

## مطالعات آزمایشگاهی به منظور بررسی ارتباط میان انرژی ویژه مصرفی دستگاه سیم برش الماسه با مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های کربناته

نادر زیاری<sup>۱</sup>، محمد عطایی\*<sup>۲</sup>، فرهنگ سرشکی<sup>۳</sup> رضا میکایل<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۱/۰۱/۲۱

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

### چکیده:

یکی از معیارهای ارزیابی برش سنگ ساختمانی با استفاده از سیستم سیم برش الماسه انرژی مصرفی دستگاه سیم برش است. در این پژوهش به منظور ارزیابی میزان انرژی مصرفی در فرایند برش، یک سیستم سیم برش الماسه آزمایشگاهی، با قابلیت تغییر و تثبیت مؤلفه‌های عملیاتی و ابزاری برش، شامل سرعت خطی، سرعت کشش به عقب و زاویه برخورد سیم الماسه طراحی و ساخته شد. با هدف تعیین ارتباط بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با انرژی مصرفی دستگاه برش، ۶ نمونه مختلف، سنگ تراورتن از معادن استان‌های آذربایجان شرقی و غربی، اصفهان، یزد و مرکزی تهیه و مقادیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی شامل چگالی، تخلخل، جذب آب، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی و سرعت عبور امواج فراصوت از آن‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. سپس با برش بلوک‌های مکعبی از نمونه‌ها با سیستم سیم برش الماسه آزمایشگاهی، انرژی مصرفی دستگاه در حالت‌های مختلف زاویه برخورد سیم با نمونه، ثبت شد. با استفاده از رگرسیون و برازش تک متغیره، ارتباط میان هر یک از خصوصیات سنگ‌ها و انرژی ویژه برش با توجه به توابع خطی، لگاریتمی، توانی و نمایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که بیشترین ارتباط بین انرژی ویژه برش و مقاومت فشاری به صورت نمایی و با ضریب همبستگی بالای ۰/۹۷ و ضعیف‌ترین ارتباط بین درصد جذب آب با انرژی ویژه برش با ضریب همبستگی کمتر از ۰/۱۴ مشاهده شد. بهترین مقدار زاویه‌ی برخورد سیم با نمونه که در آن زاویه، کمترین میزان انرژی ویژه مصرفی ثبت شده است، زاویه ۱۵ درجه بوده است.

**کلمات کلیدی:** سیم برش الماسه، تراورتن، انرژی ویژه برش، سرعت خطی سیم، برازش تک متغیره

۱. دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، [Ataei@shahroodut.ac.ir](mailto:Ataei@shahroodut.ac.ir)

۳. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۴. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه:

بین مؤلفه انرژی ویژه برش و عوامل مستقل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های تراورتن می‌تواند برای پیش‌بینی مصرف انرژی برش و عملکرد سیم برش الماسه مورد استفاده قرار گیرد.

بی‌تردید انجام تحقیقات کاربردی و هدفمند در این زمینه، باعث صرفه‌جویی‌های قابل‌ملاحظه‌ای در مصارف انرژی می‌شود. مطالعات مختلفی در مقیاس‌های مختلف صنعتی و آزمایشگاهی در زمینه قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی با انواع برش دهنده‌ها به خصوص دیسک‌ها و تا حدود کمتری سیم‌های الماسه انجام گرفته است. در این بین برخی از پژوهشگران به بررسی مؤلفه‌های عملیاتی برش و بعضی هم به بررسی مشخصات ابزار برش و تعدادی نیز به بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ پرداخته‌اند. در این تحقیقات آنچه مورد توجه کمتری قرار گرفته است بررسی نوع سیستم برش با سیم برش الماسه در انواع مختلف سنگ‌های ساختمانی، هم به لحاظ مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ و هم به لحاظ مؤلفه‌های مختلف عملیاتی و مشخصات ابزاری برش است. مهم‌ترین پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه قابلیت برش سنگ با سیم برش الماسه به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

سیم برش الماسه در معادن سنگ‌های ساختمانی به‌طور قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و بیش از ۹۰ درصد معادن با این روش استخراج می‌شوند. ایران یکی از غنی‌ترین کشورها در زمینه ذخایر و منابع سنگ‌های ساختمانی در جهان است که بیش از ده درصد آن را سنگ تراورتن تشکیل می‌دهد، اما سهم مناسبی از لحاظ صادرات سنگ ندارد که از دلایل آن می‌توان به زیاد بودن هزینه‌های تولید اشاره کرد. همچنین عوامل مؤثر متعددی در فرآیند برش سنگ تأثیرگذار است که به سه بخش، خصوصیات سنگ، مشخصات عملیاتی و ابزاری برش و عوامل مدیریتی تقسیم‌بندی می‌شوند. از بین سه عامل فوق مؤلفه‌های مربوط به مشخصات سنگ غیرقابل کنترل یا مستقل هستند و امکان تغییر یا اعمال سلیقه در ذات آن‌ها وجود ندارد و در همه‌ی روش‌های برش، ثابت می‌باشند. با توجه به اینکه یکی از بخش‌های مهم در هزینه تولید بلوک سنگ از معادن، هزینه انرژی برش توسط دستگاه سیم برش الماسه است؛ انرژی ویژه برش، به صورت میزان انرژی لازم برای برش واحد سطح از سنگ، تعریف می‌شود و بررسی آن برای پیش‌بینی هزینه‌ها، طراحی معدن و کاهش تلفات سنگ از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا بررسی ارتباط

جدول ۱. مروری بر تحقیقات انجام شده با توجه به مشخصات سنگ و مشخصات برش

Researcher (Year)	evaluation criteria	Effective characteristics in cutting
Tonshoff and Warnecke (1982)	Cutting rate	Density & Abrasive grains sizes
Korre and Durucan (2000)	Cutting rate	Joints and Cracks Direction
Tonshoff et al (2001)	Cutting rate	Cutting Pressure & Speed
Ozcelik et al. (2002)	BeadsWear rate	Cutting Angle
Konstanty (2002)	Cutting rate	Block Height & Wire Linear Speed
Eyuboglu et al(2003)	Wear rate	Rock Properties
Ozcelik et al. (2004)	Wear rate	Density & Abrasive grains sizes& texture coefficient
Ozcelik and Bayram (2004)	BeadsWear rate	Velocity of Cutting & Fast Forward
Konstanty (2005)	Cutting rate	Wire Length
Ozcelik (2005)	Cutting rate	Cutting Angle
Cai et al. (2007)	Cutting rate & Wear rate	Angel between Wire and Specimen & Wire Linear Speed
Ataei et al (2011)	Cutting rate	Tensile and Compressive Strenth, Wear & Schmidt Hammer
Jain and Rathore (2011)	Cutting rate & Wear rate	Wire Linear Speed and Pullback & Cohesive Coefficient
Ozcelik and Yilmazkaya (2011)	Wear rate & Cutting rate & Specific Cutting Energy	Compressive Strength,Cutting Angle & Rock anisotropy
Ghaysari et al (2012)	Cutting rate	texture coefficient

Sadegheslam et al (2013)	Cutting rate	Compressive Strength, Young's Modulus & Quartz Content
Huang G. and Xu X., (2013)	Cutting rate	Diamond Types
Bagherpour et al (2014)	Cutting rate	Number of beads per unit length
Khademian et al(2015)	Cutting rate	Block Height & Wire Length
Almasi et al. (2015)	Cutting rate	Pull Back
Yilmazkaya and Ozcelik (2015)	Wear rate & Specific Cutting Energy	wire rotation speed (peripheral speed) and wire downward movement speed
Mikaeil et al (2016)	Wear rate	Compressive Strength, Mohs Hardness, Schmiarezek abrasivity factor & Young's Modulus
Turchetta et al (2017)	Wear rate & cutting Speed	Torque, tension and angle of the wire
Almasi et al (2017)	Wear rate	Pullback, Compressive Strength, Mohs Hardness & Schmiarezek abrasivity factor
Almasi et al (2017)	Cutting rate	Pullback, Rock properties

بین مشخصات سنگ با انرژی ویژه برش، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

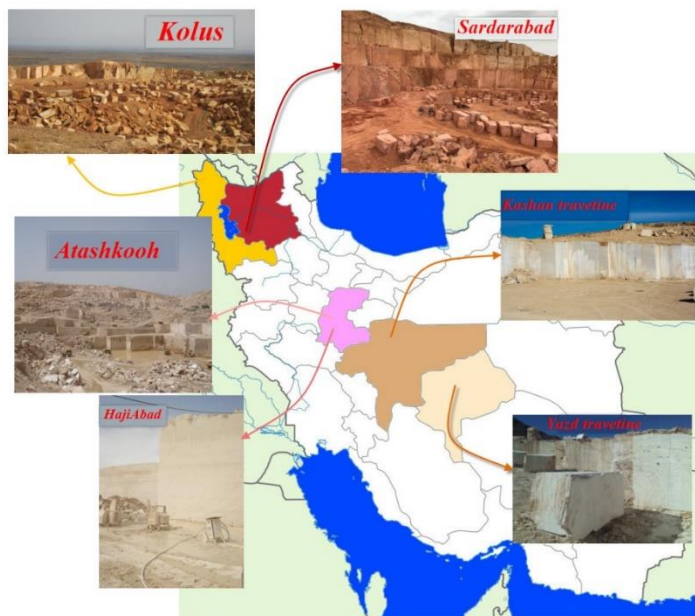
لذا در این تحقیق به منظور تعیین ارتباط بین انرژی ویژه برش و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگها، با توجه به گستردگی معادن تراورتن مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این نوع سنگ صورت گرفت و سپس با انجام آزمایشهای برش در شرایط مختلف مؤلفه‌ی عملیاتی زاویه برخورد سیم با نمونه، میزان انرژی لازم برای برش واحد سطح سنگ محاسبه و تعیین شد. در نهایت ارتباط میان انرژی ویژه مصرفی دستگاه سیم برش الماسه با مشخصات فیزیکی و مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفت.

استاندارد برای آزمایش‌های مختلف و با توجه به نوع آزمایش‌ها آغاز شد. در این تحقیق آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ‌ها به دو دسته آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ و آزمون‌های غیر مخرب تقسیم‌بندی شدند. از بین خواص فیزیکی، خصوصیات چگالی خشک سنگ‌ها، تخلخل و درصد جذب آب و از بین خواص مکانیکی، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی به روش برزلی و از بین آزمون‌های غیر مخرب، سرعت عبور امواج فراصوت طولی و عرضی بر اساس استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (International Society for Rock Mechanics (ISRM)) که در ادامه نحوه انجام هر یک از آزمایش‌ها و استانداردهای بکار رفته در آنها آمده است.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که برای بررسی عملکرد سیم برش الماسه در برش سنگ‌های متفاوت، برداشت داده‌ها از معادن مختلف امری اجتناب‌ناپذیر است اما عدم قطعیت داده‌ها در این‌گونه مطالعات از دو منبع حاصل می‌شود. اول اینکه اندازه‌گیری مقادیر در یک محیط کارگاهی کاملاً تحت تأثیر شرایط و خطاهای محیطی قرار می‌گیرد، ثانیاً از آنجا که شرایط و تجهیزات به کار رفته در معادن مختلف بسیار متغیر و متفاوت است، این تغییر شرایط شدیداً بر صحت و همگن بودن داده‌ها و تعمیم آنها به سایر معادن تأثیرگذار است. در این مطالعات محدود اکثر تحقیقات روی نمونه سنگ‌هایی خاص انجام شده است و از بین عوامل مؤثر بر برش و معیارهای ارزیابی، ارتباط

## ۲. مطالعات آزمایشگاهی خصوصیات سنگ

به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی، ابتدا سنگ‌های تراورتن مورد مطالعه از ۶ معدن مختلف انتخاب شدند. در انتخاب معادن، سعی شده است که حتی‌الامکان از مناطق مختلف ایران نمونه‌برداری انجام شود؛ با این هدف که سنگ‌های تراورتن عمده ایران با مشخصات متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۱ نواحی مورد مطالعه نشان داده شده است. در جدول ۲، نام معادن و موقعیت جغرافیایی آنها مشاهده می‌شود. پس از برداشت نمونه‌های مورد نظر از معادن و انتقال آنها به آزمایشگاه، ابتدا کار آماده‌سازی نمونه‌ها با تهیه نمونه‌های



شکل ۱. مناطق مورد مطالعه و تصاویر معادن

جدول ۲. مشخصات معادن مورد مطالعه

Code	Location	Mine
T1	Maku, Western Azerbaijan province	Orange Travertine (Kolus)
T2	Mahallat, Markazi provinc	White Travertine (Hajiabad)
T3	Azarshar, Eastern Azerbaijan province	Red Travertine (sardarabad)
T4	Mahallat, Markazi province	Cream Travertine (Atashkooh)
T5	Kashan, Isfahan province	Chocolate travertine (Kashan)
T6	Ardakan, Yazd province	Cream Travertine (Yazd)

برطرف شدن گرد و غبار سطحی آنها، نمونه‌ها داخل آب و در خلأ کمتر از ۸۰۰ پاسکال (معادل  $10^{-3} \times 10^{-3}$  اتمسفر یا ۰/۰۰۸ بار) برای مدت ۱۲ ساعت اشباع شدند (شکل ۲ ب). پس از طی زمان لازم برای اشباع نمونه‌ها، جرم اشباع - غوطه‌ور نمونه‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد (شکل ۲ ج)؛ سپس نمونه از آب خارج و سطح آن توسط پارچه به دقت خشک و جرم نمونه اشباع با سطح خشک شده اندازه‌گیری شد و پس از مراحل فوق نمونه به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت، سپس به مدت ۳۰

۱-۲. آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الف) آزمایش تعیین چگالی، تخلخل و درصد جذب آب: برای تعیین چگالی خشک و تخلخل نمونه‌ها از روش اشباع و غوطه‌ورسازی (Saturation and Buoyancy Technique) بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ استفاده شده است. برای انجام این آزمایش همانند شکل ۲ الف ۱۰ نمونه معرف از هر یک از سنگ‌های مورد نظر با وزنی بیش از ۵۰ گرم و ابعادی بزرگ‌تر از ۱۰ برابر بزرگ‌ترین دانه سنگ از نمونه‌های اصلی تهیه شد و پس از شستن نمونه‌ها با آب و

جرم اشباع غوطه‌ور، جرم اشباع با سطح خشک و جرم خشک نمونه و روابط مربوطه محاسبه شد که در جدول ۳ آورده شده است.



(A)



(B)



(C)



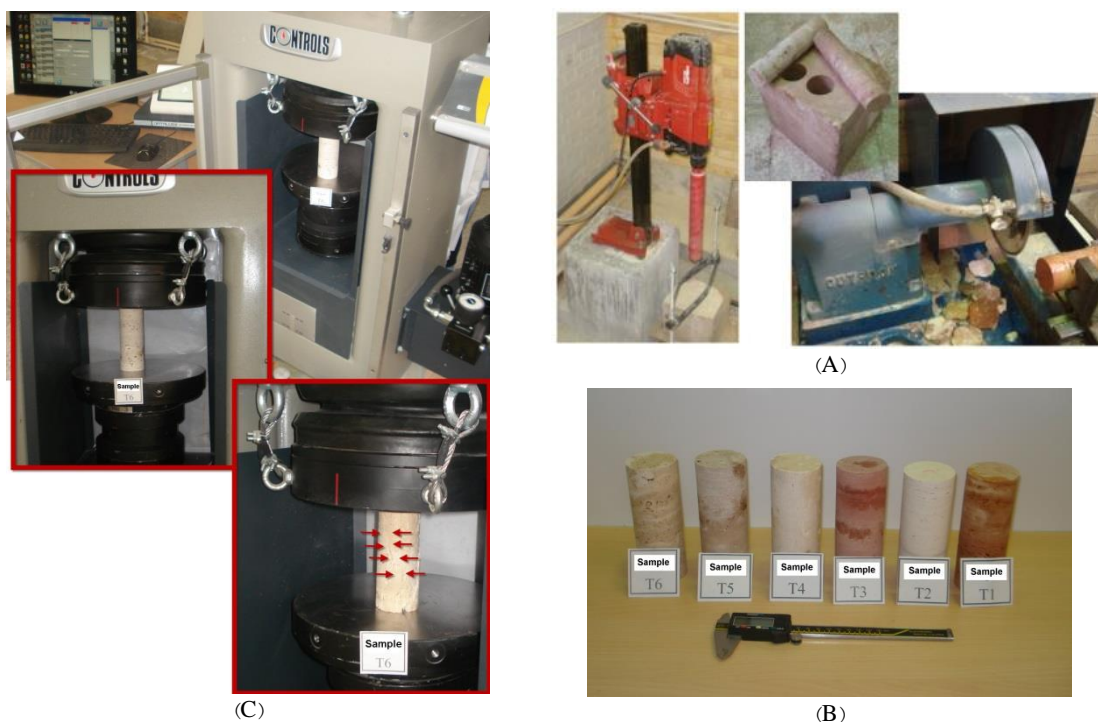
(D)

شکل ۲. مراحل انجام آزمایش تعیین خصوصیات فیزیکی

مشاهده می‌شود. هر نمونه توسط دستگاه جک فشاری هیدرولیکی اتوماتیک ۳۰۰ تنی (۳۰۰۰ کیلو نیوتنی) همانند شکل ۳ C با نرخ بارگذاری حدود ۰/۷۵ مگاپاسکال در ثانیه (حدود ۱/۷ کیلو نیوتن در ثانیه) تا لحظه شکست تحت فشار قرار داده شد. با تعیین حداکثر بار وارد بر نمونه‌ها در طول آزمایش و محاسبه سطح مقطع مؤثر هر مغزه، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها محاسبه و میانگین مقادیر محاسبه شده که در جدول ۳ آورده شده، به عنوان مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ مورد مطالعه استفاده شده است.

ب) آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری ( Uniaxial compressive strength )

برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مورد مطالعه، ابتدا همانند شکل ۳ A توسط دستگاه مغزه‌گیر، از هر یک از انواع سنگ مورد مطالعه ۵ نمونه مغزه با قطر NX (۵۴ میلی‌متر) تهیه شد و ابتدا و انتهای نمونه‌ها توسط دستگاه برش مغزه با نسبت ارتفاع به قطر حداقل ۲/۵ و به گونه‌ای که صفحات برش کاملاً عمود بر محور استوانه مغزه باشد، بریده شد، سپس نمونه‌ها توسط دستگاه سایش، تسطیح شد. در شکل ۳ B یک سری از نمونه‌های T1 تا T6 پس از آماده‌سازی



شکل ۳. مراحل انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

### ۲-۲. آزمون های غیر مخرب تعیین سرعت عبور امواج فراصوت طولی و عرضی

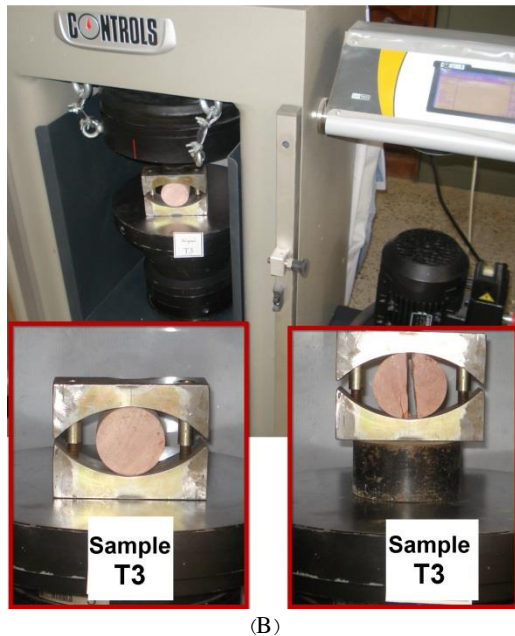
این آزمایش برای تعیین سرعت انتقال امواج فشاری (P) و برشی (S) با فرکانس بالا از داخل نمونه های سنگی که در مقایسه با طول موج پالس، ابعاد مؤثر نامحدودی دارند به کار می رود. ابعاد نمونه زمانی نامحدود تلقی می شود که میانگین اندازه دانه ها کوچکتر از طول موج و طول موج کوچکتر از کوچکترین بعد نمونه بوده و عرض نمونه نیز در جهت عمود بر انتشار موج نباید کمتر از ۱۰ برابر طول موج باشد؛ طبق استاندارد ISRM مسافت گذر موج از نمونه (فاصله وارسانها (Transducer)) باید حداقل ۱۰ برابر میانگین ابعاد دانه های سنگ باشد (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰).

از آنجا که تعیین سرعت انتقال امواج التراسونیک یک آزمون غیر مخرب است، لذا از نمونه های با قطر NX که برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری تهیه شده بود استفاده شد و طبق استاندارد ISRM نمونه ها به مدت ۶ ساعت در گرمخانه با دمای ۴۵ درجه سانتی گراد و سپس داخل دسیکاتور و با حضور مواد جاذب رطوبت خشک شدند، سپس طول مغزه

### ج) آزمایش مقاومت کششی برزیلی (Brazilian Tensile Strength)

برای انجام این آزمایش که برای تعیین مقاومت کششی نمونه های استوانه ای سنگ بکر به طور غیرمستقیم به کار می رود نیز ابتدا توسط دستگاه مغزه گیر، نمونه های مغزه با قطر NX تهیه شد و سپس طبق استاندارد ISRM ابتدا و انتهای نمونه ها با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۵، به گونه ای که صفحات برش کاملاً عمود بر محور استوانه مغزه باشد، بریده شدند. در شکل ۴ الف یک سری از نمونه های T1 تا T6 پس از آماده سازی مشاهده می شود که طبق استاندارد ISRM حداکثر ناصافی سطوح جانبی نمونه ها بیش از ۲۵ میکرون نمی باشد. پس از آماده سازی، نمونه ها همانند شکل ۴ بین دو فک فولادی بارگذاری قوسی شکل قرار گرفته و توسط دستگاه جک فشاری با نرخ بارگذاری حدود ۲۰۰ نیوتن در ثانیه، تا لحظه شکست تحت فشار قرار گرفتند. پس از شکستن نمونه ها و تعیین حداکثر بار وارده بر نمونه ها، مقاومت کششی برزیلی نمونه ها محاسبه و میانگین مقادیر محاسبه شده که در جدول ۳ آورده شده، به عنوان مقاومت کششی برزیلی سنگ مورد مطالعه استفاده شده است.

(فاصله مرکز تا مرکز و رارسانها) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر  
اندازه‌گیری شد.



(B)



(A)

شکل ۴. مراحل انجام آزمایش مقاومت کششی برزیلی

فشاری و برشی استفاده شده است. نتایج سرعت موج طولی و عرضی برای نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود از وارسان‌های ۲۴ و ۲۵۰ کیلوهرتز که برای سنگ‌هایی با چگالی کم (مانند تراورتن) پاسخ بهتری می‌دهد به ترتیب برای اندازه‌گیری زمان گذر موج



شکل ۵. دستگاه فراصوت، وارسان‌ها و نمونه‌ها

جدول ۳. نتایج خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
<b>D (ton/m<sup>3</sup>)</b>	2.61	2.54	2.51	2.53	2.47	2.38
<b>n (%)</b>	2.55	4.1	7.8	5.43	3.96	4.28
<b>Wa (%)</b>	1.9	1.01	1.8	2.12	1.86	1.93
<b>UCS (MPa)</b>	68	62	57	54	51	44
<b>BTS (MPa)</b>	6.1	5.5	3.9	4.6	3.6	2.9
<b>Vp (m/s)</b>	5595	5318	5121	5214	5021	4885
<b>Vs (m/s)</b>	2895	2947	2712	2754	2654	2561

Wa: Water Absorption. n: Porosity. D: Density. Vs: Shear Wave Speed. BTS: Brazilian Tensile Strength.

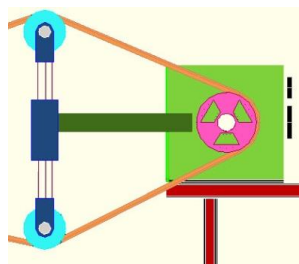
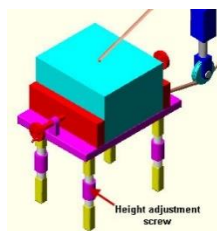
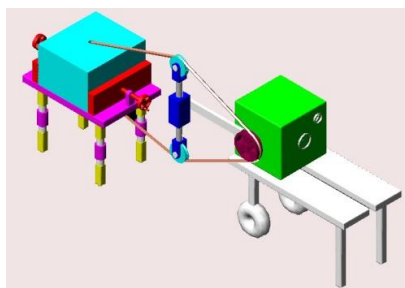
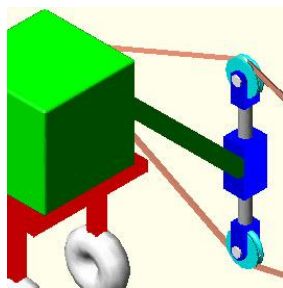
Vp: Compressive Wave Speed. UCS : Uni-axial Compressive Strength

### ۳. مطالعات آزمایشگاهی برش سنگ

با توجه به طراحی آزمایش‌های مختلفی که برای دستیابی به اهداف این پژوهش صورت گرفته بود و به منظور به حداقل رساندن تأثیر مؤلفه‌های ابزاری و عملیاتی برش بر روی ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های تراورتن و انرژی ویژه مصرفی برش، طراحی و ساخت دستگاه سیم برش الماسه آزمایشگاهی با قابلیت تثبیت و تغییر پارامترهای ابزاری و عملیاتی برش در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود صورت گرفت. برای ساخت این دستگاه ابتدا با طراحی مجدد با استفاده از نرم‌افزار Mechanical، طراحی هر یک از

قطعات مورد نیاز برای ساخت دستگاه انجام شد. همچنین قطعات مورد نیاز با نرم‌افزارهای CAE مورد تحلیل مکانیکی قرار گرفت تا نقاط تحت فشارهای استاتیکی و دینامیکی برای تحمل ۱/۵ برابر نیروها و تنش‌های وارده مورد تحلیل قرار گیرند. نمونه‌ای از طراحی دستگاه با نرم‌افزار Mechanical در شکل ۶ آورده شده است.

اجزاء اصلی سیستم سیم برش الماسه باز طراحی شده‌ی آزمایشگاهی شامل چهار بخش A بستر یا شاسی اصلی دستگاه، B قسمت فوقانی شاسی و موتورهای مولد نیرو، C تابلو برق و سیستم کنترل و D تکیه‌گاه نگهداری نمونه‌ها است.

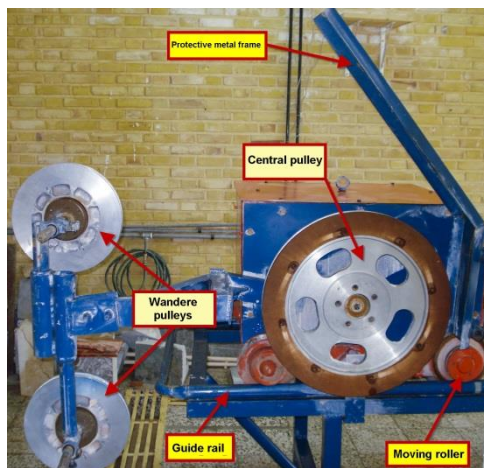


شکل ۶. تصاویر طراحی سیستم سیم برش الماسه با نرم‌افزار Mechanical



قسمت فوقانی شاسی، از یک اسکلت با قوطی ۵×۵ سانتیمتر که با ورق آهن با ضخامت یک میلی‌متر پوشانده شده و به ابعاد ۸۰×۷۵×۶۵ سانتیمتر ساخته شده است و موتورهای مولد نیرو شامل موتور اصلی چرخاننده فولی مرکزی دستگاه برای حرکت دادن سیم الماسه و موتور فرعی دستگاه که وظیفه‌ی چرخش چرخ‌دنده‌ی دایره‌ای بر روی چرخ‌دنده شانه‌ای را با هدف حرکت به سمت جلو یا عقب شاسی فوقانی و کشش به عقب دستگاه و سیم برش الماسه بر عهده دارد، بر روی این قسمت سوار شده‌اند، که مشخصات آن‌ها به همراه سایر متعلقات وابسته در جدول ۴ آورده شده است. دو عدد فولی هرزگرد در فاصله‌ی ۹۰ سانتیمتر از فولی اصلی امکان تغییر زاویه برخورد سیم برش الماسه با نمونه‌ی سنگ را فراهم می‌کنند.

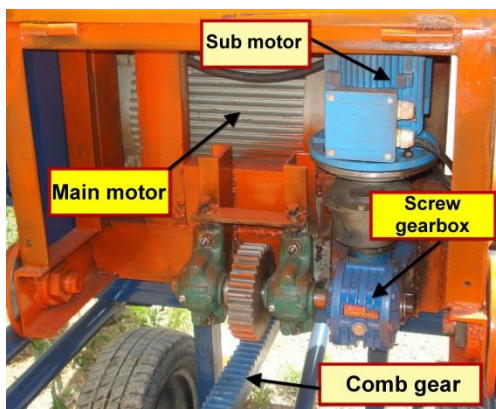
برای ساخت شاسی اصلی دستگاه که تحمل وزن کل سیستم برش، موتورها و فولی‌ها را بر عهده دارد از قوطی آهنی ۵×۵ سانتیمتر به طول ۳ متر و عرض ۹۰ سانتیمتر که از یک سمت با محور اکسل و چرخ و لاستیک برای حمل و نقل راحت‌تر کل سیستم برش تا محل قرارگیری نمونه و از سمت دیگر با پایه فلزی با ارتفاع ۷۰ سانتیمتر و دو عدد پیچ قفل شونده برای ثابت نگه‌داشتن دستگاه در محل اصلی در زمان شروع برش محصور می‌باشد. از دو لوله آهنی بدون درز با قطر ۵ سانتیمتر به عنوان ریل راهنما، برای عبور راحت ۴ عدد غلطک حرکتی متصل به قسمت فوقانی متحرک ماشین استفاده شده است. همچنین چرخ‌دنده‌ی شانه‌ای به طول ۲ متر و گام ۱۶ در مرکز محور اصلی دستگاه بر روی شاسی نصب شده است که تصاویر مربوط به ساخت این بخش در شکل ۷ آورده شده است.



(A)



(B)



(C)



(D)

شکل ۷. (الف) شاسی اصلی دستگاه، (ب) قسمت فوقانی شاسی، (ج) موتورهای مولد نیرو و (د) سیستم کنترل

متحرک ساخته شده است، تا با فاصله‌ی مناسب از شاسی و بدنه اصلی دستگاه در محل ایمن قرار گیرد و همه تجهیزات الکترونیکی و ایمنی مانند داکت‌ها، سیم‌کشی‌ها، کلیدها، چراغ‌ها، فیوزها و ترانس‌ها، همچنین تجهیزات مورد نیاز برای اندازه‌گیری جریان، ولتاژ و ثبت‌کننده انرژی مصرفی دستگاه و اینورترهای اصلی و فرعی به همراه سیستم کنترل دستگاه درون آن قرار دارد.

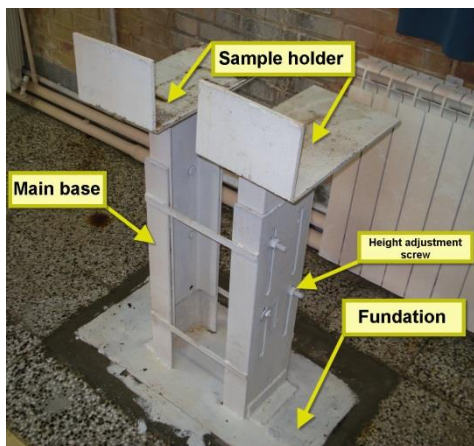
همچنین از یک قاب فلزی برای محافظت از پشت دستگاه برش در لحظه‌ای که احتمالاً سیم برش الماسه در حین کار پاره شود استفاده شده است. این قسمت با غلطک‌های حرکتی فولادی که وزن کل قسمت فوقانی (بدنه، موتورها و گیربکس حلزونی و فولی‌ها) بر روی آن قرار دارد بر روی ریل راهنما قرار گرفته که تصاویر مربوط به این بخش در شکل A و B قابل مشاهده است. تابلوی برق دستگاه در ابعاد  $30 \times 80 \times 100$  سانتیمتر و

#### جدول ۴. مشخصات تجهیزات قسمت فوقانی و سیستم کنترل

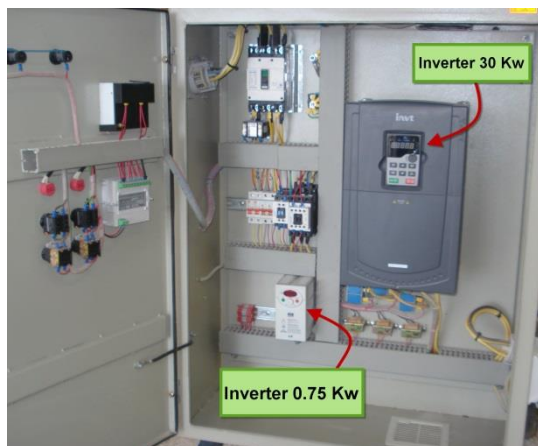
Pieces	Specifications
Main motor	Three phase, 22Kw, Weight 200kg
Ancillary motor	Three phase, 0.75Kw, Weight 10kg
Central Pulley	Diameter 60 cm
Wonderer Pulley	Diameter 30 cm
Main inverter	30 kw ,AC
Ancillary inverter	1 kw ,AC

گرفته است. با استفاده از اینورتر مورد استفاده در ساخت این دستگاه می‌توان سرعت دوران موتور اصلی و به تبع آن فولی مرکزی دستگاه را با دقت ۱ دور در دقیقه از ۰ تا ۱۸۰۰ دور در دقیقه تنظیم نمود. همچنین این اینورتر در زمان برش قسمت‌های سخت‌تر سنگ با افزایش جریان جلوی کاهش سرعت دوران را از مقداری که توسط سیستم کنترل در ابتدا تعیین شده است خواهد گرفت و با تثبیت دور اندازه‌گیری دقیق مصرف انرژی را میسر می‌کند.

از آنجا که یکی از اهداف اصلی طراحی و ساخت این دستگاه، قابلیت تغییر و تثبیت مؤلفه‌ی عملیاتی سرعت خطی سیم برش الماسه بوده است، برای دستیابی به این هدف، یکی از بخش‌های اصلی در تابلو برق، اینورتر متصل به موتور اصلی است که برای کنترل دور موتور متناسب با سرعت خطی مورد نیاز به روش تغییرات ولتاژ به نسبت فرکانس عمل می‌کند. سنسورهای نصب شده جهت قرائت ولتاژ و جریان و سامانه قرائت و ثبت انرژی مصرفی دقیقاً بین خروجی این اینورتر و موتور اصلی قرار



(B)



(A)

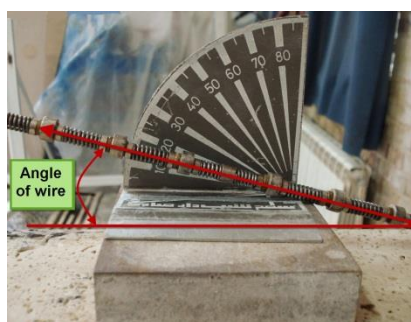
شکل ۸. (A) تابلو برق دستگاه و اینورترها (B) سکوی نگهداری نمونه

نمونه‌ها در حین برش جلوگیری به عمل می‌آورد، ساخته و بر روی پایه‌های متحرک جوش داده شد. همچنین در زمان انجام آزمایش‌های برش، نمونه‌ها توسط گیره‌های دستی به سکوی تکیه‌گاه محکم بسته می‌شوند تا از هرگونه جابجایی و لرزش نمونه حین برش جلوگیری به عمل آید. تصاویر مربوط به این بخش در شکل ۸ B آورده شده است.

برای انجام آزمایش‌های طراحی شده برای این پژوهش، نمونه‌های مورد نظر در کارخانه‌ی سنگ‌بری به صورت بلوک‌های مکعبی برش خورد تا قرارگیری و مهار آن‌ها روی سکوی نگهدارنده‌ی نمونه راحت‌تر و ایمن‌تر باشد. با هدف یکسان بودن سطح مقطع برش برای تمام حالت‌های آزمایش در تمام نمونه‌ها، ابعاد آن سطح از نمونه‌های بلوکی که مورد برش قرار می‌گیرد،  $30/5 \times 30/5$  (یک فوت در یک فوت) در نظر گرفته شد. پس از قرار گرفتن نمونه روی سکوی نگهدارنده، همانند شکل ۹ A نمونه با استفاده از گیره‌ی پیچ‌دستی، در چند جهت به تکیه‌گاه محکم بسته شد تا از حرکت آن در حین برش جلوگیری به عمل آید و در برابر تنش‌های ناشی از برش توسط سیم به لرزش در نیاید. البته باید دقت نمود که محل بستن گیره‌ی پیچ‌دستی با مسیر عبور سیم برش الماسه در حین برش برخورد نداشته باشد. در محل قرارگیری سیم روی نمونه‌ی مکعبی، توسط دستگاه فرز، شیاری به ضخامت سیم برش الماسه ایجاد می‌شود تا مسیر عبور سیم در ابتدای حرکت مشخص باشد و سطح تیز و زاویه‌دار سنگ باعث پارگی سیم الماسه در لحظه شروع برش نگردد. دو عدد نازل، (شکل ۹ C) سیال روانکار و خنک‌کننده (آب) را جداگانه در مسیر برش و روی سیم برش الماسه می‌پاشند تا علاوه بر جلوگیری از داغ شدن سیم، براده‌های قطعه‌کار را نیز از روی سیم و مسیر برش جدا نمایند. زاویه برخورد سیم با نمونه، که جزء مولفه‌های مورد بررسی در این پژوهش بوده است با استفاده از پیچ‌های تنظیم روی محور قرارگیری فولی‌های فرعی و به کمک نقاله همانند شکل ۹ B نسبت به سطح افق تنظیم می‌شود.

همچنین نیروهای مماسی و عمودی که فرآیند برش به آن‌ها بستگی دارد ناشی از نیروی کشش سیم به سمت عقب است که با سرعت کشش به عقب سیم در حین برش متناسب می‌باشد. برای تنظیم سرعت حرکت سیم به سمت عقب از اینورتر دیگری نیز استفاده شده است تا سرعت موتور فرعی متصل به گیربکس حلزونی را بتوان کنترل کرد و به هدف دیگری از ساخت این دستگاه که همان قابلیت تغییر و تثبیت مؤلفه‌ی عملیاتی سرعت کشش سیم برش به عقب بوده است دست یافت. به کمک این اینورتر و سیستم گیربکس حلزونی در مسیر چرخ‌دنده‌ها می‌توان سرعت کشش به عقب سیم را از ۱ تا ۱۰۰ سانتیمتر در دقیقه تغییر داد. تصاویر مربوط به ساخت این بخش در شکل ۸ A آورده شده است.

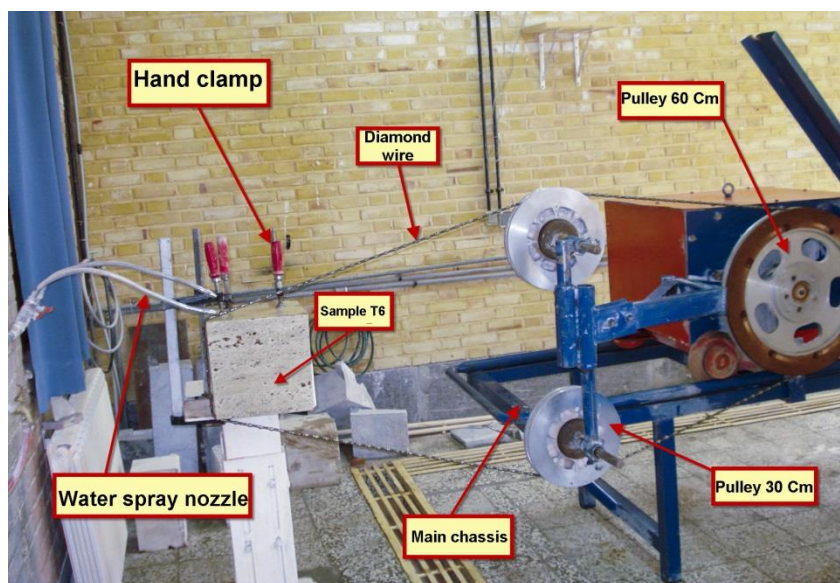
آخرین بخش طراحی و اجرا شده در محیط آزمایشگاه برای شروع مطالعات آزمایشگاهی برش سنگ، تکیه‌گاه نگهداری نمونه‌ها است، به گونه‌ای که بتواند وزن نمونه‌هایی با ابعاد مورد نظر، که با توجه به چگالی سنگ‌های مورد مطالعه، کمتر از ۱۵۰ کیلوگرم خواهد شد را به همراه لرزش‌های احتمالی و تنش‌های متعدد وارد به نمونه در زمان برش از سوی دستگاه، تحمل نماید. برای این منظور، پس از حفر زمین در محل مناسب در آزمایشگاه صفحه‌ی فلزی فونداسیون با ابعاد ۵۰ در ۸۰ سانتیمتر توسط شاخک‌های فولادی با بتن‌ریزی مناسب در زمین محکم شد. سپس با استفاده از ۴ عدد ناودانی آهنی ۲۰ و ۲۲ (هر کدام ۲ عدد) پایه‌های کشویی ساخته شد و با اجرای شیار در ناودانی ۲۲ و تعبیه سوراخ در ناودانی ۲۰ و به کمک پیچ و مهره قابلیت تنظیم ارتفاع در پایه‌ها ایجاد گردید. این کار تمهیدی است تا بتوان با تنظیم آن همواره مرکز نمونه‌ها را با مرکز پولی اصلی هم راستا نمود و با کمک آن و تغییر فاصله فولی‌های هرزگرد، زاویه برخورد سیم با نمونه را که جزء اهداف مورد بررسی در این مقاله می‌باشد طبق طراحی آزمایش‌ها تنظیم کرد. پایه‌های مذکور در محل مناسب بر روی فونداسیون جوش داده شد. با استفاده از ۲ عدد ورق فولادی با ضخامت ۱ سانتیمتر و ابعاد ۲۵ در ۴۰ سانتیمتر، تکیه‌گاه اصلی قرارگیری نمونه‌ی سنگ که با ایجاد لبه‌ای با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر در جلوی آن، از فرار



(B)



(C)



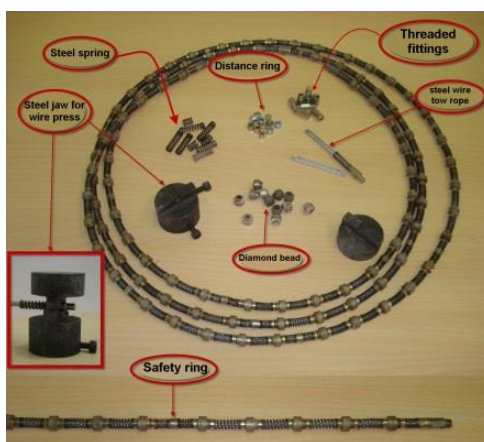
(A)

شکل ۹. نمای کلی دستگاه و نمونه برای شروع آزمایش برش

در دقیقه تنظیم شد تا سرعت خطی سیم متناسب با آزمایش‌های طراحی شده در این تحقیق روی ۵۰ متر در ثانیه تنظیم و تثبیت شود. همچنین بر اساس طراحی‌های صورت گرفته برای آزمایش‌های این پژوهش، زاویه برخورد سیم با نمونه برای هریک از نمونه‌ها روی سه حالت ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه تنظیم شد و فرآیند برش انجام گردید. در مجموع برای ۱۸ حالت مختلف طراحی آزمایش، با تنظیم سرعت خطی سیم (۵۰ متر در ثانیه) و سرعت کشش به عقب سیم (۲/۵ سانتیمتر در دقیقه) و سه حالت (۵، ۱۵ و ۲۵ درجه) زاویه برخورد سیم با سطح افق، با تنظیم پاشش سیال روانکار خنک‌کننده روی قطعه کار، برش نمونه‌ها انجام و داده‌های مربوط به انرژی بر حسب کیلو وات ساعت در هر یک از آزمایش‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری انرژی ثبت و یادداشت شد و با محاسبه سطح بریده شده در هر یک از حالت‌ها، میزان انرژی ویژه برش مصرفی برای هر یک از حالت‌های طراحی شده آزمایش بر حسب کیلو وات ساعت بر متر مربع بدست آمد. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۵ آورده شده است.

در این پژوهش، از سیم برش الماسه به طول ۷ متر، که تعداد مهره‌های الماسه در واحد طول سیم ۳۰ عدد و از نوع مهره اشباع شده (Sintered Bead) بوده، استفاده شده است. در شکل ۱۰ اجزای سیم برش الماسه و ابزار مونتاژ و تعمیر سیم مشاهده می‌شود.

برای انجام آزمایش‌های این پژوهش، به منظور انجام برشی نرم و یک‌دست که ضمن افزایش راندمان، کمترین میزان فشار به دستگاه را شاهد بود و نتایج یکنواخت‌تر، بهتر و منطقی‌تری نسبت به سایر حالات را جمع‌آوری نمود، همچنین از پاره شدن مکرر سیم در طول برش بلوک‌های مکعبی جلوگیری نمود تا برشی ایمن در طول آزمایش انجام شود، از بین حالت‌های مختلف بررسی شده برای برش با کمک کلید تنظیم سرعت حرکت افقی دستگاه (کشش به عقب سیم) سرعت مورد نظر برای انجام آزمایش‌های این پژوهش روی ۲/۵ سانتیمتر در دقیقه برای هر آزمایش تنظیم و تثبیت شد. با توجه به قطر فولی مرکزی متصل به موتور اصلی، محیط فولی حدوداً ۱/۸ متر می‌باشد، لذا برای تنظیم سرعت خطی سیم، با استفاده از کلید ولومی، دور موتور اصلی به کمک اینورتر روی عدد ۱۶۰۰ دور



شکل ۱۰. اجزای سیم برش الماسه و ابزار مونتاژ و تعمیر سیم

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های برش با سیم برش الماسه

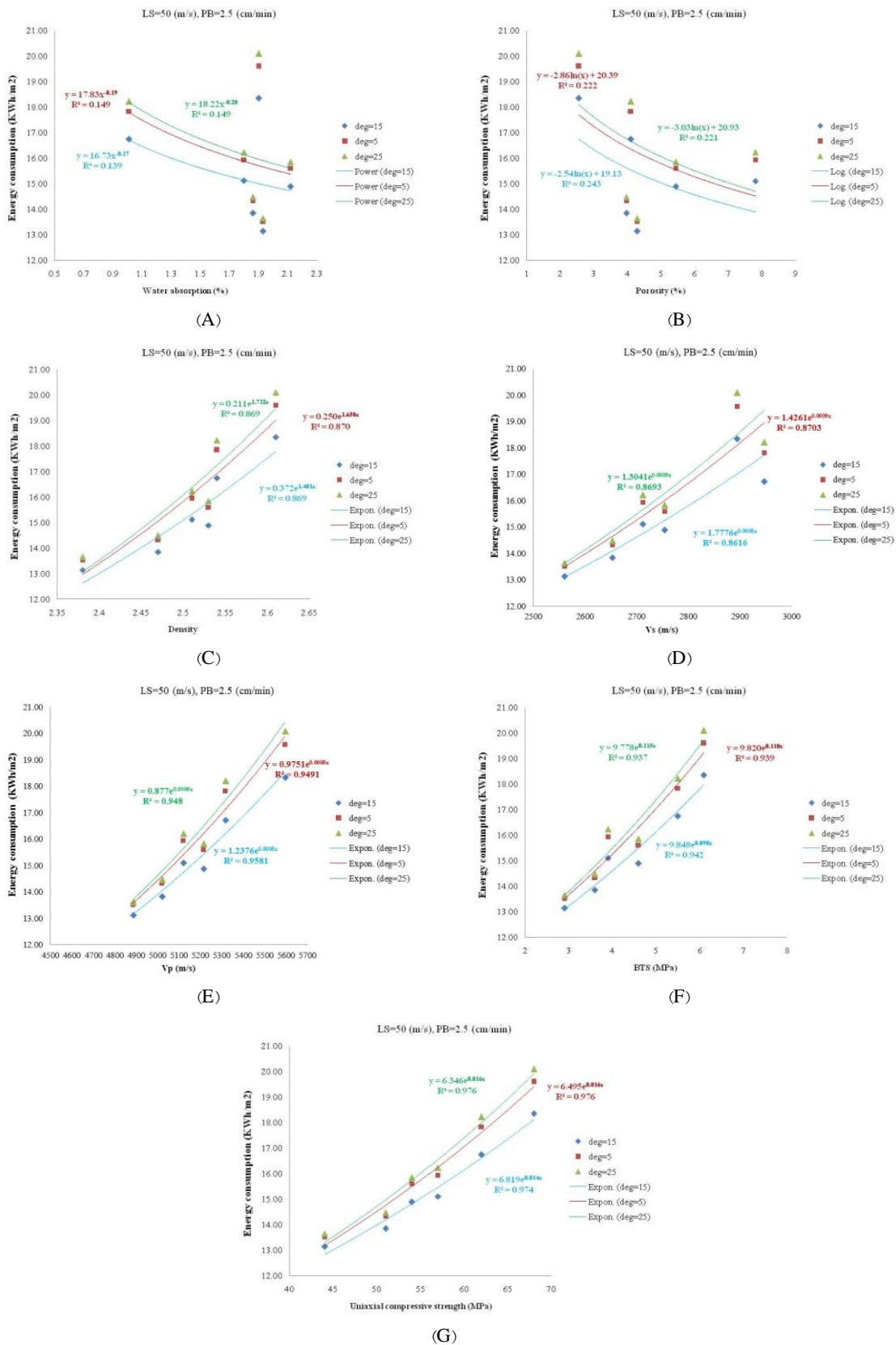
Rock	Deg (°)	LS (m/s)	PB (cm/min)	E (KWh/m <sup>2</sup> )
T1	5	50	2.5	19.59
	15	50	2.5	18.35
	25	50	2.5	20.1
T2	5	50	2.5	17.83
	15	50	2.5	16.74
	25	50	2.5	18.22
T3	5	50	2.5	15.94
	15	50	2.5	15.11
	25	50	2.5	16.23
T4	5	50	2.5	15.6
	15	50	2.5	14.89
	25	50	2.5	15.85
T5	5	50	2.5	14.32
	15	50	2.5	13.85
	25	50	2.5	14.48
T6	5	50	2.5	13.52
	15	50	2.5	13.14
	25	30	2.5	13.65

E: Specific Cutting Energy PB: Pull back wire speed LS: Linear wire speed Deg: Horizontal angle of wire

قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

۴. بررسی ارتباط بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی با انرژی ویژه برش

پس از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی طراحی شده ارتباط میان مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با انرژی ویژه برش با استفاده از توابع خطی، لگاریتمی، نمایی و توانی مورد ارزیابی



شکل ۱۱. نمودار خطوط برازش بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها با انرژی ویژه برش

برش در حالت‌های مختلف روندی افزایشی به صورت نمایی با بیشترین ضریب تعیین به ترتیب ۸۷ و ۹۵/۸ درصد مشاهده شد. مطابق با شکل ۱۱ F بین مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها با میزان انرژی ویژه برش مصرفی، روندی افزایشی به صورت نمایی با ضریب تعیین حدود ۹۴ درصد مشاهده می‌شود. مؤلفه‌ای که با توجه به معیار ضریب تعیین خط برازش، بیشترین ارتباط را با انرژی ویژه برش دارد مقاومت فشاری تک‌محوری است. همان‌طور که در شکل ۱۱ G مشاهده می‌شود در ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها با میزان انرژی ویژه برش مصرفی، روندی افزایشی به صورت نمایی با ضرایب تعیین حدود ۹۷/۶ درصد حاکم است. روابط با ضرایب تعیین بالای ۸۵ درصد حاصل از برازش بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها با میزان انرژی ویژه برش در جدول ۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ A و B مشاهده می‌شود، روند تغییرات درصد جذب آب و تخلخل با میزان انرژی ویژه برش مصرفی کاهش می‌یابد، بدین صورت که با افزایش این دو پارامتر در نمونه‌ها، میزان انرژی ویژه برش کاهش می‌یابد. با توجه به ضریب تعیین در بررسی برازش‌های مختلف، تابع توانی با بیشترین ضریب تعیین ۱۴/۹ درصد و تابع لگاریتمی با بیشترین ضریب تعیین ۲۴/۳ درصد به ترتیب بهترین برازش ارائه شده برای دو پارامتر درصد جذب آب و تخلخل است. از آنجا که معیار انتخاب تابع مناسب برای حالت‌های مختلف برازش، ضریب تعیین بوده است، با توجه به شکل ۱۱ C و با بررسی برازش‌های مختلف، تابع نمایی با ضریب تعیین حدود ۸۷ درصد بهتر از بقیه توابع، بین میزان انرژی ویژه برش مصرفی و چگالی خشک نمونه‌ها ارائه شد. با توجه به شکل ۱۱ D و E، روند ارتباط سرعت عبور امواج برشی و فشاری با میزان انرژی ویژه

جدول ۶: روابط پیشنهادی برای تعیین انرژی ویژه برش

Equation	% R <sup>2</sup>	Variables
$E = 0.372e^{1.481D}$	86.9	Density
$E = 1.777e^{0.0008Vs}$	86.1	Shear Wave Velocity
$E = 9.848e^{0.098BTS}$	94.2	Tensile Strength
$E = 1.237e^{0.0005Vp}$	95.8	Compressive Wave velocity
$E = 6.819e^{0.014UCS}$	97.4	Compressive Strength

## ۵. بحث

سیم ۳۰ عدد، ثابت نگه داشته شد و زوایای برخورد سیم با نمونه ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه اجرا شد. با توجه به نمودارهای برازش مشخص شد که بهترین مقدار زاویه‌ی برخورد سیم با نمونه که در آن زاویه، کمترین میزان انرژی ویژه برش در حالت‌های مختلف ثبت شده است، زاویه ۱۵ درجه (نسبت به سطح افق) می‌باشد. بیشترین میزان انرژی ویژه برش طبق نمودارهای برازش مربوط به زاویه ۲۵ درجه می‌باشد که دلیل اصلی این موضوع در عدم تماس مناسب سگمنت با نمونه و براده برداری نامناسب در زمان برش به دلیل باز بودن زاویه سیم با نمونه را می‌توان مطرح

در تحقیق حاضر مطالعات آماری به همراه برازش‌های تک متغیره برای بررسی ارتباط بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها با انرژی ویژه برش مورد بررسی و استفاده قرار گرفت که در بیشتر موارد ارتباط منطقی قابل قبول با ضرایب تعیین بالا ارائه شد. مولفه‌های عملیاتی سرعت خطی و سرعت کشش به عقب سیم در تمام آزمایش‌ها یکسان و به ترتیب برابر ۵۰ متر بر ثانیه و ۲/۵ سانتیمتر در دقیقه و تعداد سگمنت در واحد طول

ذاتی نمونه‌ها است و باعث می‌شود که برش نمونه‌های مستحکم تر با مصرف بیشتر انرژی صورت می‌پذیرد، به طوریکه در ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها با میزان انرژی ویژه برش مصرفی، از نمونه‌های T6 تا T1 در بیشترین حالت مصرف انرژی ویژه با افزایش حدود ۵۴ درصد در مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، انرژی ویژه برش حدود ۴۷ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین با توجه به ثابت نگهداشتن عوامل دستگاهی در تعیین سرعت عبور امواج فراصوت از نمونه‌ها در این پژوهش، تاثیر سایر عوامل موثر بر سرعت انتشار امواج التراسونیک همچون بافت، چگالی، تخلخل، سطح تنش، ناهمسانگردی و سرعت عبور امواج از کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها اهمیت می‌یابد به گونه‌ای که مثلاً با افزایش چگالی نمونه‌ها و ریز دانه شدن بافت سنگ‌ها سرعت عبور امواج التراسونیک نیز افزایش می‌یابد که چرایی افزایش مصرف انرژی ویژه برش را با افزایش سرعت عبور امواج فراصوت توجیه می‌نماید. در نمودارهای تغییرات میزان انرژی ویژه برش با سرعت عبور امواج برشی در حالت‌های مختلف، مشاهده می‌شود که در شرایط عملیاتی یکسان بین کمترین مقدار انرژی ویژه برش مصرفی در نمونه T6 تا بیشترین میزان انرژی ویژه برش مصرفی در نمونه T1 در زاویه ۱۵ درجه، حدود ۳۹ درصد افزایش انرژی ویژه برش قابل مشاهده می‌باشد که نشان از اختلاف این سطح از انرژی ویژه تنها در تغییر نمونه ها می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش مطالعاتی با هدف یافتن رابطه بین مهمترین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها با انرژی ویژه مصرفی برش دستگاه سیم برش الماسه در شرایط ثابت عملیاتی با نگرشی ویژه نسبت به تغییرات زاویه‌ی برخورد سیم با نمونه انجام شد. در این راستا ۶ نوع سنگ تراورتن انتخاب شد و تعداد ۱۸ سری آزمایش با استفاده از دستگاه سیم برش الماسه انجام و نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. خصوصیات اندازه‌گیری شده برای هر نمونه شامل تعیین خصوصیات

کرد. در زاویه ۵ درجه دلیل افزایش مصرف انرژی را می‌توان در افزایش بیش از حد سطح تماس مهره‌ها با نمونه و اصطکاک زیاد و عدم براده‌برداری مناسب دانست.

با بررسی نمونه‌های مختلف جهت تعیین ارتباط بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها با میزان مصرف انرژی ویژه مشاهده شد که بین مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزلی و سرعت عبور موج فشاری، سرعت عبور موج برشی و چگالی خشک نمونه‌ها با میزان انرژی ویژه برش نمونه‌ها ارتباطی معنادار با ضرایب تعیین بالای ۸۵ درصد برقرار است و بین تخلخل و جذب آب با میزان مصرف انرژی برای برش نمونه‌ها ارتباطی ضعیف با ضرایب تعیین کمتر از ۲۵ درصد برقرار می‌باشد. دلیل ارتباط ضعیف میان این دو پارامتر را می‌توان در نحوه تعیین آنها به ویژه تخلخل در آزمایشگاه عنوان کرد. در این تحقیق تخلخل کل سنگ با روش پودر نمودن سنگ تعیین نشده است و صرفاً تخلخل موثر با روش اشباع و غوطه‌وری در آب تعیین شده است لذا به نظر می‌رسد که تخلخل موثر به خوبی نمی‌تواند نشان دهنده تاثیر تخلخل بر میزان انرژی ویژه برش باشد.

در ارتباط بین چگالی خشک نمونه‌ها با انرژی ویژه برش مصرفی، این نکته قابل تامل می‌باشد که بین کمترین و بیشترین میزان انرژی ویژه برش مصرفی در کمترین و بیشترین مقدار چگالی، حدود ۵۰ درصد اختلاف مشاهده شده است که گویای تاثیر بالای این پارامتر بر مصرف انرژی ویژه برش می‌باشد. همچنین این روند به ترتیب برای پارامترهای مقاومت کششی برزلی و فشاری تک محوری نیز قابل مشاهده می‌باشد. از آنجا که شرایط محیطی انجام آزمایش‌های مقاومتی در این پژوهش برای همه نمونه‌ها یکسان بوده است، تنها عوامل ذاتی تاثیرگذار روی خصوصیات مقاومتی سنگ‌ها همچون ترکیب کانی شناسی، چگالی، تخلخل، ابعاد و شکل دانه‌ها، شاخص پوکی و ناهمسانگردی روی تفاوت خصوصیات مقاومتی نمونه‌ها همچون مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی تاثیرگذار بوده است و چرایی تاثیر و ارتباط مشاهده شده بین خصوصیات مکانیکی سنگ با انرژی ویژه مصرفی را می‌توان در این دانست که افزایش این خصوصیات نشان دهنده استحکام



شامل ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه نسبت به سطح افق در شرایط ثابت عملیاتی بررسی شد، نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که بهترین زاویه برخورد سیم با سطح سنگ زاویه ۱۵ درجه با کمترین انرژی ویژه مصرفی در شرایط ثابت عملیاتی می‌باشد. بیشترین میزان انرژی ویژه برش در تمامی حالات مربوط به زاویه ۲۵ درجه می‌باشد که دلیل اصلی این موضع، عدم تماس مناسب مهره‌ها با نمونه و براده برداری کمتر در زمان برش یکسان به دلیل زاویه‌ی باز سیم با نمونه و کشش بیش از حد سیم در این حالت را می‌توان مطرح کرد که باعث برشی غیر یکنواخت و گاه‌آ پارگی سیم نیز شده‌است. در زاویه ۵ درجه به دلیل افزایش بیش از حد سطح تماس مهره‌ها با نمونه و اصطکاک زیاد و عدم براده‌برداری مناسب و عدم جدایش براده‌ها از سیم در مسیر برش را می‌توان دلیل افزایش مصرف انرژی ویژه مصرفی دانست.

#### تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری صمیمانه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود در تخصیص اعتبار لازم از محل گرنت نویسندگان دوم و سوم این مقاله برای ساخت دستگاه سیم برش الماسه آزمایشگاهی کمال تشکر را ابراز دارند. همچنین از داوران محترم که با ارائه نظرات تخصصی ارزنده و بسیار سازنده‌ی خود به منظور بهبود این دستنوشته در بیان شیواتر و انتقال بهتر دستاوردهای این پژوهش به مخاطبین بسیار مثرتر بوده‌اند کمال سپاسگزاری را دارند.

فیزیکی (چگالی، تخلخل و جذب آب) و مکانیکی (مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی) و آزمایش‌های غیر مخرب تعیین سرعت عبور امواج فراصوت فشاری و برشی در آزمایشگاه به منظور یافتن روابط مناسب برای پیش‌بینی انرژی ویژه برش سنگ توسط دستگاه سیم برش الماسه، مورد استفاده قرار گرفتند.

نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که در شرایط ثابت عملیاتی (سرعت خطی سیم ۵۰ متر در ثانیه و سرعت کشش به عقب سیم ۲/۵ سانتیمتر در دقیقه) با افزایش چگالی، سرعت امواج فراصوت فشاری و برشی، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی مقدار انرژی ویژه برش دستگاه، به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. در نقطه مقابل با افزایش پارامتر تخلخل موثر و ضریب جذب آب مقدار انرژی ویژه مصرفی دستگاه کاهش پیدا می‌کند. به طوریکه بین سه مشخصه مهم مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و سرعت عبور موج فشاری با میزان انرژی ویژه برش ارتباطی معنادار با ضریب تعیین بالای ۹۳ درصد برقرار است. همچنین این مقدار برای سرعت عبور موج برشی و چگالی خشک نمونه‌ها با میزان انرژی ویژه برش بالای ۸۶ درصد مشاهده شد و کمترین مقدار برای دو مشخصه تخلخل و جذب آب با ضریب تعیین کمتر از ۲۵ درصد برقرار می‌باشد. در ادامه ارتباط میان یکی از مشخصات مهم عملیاتی دستگاه (زاویه برخورد سیم با سطح سنگ) با میزان انرژی ویژه برش مورد ارزیابی قرار گرفت. در طی انجام آزمایش‌ها سه زاویه برخورد سیم با نمونه

#### منابع

فهمی‌فر، ا.، سروش، ح.، ۱۳۸۰. آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها. جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک. چاپ اول. تهران.

- Almasi S.N. & Bagherpour R. & Mikaeil R. and Khademian A., (2015), "Influence of Cutting Wire Tension on Travertine Cutting Rate", 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET'15 Antalya, Turkey, April 14-17, pp: 1096-1102
- Almasi S.N. & Bagherpour R. & Mikaeil R. and Ozcelik Y., (2017), "Analysis of bead wear in diamond wire sawing considering the rock properties and production rate", Bull Eng Geol Environ, DOI 10.1007/s10064-017-1057-9

- Almasi S.N. & Bagherpour R. & Mikaeil R. & Ozcelik Y. and Kalhori H., (2017), "Predicting the Building Stone Cutting Rate Based on Rock Properties and Device Pullback Amperage in Quarries Using M5P Model Tree". *Geotechnical and Geological Eng.*, Vol. 35, Iss. 4: pp. 1311–1326.
- Ataei M. & Mikaeil R. & Sereshki F. and Ghaysari N., (2011), "Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis", *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 5(6): pp. 1289-1295.
- Bagherpour R. & Khademian A. & Almasi, S.N. and Aalaei, M., (2014), "Optimum cutting wire assembly situation in dimension stone quarries", *Journal of Mining and Metallurgy, Section A: Mining*, Vol. 50(1): pp. 1- 8.
- Cai O. & Careddu N. & Mereu M. and Mulas, I., (2007), "The influence of operating parameters on the total productivity of diamond wire in cutting granite" *J. of Industrial diamond review (IDR)*, pp 25-32
- Eyuboglu A.S. & Ozcelik Y. & Kulaksiz S. and Engin I.C., (2003) "Statistical and microscopic investigation of segment wear related to sawing Ankara andesites", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 40: pp. 405–414.
- Ghaysari N. & Ataei M. & Sereshki F. and Mikaeil R., (2012), "Prediction of Performance of Diamond Wire Saw with Respect to Texture Characteristics of Rock", *Archives of Mining Sciences*, Vol. 57(4): pp. 887-900.
- Huang G. and Xu X., (2013), "Sawing performance comparison of brazed and sintered diamond wires", *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 26(2): pp. 393-399.
- Jain S. and Rathore S., (2011), "Prediction of cutting performance of diamond wire saw machine in quarrying of marble: a neural network approach", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 44(3): pp. 367-371.
- Korre A. and Durucan S., (2000), "The effects of granite microstructure on the sawing performance of diamond wires", *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 14: pp. 87-102.
- Konstanty J., (2002), "Theoretical analysis of stone sawing with diamonds", *Journal of materials processing technology*, Vol. 123(1): pp. 146-154.
- Konstanty J., (2005), "Powder metallurgy diamond tools", first ed., Elsevier.
- Khademian A. & Bagherpour R. and Almasi, S.N., (2015), "Optimum Distance Between Cutting Machine And Working Face In Travertine Exploitation With Diamond Wire Cutting Method", 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET'15 Antalya, Turkey, April 14-17, pp: 1103-110
- Mikaeil R. & Ozcelik Y. & Ataei M. and Haghshenas S.S., (2016), "Application of harmony search algorithm to evaluate performance of diamond wire saw", *Journal of Mining & Environment*, Doi: 10.22044/jme.2016.723.
- Ozcelik Y. & Kulaksız S. and Cetin M., (2002), "Assessment of the wear of diamond beads in the cutting of different rock types by the ridge regression", *Journal of materials processing technology*, Vol. 127(3): pp. 392-400.
- Ozcelik Y. & Polat E. & Bayram F. and 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(3): pp. 1-7.
- Ozcelik Y. and Bayram F., (2004), "Optical investigations of bead wear in diamond wire cutting", *Industrial diamond review (IDR)*, Vol. 3: pp. 60-65.
- Ozcelik Y., (2005), "Optimum working conditions of diamond wire cutting machines in the marble industry", *Industrial diamond review (IDR)*, (1): pp. 58-64.
- Ozcelik Y. and Yilmazkaya E., (2011), "The effect of the rock anisotropy on the efficiency of diamond wire cutting machines", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48(4): pp. 626-636.
- Sadegheslam G. & Mikaeil R. & Rookei R. & Ghadernejad S. and Ataei M., (2013), "Predicting the production rate of diamond wire saws using multiple nonlinear regression analysis", *Geosystem Engineering*, Vol. 16(4): pp. 275-285.
- Tonshoff H.K. and Warnecke G., (1982) "Research on stone sawing", P. Daniel (Ed), *Advance in Ultrahard Materials Application Technology*, Vol 1, Harnbeam, England, pp. 36-49
- Tonshoff H.k. & Friemuth T. and Hillman A.H., (2001), "Diamond wire sawing of steel components" *Industrial diamond review (IDR)*, Vol. 3: pp. 203-207.
- Turchetta S. & Sorrentino L. and Bellini C., (2017), "A method to optimize the diamond wire cutting process", *Diamond & Related Materials*, Vol. 71: pp. 90–97.

---

Yilmazkaya E. and Ozcelik Y., (2015), "Development of Cuttability Chart for a Marble Cutting with Monowire Cutting Machine", in International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM), bochum , pp: 73-85.