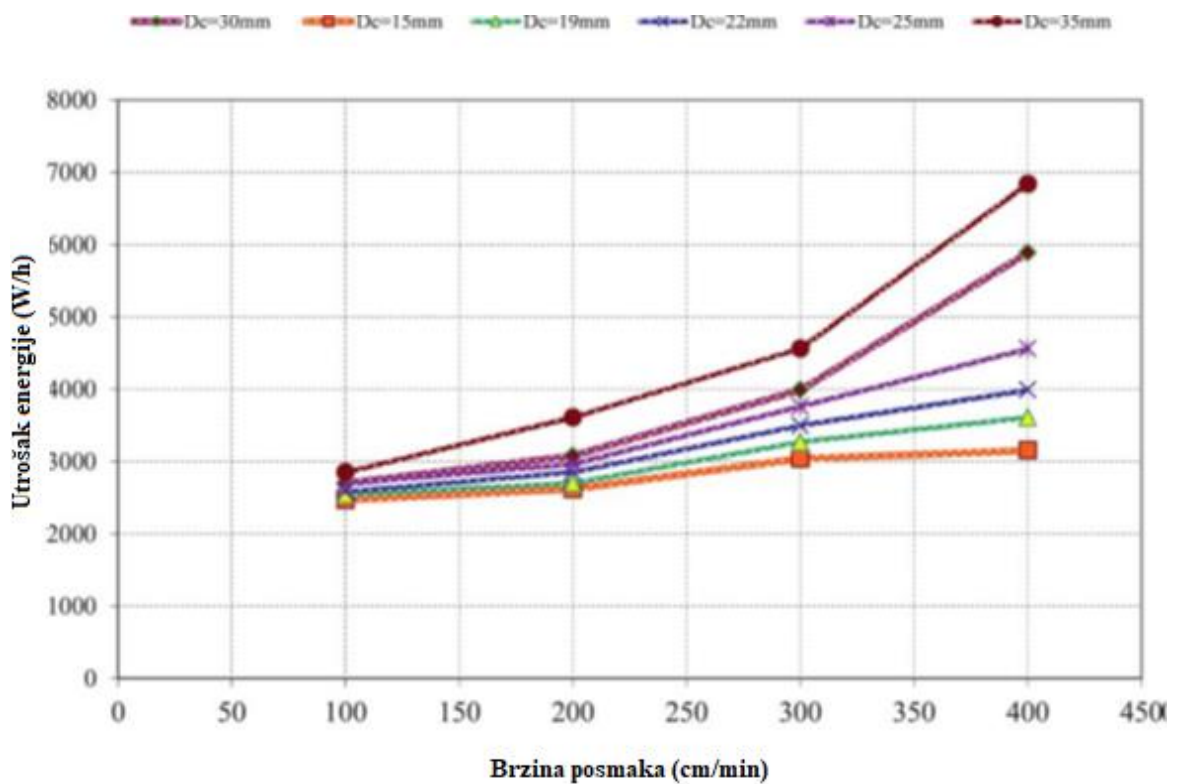
Slika 4-13 pokazuje vezu između utroška energije i ulaznog kuta dijamantne žice u stijenu.



Slika 4-13: Veza utroška energije i ulaznog kuta žice (Cai i dr., 2007.)

Može se primijetiti gotovo linearan odnos između utroška električne energije i ulaznog kuta žice. Zbog toga se da zaključiti kako će pri jednakom ulaznom kutu žice, utrošak energije biti manji pri većim obodnim brzinama.

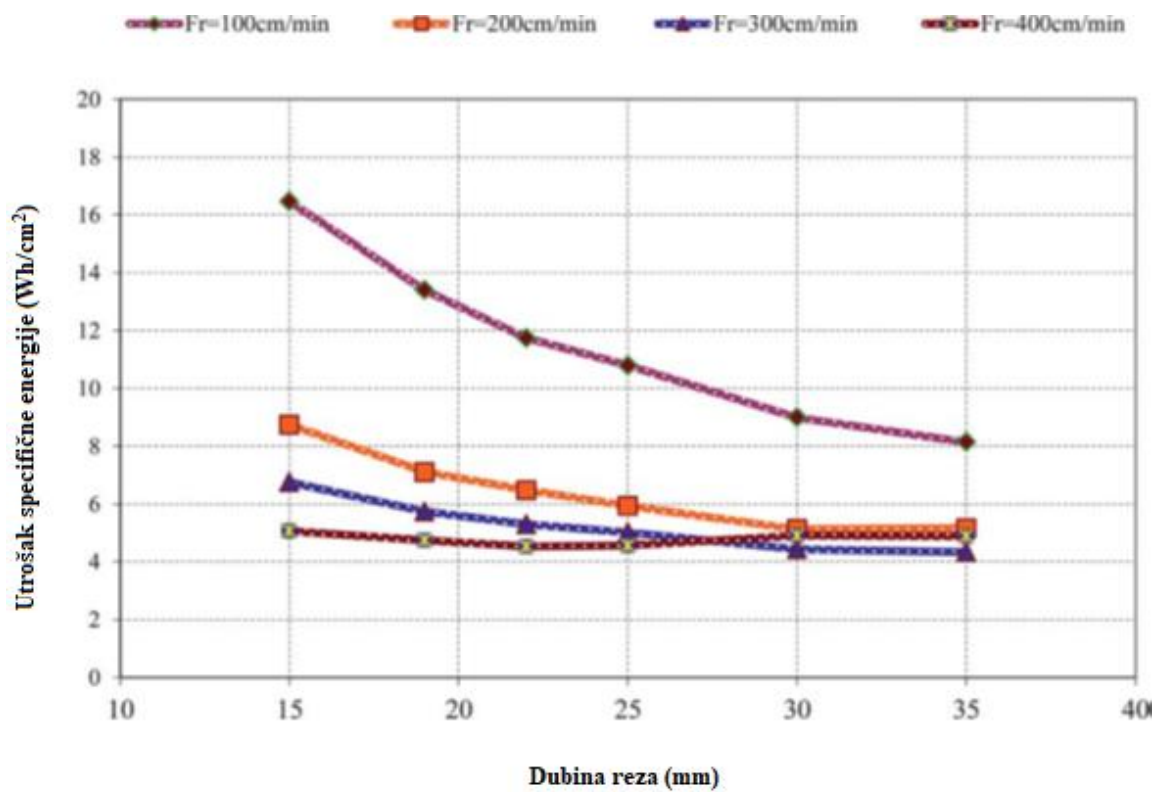
Slični fenomeni se pojavljuju i u rezultatima studije koje su proveli Mikaeil i suradnici (2018.) pri rezanju dijamantnim diskom. U ovom slučaju pri konstantnoj obodnoj brzini, utrošak energije raste porastom dubine rezanja ili porastom brzine posmaka. Na slici 4-14 se vidi ponašanje krivulja pri različitim dubinama rezanja.



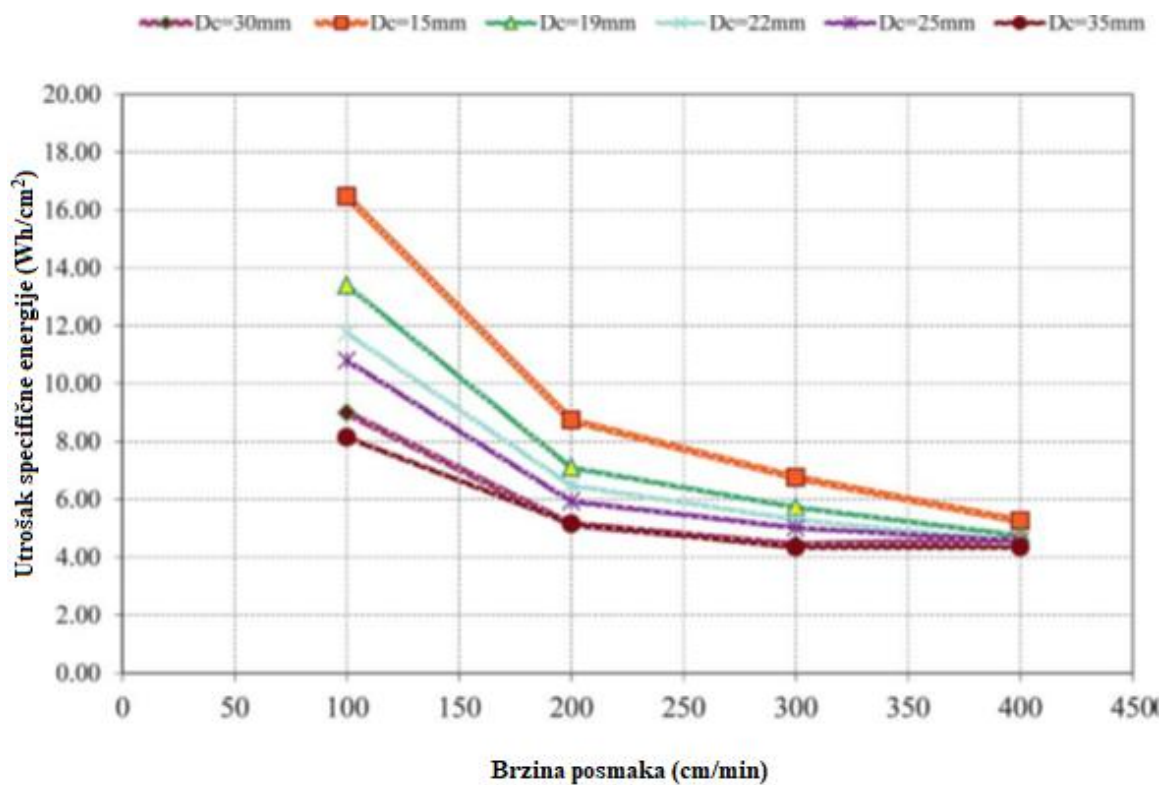
Slika 4-14: Promjena utroška energije u odnosu na brzinu posmaka pri različitim dubinama reza (Mikaeil i dr., 2018.)

Autori smatraju kako je za ovakav porast krivulja najodgovornije veliko opterećenje na stroj prilikom rezanja.

S druge strane, na slikama 4-15 i 4-16 je prikazano kako vrijednosti specifične energije padaju porastom brzine posmaka i dubine reza, odnosno približavaju se svojim optimalnim vrijednostima.



Slika 4-15: Promjena specifične energije u odnosu na dubinu reza pri različitim brzinama posmaka (Mikaeil i dr., 2018.)



Slika 4-16: Promjena specifične energije u odnosu na brzinu posmaka pri različitim dubinama reza (Mikaeil i dr., 2018.)

## 5. ZAKLJUČAK

Na količinu utroška električne energije pri radu dijamantne žične pile djeluje niz parametara na koje se većinom može utjecati. Zato je cilj ovog rada bio odrediti one najvažnije i pobliže objasniti njihov utjecaj na utrošak električne energije i efikasnost rezanja.

Sintezom dosadašnjih istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Fizikalno-mehaničke karakteristike koje imaju najveći utjecaj na specifičnu energiju rezanja su: Gustoća stijene, brzina P-valova i Schimazek-ov faktor habanja.
- Metodom višestruke linearne regresije moguće je predvidjeti vrijednost specifične energije na temelju fizikalno-mehaničkih karakteristika stijene i karakteristika reznog stroja.
- Rezanjem blokova srednje veličine koristeći dijamantnu žicu s optimalnim brojem perli od 31 perle po metru dužnom, postiže se najveća efikasnost rezanja.
- Većim obodnim brzinama pile postiže se manji utrošak električne energije ali se povećava trošenje dijamantnih perli

Za razliku od lančane sjekačice i kružnih dijamantnih pila, dijamantna žična pila nije toliko česta tema istraživanja utroška energije. Postoji mogućnost provođenja dodatnih laboratorijskih i terenskih istraživanja u kojima će se preciznije izmjeriti direktan utrošak energije pri radu dijamantne žične pile. Ovaj rad može poslužiti kao smjernica za obavljanje daljnjih istraživanja sa ciljem postizanja optimalnih uvjeta potrošnje energije ne samo prilikom rada dijamantne žične pile, već i pri svim ostalim rudarskim zahvatima.



## 6. LITERATURA

Almasi, S. N., Bagherpour, R., Khademian, A., Mikaeil, R. (2015). *Influence of cutting wire tension on travertine cutting rate*. Proceedings of the 24th International Mining Congress of Turkey, IMCET 2015. 1096-1102.

Bagherpour, R., Khademian, A., Almasi, S. N., Aalaei, M. (2014). *Optimum cutting wire assembly in dimension stone quarries*. 50. 1-8.

Cai, O., Careddu, N., Mereu, M., Mulas, I. (2007). *The influence of operating parameters on the total productivity of diamond wire in cutting granite*. Industrial Diamond Review. 67.

Del Valle Vega R., Rai G. A., *Multivariate Linear Regression*, Brilliant.org

URL: <https://brilliant.org/wiki/multivariate-regression/> 20.8.2021.

Dunda, S., Kujundžić, T., 2003. *Digitalni udžbenik: Eksploatacija arhitektonsko građevnog kamena*. RGN fakultet. Zagreb.

Energetski Institut Hrvoje Požar, 2020., *Energija u Hrvatskoj 2019.*,

URL: [http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2021/01/1\\_Energija\\_u\\_Hrvatskoj\\_2019-2\\_compressed-1.pdf%20](http://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2021/01/1_Energija_u_Hrvatskoj_2019-2_compressed-1.pdf%20) 8.6.2021.

Jain, S.C., Rathore, S.S., Jain H.K., 2013. *Investigation The Effects Of Machine Parameters On Cutting Performance Of Diamond Wire Saw Machine In Cutting Of Marble Bench*, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Volume 02, Issue 04 (April 2013.)

Khoshouei, M., Jalalian, M.H., Bagherpour, R. (2020). *The effect of geological properties of dimension stones on the prediction of Specific Energy (SE) during diamond wire cutting operations*. Rudarsko-geološko-Naftni Zbornik (The Mining-Geological-Petroleum Bulletin), 35(3).

Mikaeil, R., Sohrabian, B., Ataei, M. 2018. *The study of energy consumption in the dimension stone cutting process*. Rudarsko Geološko Naftni Zbornik 33(4):65-71

Mirahmadi, M., Tabaei, M., Dehkordi, M. S. (2017): *Estimation of the specific energy of TBM using the strain energy of rock mass, case study: Amir-Kabir water transferring tunnel of Iran*. Geotechnical and Geological Engineering, 35,5, 1991-2002.

Norling, R. G. (1971). *Mechanical properties and the composition of some Swedish natural stone types and their effect on cutting results*. Paper presented at the Diamond in the Construction and Stone Industry, Germany.

Wu, H. (2016): *Wire sawing technology: A state-of-the-art review*. Precision engineering, 43, 1-9.

Yurdakul, M., Gopalakrishnan, K., Akdas, H. (2014): *Prediction of specific cutting energy in natural stone cutting processes using the neuro-fuzzy methodology*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 67, 127-135.



KLASA: 602-04/21-01/111  
URBROJ: 251-70-11-21-2  
U Zagrebu, 13.09.2021.

Šime Vrandečić, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/111, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 26.04.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### UTROŠAK ELEKTRIČNE ENERGIJE PRI RADU DIJAMANTNE ŽIČNE PILE

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Doc.dr.sc. Tomislav Korman nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Doc.dr.sc. Tomislav Korman

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)