

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

Tomislav Korman

Rudarsko-geološko-naftni fakultet, prof. dr. sc.

Trpimir Kujundžić

Rudarsko-geološko-naftni fakultet, prof. dr. sc.

Šime Vrandečić

B.Sc ing. rud.

Sažetak: Danas su dijamantne žične pile nezamjenjivi strojevi u eksploataciji i obradi arhitektonsko - građevnog kamena. Brzina rezanja, utrošak energije i intenzitet trošenja dijamantnih perli najvažniji su čimbenici za procjenu učinkovitosti dijamantne žične pile. Parametri koji utječu na učinkovitost dijamantna žične pile mogu se podijeliti na kontrolirane i nekontrolirane. Na nekontrolirane parametre nije moguće izravno utjecati, a povezani su s inženjerskim svojstvima stijene poput čvrstoće, tvrdoće i abrazivnosti. Kontrolirani parametri povezani su s radnim veličinama i tehničkim karakteristikama stroja. Utrošak energije i trajnost dijamantne žice izravno će ovisiti o karakteristikama stroja i konstrukcijskim parametrima dijamantne žice kao što je, snaga pogonskog motora, promjer pogonskog kotača, veličina dijamanta i promjer dijamantne žice. Pored navedenog, značajan utjecaj imaju i radne veličine dijamantne žične pile kao što su brzina rezanja, kut rezanja, napetost žice, površina reza i količina vode za hlađenje. Na temelju dosadašnjih istraživanja, u radu je analiziran utjecaj navedenih parametara na utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile.

Ključne riječi: rudarstvo, arhitektonsko građevni kamen, eksploatacija, dijamantna žična pila, učinak

Energy consumption and wear rate of diamond beads during operation of a diamond wire saw

Abstract: Diamond wire saws are indispensable machines for the extraction and processing of dimension stones. The cutting speed, energy consumption and wear rate of the diamond beads are the most important factors in assessing the efficiency of a diamond wire saw. The parameters that influence the efficiency of the diamond wire saw can be divided into controlled and uncontrolled parameters. Uncontrolled parameters cannot be influenced directly and are related to the rock types and their properties such as strength, hardness and abrasiveness. Controlled parameters are related to the operating parameters and technical characteristics of the machine. The energy consumption and the service life of the diamond wire are directly related to the characteristics of the machine and the design of the diamond wire, such as the power of the drive motor, the diameter of the drive wheel, diamond grit size and the diameter of the wire. The operating parameters of the diamond wire saw, such as cutting speed, cutting surface, cutting angle, wire tension and cooling water flow, also have a significant influence. Based on previous studies, the influence of the above parameters on the consumption of energy and wear rate of diamond beads in the operation of a diamond wire saw was analyzed.

Key words: mining, dimension stone, extraction, diamond wire saw, efficiency

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

1. UVOD

Piljenje kamena dijamantnom žičnom pilom danas je afirmirana i raširena tehnologija eksploatacije arhitektonskog kamena. Dijamantne žične pile omogućuju piljenje različitih vrsta rezova, uključujući vertikalne, kose i horizontalne rezove. Uz to, dijamantna žična pila omogućuje rezanje različitih vrsta kamena, uključujući mramor, granit, vapnenac i ostale tvrde stijene. U kombinaciji s lančanim sjekačicama, dijamantne žične pile su nezamjenjivi strojevi u eksploataciji i obradi arhitektonsko-građevnog kamena. Učinkovitost dijamantne žične pile u dobivanju blokova arhitektonskog kamena ovisi o pravilnom odabiru konstrukcijskih i tehnoloških parametara stroja, dijamantne žice te uvjeta i načina eksploatacije specifične vrste stijene, [1].

Brzina rezanja, utrošak energije i dijamantnih perli najvažniji su čimbenici za procjenu učinkovitosti dijamantne žične pile te izravno ovise o otporima prilikom rezanja. Dio tih otpora ovisi o značajkama stijenske mase na koje nije moguće izravno utjecati. Čvrstoća, tvrdoća i abrazivnost su ključna inženjerska svojstva stijene koja utječu na učinak piljenja i utrošak perli. Utrošak energije i trajnost dijamantne žice izravno će ovisiti o karakteristikama stroja i konstrukcijskim parametrima dijamantne žice. Izborom konstrukcijskih parametara kao što su snaga pogonskog motora, promjer pogonskog kotača, veličina i koncentracija dijamantata te promjer i broj perli moguće je značajno utjecati na učinkovitost piljenja. Pored navedenog, značajan utjecaj imaju i radne veličine dijamantne žične pile kao što su brzina rezanja, kut rezanja, napetost žice, položaj stroja, površina reza i količina vode za hlađenje, [2].

Budući da troškovi piljenja dijamantnom žičnom pilom čine veliki udio u troškovima eksploatacije, važno je poznavati i odabrati optimalne radne veličine stroja kako bi se povećala učinkovitost i smanjili troškovi piljenja. Glavni cilj ovog rada je, analizom dosadašnjih istraživanja, utvrditi glavne čimbenike koji utječu na utrošak električne energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile te izložiti smjernice za povećanje učinkovitosti rada dijamantne žične pile.

2. RADNE I KONSTRUKCIJSKE VELIČINE DIJAMANTNE ŽIČNE PILE

Dijamantna žična pila sastoji se od nekoliko glavnih dijelova, uključujući pogonski dio, upravljačku jedinicu i dijamantnu žicu kao rezni element (slika 1). Pogonski dio zajedno sa zamašnjakom smješten je u kućište koje je postavljeno na metalne kotače kako bi se stroj mogao pomicati duž tračnica tijekom rada. Gibanje stroja se ostvaruje pomoću zupčanika i zupčaste letve između tračnica, čime se ujedno osigurava napetost dijamantne žice. Snaga pogonskog motora najčešće varira između 30 kW i 75 kW, a odabir snage ovisi o površini reza i otporu piljenja. Pored pogonskog kotača, na okviru se nalaze i dva orijentacijska kolotura koji sprječavaju ispadanje žice tijekom rada i povećavaju kut obuhvata dijamantne žice. Zakretanjem poluosovine, pogonski kotač se može postaviti u bilo koji položaj što omogućuje piljenje horizontalnih i vertikalnih rezova. Na kotaču se nalazi i zaštitna guma koja služi za zaštitu kotača i žice od trošenja te osigurava potrebni koeficijent trenja. Komandni dio je odvojen od pogonskog dijela i obično se postavlja nekoliko metara bočno od stroja radi zaštite radnika.

Kod piljenja primarnog bloka dijamantom žičnom pilom nužno je na banku imati barem dvije slobodne vertikalne površine. Prije početka piljenja potrebno je obaviti pripreme radnje koje uključuju bušenje dviju 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. Gibanje žice se ostvaruje preko pogonskog kotača kojeg pokreće zamašnjak spojen s pogonskim motorom, a prijenos sile sa kotača na dijamantnu žicu se postiže trenjem. Za vrijeme piljenja stroj se po tračnicama odmiče od rezne površine, konstantno osiguravajući napetost žice, a tijekom piljenja potrebno je osigurati konstantan

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

dotok vode. Napetost žice ostvaruje se motorom za posmak stroja pri čemu vučna sila mora biti usklađena s otporima piljenja. Kod suvremenih pila, regulacija napinjanja žice i obodna brzina žice automatski se regulira ovisno o otporima piljenja.



Slika 1. Dijamantna žična pila i upravljačka jedinica

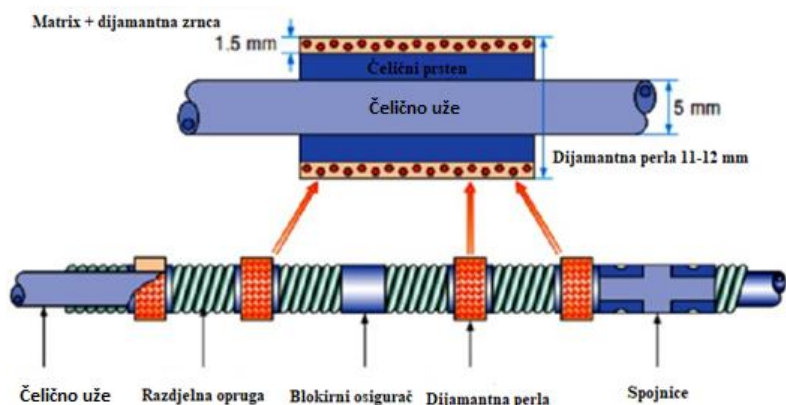
2.1 Konstrukcija dijamantne žice

Dijamantna žica je ključni rezni element dijamantne žične pile, čija konstrukcija ima značajan utjecaj na učinkovitost piljenja. Sastoji se od čeličnog užeta na koje su postavljene dijamantne perle, čelični zaštitni prstenovi, blokirni osigurači, razdjelne opruge i muško-ženske spojnice (slika 2).

Čelično uže predstavlja važan dio reznog alata jer se na njega nanizaju svi ostali dijelovi, stoga je izuzetno bitno da uže ne puca. Ono mora biti otporno na koroziju, fleksibilno i posjedovati visoku čvrstoću. Promjer užeta obično iznosi oko 5 mm, što omogućava lagan prolazak kroz dijamantne perle koje imaju isti unutarnji promjer. Najčešće korišteno uže od 61 žice je dovoljno savitljivo i manje se oštećuje pri savijanju na krutom dijelu gdje se nalazi spojnica. Užad s manje žica su se pokazala prekruta, a ona s više žica su preosjetljiva na uporabu spojnic kod oštih kutova piljenja.

Najbitniji dio žice su dijamantne perle, koje imaju ključnu ulogu u rezanju i utječu na potrošnju i učinkovitost alata. Dijamantne perle mogu biti cilindričnog ili konusnog oblika. Važan dio perle je dijamantni sloj, na kojem se nalaze dijamantna zrnca koja mogu biti povezana na različite načine, različite koncentracije i granulacije. Odabir navedenih parametara najčešće ovisi o vrsti stijene koja se pili. Za vapnence se primjenjuju sinterirane dijamantne perle cilindričnog oblika ukupne dužine 8,5 mm s vanjskim promjerom 10 mm, a unutarnji promjer im je 5 mm. Marka dijamantata je tipa SDA (sintetički) granulacije 40/50 mesha s koncentracijom dijamantata od 35 %, [3].

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

Slika 2. Konstrukcija dijamantne žice, [4]

3. UČINKOVITOST PILJENJA DIJAMANTNOM ŽIČNOM PILOM

Učinak piljenja dijamantnom žičnom pilom izražava se kao omjer ispiljene površine u jedinici vremena, obično u jednom satu. Iz tablice 1. je vidljivo da na učinak piljenja utječe veliki broj parametara, a većina tih parametara međusobno je povezana, što otežava precizno određivanje utjecaja pojedinačnih parametara na učinak piljenja. Neki od tih parametara su nekontrolirani i povezani su s karakteristikama stijene koja se pili, kao što su čvrstoća, tvrdoća, sadržaj vlage, stupanj trošenja, prisutnost pukotina i mineralni sastav te tekstura stijene.

Postoje i parametri koje možemo djelomično kontrolirati, a oni su povezani s radnim veličinama, karakteristikama stroja i konstrukcijom dijamantne žice. To uključuje snagu motora, linearnu brzinu žice, vrstu i broj dijamantnih perli po metru žice, površinu i obliku reza, položaj stroja i potrošnja vode. Prema istraživanjima koje se proveli Almasi i suradnici, svi parametri koji utječu na proces piljenja podijeljeni su u dvije kategorije: kontrolirane i nekontrolirane, [2].

Tablica 1. Utjecajni parametri pri piljenju dijamantnom žičnom pilom, [2]

Nekontrolirani parametri	Kontrolirani parametri	
Svojstva stijena	Konstruktivske veličine	Upravljačke veličine
Fizikalna svojstva	Snaga pogonskog motora	Vještina rukovatelja strojem
Poroznost	Napon	Primijenjene tehnike piljenja
Veličina i oblik čestica	Promjer pogonskog kotača	
Sadržaj kvarca	Vrsta dijamantnih perli	
Upijanje vode	Veličina, tip i gustoća dijamantata	
Stupanj cementacije	Broj perli po metru dužnom	
Mehanička svojstva	Radne veličine	
Čvrstoća	Linearna brzina žice	
Tvrdoća	Sila posmaka	
Abrazivnost	Kut ulaska žice	
Krtost	Dužina žice	
Elastičnost	Vrsta reza	
Strukturna svojstva	Geometrija reza	
Stanje diskontinuiteta	Udaljenost žice od čela	
Mineraloški sastav	Orijentacija i količina vode	
Tekstura		

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

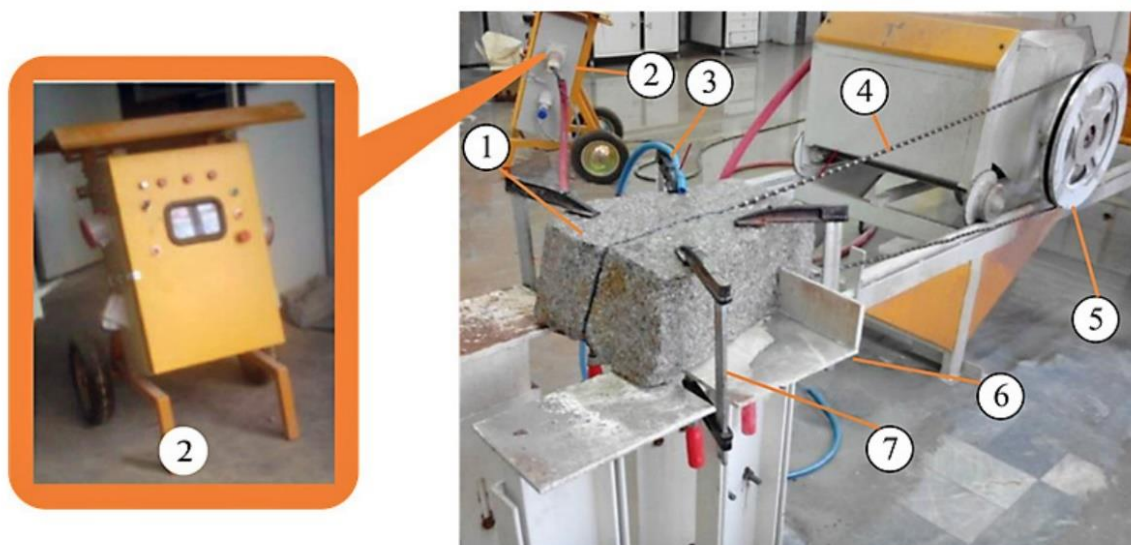
U mekšim stijenama poput travertina i mramora, učinci se kreću u rasponu od 5 m²/h do 12 m²/h. S druge strane, u kamenolomima vapnenca, učinci su nešto manji i obično se kreću od 5 m²/h do 7 m²/h, [5].

3.1 Utjecaj svojstava stijena na učinak piljenja dijamantne žične pile

Kod većine rudarskih strojeva, neovisno o mehanizmu razrušavanja stijenske mase, jednoosna tlačna čvrstoća ima presudan utjecaj na njihov učinak i važan čimbenik u mnogim klasifikacijama stijenskih masa. Dijamantne žične pile u tome pogledu nisu iznimka što potvrđuju i prijašnja istraživanja, [6], [7], [8]. Rezultati navedenih istraživanja pokazuju da se brzina rezanja i učinak piljenja smanjuje s povećanjem čvrstoće stijene koja se pili. Iako u manjoj mjeri, tvrdoća, abrazivnost, krtost također imaju značajan utjecaj na učinak piljenja, [6], [9], [10].

Pri piljenju mramora s izraženom anizotropijom najveći učinak postiže pri piljenju kamena paralelno sa slojevitošću, a najmanji pri piljenju okomito na slojevitost, [7]. Koeficijent teksture također može imati presudan utjecaj na učinak piljenja. Ispitivanjima je ustanovljeno da se kod mramora i vapnenaca povećanjem koeficijenta teksture smanjuje učinak piljenja, [11], [12]. Sadržaj kvarca i modul elastičnosti također mogu imati značajan utjecaj na učinak piljenja, [8].

Khoshouei i sur. 2020. su mjerili energiju piljenja na laboratorijskoj dijamantnoj žičnoj pili. Ispitivanja su provedena na uzorcima diorita, sijenita, gabra, granita i andezita (slika 3.), [13]. Rezultati su pokazali kako su gustoća, abrazivnost te brzina p-valova u najvećoj korelaciji sa specifičnom energijom. Višestrukom regresijskom analizom razvijen je model za procjenu specifične energije rezanja s točnošću od 85,8%.



Slika 3. Laboratorijska dijamantna žična pila: 1 - Uzorak stijene; 2 - Jedinica za mjerenje potrošnje energije; 3 – Dotok vode za hlađenje; 4 - Dijamantna žica; 5 - Pogonski kotač; 6 - Platforma; 7 - Stezaljke za uzorke, [13]

3.2 Utjecaj konstrukcijskih i radnih veličina dijamantne žične pile na učinak piljenja

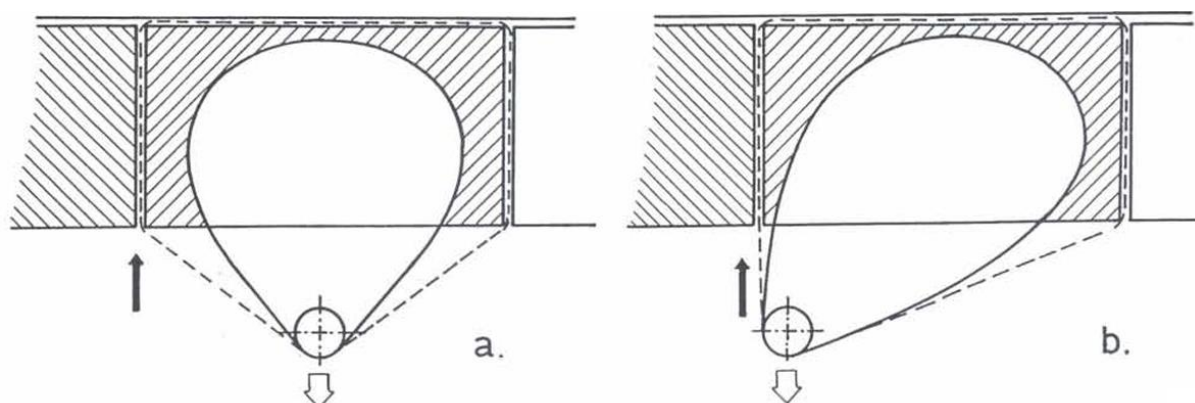
Odabir konstrukcijskih i radnih veličina dijamantne žične pile ima presudan utjecaj na učinak rezanja. Učinak piljenja će ovisiti o otporima uslijed gibanja dijamantne žice tijekom piljenja. Otpori piljenja ovise svojstvima stijene koja se pili ali isto tako i o radnim veličinama poput

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

brzine rezanja, kuta rezanja, napetosti žice, položaja stroja, površine i oblika reza i količini vode za hlađenje. Upravo iz toga razloga je važno primijeniti radne parametre kod kojih će žica polučiti najbolje rezultate.

Jedan od parametra je oblik trajektorije piljenja, koji je određen dimenzijama reza i položajem dijamantne žice u odnosu na površinu piljenja. Dunda i Štambuk, 1994. su analizirali utjecaj položaja pile na učinak piljenja dijamantne žične pile na kamenolomu Zečevo na otoku Braču, [1]. Istraživanjima su ustanovili da se pri bočnom položaju pile (slika 4.b) u odnosu na dužinu horizontalnog reza, postigao 14,6% veći prosječni učinak piljenja nego kod centralnog položaja pile (slika 4.a). Pored navedenog, bočnim postavljanjem pile moguće je s jednim metrom dužine žice ispiliti 12,37 m² više, odnosno ispiljena površina je 29,7% veća nego kod centralnog uz isti utrošak dijamantne žice.

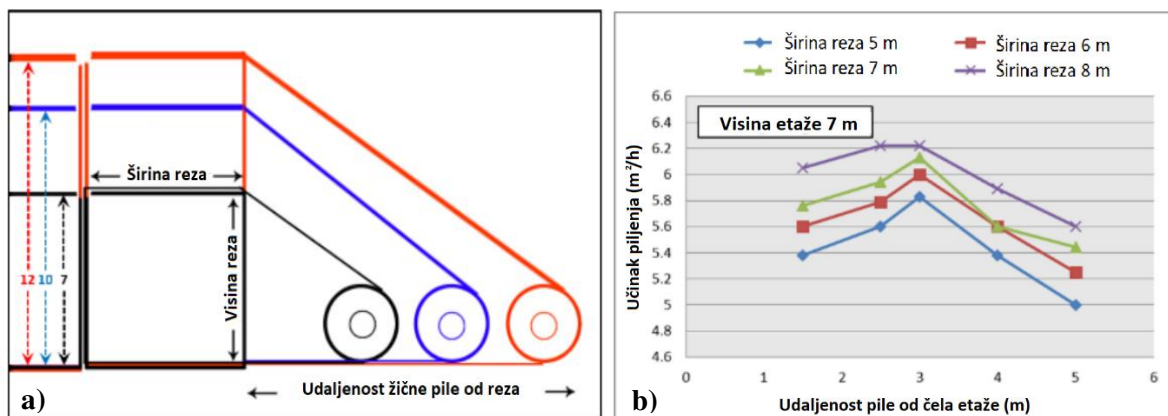


Slika 4. Mogući položaji kod horizontalnog reza, a) centralni položaj, b) bočni položaj pile, [1]

Položaj pile pri izradi vertikalnog reza ne može se bitno mijenjati, stoga oblik trajektorije ovisi prvenstveno o dimenzijama reza. Glavna razlika u obliku trajektorije pri izradi vertikalnog reza proizlazi iz načina odnosno položaja pile pri izradi reza, koji može biti visinski ili dubinski. Kod visinskog načina izrade reza pila se nalazi na etaži na koju se obara blok dok se kod dubinskog reza pila postavlja na etažu koja se pili. Kod dubinskog reza koristi se pomoćni kotač što uzrokuje dodatne otpore na izlazu iz reza. U praksi se pokazalo da se bolji rezultati piljenja postižu kad se pila nalazi na etaži na koju se obara blok. Međutim, taj položaj nije moguće uvijek ostvariti zbog prostornog ograničenja ili drugih organizacijskih ili eksploatacijskih razloga, [1].

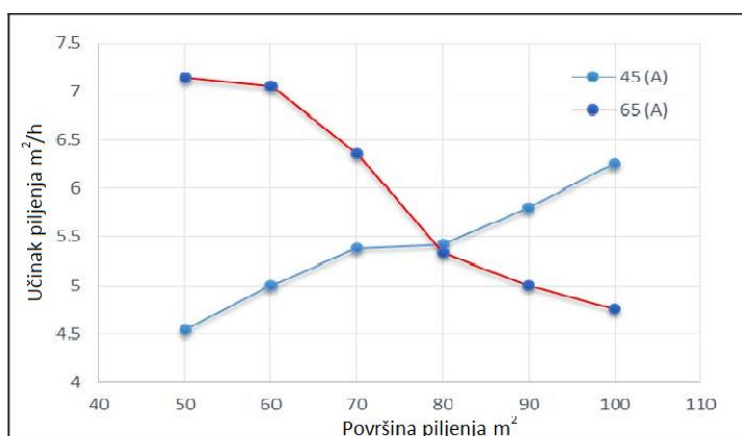
Khademian i suradnici 2015. analizirali su optimalnu udaljenost pile od čela etaže pri piljenju vertikalnih rezova u eksploataciji travertina, [14]. Ispitivanja su proveli na etažama visine od 7 m do 12 m pri udaljenostima pile od čela etaže u rasponu od 1,5 m do 5,5 m (slika 5.a). Širine reza su varirale od 5 do 12 m. Ustanovili su kako se s povećanjem visine čela povećava i optimalna udaljenost pile od radnog čela te kako se najveća učinkovitost piljenja postiže kod najveće širine etaže, neovisno o njenoj visini. Iz (slike 5.b) vidljivo je da optimalna udaljenost pile od čela etaže visine 7 m iznosi 3 m, neovisno o širini reza. Za etaže visine 10 m i 12 m optimalna udaljenost pile od čela iznosi 3,5 m i 4,5 m.

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

Slika 5. a) Geometrija vertikalnog reza ovisno o položaju dijamantne žične pile b) Učinkovitost piljenja za visinu etaže 7 m, [14]

Kako bi piljenje bilo moguće, vučna sila na obodu pogonskog kotača dijamantne žične pile mora savladati sve otpore koji nastaju pri gibanju dijamantne žice. Povećanjem površine piljenja povećava se dužina dijamantne žice, što u konačnici rezultira većim otporima i većom vučnom silom. Upravo stoga je potrebno uskladiti snagu pogonskog motora s otporima piljenja čime se osigurava dovoljna napetost žice. Almasi i suradnici 2015. su odredili optimalnu napetost rezne žice ovisno o površini reza pri piljenju blokova travertina, [2]. Ispitivanja su provedena na površinama od 50 do 100 m² mijenjajući iznos vučne sile pri čemu je struja motora za posmak iznosila od 45 do 65 ampera.

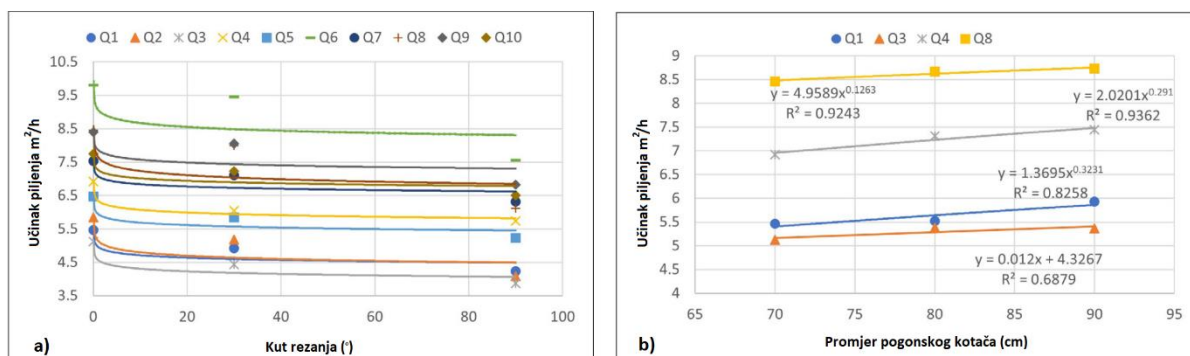


Slika 6. Utjecaj površine piljenja i vučne sile na učinak piljenja, [2]

Kako bi se postigla optimalna učinkovitost, kod piljenja rezova malih površina, manjih od 60 m² svrhovito je povećati vučnu silu ukoliko to dopušta snaga i konstrukcija pile. Kod piljenja rezova većih površina prikladnije je smanjiti napetost žice. Kod površine reza od 80 m² učinak piljenja je jednak za maksimalnu i minimalnu vučnu silu ali zbog sigurnosnih razloga bolje je raditi s manjim posmakom (slika 6).

Rasti i suradnici. 2021. su proveli mjerenja učinka i potrošnje dijamantne žice na kamenolomima vapnenca, travertina i mramora, [6]. Analizom izmjerenih podataka, autori su ustanovili da se povećanjem kuta piljenja u odnosu na čelo etaže, učinak smanjuje dok se istovremeno utrošak dijamantnih perli povećava (slika 7.a). Iz navedenog proizlazi da se veća učinkovitost piljenja postiže pri piljenju vertikalnih nego horizontalnih rezova. Autori su također ustanovili da se povećanjem promjera pogonskog kotača povećava učinak rezanja što je posljedica povećanja brzine (slika 7.b).

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

Slika 7. a) Utjecaj kuta rezanja na učinak piljenja; b) Utjecaj promjera pogonskog kotača na učinak piljenja, [6]

Povećanje promjera pogonskog kotača ima i dodatne prednosti kao što je smanjenje neujednačenosti gibanja dijamantne žice pri čemu se smanjuje kolebanje brzine i ubrzanja. Naime, linearna brzina žice nije kontinuirana već se giba na mahove. Razlog tome je što žica nije u stalnom kontaktu s pogonskim kotačem već se prijenos ostvaruje kontaktom odnosno trenjem perli i pogonskog kotača. Uz konstantu brzinu žice i povećanjem polumjera pogonskog kotača za n puta, smanjiti će se maksimalno ubrzanje za nx^2 puta, a time i dinamička naprezanja uzrokovana neravnomjernim prijenosom gibanja s pogonskog kotača na dijamantnu žicu, [15].

4. POTROŠNJA DIJAMANTNIH PERLI

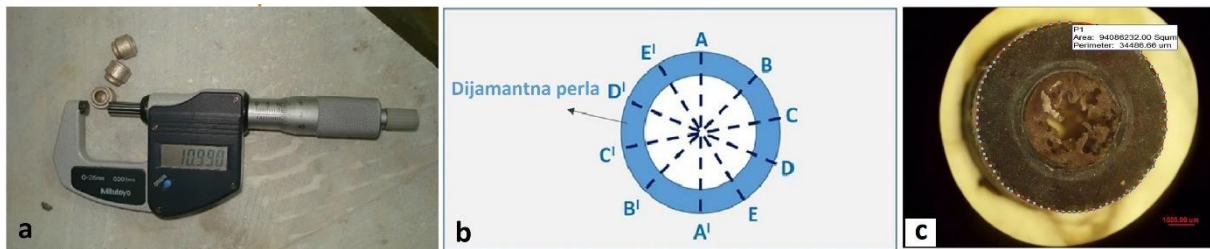
Jedan od ključnih čimbenika koji utječu na ekonomičnost rezanja dijamantnom žicom je trošenje dijamantnih perli. Smanjenjem trošenja dijamantnih perli, smanjit će se i trošak rezanja dijamantnom žicom. Velik broj parametara može utjecati na trošenje dijamantnih perli, među kojima su posebno istaknuta tekstura i inženjerska svojstva stijene te radne veličine dijamantne žične pile. Stoga je pri piljenju kamena vrlo važno primijeniti radne parametre kod kojih će žica polučiti najbolje rezultate. Tijekom rada pile potrebno je kontinuirano pratiti istrošenost perli kako bi se osiguralo učinkovito piljenje. Istrošena žica rezultirat će slabim učinkom i povećanom potrošnjom energije.

Istrošenost dijamantnih perli moguće je odrediti mjerenjem mase perle ili mjerenjem obujma perle prije i po završetku piljenja. Mjerenjem mase perli moguće je odrediti specifičnu potrošnju perli po metru dužnom žice mg/m' ili po jedinici površine ispiljenog reza mg/m^2 . Da bi se odredila specifična potrošnja žice izražena u metrima potrošene žice po m^2 površine piljenja, potrebno je specifičnu potrošnju izraženu u mg/m^2 podijeliti sa ukupnom masom dijamantnog sloja po m' žice. Ukupnu masu dijamantnog sloja po m' žice određuje se na način da se masa dijamantnog sloja jedne prele pomnoži s brojem perli po m' žice, [1].

Nekoliko autora je određivalo istrošenost perli u laboratorijskim uvjetima mjerenjem promjene obujma perli uslijed rezanja, [10], [11], [16], [17]. Za određivanje promjene obujma perli uslijed rezanja koriste se mikrometri ili mikroskopi uz uporabu računalnih programa za obradu slika (slika 8).

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

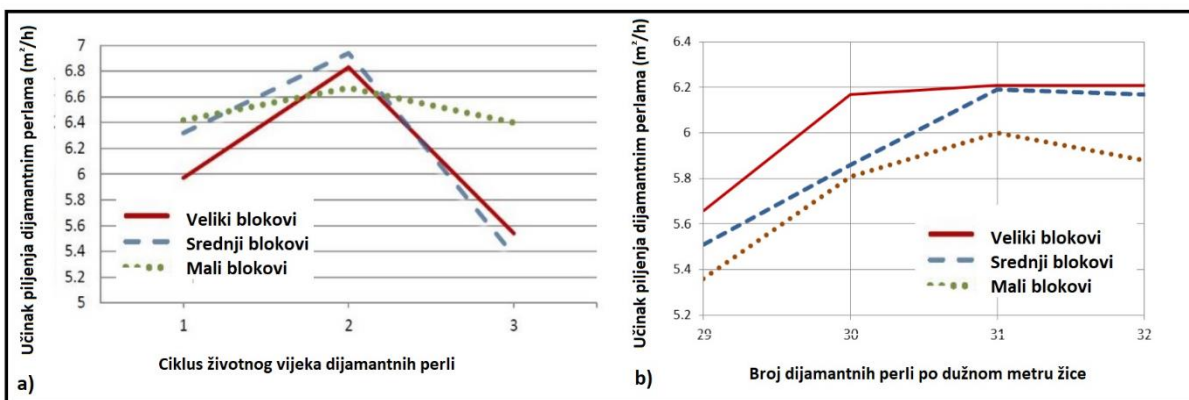


Specifični utrošak perli mjerenjem promjene obujma i površine reza računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$UW = \frac{d_0 - d_1}{A} \quad (1)$$

gdje je: UW jedinica utroška dijamantnih perli ($\mu\text{m}/\text{m}^2$), d_0 je promjer nove dijamantne perle prije rezanja (μm), d_1 je promjer potrošene prele nakon rezanja (μm), i A (m^2) površina reza ispiljena tijekom ispitivanja.

U kamenolomu travertina u Iranu istraživanjem je utvrđeno da na optimalni učinak piljenja dijamantnom žičnom pilom nedvojbeno utječe broj perli po metru dužnom žice pri čemu se najveći učinak ostvaruje s 31 perlom po metru dužnom i to u srednjoj trećini radnog vijeka žice (slika 9), [19].



Slika 9. a) utjecaj životnog ciklusa dijamantnih perli na učinak piljenja; b) utjecaj broja perli na učinak piljenja, [19]

Prema ispitivanjima koja je Özçelik 2003 proveo na kamenolomu andezita u Turskoj, na trošenje dijamantnih perli najviše utječu parametri stijene (elastičnost i specifična gustoća), te radne veličine stroja, (vrijeme rezanja te potrošnja energije i vode), [20]. Yilmazkaya i Özçelik 2016. su ustanovili značajnu zavisnost stupnja istrošenosti dijamantnih perli i jednoosne tlačne čvrstoće i nešto manju zavisnost sa vlačnom i udarnom čvrstoćom, [21]. Također su ustanovili da se povećanjem vrijednosti abrazivnosti određene prema Böhme-u trošenje perli smanjuje kao i povećanjem otvorene poroznosti. Ozçelik i suradnici su ustanovili značajnu ovisnost trošenja dijamantnih perli o koeficijentu teksture vapnenca. Kako se vrijednosti koeficijenta teksture vapnenca povećavaju, specifični utrošak dijamantnih perli raste, a učinak rezanja se smanjuje. Pored navedenog, zaključili su da se kod vapnenca i mramora povećanjem mineralnog zrna smanjuje utrošak dijamantnih perli, [11]. Rajpurohit i suradnici analizirali su trošenje dijamantnih perli pri piljenju granita. Na temelju rezultata predložili su višestruki

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

regresijski model za procjenu trošenja perli koji obuhvaća četiri svojstva stijene: Indeks točkaste čvrstoće, Cercharov indeks abrazivnosti, jednoosna tlačna čvrstoća i modul elastičnosti, [10].

Rasti i suradnici. 2021., [6] su ustanovili da se prilikom rezanja mramora stopa trošenja perli povećava sa povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće i tvrdoće određene Schmidtovim čekićem, a smanjuje povećanjem abrazije. Osim toga, ustanovili su da se povećanjem kuta rezanja povećava potrošnja dijamantne žice, odnosno veći utrošak perli je pri piljenju horizontalnog reza nego kod vertikalnog reza. Povećanjem obodne brzine i vučne sile povećava se učinak rezanja ali se istovremeno povećava potrošnja perli, [9], [16]. Autori su također zaključili da povećanje kohezije rezultira povećanjem potrošnje perli i smanjenjem učinka rezanja. Konstanty 2021. je uočio se se usljed prevelike vučne sile prilikom piljena granita dolazi do konusnog trošenja perli (slika 10), [22].



Slika 10. Trošenje dijamantnih perli usljed prevelike vučne sile, [22]

5. ZAKLJUČAK

Na temelju dosadašnjih istraživanja u radu su analizirani učinci dijamantne žične pile te utrošak energije i dijamantne žice pri piljenju kamena. Kod mekših stijena u kamenolomima travertina i mramora postižu se učinci od 5 m²/h do 12 m²/h dok su u kamenolomima vapnenca učinci nešto manji i kreću se od 5 m²/h do 7 m²/h. Prosječni učinci piljenja u granitima kreću se od 2 m²/h do 5 m²/h iako su u pojedinim kamenolomima zabilježeni i veći učinci.

Na učinak piljenja kao i utrošak energije i dijamantnih perli utječu brojni parametri. Na dio tih parametara nije moguće utjecati s obzirom da su određeni radnom sredinom, odnosno svojstvima stijene koja se pili. Jednoosna tlačna čvrstoća stijene ima presudan utjecaj na učinak piljenja i potrošnju perli. Nešto manji ali ipak značajan utjecaj na učinak piljenja imaju tvrdoća, abrazivnost, krtost, koeficijent teksture, sadržaj kvarca i veličina mineralnog zrna.

Radne i konstrukcijske veličine dijamantne žične pile ubrajaju se u parametre koje je moguće djelomično kontrolirati te imaju značajan učinak na piljenje kamena. Kako bi se ostvarili optimalni učinci piljenja važno je pravilno odabrati radne parametre pri čemu treba obratiti pažnju na sljedeće smjernice:

- Optimalni učinak piljenja dijamantnom žičnom pilom ovisi o broju perli po metru dužnom žice, a u travertinu najveći zabilježeni učinak ostvaren je s 31 perlom po metru dužnom žice i to u srednjoj trećini radnog vijeka žice. U većini hrvatskih kamenoloma utvrđen je najprihvatljiviji način formiranja žice s postavljanjem blokirnog osigurača poslije svakih 5 dijamantnih perli s 30 perli po metru dužnom žice.
- Pri izradi dubinskog vertikalnog reza, povećanjem visine čela povećava se i optimalna udaljenost pile od radnog čela. Pri piljenju travertina kod visina etaže 7, 10 i 12 metara optimalna udaljenost pile od čela iznosi 3, 3,5 i 4,5 m.
- Pri izradi horizontalnog reza bočni položaj ima prednost u odnosu na centralni položaj u pogledu učinkovitosti i potrošnji dijamantne žice.
- Učinak piljenja se povećava sa povećanjem sile posmaka i povećanjem promjera pogonskog kotača, a smanjuje sa povećanjem kuta piljenja. Osim toga, povećanjem promjera pogonskog kotača smanjuju se dinamička naprezanja uzrokovana neravnomjernim prijenosom gibanja s pogonskog kotača na dijamantnu žicu.

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

- Kod piljenja površine reza manje od 60 m² svrhovito je povećati vučnu silu ukoliko to dopušta snaga i konstrukcija pile. Kod piljenja rezova većih površina prikladnije je smanjiti napetost žice kako bi se povećao učinak piljenja. Povećanje vučne sile rezultira većim trošenjem perli, a usljed prevelike vučne sile prilikom piljenja granita dolazi do konusnog trošenja perli.

LITERATURA

1. Dunda, S., Štambuk, S. (1994.): Utjecaj položaja dijamantne žične pile na učinak piljenja kod izrade horizontalnog reza. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 6(1), 107-112.
2. Najmedin Almasi, S., Bagherpour, R., Mikaeil, R., Khademian, A. (2015.): Influence of cutting wire tension on travertine cutting rate. In: Proceedings of 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, pp 1096–1102
3. Dunda, S., Kujundžić, T.: Digitalni udžbenik: Eksploatacija arhitektonsko građevnog kamena, RGN fakultet, Zagreb, 2003.
4. Ataei, M., Mikaeil, R., Sereshki, F., & Ghaysari, N., (2011.): Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis. Arabian Journal of Geosciences, 5(6), 1289-1295
5. Kujundžić, T., Korman, T., Zeko, F., Vrandečić, Š. (2023.): Učinak piljenja dijamantnom žičnom pilom. Klesarstvo i graditeljstvo, 31(1-2), 77-89
6. Rasti, A., Adarmanabadi, H. R., & Sahlabadi, M. R. (2021.): Effects of controllable and uncontrollable parameters on diamond wire cutting performance using statistical analysis: a case study. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 36(4), 21-32.
7. Ozcelik, Y., & Yilmazkaya, E. M. R. E. (2011.): The effect of the rock anisotropy on the efficiency of diamond wire cutting machines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(4), 626-636.
8. Sadegheslam, G., Mikaeil, R., Rooki, R., Ghadernejad, S., & Ataei, M. (2013.): Predicting the production rate of diamond wire saws using multiple nonlinear regression analysis. Geosystem engineering, 16(4), 275-285.
9. 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 and Technology, 2(4).
10. Rajpurohit, S. S., Sinha, R. K., Sen, P., Adak, V. (2020.): Effect of the rock properties on sawability of granite using diamond wire saw in natural stone quarries. Arab J Geosci 13. Artn 1117
11. Ozcelik, Y., Polat, E., Bayram, F., & Ay, A. M. (2004.): Investigation of the effects of textural properties on marble cutting with diamond wire. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 228-234.
12. Tumac, D., Avunduk, E., Copur, H., Balci, C., & Er, S. (2016.): Investigation of the effect of textural properties towards predicting sawing performance of diamond wire machines. In ISRM EUROCK (pp. ISRM-EUROCK). ISRM.
13. 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, 35(3).
14. Khademian, A., Bagherpour, R., Almasi, S. N., & Alaei, M. (2015.): Optimum distance between cutting machine and working face in travertine exploitation with diamond wire cutting method. In Proceedings of 24th international mining congress and exhibition of Turkey. 1103-1110.
15. Dunda, S. (1991.): Neujednačenost prijenosa gibanja dijamantne žične pile za eksploataciju blokova arhitektonskog kamena. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 3(1), 77-84.

Korman, T., Kujundžić, T., Vrandečić, Š.

Utrošak energije i dijamantnih perli pri radu dijamantne žične pile

16. Jain, S. C., Rathore, S. S. (2011.): Prediction of cutting performance of diamond wire saw machine in quarrying of marble: a neural network approach. *Rock mechanics and rock engineering*, 44, 367-371.
17. Najmedin Almasi, S., Bagherpour, R., Mikaeil, R., & Ozcelik, Y. (2017.): Analysis of bead wear in diamond wire sawing considering the rock properties and production rate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, 1593-1607.
18. Mikaeil, R., Haghshenas, S. S., Ozcelik, Y., & Gharehgheshlagh, H. H. (2018.): Performance evaluation of adaptive neuro-fuzzy inference system and group method of data handling-type neural network for estimating wear rate of diamond wire saw. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 3779-3791
19. Bagherpour, R., Khademian, A., Almasi, S. N., & Aalaei, M. (2014.): Optimum cutting wire assembly in dimension stone quarries. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*, 50(1), 1-8.
20. Özçelik, Y. (2003.): Multivariate statistical analysis of the wear on diamond beads in the cutting of andesitic rocks. *Key Engineering Materials*, 250, 118-130.
21. Yilmazkaya, E., & Ozcelik, Y. (2016.): The effects of operational parameters on a mono-wire cutting system: efficiency in marble processing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 523-539.
22. Konstanty, J. S. (2021.): The mechanics of sawing granite with diamond wire. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 2591-2597.