

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

بهینه‌سازی عملکرد سیم برش الماسه با استفاده از مدل‌سازی عددی

نگارنده: اردشیر امیرشرفی

اساتید راهنما:

دکتر مهدی نوروزی

دکتر فرهنگ سرشکی

اسفند ۱۳۹۹

شماره: ۴۰۰/۴۲۰۸۹  
 تاریخ: ۹/۰۳/۱۴۰۰  
 ویرایش:

**باسمه تعالی**

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد  
 مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

**فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد**

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای اردشیر امیرشرفی با شماره دانشجویی ۹۷۰۳۰۲۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان **یهینه‌سازی عملکرد سیم برش الماسه با استفاده از مدل‌سازی عددی** که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۲/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر مهدی نوروزی	۱- استاد راهنمای اول
	استاد	دکتر فرهنگ سرشکی	۲- استاد راهنمای دوم
		-	۳- استاد مشاور
	استاد	دکتر محمد عطائی	۴- استاد داور اول
	استادیار	دکتر مرتضی جوادی اسطهباناتی	۵- استاد داور دوم
	استادیار	دکتر محمد جهانی چگنی	۶- نماینده تحصیلات تکمیلی

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطائی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



# رہبر و مہربان

کہ مرادور نماح مرادور زندگى رہنمایانى مى کنند

## سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده‌ی اساتید راهنما گرامی جناب آقای دکتر مهدی نوروزی و جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی که در تحقق این پژوهش همکاری فراوان داشته‌اند، کمال سپاس و قدردانی را داشته باشم. ضمناً وظیفه‌ی خود دانسته که کمال تشکر و قدردانی ویژه‌ای از دوست و برادر عزیزم مهندس امیر جعفرپور را داشته باشم.

## تعهد نامه

اینجانب اردشیر امیرشرفی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه‌سازی عملکرد سیم برش الماسه با استفاده از مدل‌سازی عددی تحت راهنمایی دکتر مهدی نوروزی و دکتر فرهنگ سرشکی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

در دهه‌های اخیر، برش سنگ با سیم الماسه، یکی از روش‌های پرکاربرد در صنایع سنگ ساختمانی محسوب می‌شود. نرخ برش سنگ در روش سیم الماسه، یکی از معیارهای مهم در ارزیابی این روش است. پارامترهای غیرقابل کنترل و قابل کنترل زیادی در کارایی برش سنگ اثرگذار هستند که می‌توان به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ، پارامترهای عملیاتی و ابزاری اشاره کرد. در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای به‌صورت آزمایشگاهی و میدانی در خصوص نحوه تاثیر پارامترهای غیرقابل کنترل و قابل کنترل بر نرخ برش، انجام شده است. به دلیل پرهزینه بودن و زمان‌بر بودن آزمایش‌ها و مطالعات میدانی، مدل‌های عددی می‌توانند کمک شایانی به ارزیابی پارامترهای مختلف بر فرآیند برش سنگ کنند. همچنین با استفاده از مدل‌سازی عددی می‌توان دامنه گسترده‌ای از تغییرات پارامترها که خارج از توان آزمایشگاه و تکنولوژی موجود است، را بررسی کرد. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار PFC3D یک مدل عددی برای محاسبه نرخ برش و تحلیل پارامترهای قابل کنترل اثرگذار بر آن شامل سرعت محیطی سیم الماسه، تعداد مهره در واحد طول سیم، آمپراژ کشش دستگاه و قطر مهره‌ها توسعه داده شده است. شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی آن بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی یک نمونه سنگ گرانیتی انجام شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد، پارامترهای سرعت محیطی سیم الماسه و آمپراژ کشش دستگاه رابطه‌ی مستقیم با نرخ برش دارند. مقدار بهینه برای این پارامترها، بیشترین مقدار ممکن است. به عبارت دیگر با پیشرفت تکنولوژی و توانایی افزایش مقادیر این پارامترها در دستگاه‌های سیم برش می‌توان به نرخ‌های بالاتری از برش دست یافت. بررسی پارامتر تعداد مهره در واحد طول سیم برش الماسه نشان داد که با افزایش آن تا ۳۶ مهره، نرخ برش روندی افزایشی دارد، اما با افزایش بیش از آن، نرخ برش تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بنابراین تعداد ۳۶ مهره در واحد طول سیم برش الماسه به عنوان مقدار بهینه برای این پارامتر در نظر گرفته می‌شود. بررسی تاثیر قطر مهره‌ها بر نرخ برش نشان داد که با افزایش قطر، نرخ برش افزایش یافته و در قطر مهره برابر یک سانتی‌متر، میزان نرخ برش حداکثر می‌شود. افزایش بیشتر قطر مهره، سبب کاهش نرخ برش خواهد شد. بنابراین قطر مهره برابر یک سانتی‌متر به عنوان مقدار بهینه در برش سنگ گرانیتی معرفی می‌شود. با مقایسه تاثیر هر یک از پارامترهای ذکر شده بر روی میزان نرخ برش، می‌توان آمپراژ کشش دستگاه را به عنوان تاثیرگذارترین پارامتر بر نرخ برش بیان کرد. در نهایت با استفاده از رگرسیون چند متغیره، رابطه‌ای تجربی بین نرخ برش و پارامترهای مورد مطالعه با ضریب همبستگی ۰/۹۷۴ ارائه شد. از این رابطه می‌توان برای پیش‌بینی و بهبود عملکرد سیم برش الماسه در سنگ‌های گرانیتی استفاده کرد.

**واژگان کلیدی:** مدل‌سازی عددی، سیم برش الماسه، سنگ ساختمانی، PFC3D.

## فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- بیان مساله	۲
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳
۴-۱- اهداف تحقیق	۴
۵-۱- سازمان‌دهی پایان‌نامه	۴
فصل دوم: مفاهیم پایه	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- روش‌های استخراج سنگ‌های ساختمانی	۸
۳-۲- استخراج سنگ ساختمانی با سیم برش الماسه	۹
۴-۲- مراحل استخراج با سیم برش الماسه	۱۰
۵-۲- مکانیزم برش و فرآیند تشکیل تراشه	۱۱
۶-۲- نیروهای وارده بر مهره‌ها	۱۴
۱-۶-۲- نیروی گریز از مرکز	۱۵
۲-۶-۲- نیروی نرمال	۱۵
۳-۶-۲- نیروی مماسی (برشی)	۱۶
۴-۶-۲- نیروهای کششی وارد بر سیم	۱۶
۵-۶-۲- اصطکاک بین سنگ و ابزار برش	۱۶
۶-۶-۲- مقاومت ویژه برش سنگ	۱۶
۷-۲- پارامترهای موثر در برش سنگ	۱۶
۱-۷-۲- مشخصات سنگ	۱۷
۱-۱-۷-۲- مشخصات فیزیکی سنگ	۱۸



۲۰	۲-۱-۷-۲- مشخصات مکانیکی سنگ
۲۲	۳-۱-۷-۲- مشخصات ساختاری و محیطی سنگ
۲۲	۲-۷-۲- مشخصات دستگاه برش
۲۲	۱-۲-۷-۲- مشخصات ابزاری
۲۲	۲-۲-۷-۲- مشخصات عملیاتی
۲۳	۸-۲- معیارهای قابل ارزیابی در عملیات برش
۲۴	۱-۸-۲- نرخ برش
۲۴	۲-۸-۲- جریان مصرفی
۲۴	۳-۸-۲- هزینه سیم برش
۲۵	۴-۸-۲- بهره‌وری یا نرخ سایش مهره‌های الماسه
۲۶	۹-۲- جمع‌بندی
۲۷	فصل سوم: پیشینه پژوهش
۲۸	۱-۳- مقدمه
۲۸	۲-۳- مطالعات پیشین
۲۸	۱-۲-۳- مطالعات پیشین در خصوص مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ
۳۶	۲-۲-۳- مطالعات پیشین در خصوص مشخصات دستگاه برش
۴۹	۳-۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۵۱	فصل چهارم: مدل سازی عددی فرآیند برش سنگ توسط سیم الماسه
۵۲	۱-۴- مقدمه
۵۲	۲-۴- نرم افزار کد جریان ذرات (PFC)
۵۳	۳-۴- مدل پیوند ذرات (BPM)
۵۵	۴-۴- مدل سازی فرآیند برش در سنگ
۵۵	۱-۴-۴- مورد مطالعاتی
۵۷	۲-۴-۴- تعیین ابعاد حجم اولیه معرف برای شبیه‌سازی آزمون‌های مقاومتی

۵۸	..... شبیه‌سازی آزمون‌های مقاومتی
۶۲	..... شبیه‌سازی بلوک سنگی
۶۳	..... شبیه‌سازی مهره‌های الماسه
۶۵	..... مدل‌سازی فرآیند برش
۶۹	..... اعتبارسنجی مدل
۷۱	..... جمع‌بندی
۷۳	..... فصل پنجم: بررسی عملکرد سیم برش الماسه نسبت به پارامترهای قابل کنترل
۷۴	..... ۱-۵- مقدمه
۷۴	..... ۲-۵- انتخاب پارامترهای مورد بررسی بر اساس محدودیت‌های مدل
۷۴	..... ۳-۵- سرعت محیطی سیم و تاثیر آن بر نرخ برش
۸۰	..... ۴-۵- تعداد مهره‌ها در واحد طول و تاثیر آن بر نرخ برش
۸۴	..... ۵-۵- آمپراژ کشش و تاثیر آن بر نرخ برش
۹۰	..... ۶-۵- قطر مهره‌های الماسه و تاثیر آن بر نرخ برش
۹۳	..... ۷-۵- ارایه رابطه تجربی میان نرخ برش و پارامترهای قابل کنترل
۹۵	..... ۸-۵- جمع بندی و نتیجه‌گیری
۹۷	..... فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۹۸	..... ۱-۶- نتیجه‌گیری
۹۹	..... ۲-۶- پیشنهادها
۱۰۰	..... منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: استخراج سنگ ساختمانی با سیم برش الماسه ..... ۹
- شکل ۲-۲: اجزای سیم الماسه و دو نوع مهره اشباع‌شده و آبکاری‌شده ..... ۱۰
- شکل ۳-۲: سیم برش الماسه و نحوه استخراج به کمک آن ..... ۱۱
- شکل ۴-۲: تعامل نیروهای موجود میان دانه های الماسه و سطح خراشیده شده از سنگ ..... ۱۳
- شکل ۵-۲: نمایی از تشکیل یک منطقه پلاستیک به همراه ترک‌های شعاعی و جانبی در برش ..... ۱۴
- شکل ۶-۲: نیروهای وارده بر مهره الماسه و سنگ در هنگام برش ..... ۱۵
- شکل ۷-۲: توزیع بردارهای نیروهای برشی در زمان تماس با سنگ ..... ۱۶
- شکل ۸-۲: ارتباط بین جریان مصرفی و نرخ برش سطح ..... ۲۴
- شکل ۹-۲: ارتباط بین نرخ برش با کل هزینه برش در روش سیم الماسه ..... ۲۵
- شکل ۱۰-۲: ارتباط بین نرخ برش سیم و بهره‌وری یا عمر سیم ..... ۲۵
- شکل ۱-۳: نمودار تغییرات نرخ برش و نرخ سایش نسبت به ضریب بافت سنگ مرمر ..... ۳۱
- شکل ۲-۳: نمودار تغییرات نرخ برش نسبت به آزمون سایش لس‌آنجلس و مقاومت کششی برزیلی ..... ۳۲
- شکل ۳-۳: مقایسه میان مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی ..... ۳۳
- شکل ۴-۳: تکرار خواص فیزیکی سنگ در پژوهش‌های بررسی شده ..... ۳۵
- شکل ۵-۳: تکرار خواص مکانیکی سنگ در پژوهش‌های بررسی شده ..... ۳۵
- شکل ۶-۳: برش سنگ مرمر توسط سگمنت‌های الماسه ..... ۳۸
- شکل ۷-۳: تاثیر مشخصات نوک ابزار در فرآیند برش ..... ۳۸
- شکل ۸-۳: نرخ برش برای سیم‌هایی با جنس مختلف ..... ۳۹
- شکل ۹-۳: آرایش و جنس سیم و روکش آن ..... ۴۰
- شکل ۱۰-۳: گسیختگی سیم برش الماسه در قطرهای مختلف ..... ۴۰
- شکل ۱۱-۳: نمودار ارتباط میان زاویه برش با نرخ برش ..... ۴۱
- شکل ۱۲-۳: مقایسه برش نمونه بتنی در فشارهای خوراک‌دهی متفاوت ..... ۴۱

- شکل ۳-۱۳: نمودارهای مقایسه دو مدل رگرسیون و شبکه عصبی با واقعیت ..... ۴۲
- شکل ۳-۱۴: تاثیر نوع ساختار مهره بر روی نیروی برش در سیم الماسه ..... ۴۳
- شکل ۳-۱۵: نمودار نرخ برش در طول عمر مهرهها ..... ۴۳
- شکل ۳-۱۶: نمودار نرخ برش با تغییر تعداد مهره در واحد طول در ابعاد مختلف بلوک استخراجی ..... ۴۴
- شکل ۳-۱۷: تغییرات نرخ برش نسبت به سطح برش در آمپراژهای مختلف ..... ۴۵
- شکل ۳-۱۸: مدل عددی و نمودار انرژی اصطکاک نسبت به زمان ..... ۴۶
- شکل ۳-۱۹: مقایسه میان مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی ..... ۴۶
- شکل ۳-۲۰: نمودار تغییرات بهره‌وری نسبت به سرعت خطی سیم ..... ۴۷
- شکل ۳-۲۱: نمودار تغییرات بهره‌وری نسبت به نرخ خوراک‌دهی ..... ۴۸
- شکل ۳-۲۲: تکرار مشخصات دستگاه برش در پژوهش‌های بررسی شده ..... ۴۸
- شکل ۴-۱: تصویر شماتیک از تماس خطی بین ذرات و پیوند سیمانی بین ذرات ..... ۵۴
- شکل ۴-۲: نمای برقراری پیوند موازی میان ذرات ..... ۵۵
- شکل ۴-۳: دستگاه برش ساخته‌شده برای انجام آزمایشات برش ..... ۵۶
- شکل ۴-۴: نتایج آزمون فشاری سه‌محوری ..... ۵۹
- شکل ۴-۵: نتایج آزمون فشاری تک‌محوری ..... ۶۰
- شکل ۴-۶: نتایج آزمون کششی برزیلی ..... ۶۱
- شکل ۴-۷: توزیع شعاع توپ‌ها در مدل ..... ۶۳
- شکل ۴-۸: مهره برش‌خورده مورد استفاده در آزمایشگاه و مهره طراحی شده در نرم‌افزار PFC ..... ۶۴
- شکل ۴-۹: موقعیت فضایی ۶ مهره ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۰: مسیر حرکت مهره‌ها در نرم‌افزار ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۱: راستای نفوذ و برش مهره‌ها ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۲: تغییرات جابجایی در راستای نفوذ ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۳: تغییرات نیرو در راستای نفوذ بر روی مهره ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۴: نمودار تغییرات جابجایی و نیروهای وارده به مهره به گام‌های محاسباتی ..... ۶۸

- شکل ۴-۱۵: گسیختگی ایجادشده توسط مهره‌ها در هنگام برش ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۶: نمودار جابجایی مهره‌ها در راستای نفوذ نسبت به زمان ..... ۷۰
- شکل ۵-۱: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در سرعت محیطی ۵ متر بر ثانیه ..... ۷۵
- شکل ۵-۲: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در سرعت محیطی ۱۵ متر بر ثانیه ..... ۷۶
- شکل ۵-۳: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در سرعت محیطی ۲۴ متر بر ثانیه ..... ۷۶
- شکل ۵-۴: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در سرعت محیطی ۳۵ متر بر ثانیه ..... ۷۷
- شکل ۵-۵: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در سرعت محیطی ۵۰ متر بر ثانیه ..... ۷۷
- شکل ۵-۶: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در سرعت محیطی ۷۰ متر بر ثانیه ..... ۷۸
- شکل ۵-۷: نتایج حاصل از برازش تک متغیره میان سرعت محیطی و نرخ برش ..... ۷۹
- شکل ۵-۸: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای ۵۸ مهره در واحد طول سیم ..... ۸۰
- شکل ۵-۹: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای ۳۶ مهره در واحد طول سیم ..... ۸۱
- شکل ۵-۱۰: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای ۲۷ مهره در واحد طول سیم ..... ۸۱
- شکل ۵-۱۱: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای ۲۱ مهره در واحد طول سیم ..... ۸۲
- شکل ۵-۱۲: نتایج حاصل از برازش تک متغیره میان تعداد مهره‌ها در واحد طول و نرخ برش ..... ۸۳
- شکل ۵-۱۳: نمودار و رابطه میان آمپراژ کشش و نیروی کشش در مدل عددی ..... ۸۵
- شکل ۵-۱۴: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۵۵ آمپر ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۵: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۷۰ آمپر ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۶: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۸۳ آمپر ..... ۸۷
- شکل ۵-۱۷: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۱۰۰ آمپر ..... ۸۷
- شکل ۵-۱۸: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۱۲۰ آمپر ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۹: نتایج حاصل از برازش تک متغیره میان آمپراژ کشش دستگاه و نرخ برش ..... ۸۹
- شکل ۵-۲۰: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای قطر مهره ۰/۸ سانتی‌متر ..... ۹۰
- شکل ۵-۲۱: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای قطر مهره ۱ سانتی‌متر ..... ۹۱
- شکل ۵-۲۲: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای قطر مهره ۱/۵ سانتی‌متر ..... ۹۱

شکل ۵-۲۳: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای قطر مهره ۲ سانتی‌متر..... ۹۲

شکل ۵-۲۴: نتایج حاصل از برآزش تک متغیره میان قطر مهره‌ها الماسه و نرخ برش..... ۹۳

شکل ۵-۲۵: مقایسه نرخ برش تخمین زده شده و نرخ برش حاصل شده از مدل عددی..... ۹۴

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: پارامترهای موثر در روش برش با سیم الماسه ..... ۱۷
- جدول ۲-۲: شاخص‌های کمی ارزیابی بافت ..... ۱۹
- جدول ۳-۲: مقادیر کوارتز برای کانی‌ها ..... ۲۰
- جدول ۱-۳: پیشینه پژوهش مربوط به مشخصات فیزیکی سنگ ..... ۲۹
- جدول ۲-۳: پیشینه پژوهش مربوط به مشخصات مکانیکی سنگ ..... ۲۹
- جدول ۳-۳: پیشینه پژوهش مربوط به مشخصات ابزاری ..... ۳۶
- جدول ۱-۴: مشخصات دستگاه برش ساخته شده ..... ۵۶
- جدول ۲-۴: مشخصات خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ گرانیت افشار ..... ۵۶
- جدول ۳-۴: مقادیر مقاومت فشاری سنگ در قطرهای متفاوت ..... ۵۸
- جدول ۴-۴: پارامترهای میکرو ذرات، پیوند خطی و پیوند موازی ..... ۶۱
- جدول ۵-۴: مقایسه نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و عددی ..... ۶۲
- جدول ۶-۴: میزان جابجایی در هر ثانیه از برش ..... ۷۰
- جدول ۷-۴: مقایسه پارامترهای مدل عددی و آزمایشگاهی و نرخ برش حاصل شده ..... ۷۱
- جدول ۱-۵: مقایسه میان نرخ برش حاصل از مدل عددی و آزمایشگاه ..... ۸۴

فصل اول

**کلیات**



## ۱-۱- مقدمه

سنگ یکی از قدیمی‌ترین مصالحی است که انسان‌ها از بدو زندگی بر روی زمین شناخته است و در سفر تاریخی هزاران ساله خود همواره در کنار او بوده است. از زمانی که انسان نخستین برای ساختن ابزار، پناهگاه و رفع نیاز خود از سنگ استفاده کرد تا عصر حاضر، که در زندگی بشر نقش اساسی دارد. امروزه سنگ‌های تزئینی و نما، زینت‌بخش بناها و کاخ‌ها هستند. سنگ ساختمانی به سنگی گویند که با تغییر شکل یا بدون تغییر شکل فیزیکی در یکی از قسمت‌های ساختمان مثل پی، کف، دیواره و نما به کار رود. این سنگ‌ها به دو دسته سنگ‌های زیربنایی و سنگ‌های تزئینی تقسیم می‌شوند (عطایی، ۱۳۸۷).

با توجه به اهمیت فنی و اقتصادی صنعت تولید سنگ ساختمانی، ضرورت دارد پژوهش‌های متعددی در خصوص بهره‌برداری بهینه از معادن انجام شود. در این پژوهش، به مدل‌سازی فرآیند برش و بررسی تاثیر عوامل فنی مختلف بر آن پرداخته شده است.

در این فصل، پس از بیان مسئله و ضرورت انجام این پژوهش، اهداف پژوهش به اختصار ارایه شده و در نهایت، ساختار پایان نامه شرح داده شده است.

## ۱-۲- بیان مساله

روش برش سنگ با سیم برش الماسه، از سال ۱۹۸۵ در برش سنگ‌های ساختمانی استفاده شده است. از آن زمان به بعد، این روش تولید سنگ، پیشرفت‌های سریعی را در زمینه تجهیزات داشته و به صورت گسترده‌ای برای ۹۰ درصد معدن‌کاری سنگ مرمر، گرانیت و دیگر سنگ‌های ساختمانی استفاده شده است. این روش کاربرد فراوانی در دیگر صنایع معدنی و عمرانی دارد. روش برش با سیم الماسه، به دلیل مزایای زیست‌محیطی، میزان استخراج بالا، بهره‌وری بهتر و هزینه پایین در معدن‌کاری، مورد استقبال بهره‌برداران معدن قرار گرفته است (نبیان، ۱۳۷۰).

سیم برش الماسه، یکی از مهم‌ترین ابزارها برای دستگاه برش سنگ است که متشکل از کابلی مستحکم بوده و بر روی آن مهره‌های حاوی الماسه در فواصل برابر با یکدیگر قرار گرفته‌اند. عملیات برش، با یک پولی متصل به موتور انجام می‌گیرد که باعث چرخش سیم الماسه به دور بلوک سنگ می‌شود. سیم در

داخل چال‌های از قبل حفاری شده در سنگ قرار می‌گیرد و نیروی کشش از طریق ریل‌هایی که موتور بر آن سوار است، به سیم وارد می‌شود. مهم‌ترین نکته در استفاده از سیم برش الماسه، تولید بلوک با کم‌ترین قیمت ممکن به‌وسیله انتخاب مناسب پارامترهای موثر در برش است. در برش سنگ‌های ساختمانی، پارامترهای موثر بر عملکرد سیم برش الماسه به دو دسته غیرقابل کنترل و قابل کنترل تقسیم می‌شوند. پارامترهای غیرقابل کنترل همچون مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ است. از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ، می‌توان خصوصیات بافت، ضریب بافت، محیط دانه، قطر معادل، نسبت وضعیت دانه، شاخص یکنواختی، پارامترهای مقاومتی، سختی، ساینده‌گی، تردی یا شکنندگی و الاستیسیته را نام برد. همچنین از پارامترهای قابل کنترل، می‌توان به توان موتور، شکل سگمنت الماسه، نوع ساختار مهره (اشباع شده یا آبکاری شده)، تراکم الماسه بر روی مهره، سرعت محیطی سیم برش، نیروی کشش سیم، ابعاد بلوک، طول سیم برش، نوع برش، هندسه سیم در هنگام برش، تعداد مهره‌ها در واحد طول، قطر مهره‌ها، لرزش دستگاه و شرایط محیطی اشاره کرد. با بررسی و مطالعه بر روی این پارامترهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل می‌توان عملکرد سیم برش الماسه را از لحاظ نرخ برش بهبود داد (الماسی، ۱۳۹۵).

در این پژوهش، با توجه به اهمیت پارامترهای قابل کنترل در بهره‌وری عملیات برش سنگ، با مدل‌سازی فرآیند برش، به ارزیابی نحوه اثرگذاری پارامترهای عملیاتی قابل کنترل شامل سرعت محیطی سیم، آمپراژ کشش دستگاه، تعداد مهره در واحد طول و قطر مهره‌ها، پرداخته شده است.

### ۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به محدود بودن و انحصار تولید سنگ ساختمانی در چند کشور نظیر ایتالیا، چین، ایران و ترکیه، انتظار می‌رود مطالعه و پژوهش و ارتقای توان فناوری استخراج سنگ ساختمانی نیز توسط این کشورها انجام شود و کشورهای صنعتی بزرگ همانند امریکا، آلمان و ژاپن، سهمی کمتری در این زمینه خواهند داشت.

تاکنون پژوهش‌های آزمایشگاهی و میدانی بسیاری در زمینه نرخ برش انجام شده است. ماهیت این نوع پژوهش‌ها به نوعی است که نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی است. در عین حال با بکارگیری مدل‌سازی عددی و استفاده از مزایای آن، می‌توان در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرد. در دهه گذشته، با

توجه به دسترسی به رایانه‌های پرسرعت و نرم‌افزارهای مختلف، مدل‌سازی عددی به یک ابزار مفید، پرکاربرد و کارآمد تبدیل شده است. در سال‌های اخیر، نرم‌افزار PFC3D به‌طور گسترده‌ای توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم‌افزار، با توجه به توانایی منحصربه‌فرد خود در مدل‌سازی فرآیند ایجاد و رشد ترک و خردایش مواد، می‌تواند کمک شایانی به شبیه‌سازی مواردی همچون موضوع این پایان‌نامه داشته باشد.

## ۱-۴- اهداف تحقیق

در این پژوهش، تاثیر پارامترهای موثر قابل کنترل عملیاتی در برش سنگ، بر عملکرد سیم الماسه با استفاده از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار PFC3D بررسی شده است. از آن‌جا که برش سنگ توسط سیم الماسه به پارامترهای دیگری همچون خواص فیزیکی- مکانیکی سنگ، مشخصات ابزاری و مدیریتی نیز بستگی دارد، در این تحقیق این خواص به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده است. اهداف این تحقیق به‌صورت خلاصه به شرح زیر است:

- ۱- ساخت مدل عددی از برش سنگ توسط سیم الماسه با نرم‌افزار PFC3D
- ۲- انتخاب پارامترهای موثر قابل کنترل عملیاتی در برش سنگ با توجه به محدودیت‌های مدل عددی
- ۳- بررسی تغییرات نرخ برش نسبت به تغییرات پارامترهای انتخاب شده
- ۴- ارایه رابطه‌ای تجربی میان تغییرات نرخ برش و پارامترهای مورد نظر.

## ۱-۵- سازمان‌دهی پایان‌نامه

این پایان‌نامه، در شش فصل تهیه و تنظیم شده است. در ادامه، به شرح مختصر هر فصل پرداخته شده است.

- فصل اول: در این فصل، پس از بیان مقدمه‌ای کوتاه، تعریف مساله، ضرورت انجام پژوهش و اهداف تحقیق بیان شده است و در انتها، ساختار کلی پایان‌نامه شرح داده شده است.

- فصل دوم: در این فصل، به اختصار، به روش‌های برش سنگ‌های ساختمانی اشاره شده است. سپس به تفصیل روش، فرآیند و پارامترهای موثر بر برش سنگ توسط سیم الماسه تشریح شده است. در انتهای فصل نیز معیارهای ارزیابی برش سنگ توسط سیم الماسه بیان شده است.

- فصل سوم: در این فصل، پژوهش‌های انجام شده توسط محققین در دهه‌های اخیر، مرور شده است.

- فصل چهارم: در این فصل، روند مدل‌سازی عددی برش سنگ توسط سیم الماسه و اعتبارسنجی آن شرح داده شده است.

- فصل پنجم: در این فصل، برای بهینه‌سازی عملکرد سیم برش الماسه با استفاده از مدل عددی تهیه شده، در ابتدا پارامترهای قابل کنترل با توجه به محدودیت‌های مدل، انتخاب شده است. با تغییر این پارامترها، تغییرات به‌وجود آمده در نرخ برش، ثبت و به کمک برازش تک‌متغیره و برازش چندمتغیره، روندی میان نرخ برش و پارامترهای مورد نظر ارائه شده است.

- فصل ششم: در فصل آخر نیز نتایج حاصل از تحقیق و پیشنهادهای لازم برای پژوهش‌های آتی بیان شده است. در پایان نیز منابع و مآخذ مورد استفاده در پایان‌نامه ذکر شده است.



فصل دوم

**مفاهیم پایه**

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل، کلیاتی در مورد روش‌های استخراج سنگ‌های ساختمانی بیان شده است. همچنین روش استخراج به کمک سیم برش الماسه به تفصیل شرح داده شده و پارامترهای موثر در برش سنگ توسط سیم برش الماسه مورد بررسی قرار گرفته است. در انتهای فصل، به معیارهای بررسی عملکرد سیم برش نیز اشاره شده است.

## ۲-۲- روش‌های استخراج سنگ‌های ساختمانی

روش‌های استخراج سنگ‌های ساختمانی به سه دسته تقسیم می‌شوند (عطایی، ۱۳۸۷):

- روش‌های استخراج با حفاری چال‌های موازی: می‌توان به روش پارس و گوه، روش مکانیکی، روش استفاده از آشکاری کنترل‌شده و استفاده از مواد منبسط‌شونده اشاره کرد.
- روش‌های استخراج مکانیزم برش سنگ: می‌توان استفاده از ماشین ضربه‌زن، برش با سیم برش فولادی، برش با سیم الماسه و استفاده از دستگاه‌های سنگ‌بر (همانند هاواژ) را نام برد. شکل ۱-۲ روش استخراج سنگ‌های ساختمانی با استفاده از سیم برش را نشان می‌دهد.
- روش‌های استخراج نوین: استفاده از واترجت، شعله، ترموالاستیک و اشعه لیزر، جزو این روش‌ها محسوب می‌شوند.

عوامل موثر در انتخاب روش استخراج سنگ‌های ساختمانی شامل قیمت بلوک، دسترسی به ماشین‌آلات، نیروی کار متخصص، امکان استفاده از ضایعات، تعداد پله و طول کارگاه، امکان تامین آب کافی و تامین نیروی برق هستند.



شکل ۲-۱: استخراج سنگ ساختمانی با سیم برش الماسه

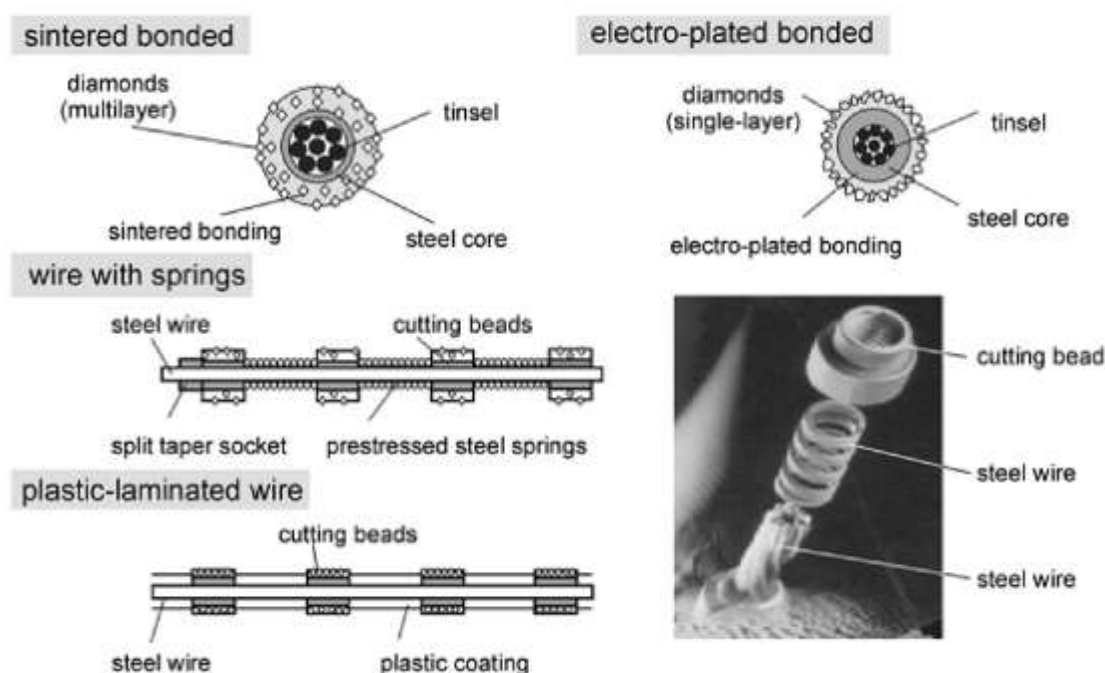
## ۲-۳- استخراج سنگ ساختمانی با سیم برش الماسه

برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ سیم برش الماسه در معدن کارارا واقع در ایتالیا استفاده شده است. از آن زمان تاکنون، این روش پیشرفت‌های سریعی را در زمینه تجهیزات داشته است. این روش در معادن مرمریت و سایر انواع سنگ‌های نرم به کار گرفته شده و به یک ابزار ضروری در معادن مرمریت تبدیل شده است. البته با پیشرفت فناوری و ساخت الماسه‌های مصنوعی، استفاده این ابزار در برش سنگ‌های سخت (همچون گرانیت) نیز اقتصادی شده است (عطایی، ۱۳۸۷).

سیم برش الماسه، متشکل از سیمی مستحکم، فنر، بوش یا قطعات فاصله‌دهنده، نری و مادگی اتصال سیم و مهره‌های الماسه است. جنس این سیم را می‌توان از آلیاژهای متفاوتی ساخت تا از پارگی سیم در هنگام برش جلوگیری شود. برای محکم کردن مهره‌ها و فنرها به یکدیگر، از حلقه‌هایی میان آن‌ها استفاده می‌شود. دو سر سیم، دارای نر و مادگی است که به وسیله دستگاه مونتاژ به هم متصل می‌شوند. طول سیم نیز متناسب با سطح برش در نظر گرفته می‌شود (سخن‌سنج، ۱۳۹۰).



مهره‌های الماسه متشکل از دانه‌های ریز الماس صنعتی و خمیره‌ای با آلیاژ مخصوص است. دانه‌های الماسه به دو صورت اشباع‌شده یا آبکاری‌شده برقی بر روی مهره‌ها قرار می‌گیرند. دانه‌های الماسه در نوع اشباع‌شده در درون خمیره مهره قرار دارند و در نوع آبکاری‌شده، توسط جریان الکتریکی دانه‌های الماسه به مهره می‌چسبند. در مهره‌های آبکاری‌شده، به تدریج با سایش بلورهای الماسه، قدرت برش کم‌تر می‌شود، ولی در نوع اشباع‌شده قدرت برش ثابت می‌ماند (الماسی، ۱۳۹۵). شکل ۲-۲، سیم برش الماسه و انواع مهره‌ها را نشان می‌دهد (Tönshoff et al., 2003).



شکل ۲-۲: اجزای سیم الماسه و دو نوع مهره اشباع‌شده و آبکاری‌شده (Tönshoff et al., 2003)

## ۲-۴- مراحل استخراج با سیم برش الماسه

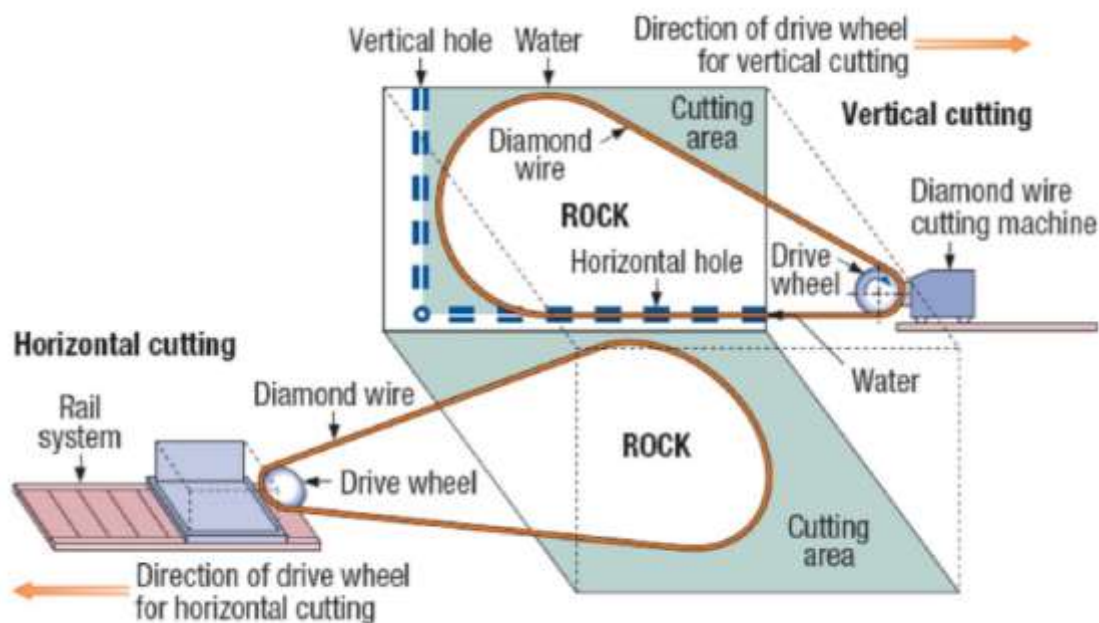
استخراج سنگ‌های ساختمانی با سیم برش الماسه را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد:

### ۱- حفاری چال

۲- برش سنگ توسط سیم برش الماسه.

در مرحله اول، به وسیله دستگاه چال‌زنی، چال‌هایی با قطر مناسب به صورت عمود بر هم حفاری می‌شوند که محدوده بلوک استخراجی را مشخص می‌کند. در مرحله دوم، به منظور استخراج بلوک، سیم

الماسه در چال‌های حفاری شده قرار می‌گیرد. سیم برش الماسه توسط یک قرقره در یک جهت معین به‌طور دائم روی سنگ حرکت می‌کند و در سنگ شیار ایجاد می‌کند. دستگاه در هنگام کار، بر روی ریل قرار گرفته و با استفاده از امکانات الکترونیکی یا هیدرولیکی به‌طور اتوماتیک بر روی ریل‌ها جابجا می‌شود و در حین برش خود را به عقب می‌کشد. نیروی کشش ایجادشده از این امر، حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم است، که به‌صورت ثابت این کشش باید حفظ شود. مکانیزم دستگاه به‌صورتی است که با جابجایی و تغییر محور قرقره از حالت افقی به عمودی، سنگ را می‌توان در راستاهای عمودی یا افقی برش داد (نبیان، ۱۳۷۰). در شکل ۲-۳، نحوه برش سنگ توسط دستگاه سیم برش الماسه نشان داده شده است (Ozcelik, 2005).



شکل ۲-۳: سیم برش الماسه و نحوه استخراج به کمک آن (Ozcelik, 2005)

کنترل عملیات برش توسط تابلویی در فاصله حدود ۱۰ متری از دستگاه برش انجام می‌شود. با استفاده از این تابلو می‌توان سرعت برش و کشش سیم را در هنگام برش سنگ تنظیم کرد. با این شیوه می‌توان از ایجاد ضربه به سیم برش الماسه جلوگیری کرد (نبیان، ۱۳۷۰).

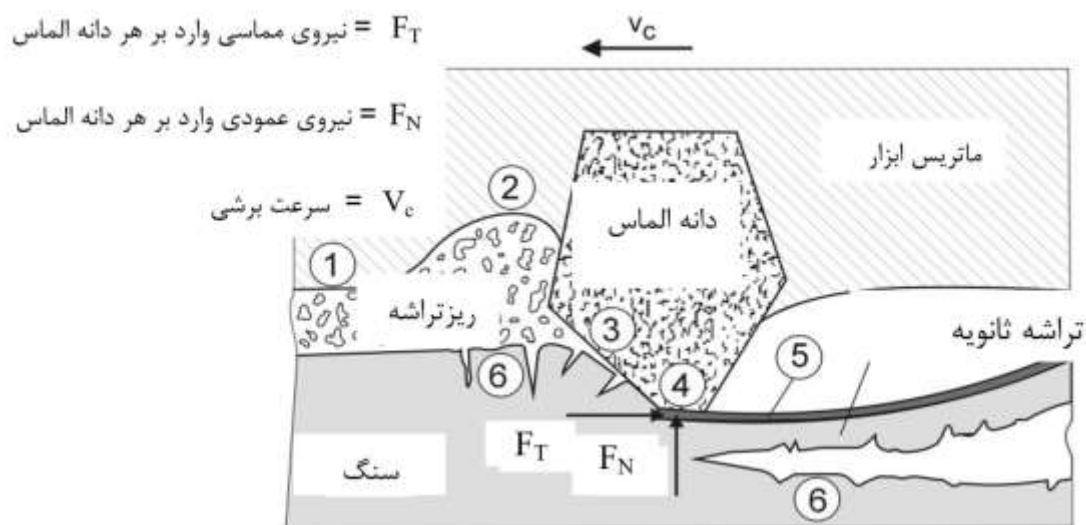
## ۲-۵- مکانیزم برش و فرآیند تشکیل تراشه

فرآیند برش، یک فرآیند سایشی است، به‌طوری که می‌توان برش سنگ توسط سیم برش الماسه را سایش میان ذرات تشکیل‌دهنده سنگ و دانه‌های الماسه دانست. برای درک بهتر فرآیند برش و نحوه

عملکرد دانه‌های الماسه در حین برش، شناخت مکانیزم برش و پارامترهای موثر بر آن لازم و ضروری است (قیصری، ۱۳۸۹).

به‌طور کلی، فرآیند برش سنگ با استفاده از سیم برش الماسه را می‌توان در دو مرحله بیان کرد. مرحله اول، فرآیند برش سنگ در نتیجه حرکت مهره‌های الماسه بر روی سطح قطعه کار و به دنبال آن تشکیل تراشه سنگ در اثر نفوذ دانه‌های الماسه در داخل سنگ است. در طی این فرآیند، دانه‌های الماسه با خراشیدن و شکافتن سطح قطعه کار موجب تشکیل تراشه و ایجاد سطح جدید برای دانه‌های الماسه بعدی می‌شوند. هنگامی که سنگ توسط سیم برش الماسه تحت برش قرار می‌گیرد، تعامل مکانیکی میان ابزار و سنگ، نیروهای فرآیندی ایجاد می‌کند که عمدتاً ناشی از عواملی نظیر تغییر شکل الاستیکی و پلاستیکی در سنگ، اصطکاک میان مهره (دانه الماسه و ماتریکس) با سنگ و تراشه‌های حاصل از برش است. شکل ۲-۴ نمای شماتیکی از یک دانه الماسه در حال برش و تعامل نیروهای موجود میان دانه الماسه و سطح خراشیده شده از سنگ را نشان می‌دهد. دو مولفه نیروی مماسی ( $F_T$ ) و نیروی عمودی ( $F_N$ )، از مهم‌ترین نیروهای موثر در مکانیزم برش سنگ هستند (قیصری، ۱۳۸۹).

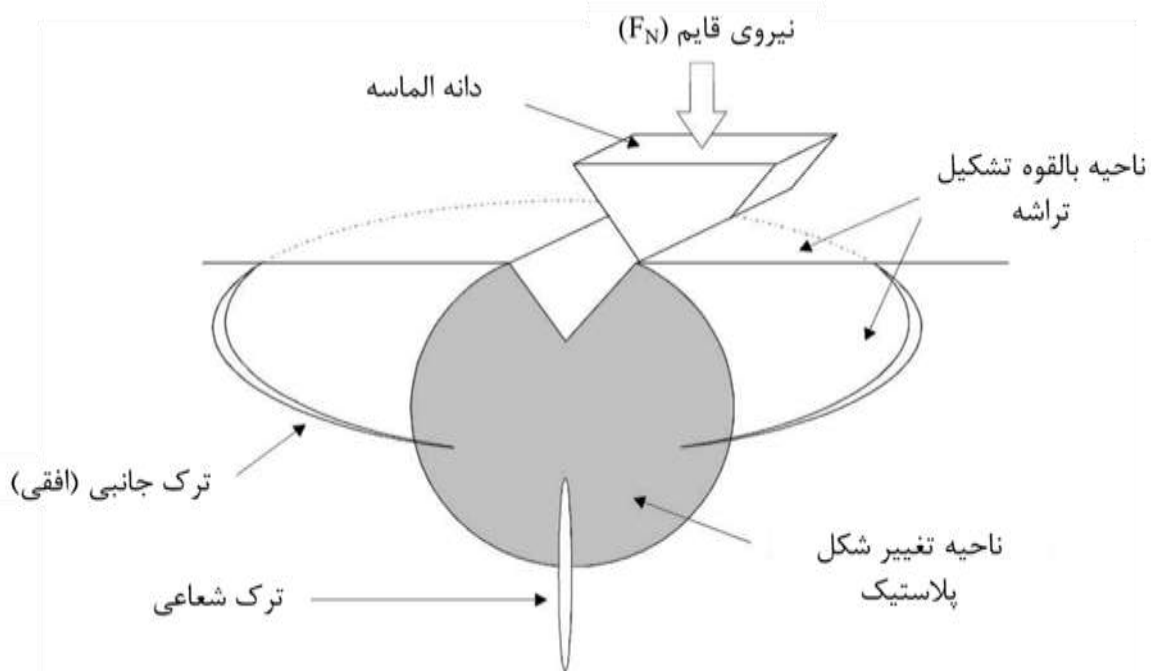
در شروع فرآیند برش، تراشه‌های اولیه توسط تنش‌های فشاری و کششی ناشی از برخورد دانه‌های الماسه با سطح سنگ و نیروهای مماسی به‌وجود آمده در جلوی دانه‌های الماسه تشکیل می‌شوند. این مرحله از فرآیند برش، مکانیزم اولیه تشکیل تراشه نامیده می‌شود. هنگامی که تراشه اولیه تشکیل می‌شود، قسمتی از سنگ که در ناحیه انتهایی دانه الماسه قرار دارد، در اثر تنش فشاری که از سوی دانه الماسه اعمال می‌شود، تغییر شکل پلاستیک می‌دهد. به دلیل ماهیت ترد سنگ، تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های فشاری، ترک‌هایی به دو صورت شعاعی و جانبی (افقی) در ناحیه تحت برش ایجاد می‌شوند. دلیل اصلی تشکیل این ترک‌ها، تنش‌های کششی در درون ناحیه تغییر شکل پلاستیک است. این ترک‌ها پس از حذف بار اعمالی، به دلیل تمرکز تنش‌های کششی پسماند، در راستای ترک، گسترش می‌یابند (قیصری، ۱۳۸۹).



- ۱- ناحیه اصطکاک بین ریز تراشه و ماتریس ابزار      ۴- ناحیه اصطکاک بین سنگ و دانه الماسه
- ۲- ناحیه سایش یافته توسط ریز تراشه و تراشه ها      ۵- ناحیه تغییر شکل پلاستیک
- ۳- ناحیه تشکیل تراشه اولیه      ۶- ناحیه تغییر شکل الاستیک

شکل ۲-۴: تعامل نیروهای موجود میان دانه های الماسه و سطح خراشیده شده از سنگ (قیصری، ۱۳۸۹)

ترک‌های جانبی از زیر ناحیه تغییر شکل پلاستیک شکل می‌گیرند و تا سطح سنگ نیز گسترش می‌یابند. این ترک‌ها پس از برداشت بارهای اعمالی ایجاد می‌شوند. در حقیقت، این تغییر ناگهانی تنش است که موجب یک بازگشت الاستیکی شدید شده و این بازگشت، منجر به ایجاد تنش کششی بحرانی و شکست ترد می‌شود. این مرحله، مکانیزم تشکیل تراشه ثانویه در زیر دانه الماسه است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت ترک‌های جانبی و شکست ترد، عوامل ایجاد تراشه‌های ثانویه هستند. تراشه‌های ایجاد شده در فرآیندهای موفق برش سنگ عمدتاً از این نوع هستند و برشی که از چنین مشخصه‌هایی برخوردار باشد، از بهره‌وری و کارایی بیشتری برخوردار خواهد بود (قیصری، ۱۳۸۹). در شکل ۲-۵ تشکیل ترک‌های جانبی از زیر ناحیه تغییر شکل پلاستیک و گسترش آن تا سطح، نشان داده شده است (Konstanty, 2002).

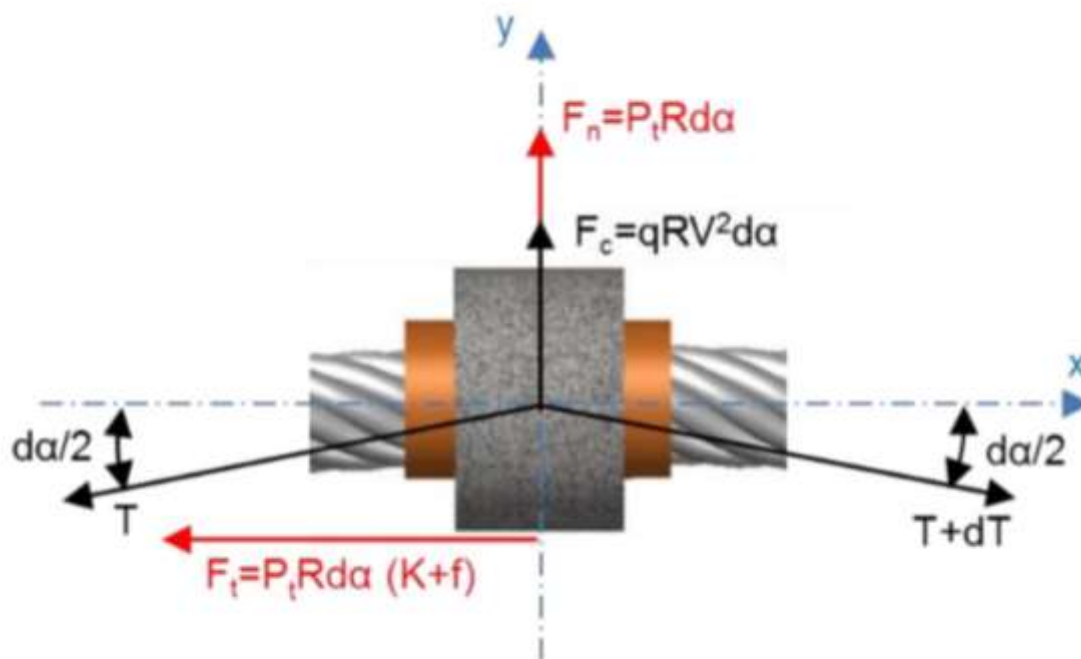


شکل ۲-۵: نمایی از تشکیل یک منطقه پلاستیک به همراه ترک‌های شعاعی و جانبی در برش (Konstanty, 2002)

مرحله دوم، خروج تراشه‌ها و کاهش دمای محیط توسط جریان سیال سرد است. در این مرحله، سیالی با فشار، از سطح برش عبور می‌کند تا از دمای محیط برش بکاهد. استفاده از سیال در برش، نتایجی همچون برش روان‌تر و هموارتر، با کیفیت سنگ بهتر، کاهش بار حرارتی بر روی دانه‌های الماسه و خروج بهتر تراشه‌های تولیدی را به همراه دارد (قیصری، ۱۳۸۹).

## ۲-۶- نیروهای وارده بر مهره‌ها

در شکل ۲-۶، نیروهای وارده به مهره در هنگام برش نشان داده شده است. در این شکل،  $F_n$  نیروی نرمال،  $F_t$  نیروی مماسی (برشی)،  $F_c$  نیروی گریز از مرکز،  $T$  نیروی کششی وارد بر سیم،  $\alpha$  زاویه انحنا،  $R$  شعاع انحنا،  $P_t$  مقاومت ویژه برش،  $V$  سرعت خطی سیم،  $q$  وزن هر مهره،  $K$  و  $f$  ضرایب اصطکاک بین سنگ و ابزار برش است (Turchetta et al., 2017).



شکل ۲-۶: نیروهای وارده بر مهره الماسه و سنگ در هنگام برش (Turchetta et al., 2017)

## ۲-۶-۱- نیروی گریز از مرکز

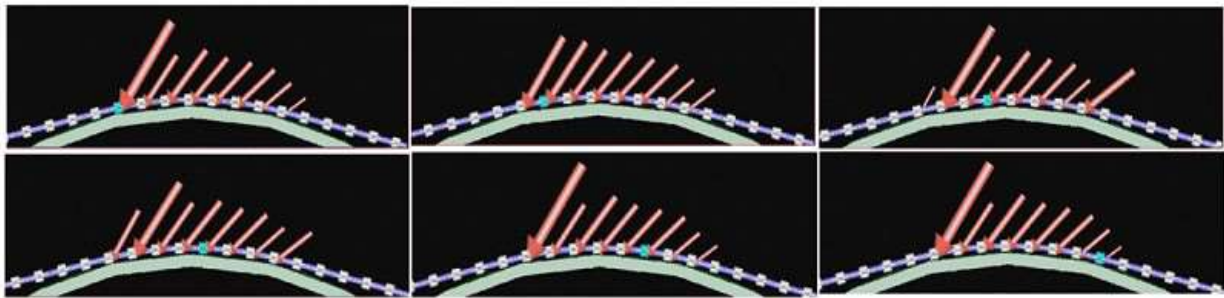
در فرآیند برش، سرعت محیطی ابزار برش باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز می‌شود. این نیرو با شعاع و زاویه انحنا سیم، سرعت محیطی سیم و جرم مهره رابطه مستقیم دارد (Turchetta et al., 2017).

## ۲-۶-۲- نیروی نرمال

این نیرو باعث می‌شود تا مهره‌ها، فشار وارد شده از طرف سنگ در هنگام برش را تحمل کنند. نیروی نرمال در فرآیند برش، عامل بسیار مهمی محسوب می‌شود، زیرا با افزایش بیش از حد این نیرو، اصطکاک میان مهره‌ها و قطعه کار افزایش می‌یابد و در نتیجه، دانه‌های الماسه دچار فرسایش می‌شوند. قسمتی از نیروی نرمال به نیروی گریز از مرکز و قسمتی دیگر صرف نیروی مماسی (برشی) می‌شود. مقدار نیروی نرمال وارد بر سنگ، بستگی به تعداد مهره‌های درگیر بین سنگ و ابزار برش در هنگام برش دارد (قیصری، ۱۳۸۹).

## ۲-۶-۳- نیروی مماسی (برشی)

نیروی مماسی (برشی) در فرآیند برش رابطه مستقیم با نیروی نرمال و مجموع اصطکاک میان مهره و سنگ دارد (Turchetta et al., 2017). در شکل ۲-۷، توزیع بردارهای نیروهای برشی در هنگام برش نشان داده شده است (Molfino & Zoppi, 2012).



شکل ۲-۷: توزیع بردارهای نیروهای برشی در زمان تماس با سنگ (Molfino & Zoppi, 2012)

## ۲-۶-۴- نیروهای کششی وارد بر سیم

نیروی کششی وارد بر سیم تابعی از دو نیروی نرمال و مماسی (برشی) و زاویه انحنا سیم در هنگام برش است (Turchetta et al., 2017).

## ۲-۶-۵- اصطکاک بین سنگ و ابزار برش

دانه‌های الماسه قرار گرفته بر مهره‌های سیم برش دارای سختی بسیار بالایی هستند و این امر موجب ایجاد اصطکاک زیادی بین سنگ و ابزار در هنگام برش می‌شود.

## ۲-۶-۶- مقاومت ویژه برش سنگ

مقاومت ویژه برش سنگ، به شعاع و زاویه انحنای سیم وابسته است. با افزایش شعاع انحنا مقدار این پارامتر کاهش می‌یابد، این در صورتی است که زاویه انحنای سیم ثابت بماند (Turchetta et al., 2017).

## ۲-۷- پارامترهای موثر در برش سنگ

به‌طور کلی، می‌توان پارامترهای اثرگذار در برش سنگ را به سه دسته: مشخصات سنگ، مشخصات دستگاه برش و مشخصات مدیریتی تقسیم کرد. مشخصات سنگ جزو پارامترهای غیرقابل کنترل است و

تغییر در آن ممکن نیست. این در حالی است که مشخصات دستگاه برش و مشخصات مدیریتی، جزو پارامترهای قابل کنترل بوده و تغییر هر کدام از این پارامترها به صورت خاصی در کارآیی، توان تولید و فرآیند برش اثرگذار هستند. در بررسی پارامترهای موثر بر فرآیند برش، پارامترهای مربوط به مشخصات سنگ در تمامی روش‌های برش، ثابت و مستقل هستند، ولی پارامترهای قابل کنترل، وابسته به روش برش هستند (الماسی، ۱۳۹۵). در جدول ۱-۲ پارامترهای موثر در برش سنگ با سیم الماسه ارائه شده است (Ozcelik & Yilmazkaya, 2010).

جدول ۱-۲: پارامترهای موثر در روش برش با سیم الماسه (Ozcelik & Yilmazkaya, 2010)

پارامترهای قابل کنترل		پارامترهای غیرقابل کنترل
پارامترهای مدیریتی	پارامترهای برش	پارامترهای سنگ
مهارت نیروی انسانی	پارامترهای ابزار	پارامترهای فیزیکی
لرزش دستگاه	توان موتور اصلی	چگالی
شرایط محیطی	ولتاژ موتور مورد نیاز دستگاه	تخلخل
	قطر پولی	بافت
	نوع مهره (آبکاری یا اشباع)	اندازه و شکل دانه‌ها
	جنس مهره	نوع و درجه سیمان‌شدگی
	اندازه، نوع و تراکم دانه‌های الماسه	میران کوارتز محتوی
	پارامترهای عملیاتی	ضریب جذب آب
	سرعت محیطی سیم برش	قابلیت هدایت موج
	نیروی کشش سیم برش	قابلیت هدایت حرارتی
	زاویه ورودی سیم برش	هوازدگی و دوام
	ابعاد بلوک	پارامترهای مکانیکی
	طول سیم	پارامترهای مقاومتی
	نوع برش (عمودی، زاویه‌دار یا افقی)	سختی
	هندسه سیم در هنگام برش	سایندگی
	فاصله دستگاه از سینه‌کار	تردی یا شکنندگی
	تعداد مهره در واحد طول	الاستیسیته
	قطر مهره	پارامترهای ساختاری
	جهت و سرعت آب مورد استفاده	ناپیوستگی‌ها

## ۲-۷-۱- مشخصات سنگ

مشخصات سنگ، یکی از عوامل موثر در فرآیند برش به‌ویژه در فرآیند تشکیل تراشه است. سنگ به‌عنوان میزبان عملیات برش، نقش مهمی در فرآیند برش و تولید دارد. مشخصات سنگ، تعیین‌کننده



شرایط، کیفیت و کمیت اندرکنش میان سنگ و ابزار است، به همین علت، مکانیزم تشکیل تراشه و پیشروی ابزار را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد (الماسی، ۱۳۹۵).

به‌منظور سهولت در تجزیه و تحلیل و مطالعه مشخصات سنگ، آن‌ها را می‌توان در سه گروه مشخصات فیزیکی، مکانیکی و مشخصات ساختاری تقسیم‌بندی کرد. تمامی این پارامترها در فرآیند برش، غیرقابل کنترل هستند و به هیچ‌عنوان نمی‌توان در آن‌ها تغییری ایجاد کرد. برای محاسبه مقدار هر کدام از این پارامترها بکارگیری روش‌های نوین و دستگاه‌های پیشرفته و استفاده از استانداردهای توصیه‌شده با بهره‌گیری کاربران ماهر حائز اهمیت است (الماسی، ۱۳۹۵).

## ۲-۷-۱-۱- مشخصات فیزیکی سنگ

در این قسمت از مشخصات فیزیکی سنگ، پارامترهای چگالی، تخلخل، بافت، اندازه و شکل دانه‌ها، نوع و درجه سیمان‌شدگی، مقدار کوارتز محتوی و قابلیت هدایت امواج، به اختصار معرفی شده‌اند.

### الف) چگالی

به‌طور معمول، چگالی سنگ‌ها بین  $1/9$  تا  $3/5$  تن بر مترمکعب، متغیر است. چگالی سنگ با مقاومت سنگ، رابطه مستقیم دارد و می‌توان گفت که با عملکرد ابزارهای برش در فرآیند برش نیز رابطه عکس دارد (قیصری، ۱۳۸۹).

### ب) تخلخل

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار فیزیکی در برش سنگ، تخلخل است. هر چه تخلخل سنگ بیشتر باشد، تراشه‌های ثانویه به راحتی در هنگام فرآیند برش تشکیل می‌شوند. بنابراین، با افزایش مقدار این پارامتر میزان برش‌پذیری سنگ نیز افزایش می‌یابد (الماسی، ۱۳۹۵).

### پ) بافت

بافت سنگ، تشکیل شده از دانه‌هایی (خمیره) با شکل و اندازه متفاوت است. از این پارامتر می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین خاصیت فیزیکی سنگ در انتخاب درست تجهیزات و ماشین‌آلات برش، تعیین رفتار مکانیکی و پیش‌بینی عملکرد تجهیزات برش نام برد. با افزایش ضریب بافت، نرخ سایش مهره‌های الماسه،

افزایش و نرخ برش کاهش می‌یابد. شاخص‌های کمی ارزیابی بافت نیز به شرح جدول ۲-۲ است (قیصری، ۱۳۸۹).

جدول ۲-۲: شاخص‌های کمی ارزیابی بافت (قیصری، ۱۳۸۹)

شاخص‌های کمی ارزیابی بافت			
مساحت دانه‌ها	محیط دانه‌ها	طول قطر بزرگ و کوچک دانه‌ها	شیب و قطر اصلی دانه‌ها
قطر معادل	فشردگی	فاکتور شکل	نسبت وضعیت دانه

### ت) اندازه و شکل دانه‌ها

اندازه و شکل دانه‌ها یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کمی ارزیابی بافت سنگ است. با افزایش ابعاد دانه‌ها نرخ برش کاهش می‌یابد (قیصری، ۱۳۸۹).

### ث) نوع و درجه سیمان‌شدگی

خمیره سنگ‌های مختلف با توجه به دوران و شرایط تشکیل با یکدیگر متفاوت هستند. هرچه میزان چسبندگی (سیمان‌شدگی) سنگ بیشتر باشد، مقاومت برشی سنگ افزایش یافته و در نتیجه نرخ برش کاهش می‌یابد (Mikaiei et al., 2008).

### ج) مقدار کوارتز محتوی

از کوارتز می‌توان به‌عنوان یکی از ساینده‌ترین کانی‌ها نام برد. هر چه مقدار کوارتز محتوی یک سنگ بیشتر باشد، قابلیت برش آن سنگ کم‌تر خواهد شد. در جدول ۲-۳ مقدار کوارتز کانی‌های مختلف آورده شده است (Ozelik & Bayram, 2004).

جدول ۲-۳: مقادیر کوارتز برای کانی‌ها (Ozcelik & Bayram, 2004)

مقدار معادل کوارتز (درصد)	نام کانی
۱۰۰	کوارتز
۸۰ تا ۷۰	فلدسپات
۶۰ تا ۵۷	اولیوین
۵۳ تا ۵۰	پیروکسن
۵۳ تا ۴۷	آمفوبیل‌ها
۳۰ تا ۲۳	سرپانتین‌ها
۳۴ تا ۱۷	کربنات‌ها
۴۱	کانی‌های رسی

### چ) قابلیت هدایت امواج

یکی از راه‌های سریع و ارزان آزمایشگاهی برای شناخت ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ تعیین سرعت عبور امواج در سنگ است (الماسی، ۱۳۹۵).

### ۲-۱-۷-۲- مشخصات مکانیکی سنگ

پارامترهای مقاومتی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ...)، سختی، سایندگی، تردی و ضریب الاستیسیته سنگ، جزو این مشخصات محسوب می‌شوند. بدیهی است، قابلیت برش سنگ با مشخصات مذکور در ارتباط است (الماسی، ۱۳۹۵).

### الف) پارامترهای مقاومتی سنگ

میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی را مقاومت سنگ می‌نامند. پارامترهای مقاومتی سنگ شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت ضربه‌ای، مقاومت خمشی، مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هستند. از مهم‌ترین پارامترهای مقاومتی می‌توان به مقاومت فشاری و مقاومت کششی اشاره کرد (الماسی، ۱۳۹۵). با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ میزان برش‌پذیری آن نیز کاهش می‌یابد (Mikael et al., 2008).

## ب) سختی

مقاومت یک سنگ یا کانی در برابر خراش پذیری را سختی می‌نامند. برای ارزیابی سختی سنگ یا کانی، شاخص‌های مختلفی ارایه شده است که از آن جمله می‌توان به سختی موس<sup>۱</sup>، ویکورز<sup>۲</sup>، شور<sup>۳</sup>، نوپ<sup>۴</sup> و شاخص سختی ان.سی.بی، برینل<sup>۵</sup> و راکول<sup>۶</sup> اشاره کرد. به عنوان مثال در شاخص ارزیابی موس کانی تالک خراش پذیرترین کانی و الماس به عنوان خراش‌دهنده‌ترین کانی در نظر گرفته شده است. با افزایش سختی سنگ میزان برش پذیری (نرخ برش) کاهش می‌یابد (Mikael et al., 2008).

## پ) ساینده‌گی

ساینده‌گی یک سنگ به عواملی همچون سختی کانی‌ها، شکل و اندازه دانه‌ها، قفل‌شدگی دانه‌ها و خمیره سنگ بستگی دارد (الماسی، ۱۳۹۵). ساینده‌گی سنگ با برش‌پذیری رابطه معکوس و با نرخ سایش مهره‌ها رابطه مستقیم دارد و هر چه الماسه به کار برده شده در مهره‌ها دارای گوشه‌های تیز باشد، میزان سایش آن نیز بیشتر است (Mikael et al., 2011a).

## ت) تردی یا شکنندگی

شکنندگی یا تردی سنگ زمانی رخ می‌دهد که میزان چسبندگی داخلی سنگ کاهش یابد یا از بین برود. این رویداد تاثیر بر سست‌شدن شکستگی‌ها و قابلیت ارتجاعی سنگ دارد. با افزایش شکنندگی سنگ قابلیت برش کاهش می‌یابد (الماسی، ۱۳۹۵).

## ث) خواص الاستیسیته

نحوه‌ی شکست و تغییر شکل سنگ در اثر بارگذاری بستگی به خواص الاستیک و پلاستیک آن سنگ دارد. خواص الاستیک سنگ، با مدول الاستیک مشخص می‌شود. با افزایش مقدار این مدول قابلیت برش‌پذیری سنگ نیز کاهش می‌یابد (Mikael et al., 2011b).

---

1 Mohs hardness  
2 Vickers  
3 Shore  
4 Knoop  
5 Brinell  
6 Rockwell

## ۲-۷-۱-۳- مشخصات ساختاری و محیطی سنگ

از مشخصات ساختاری، می‌توان به درزه، ترک، گسل و کلیواژ اشاره کرد. به‌طور کلی، هر مشخصه ساختاری که موجب کاهش پارامترهای مقاومتی سنگ شود، موجب افزایش قابلیت برش آن خواهد شد (Mikael et al., 2008).

## ۲-۷-۲- مشخصات دستگاه برش

یکی از مهم‌ترین پارامترهای قابل کنترل و موثر در قابلیت برش سنگ، مشخصات دستگاه برش است. مشخصات دستگاه برش شامل مشخصات ابزاری و مشخصات عملیاتی برش است. هر کدام از پارامترهای مشخصات دستگاه برش، نقش بسیار مهمی در رسیدن به الگویی برای کاهش نرخ سایش مهره‌ها و افزایش راندمان تولید دارند (الماسی، ۱۳۹۵).

## ۲-۷-۲-۱- مشخصات ابزاری

هر دستگاه برش دارای مشخصات متفاوتی است. مشخصات ابزاری قابل ارزیابی هر دستگاه شامل توان موتور اصلی، ولتاژ مورد نیاز، قطر پولی، نوع مهره (آبکاری شده یا اشباع)، قطر مهره، اندازه، نوع و تراکم دانه‌های الماسه در مهره و ساختار خمیره مهره است. به‌عنوان مثال، قطر پولی تاثیر بر روی هندسه سیم در فرآیند برش سنگ و نوع و ابعاد مهره‌های الماسه نیز تاثیر به‌سزایی بر روی نرخ سایش و نرخ برش دارد (الماسی، ۱۳۹۵).

## ۲-۷-۲-۲- مشخصات عملیاتی

از مهم‌ترین مشخصات عملیاتی، می‌توان مواردی همچون سرعت محیطی سیم برش، نیروی کشش سیم یا فشار برش، ابعاد بلوک، زاویه سیم برش با سطح افق و تعداد مهره‌ها در واحد طول را نام برد.

## الف) سرعت محیطی سیم برش

سرعت برش یا سرعت خطی سیم یا سرعت محیطی سیم، یکی از عوامل اثرگذار در فرآیند برش است. سرعت محیطی برش بر حسب متر بر ثانیه تعریف می‌شود. سرعت برش تاثیر بسیاری بر نرخ تولید دارد (الماسی، ۱۳۹۵).

## ب) نیروی کشش سیم یا فشار کار یا فشار برش

همان طور که گفته شد برای حرکت رو به عقب دستگاه و ایجاد نیروی کشش به عقب نیاز به یک نیروی مکانیکی یا هیدرولیکی است. نیروهای مماسی و عمودی فرآیند برش از نیروی کشش به عقب دستگاه حاصل می‌شوند. با افزایش این نیرو میزان نرخ تولید افزایش می‌یابد، با افزایش بیش از حد نیروی کشش به عقب دستگاه، سایش مهره‌ها و خطر پاره شدن سیم نیز افزایش می‌یابد (الماسی، ۱۳۹۵).

## پ) زاویه ورودی سیم

زاویه ورودی سیم، زاویه‌ای است که سیم با افق در شروع فرآیند برش دارد. که با افزایش این زاویه نرخ برش افزایش می‌یابد (Cai et al., 2007).

## ت) تعداد مهره‌ها در واحد طول

افزایش تعداد مهره‌ها در واحد طول باعث افزایش اجزای برنده سیم می‌شود ولی صلیبیت سیم را نیز افزایش می‌دهد. با افزایش تعداد مهره‌ها نرخ برش روند افزایشی دارد و پس از تعداد مشخصی از مهره‌ها نرخ برش ثابت می‌شود (Bagherpour et al., 2014).

## ث) ابعاد برش

ابعاد برش، یکی دیگر از عوامل موثر بر میزان تولید است. با افزایش ابعاد بلوک، نرخ تولید بالاتر می‌رود و این درحالی است که تاثیری بر مصرف ویژه سیم برش و بازدهی آن ندارد (Bagherpour et al., 2014).

## ۲-۸- معیارهای قابل ارزیابی در عملیات برش

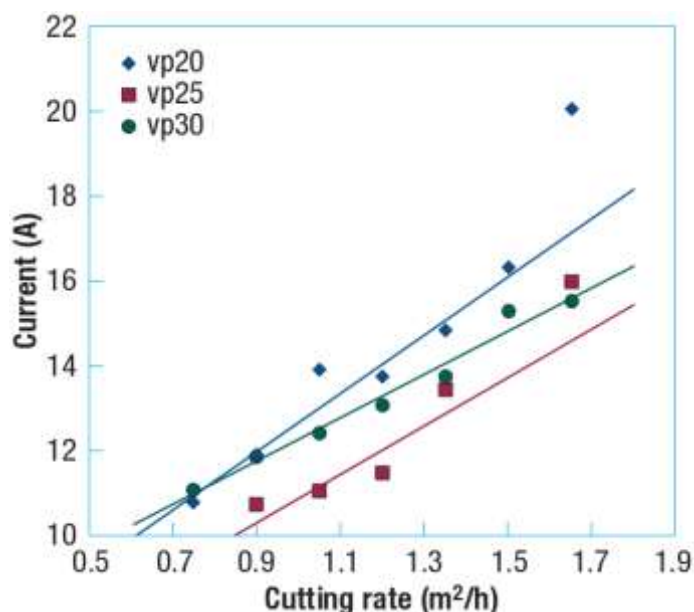
به منظور ارزیابی عملکرد سیم برش، می‌توان از چهار معیار مهم همچون نرخ برش، جریان مصرفی، هزینه سیم برش و بهره‌وری یا نرخ سایش مهره‌های الماسه استفاده کرد.

## ۲-۸-۱- نرخ برش

نرخ برش یا سرعت برش که بر حسب مترمربع بر ساعت بیان می‌شود، یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی روش سیم برش الماسه است. این معیار، به عوامل متعددی وابسته است که با ایجاد ارتباط بین آن عوامل و نرخ برش، می‌توان تاثیر هر کدام را مورد ارزیابی قرار داد. تمامی پارامترهای قابل کنترل اعم از پارامترهای عملیاتی، ابزاری و محیطی بر این معیار (نرخ برش) اثرگذار هستند (الماسی، ۱۳۹۵).

## ۲-۸-۲- جریان مصرفی

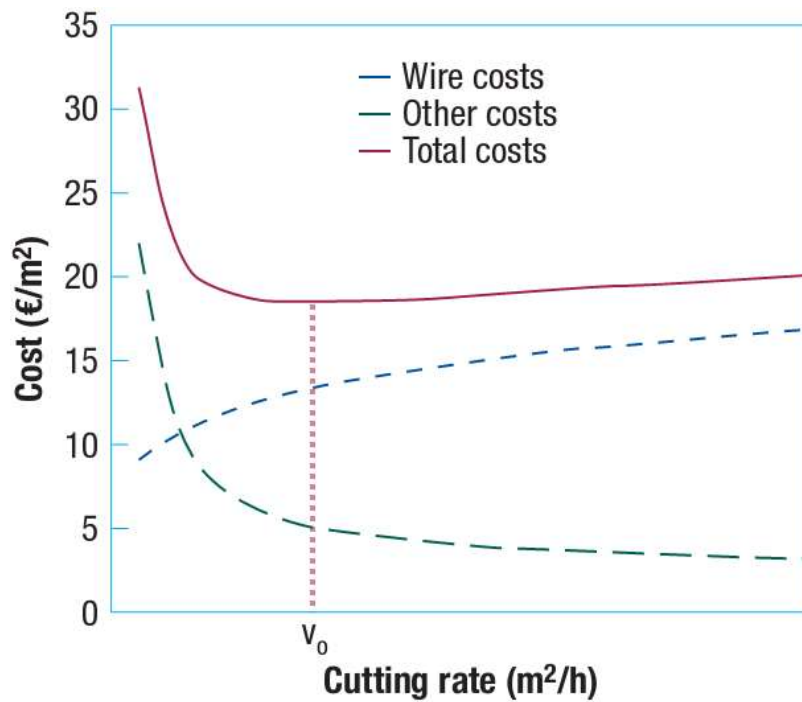
جریان مصرفی، میزان برق مصرف شده توسط دستگاه برای برش سنگ است. این معیار با نرخ برش رابطه مستقیم دارد و با افزایش جریان میزان نرخ برش نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۲-۸ ملاحظه می‌شود ضریب زاویه خطوط برای سرعت‌های مختلف متفاوت است (Cai et al., 2007).



شکل ۲-۸: ارتباط بین جریان مصرفی و نرخ برش سطح (Cai et al., 2007)

## ۲-۸-۳- هزینه سیم برش

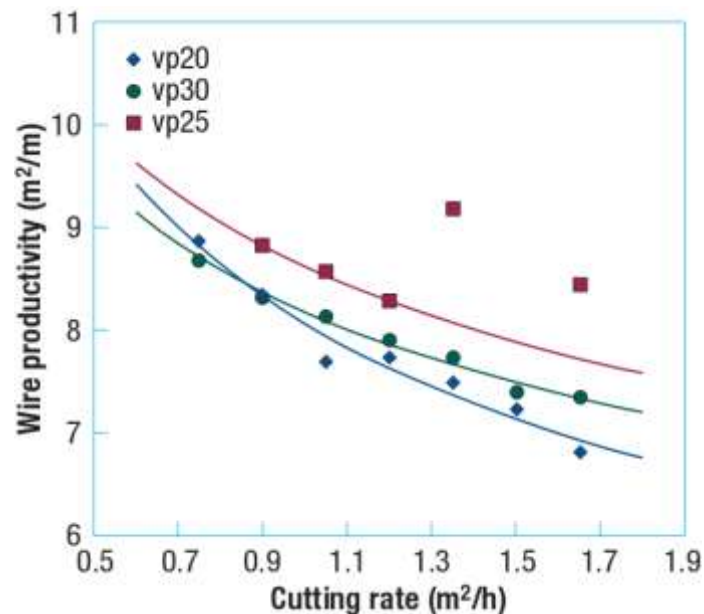
هزینه سیم برش به مقدار هزینه سیم برش الماسه برای برش یک مترمربع از سنگ بیان می‌شود. این معیار بر حسب واحد پول بر مترمربع است. شکل ۲-۹ ارتباط هزینه سیم برش الماسه با نرخ برش و مقایسه این هزینه‌ها با سایر هزینه‌های معدن‌کاری را نشان می‌دهد (Cai et al., 2007).



شکل ۲-۹: ارتباط بین نرخ برش با کل هزینه برش در روش سیم الماسه (Cai et al., 2007)

## ۲-۸-۴- بهره‌وری یا نرخ سایش مهره‌های الماسه

بهره‌وری سیم، مقدار سطح بریده‌شده توسط واحد طول سیم است و بر حسب مترمربع بر متر بیان می‌شود. این پارامتر، عمر سیم یا توان برش سیم را نشان می‌دهد. شکل ۲-۱۰ ارتباط بین نرخ برش سیم و بهره‌وری آن را نشان می‌دهد (Cai et al., 2007).



شکل ۲-۱۰: ارتباط بین نرخ برش سیم و بهره‌وری یا عمر سیم (Cai et al., 2007)



## ۲-۹- جمع بندی

سنگ‌های ساختمانی، از زمان‌های قدیم کاربرد بسیاری در زندگی بشر داشته است و به روش‌های مختلفی از جمله برش با سیم الماسه، استخراج می‌شود. در برش سنگ، عوامل موثر بسیاری نقش دارند که به دو دسته پارامترهای غیرقابل کنترل و قابل کنترل تقسیم می‌شوند. پارامترهای غیرقابل کنترل را نمی‌توان تغییر داد، زیرا وابسته به جنس سنگ هستند، ولی با تغییر پارامترهای قابل کنترل، می‌توان برش با سیم الماسه را به یک روش ایده‌آل برای استخراج سنگ‌های ساختمانی تبدیل کرد.

در این فصل، پارامترهای قابل کنترل اثرگذار در فرآیند برش سنگ به اختصار مورد اشاره قرار گرفت و ارتباط بین این عوامل با یکدیگر و همچنین اثر آنها بر نرخ برش و بهره‌وری فرآیند برش تشریح شد.

فصل سوم

**پیشینه پژوهش**

### ۳-۱- مقدمه

تاکنون در خصوص ارزیابی نحوه فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی، مطالعات گسترده‌ای انجام شده است. در بیشتر پژوهش‌های انجام شده، فرآیند برش صرفاً با روش‌های تجربی و آزمایشگاهی انجام شده و در برخی مطالعات، با توجه به کاربردهای گسترده و نتایج مطلوب، از روش‌های عددی همانند DEM استفاده شده است.

به‌منظور شناخت مطالعات انجام شده در راستای بهینه‌سازی عملکرد سیم برش، ضرورت دارد پژوهش‌های پیشین بررسی شوند. در این فصل، برخی از مهم‌ترین مطالعات مرتبط با موضوع مورد اشاره، به اختصار تشریح شده است.

### ۳-۲- مطالعات پیشین

در این بخش پیشینه مطالعات به دو بخش مجزا تقسیم شده است. در بخش اول به شرح مطالعات انجام شده در خصوص تاثیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ بر نرخ برش و در بخش دوم به تاثیر مشخصات ابزاری (دستگاه برش) بر نرخ برش سیم الماسه پرداخته شده است.

### ۳-۲-۱- مطالعات پیشین در خصوص مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ

در طی سال‌های اخیر پژوهش‌هایی به‌صورت میدانی و یا آزمایشگاهی بر روی تاثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ بر نرخ برش سیم الماسه انجام شده است. از مشخصات فیزیکی سنگ، چگالی، اندازه شکل و دانه، تخلخل، درصد کوارتز محتوی، بافت و درجه سیمان شدگی و از مشخصات مکانیکی سنگ، مقاومت فشاری و کششی سنگ، سختی، تردی و ساینده‌گی را می‌توان به‌عنوان پارامترهای موثر بر نرخ برش و مورد توجه پژوهشگران، نام برد. در جدول ۳-۱ و جدول ۳-۲ به ترتیب پیشینه پژوهش مربوط به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ به تفکیک ارایه شده است. در ادامه نیز به شرح مختصر پژوهش‌های ذکر شده به ترتیب سال پرداخته شده است.

جدول ۳-۱: پیشینه پژوهش مربوط به مشخصات فیزیکی سنگ (برگرفته از: الماسی، ۱۳۹۵)

مشخصات فیزیکی سنگ							منبع
سایر	درجه سیمان‌شدگی	بافت	درصد کوارتز محتوی	تخلخل	اندازه و شکل دانه	چگالی	
		•					Howarth & Rowlands (1986)
			•		•		Wei et al. (2003)
			•		•		Agus et al. (2003)
	•	•	•		•	•	Ozcelik & Bayram (2004)
			•				Mikaeil et al. (2008)
		•		•		•	قیصری (۱۳۹۵)
ضرب جذب آب			•				Samini & Bafghi. (2012)
		•			•		Gheisari et al. (2012)
			•				Sadegheslam et al. (2013)
		•					عطایی و قنبری (۱۳۹۵)
				•	•	•	Yilmazkaya & ozcelik (2016)

جدول ۳-۲: پیشینه پژوهش مربوط به مشخصات مکانیکی سنگ (برگرفته از: الماسی، ۱۳۹۵)

مشخصات مکانیکی سنگ						منبع	
سایر	خواص الاستیسیته	تردی یا شکنندگی	سایندگی	سختی	مقاومت فشاری		مقاومت کششی
			سورشار	شور	•		Wei et al. (2003)
				نوپ			Agus et al. (2003)
				شور	•	•	Ozcelik & Bayram (2004)
					•		Mikaeil et al. (2008)
			لس‌انجلس	چکش اشمیت	•	•	قیصری (۱۳۹۵)
			لس‌انجلس	چکش اشمیت	•	•	Ataei et al. (2012)
RMR				موس	•		Samani & bafghi (2012)
	•	•			•		Sadegheslam et al. (2013)
مقاومت ضربه‌ای					•	•	Yilmazkaya & ozcelik (2016)
	•		شیمازک	موس	•		Mikaeil et al. (2017)
آزمون بار نقطه‌ای	•		شیمازک	موس، چکش اشمیت	•	•	الماسی (۱۳۹۵)
	•		شیمازک	موس	•		Mikaeil et al. (2019)

هاوارد<sup>۱</sup> و رولند<sup>۲</sup> (۱۹۸۶)، ۱۱ نمونه سنگ رسوبی و کریستاله را از نظر ابعاد دانه‌ها، مساحت و جهت‌داری هر دانه مورد بررسی قرار دادند و ضریب بافت را بر اساس خواص ذکر شده معرفی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها، بیانگر این بود که میان ضریب بافت و خواص مکانیکی برجا، ضریب همبستگی خوبی وجود دارد. از ضریب بافت به‌عنوان وسیله‌ای برای پیش‌بینی برش‌پذیری و ویژگی‌های مقاومتی سنگ یاد کردند. همچنین بیان کردند این ضریب، راهی را برای درک بهتر از نحوه ایجاد ترک و گسترش آن در نمونه سنگ ارائه می‌دهد (Howarth & Rowlands, 1986).

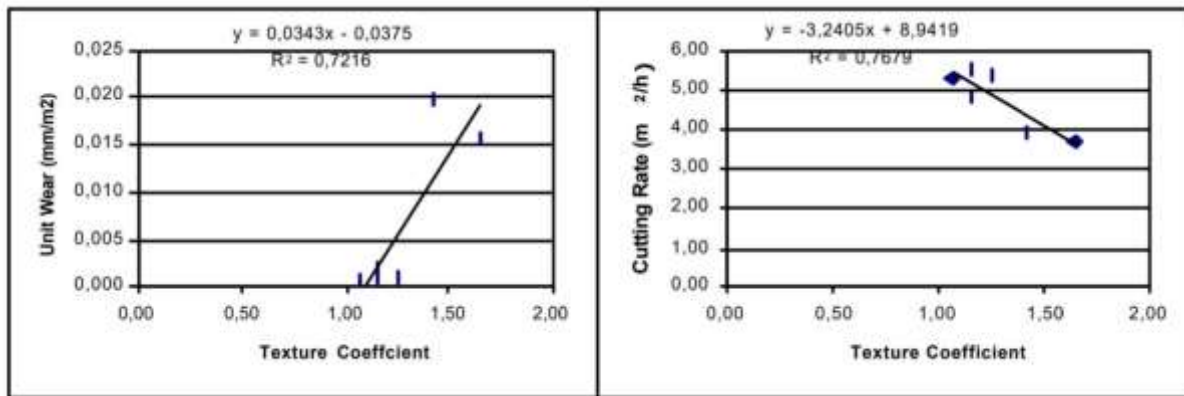
وی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از ریاضیات فازی و رابطه میان خواصی همچون درصد کوارتز محتوی، اندازه دانه‌های کوارتز، سختی، مقاومت فشاری و ساینده‌گری گرانیت با نیروی کشش دستگاه برش‌دهنده، طبقه‌بندی قابلیت برش برای سنگ‌های گرانیت را ارائه کرده‌اند. از این طبقه‌بندی می‌توان نوع دستگاه برش و مشخصات آن را برای هر سنگ گرانیتی مشخص کرد (Wei et al., 2002).

آگوس<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی شکل و اندازه دانه‌ها، درصد کوارتز محتوی و سختی نوپ، آزمایش برش بر روی ۲۵ نمونه سنگ توسط سیم برش الماسه را انجام داده‌اند و نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را به‌صورت رابطه‌ای برای بهره‌وری سیم برش الماسه ارائه کردند (Agus et al., 2003).

اوزچلیک<sup>۵</sup> و بایرام<sup>۶</sup> (۲۰۰۴) ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ مرمر از قبیل چگالی، درصد کوارتز محتوی، ضریب بافت، مقاومت کششی و مقاومت فشاری تک‌محوری را نسبت به نرخ برش و سایش مهره‌های الماسه در هنگام برش مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها بیانگر این است که میان نرخ برش و ویژگی‌های ساختاری سنگ رابطه معکوس و میان نرخ سایش و ویژگی‌های ساختاری، رابطه مستقیم وجود دارد. شکل ۱-۳ نمودار تغییرات نرخ برش و نرخ سایش نسبت به ضریب بافت سنگ مرمر را نشان می‌دهد (Ozcelik & Bayram, 2004).

---

1 Howarth  
2 Rowlands  
3 Wei  
4 Agus  
5 Ozcelik  
6 Bayram



شکل ۳-۱: نمودار تغییرات نرخ برش و نرخ سایش نسبت به ضریب بافت سنگ مرمر (Ozcelik & Bayram, 2004)

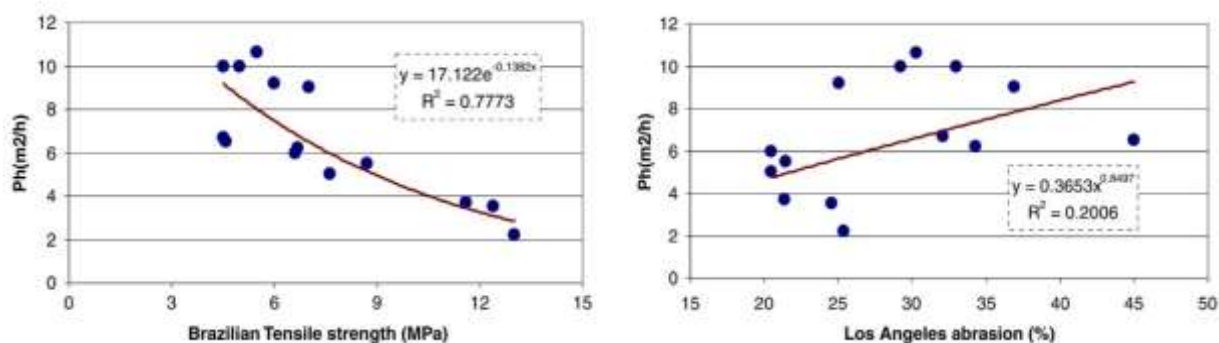
میکائیل و همکاران (۲۰۰۸) مطالعه‌ای بر روی ۱۳ نمونه سنگ کربناته انجام داده‌اند. در هر نمونه، میزان مقاومت فشاری تک‌محوری و درصد کوارتز محتوی، اندازه‌گیری شده است. میان این پارامترها و نرخ برش سیم الماسه، رگرسیون خطی انجام شده است. ضرایب همبستگی به‌دست‌آمده، نشانگر ارتباط خوب مدل با نتایج واقعی است و می‌توان از این مدل به‌عنوان مدل پیش‌بینی‌کننده نرخ برش استفاده کرد (Mikael et al., 2008).

قیصری (۱۳۸۹) در پژوهشی به‌منظور پیش‌بینی نرخ برش سیم الماسه در سنگ‌های کربناته، ۱۱ نمونه سنگ را از معادن مختلف مورد بررسی قرار داد. هدف ایشان تعیین روابط میان مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با نرخ برش بوده است. در این مطالعه، خواص فیزیکی سنگ نظیر بافت، چگالی، تخلخل و خواص مکانیکی سنگ، نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی چکش اشمیت و سایش لس‌آنجلس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ضریب بافت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی اشمیت ارتباط بسیار خوبی با نرخ برش دارند و رابطه (۳-۱) بر حسب این مشخصات ارایه شده است (قیصری، ۱۳۸۹):

$$Pr = -102.234A + 0.2\sigma_t + 56.17D_{equi} - 8.44TC + 8.88 \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

در این رابطه،  $A$  سطح دانه،  $D_{equi}$  قطر معادل،  $\sigma_t$  مقاومت کششی و  $TC$  ضریب بافت است. عطایی و همکاران (۲۰۱۲) مطالعه‌ای بر روی ۱۴ نمونه سنگ کربناته انجام دادند. برای هر نمونه، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، عدد چکش اشمیت و سایش لس‌آنجلس اندازه‌گیری

شده است. سپس با انجام رگرسیون میان این پارامترها و نرخ برش هر نمونه توسط سیم برش الماسه، مدلی برای نرخ تولید سیم برش الماسه ارایه کرده‌اند. شکل ۳-۲، نشان‌دهنده رابطه میان آزمون سایش لس‌آنجلس و مقاومت کششی برزیلی نسبت به نرخ برش است (Ataei et al., 2012).



شکل ۳-۲: نمودار تغییرات نرخ برش نسبت به آزمون سایش لس‌آنجلس و مقاومت کششی برزیلی (Ataei et al., 2012)

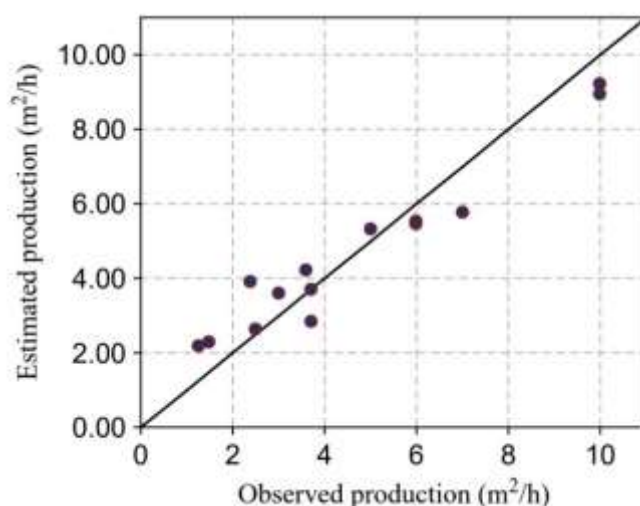
سامانی و بافقی (۲۰۱۲) با جمع‌آوری اطلاعات از معادن مرمریت و با استفاده از شبکه عصبی مدلی برای برآورد برش با سیم برش الماسه در معادن کربناته ارایه کرده‌اند. به‌منظور آموزش شبکه عصبی از RMR سنگ استفاده کرده‌اند و پس از آموزش، به این نتیجه دست یافتند که درصد کوارتر محتوی، ضریب جذب آب، مقاومت فشاری تک‌محوری و ساینده‌گی، مناسب‌ترین پارامترها برای آموزش شبکه عصبی هستند (Samani & Bafghi, 2012).

قیصری و همکاران (۲۰۱۲) با در نظر گرفتن خواص فیزیکی رابطه‌ای برای پیش‌بینی نرخ تولید سیم برش الماسه در سنگ‌های کربناته ارایه کردند. در این تحقیق، هفت نمونه سنگ کربناته از معادن غرب ایران مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه پارامترهای ضریب بافت، قطر و سطح دانه‌ها بررسی و آزمایش شد. با استفاده از برازش یک‌متغیره و چندمتغیره میان پارامترهای به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و نرخ نفوذ واقعی، رابطه‌هایی ارایه شد که در نهایت با مقایسه ضریب هم‌بستگی این رابطه‌ها، نزدیک‌ترین رابطه به واقعیت برای نرخ نفوذ سیم برش الماسه انتخاب شده است. رابطه (۳-۲) نشانگر نرخ تولید بر اساس خواص فیزیکی است (Ghaysari et al., 2012):

$$Pr = -87.44A - 44.83D_{equi} - 5.24TC + 8.98 \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

در این رابطه،  $A$  سطح دانه،  $D_{equi}$  قطر معادل و  $TC$  ضریب بافت است.

صادق‌اسلام و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری تک‌محوری، درصد کوارتز محتوی برای ۱۴ نمونه از سنگ‌های کربناته معادن مختلف، رابطه‌ای میان نرخ تولید سیم برش الماسه و مشخصه‌های ذکر شده با استفاده از شبکه عصبی ارائه کردند. شکل ۳-۳، مقایسه میان مقادیر تخمین زده شده توسط مدل شبکه عصبی و مقادیر واقعی را ارائه می‌دهد (Sadegheslam et al., 2013).



شکل ۳-۳: مقایسه میان مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی (Sadegheslam et al., 2013)

عطایی و قنبری (۱۳۹۵) با جمع‌آوری ۱۱ نمونه از معادن کربناته و مطالعه مشخصات فیزیکی سنگ، روابطی برای نرخ برش سیم الماسه و نفوذ حفاری ارائه کردند. در این تحقیق، با استفاده از برازش چندمتغیره میان مشخصات فیزیکی نرخ برش سیم الماسه رابطه (۳-۳) ارائه شده است (عطایی و قنبری، ۱۳۹۵):

$$Pr = -0.025L_p + 0.398TC + 4.248 \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

در این رابطه،  $L_p$  محیط دانه و  $TC$  ضریب بافت است.

ییلمازکایا<sup>۱</sup> و اوزچلیک (۲۰۱۶) در آزمایش‌های خود، اثر پارامترهای چگالی، تخلخل، اندازه و شکل دانه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، مقاومت ضربه‌ای، سرعت محیطی سیم برش الماسه و نرخ برش را بر روی پارامترهای انرژی واحد و سایش واحد سیم برش الماسه، با استفاده از روش‌های آماری

<sup>1</sup> Yilmazkaya



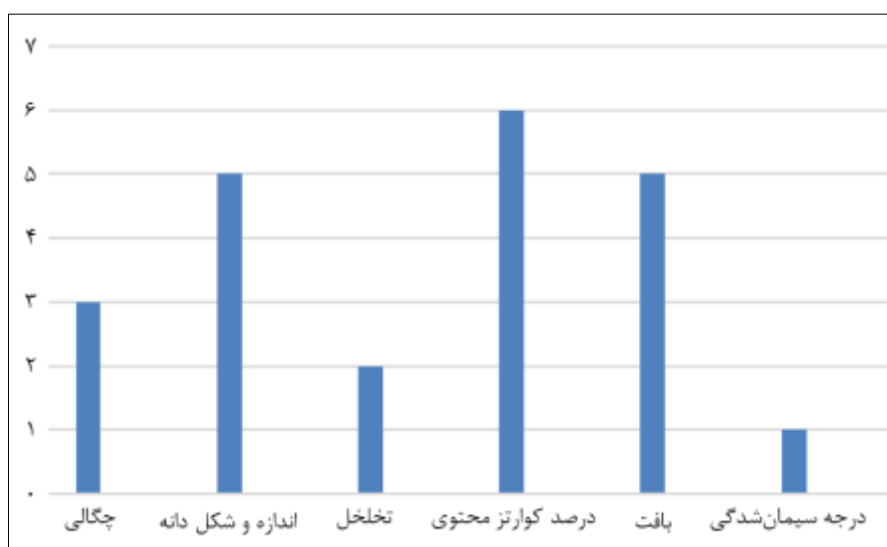
بررسی کردند. نتایج این بررسی‌ها به صورت یک مدل غیرخطی مکعبی (درجه سه) با بیشترین ضریب همبستگی برای پیش‌بینی سایش واحد و انرژی واحد ارایه شده است (Yilmazkaya & Ozcelik, 2016).

الماسی (۱۳۹۵) مشخصات فیزیکی و مکانیکی ۱۱ نوع سنگ مختلف گرانیتی را از نظر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیک، آزمون بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی، معادل کوارتز محتوی، اندازه دانه‌ها، سختی موس، عدد بازگشت چکش اشمیت، سرعت عبور موج و چگالی مورد مطالعه قرار داد. سپس به منظور تعریف شاخص برش‌پذیری سنگ‌های سخت، آزمایش‌های برش را بر روی نمونه‌های سنگ ذکر شده انجام داد و در نتیجه یک سیستم طبقه‌بندی جدید ارایه کرد. بر اساس این سیستم، سنگ‌های گرانیتی به پنج گروه مجزا تقسیم شدند که در بازه بیش‌ترین برش‌پذیری تا کم‌ترین برش‌پذیری قرار گرفتند. به منظور بررسی عملکرد سیستم برش با سیم الماسه، تحلیل سه معیار اساسی (نرخ برش، نرخ سایش مهره‌ها و انرژی ویژه برش) بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای هر کدام از معیارهای ذکر شده، تحلیل‌های آماری خطی و غیرخطی به صورت تک‌متغیره و چندمتغیره انجام شده است (الماسی، ۱۳۹۵).

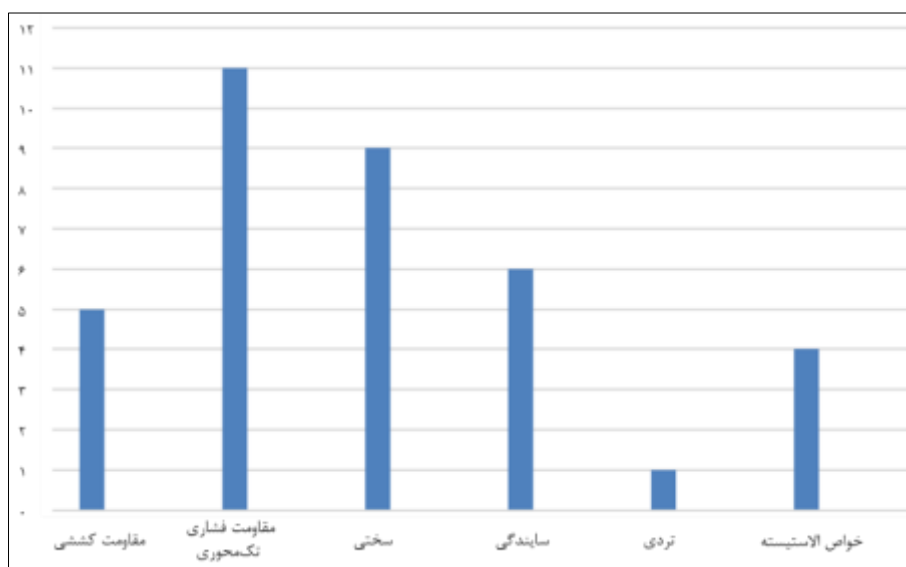
میکائیل و همکاران (۲۰۱۷) برای ارزیابی عملکرد سیم برش الماسه، مدل‌های پیش‌بینی‌کننده با استفاده از دو روش بهینه‌سازی MLP و GA-ANN ارایه کردند. در این تحقیق، به بررسی ۳۸ نمونه از سنگ‌های آندزیت، آهک و مرمر پرداخته شده است. چهار ویژگی مهم فیزیکی و مکانیکی در فرآیند برش به عنوان پارامترهای ورودی و میزان سایش مهره‌های الماسه توسط سنگ، به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است. پارامترهای ورودی مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول یانگ، فاکتور سایش شیمازک و سختی موس است. نتایج حاصل نشان می‌دهد الگوریتم GA-ANN ضرایب همبستگی بهتری با واقعیت دارد (Mikaeil et al., 2017).

میکائیل و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) به منظور ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد سیم برش الماسه، سایش مهره‌ها را به عنوان یک معیار اصلی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، ۱۵ نمونه آندزیت از معادن ترکیه انتخاب شده است. برای هر کدام از این نمونه‌ها چهار ویژگی مهم برای سایش مهره‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری، ضریب سایش شیمازک، سختی شور و مدول یانگ اندازه‌گیری شده است (Mikaeil et al., 2019).

با توجه به مطالعات پیشین بررسی شده در این پژوهش که در مورد تاثیر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بر عملکرد برش با سیم الماسه است، می‌توان گفت که بیش‌ترین خواص فیزیکی سنگ بررسی شده توسط محققین، درصد کوارتز محتوی بوده است. همچنین، از دیدگاه برخی از این محققین بافت سنگ نیز یکی از عوامل بسیار تاثیرگذار بر عملکرد سیم برش الماسه بوده است. در شکل ۳-۴ تکرار خواص فیزیکی سنگ در پژوهش‌های بررسی شده، نشان داده شده است. از مقاومت فشاری تک‌محوری می‌توان به عنوان پر تکرارترین خاصیت مکانیکی نام برد. در شکل ۳-۵ تکرار خواص مکانیکی سنگ در پژوهش‌های بررسی شده، نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: تکرار خواص فیزیکی سنگ در پژوهش‌های بررسی شده



شکل ۳-۵: تکرار خواص مکانیکی سنگ در پژوهش‌های بررسی شده

### ۳-۲-۲- مطالعات پیشین در خصوص مشخصات دستگاه برش

مشخصات ابزاری یکی از پارامترهای موثر در برش سنگ است و همواره این موضوع مورد بحث و بررسی پژوهشگران به منظور ارتقا و توسعه فناوری روش برش سنگ توسط سیم الماسه، بوده است. در مطالعات پژوهشگران گذشته در این زمینه، معیار ارزیابی، بهره‌وری و یا نرخ برش سیم است. همچنین از مشخصات ابزاری که بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است، می‌توان به سرعت محیطی سیم، نیرو کشش به عقب دستگاه و ابعاد و تراکم دانه‌های الماسه قرار گرفته بر روی مهره‌های سیم برش اشاره کرد. در عین حال بر روی پارامترهای تعداد مهره در واحد طول و قطر مهره مطالعات کمتری صورت گرفته است. در جدول ۳-۳ پیشینه پژوهش مربوط به مشخصات ابزاری برش به ترتیب سال ارایه شده است. در ادامه نیز به شرح مختصر هر یک از پژوهش‌های نام برده در جدول ۳-۳ پرداخته شده است.

جدول ۳-۳: پیشینه پژوهش مربوط به مشخصات ابزاری (برگرفته از: الماسی، ۱۳۹۵)

منبع	معیار ارزیابی	سرعت محیطی	نیروی کششی	تعداد مهره در واحد طول	ابعاد بلوک	قطر مهره	ابعاد و تراکم دانه‌های الماسه	سایر
Konstanty (1991)	بهره‌وری						•	
Korre & Durucan (2000)	نرخ برش							ریز ترک‌ها
Wang & Clausen (2002)	بهره‌وری						•	
Tonshoff et al. (2003)	نرخ برش		•				•	جنس سیم
Filgueira & Pinatti (2005)	بهره‌وری						•	جنس سیم
Cai et al. (2007)	بهره‌وری	•						زاویه ورودی
Denkena et al. (2010)	نرخ برش		•				•	
Jain & Rathore (2011)	نرخ برش	•	•					
Huang & Xu (2013)	بهره‌وری						•	
Bagherpour et al. (2014)	نرخ برش			•	•			
Turchetta et al. (2014)	نرخ برش		•					
Almasi et al. (2015)	نرخ برش		•		•			
صباغیان (۱۳۹۵)	نرخ برش					•		
Hasanpour et al. (2016)	بهره‌وری	•						انرژی اصطکاک
Turchetta et al. (2017)	نرخ برش		•					تاب سیم
Feng et al. (2019)	بهره‌وری	•						نرخ خوراک‌دهی

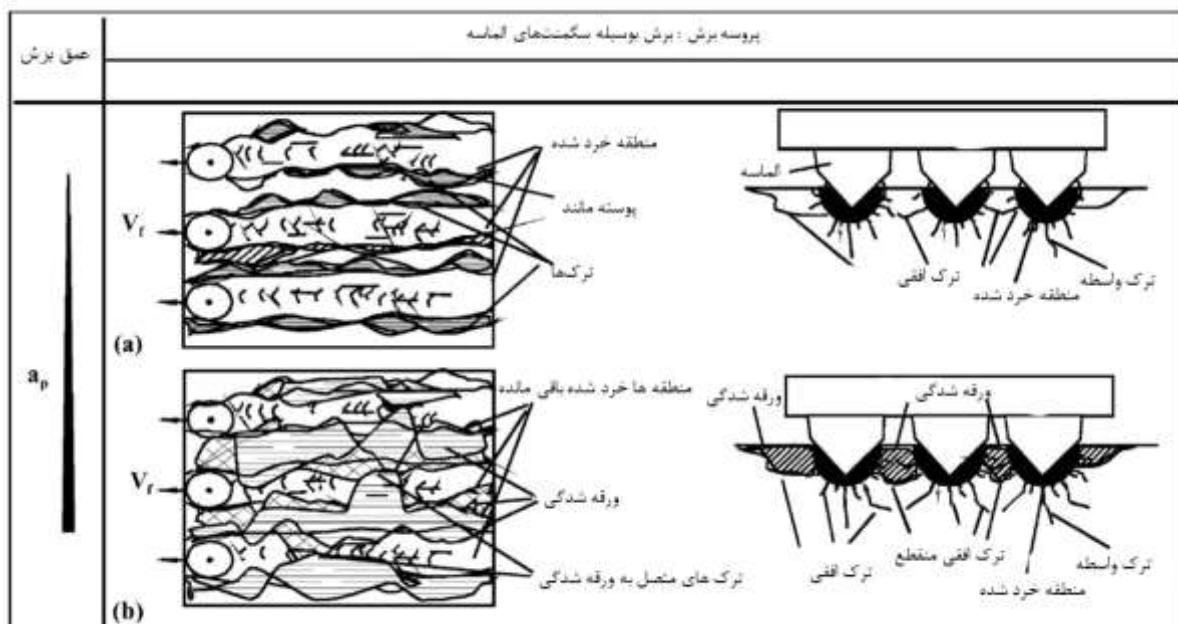
کنستانتی<sup>۱</sup> (۱۹۹۱) به منظور به دست آوردن بهره‌وری بیش‌تر مهره‌های الماسه در هنگام برش، ترکیب‌های مناسبی از مشخصات دانه‌های الماسه (شامل: ابعاد، تراکم و نوع) ارایه کرد. از نظر وی با این ترکیب‌های پیشنهاد شده می‌توان بهره‌وری این روش را افزایش داد (Konstanty, 1991).

کوره<sup>۲</sup> و دوراکن<sup>۳</sup> (۲۰۰۰) برای بررسی عملکرد سیم برش الماسه، سنگ‌های گرانیتی را با توجه به بافت سنگ و نحوه گسترش ریزترک‌ها در هنگام برش مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. در این آزمایش‌ها بیش از ۱۲۰ مترمربع برش در جهت‌های افقی و عمودی انجام شده است. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با روش‌های آماری پیشرفته مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل، نشانگر این است که در راستای عمودی، مقدار سایش مهره‌ها بیش‌تر از راستای افقی است و عملکرد سیم برش در دو راستا تفاوت ناچیزی با هم دارند (Korre & Durucan, 2000).

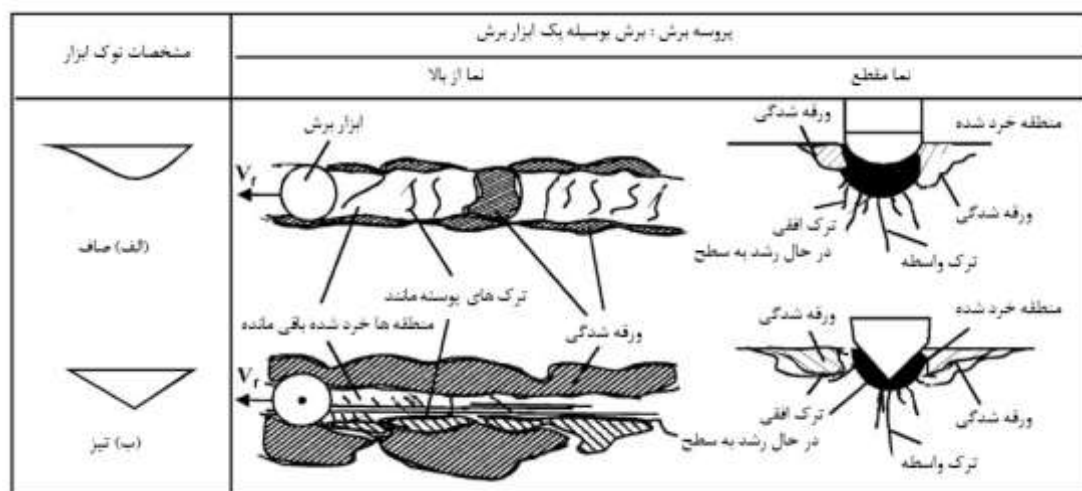
وانگ<sup>۴</sup> و کلارکسون<sup>۵</sup> (۲۰۰۲) با بررسی دانه‌های الماسه در هنگام برش سنگ مرمر، رفتار سینماتیکی دانه‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، مکانیسم برش، به‌عنوان یک تغییر شکل پلاستیک مطرح شده است. شکل ۳-۶ نشانگر نحوه ایجاد ترک‌های حاصل از برش است. تغییر شکل‌های به‌وجودآمده تحت تاثیر شرایط برش همانند عمق برش، خنک‌کننده‌های برش، شکل نوک ابزار برش و خصوصیات سنگ است. شکل ۳-۷ تاثیر شکل نوک ابزار برش بر ایجاد ترک در فرآیند برش را نشان می‌دهد. همچنین نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد، از تمامی الماسه بر روی مهره‌ها فقط چند عدد از آن‌ها درگیر برش می‌شوند و تراکم بیش از حد الماسه بر روی مهره‌ها تاثیری در برش سنگ ندارد (Wang & Clausen, 2002).

---

1 Konstanty  
2 Korre  
3 Durucan  
4 Wang  
5 Clausen



شکل ۳-۶: برش سنگ مرمر توسط سگمنت‌های الماسه (Wang & Clausen, 2002)

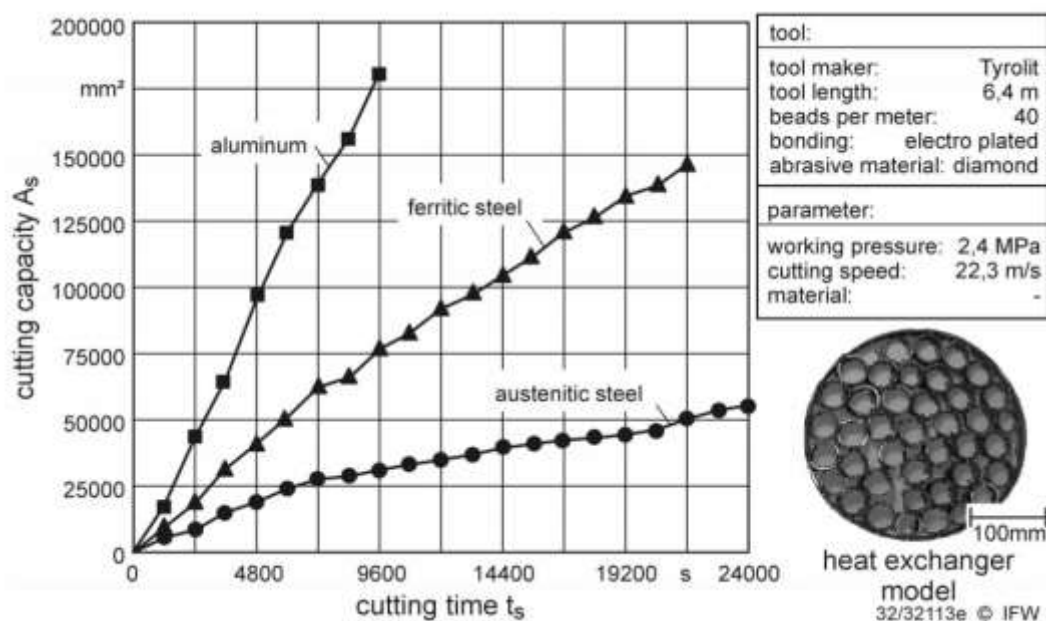


شکل ۳-۷: تاثیر مشخصات نوک ابزار در فرآیند برش (Wang & Clausen, 2002)

تانسوف<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۳) به منظور توسعه و ارتقا فناوری برش توسط سیم الماسه، تاثیر پارامترهایی همچون نوع مهره، جنس سیم و فشار کار دستگاه را بر نرخ برش مورد مطالعه و ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج حاصله از این تحقیق نشان می‌دهد که مهره‌های آبکاری شده نرخ برش بیشتری نسبت به مهره‌های اشباع شده دارند. همچنین با افزایش فشار کار دستگاه میزان نرخ برش نیز افزایش می‌یابد. در مقایسه انجام شده بین سیم‌هایی با جنس مختلف، نرخ برش سیم با جنس آلومینیومی نسبت به سیم‌هایی

<sup>1</sup> Tonshoff

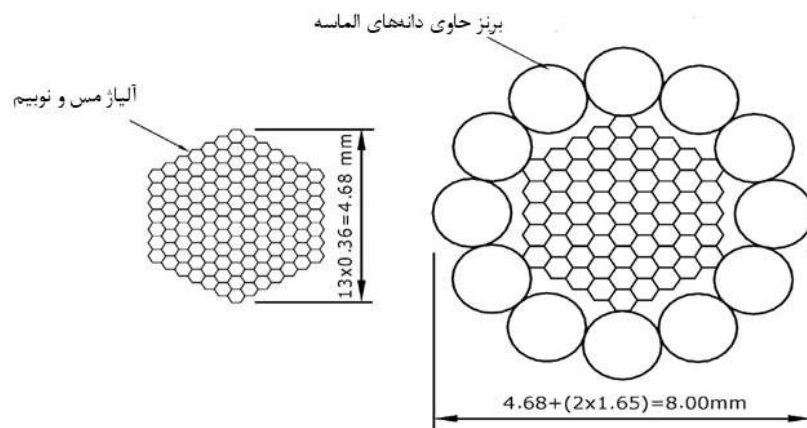
با جنس استیل و استیل پر کربن بیشتر است. شکل ۳-۸ نرخ برش برای سیم‌هایی با جنس مختلف را نشان می‌دهد (Tonshoff et al., 2003).



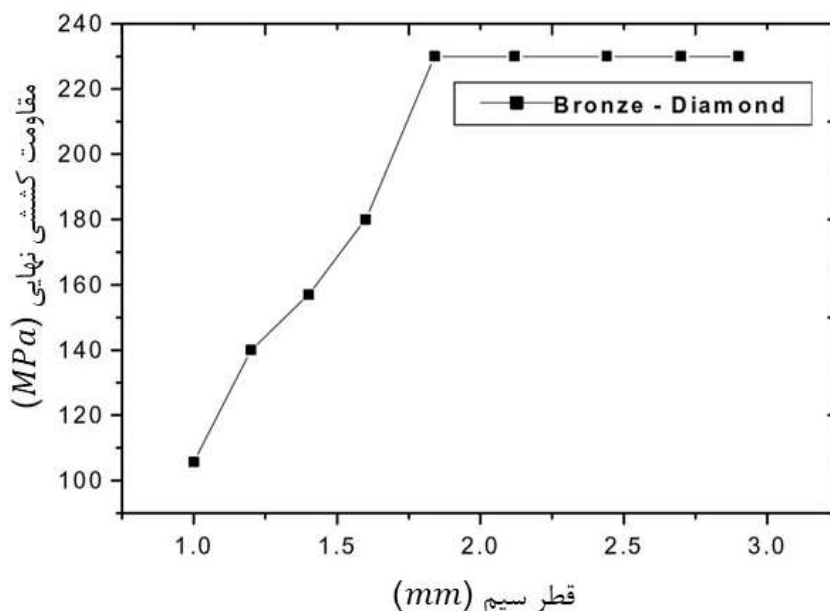
شکل ۳-۸: نرخ برش برای سیم‌هایی با جنس مختلف (Tonshoff et al., 2003)

فیلگوئرا<sup>۱</sup> و پیناتی<sup>۲</sup> (۲۰۰۵) به منظور حل مشکل پاره شدن سیم برش الماسه بر اثر فاصله میان مهره‌ها، نوع جدیدی از سیم برش الماسه را به نام "in stu" معرفی کردند. در این نوع سیم برش، به جای استفاده از مهره‌ها از کابلی از جنس مس-نوبیوم با پوششی از جنس برنز حاوی الماسه استفاده شده است. در این تحقیق، با انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های مختلف سیم برش الماسه با استانداردهای ASTM E8M-97 و ASTM E466-82 به بررسی قطر بهینه و میزان مقاومت کششی نوع سیم برش الماسه پرداخته شده است. شکل ۳-۹ آرایش سیم و روکش آن و شکل ۳-۱۰ گسیختگی کششی سیم در قطرهای مختلف را نشان می‌دهد (Filgueira & Pinatti, 2005).

1 Filgueira  
2 Pinatti



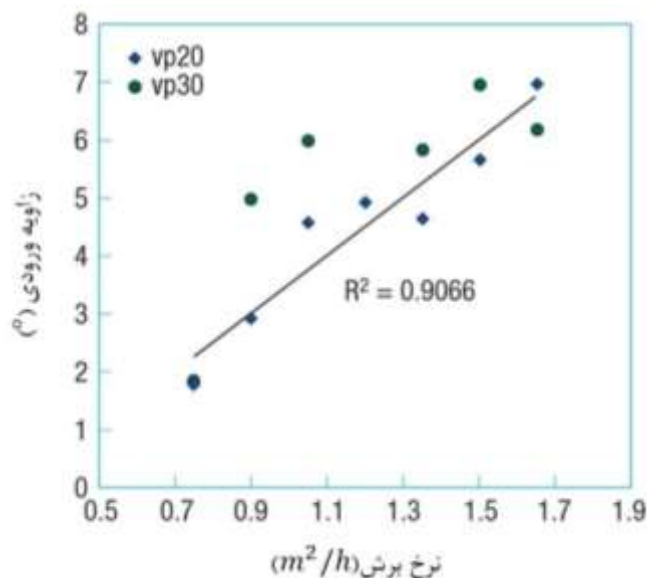
شکل ۳-۹: آرایش و جنس سیم و روکش آن (Filgueira & Pinatti, 2005)



شکل ۳-۱۰: گسیختگی سیم برش الماسه در قطرهای مختلف (Filgueira & Pinatti, 2005)

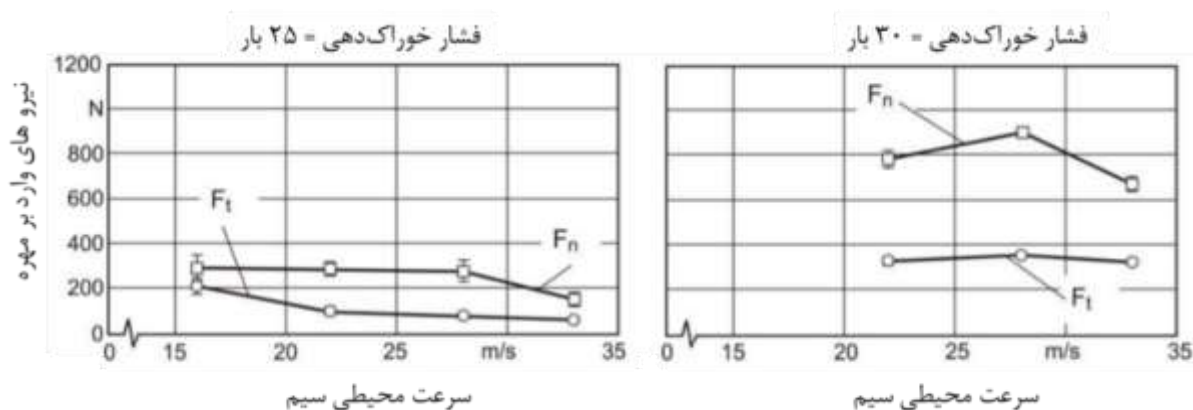
کای<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۷) آزمایش‌هایی را با هدف شناخت روش‌های پیش‌بینی بهره‌وری سیم برش الماسه در برش سنگ گرانیت انجام دادند. آن‌ها در آزمایش خود، ارتباط سرعت محیطی و زاویه ورودی سیم برش الماسه با نرخ برش را مورد بررسی قرار دادند. شکل ۳-۱۱ نمودار ارتباط میان زاویه برش با نرخ برش در دو سرعت محیطی مختلف، ۲۰ و ۳۰ متر بر ثانیه است. همچنین این پژوهشگران، عمر و سایش مهره‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند (Cai et al., 2007).

1 Cai



شکل ۳-۱۱: نمودار ارتباط میان زاویه برش با نرخ برش (Cai et al., 2007)

دنکنا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) آزمایش‌هایی را با سیم برش الماسه بر روی بلوک‌های بتنی انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد، با افزایش فشار خوراک‌دهی دستگاه برش به بلوک بتنی، نیروهای وارد بر مهره‌ها افزایش یافته و با افزایش سرعت محیطی، این نیروها کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که نرخ برش به تراکم الماسه‌ها بر روی مهره‌ها وابستگی ندارد. شکل ۳-۱۲ مقایسه برش یک نمونه بتنی در فشارهای خوراک‌دهی متفاوت را نشان می‌دهد (Denkena et al., 2010).



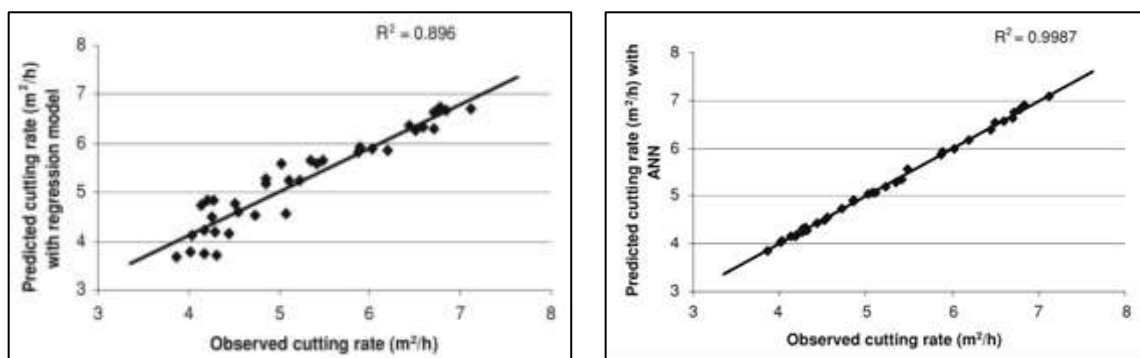
شکل ۳-۱۲: مقایسه برش نمونه بتنی در فشارهای خوراک‌دهی متفاوت (Denkena et al., 2010)



جاین<sup>۱</sup> و راتور<sup>۲</sup> (۲۰۱۱) با استفاده از شبکه عصبی و رگرسیون چندمتغیره، سعی بر کاهش هزینه‌های معدن‌کاری سنگ مرمر داشته‌اند. در این تحقیق، ۳۶ نمونه از برش سنگ توسط سیم برش الماسه مورد مطالعه قرار گرفته است. در هر نمونه، خاصیت‌های مقاومت برشی سنگ (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، نیروی کشش به عقب دستگاه برش، سرعت محیطی، نرخ برش و نرخ سایش سیم برش الماسه بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل به‌دست‌آمده از شبکه عصبی نسبت به رگرسیون چندمتغیره به واقعیت نزدیک‌تر است. رابطه (۳-۴) رگرسیون چند متغیره میان نرخ برش و پارامترهای ذکر شده است. شکل ۳-۱۳، مقایسه میان نتایج حاصل از مدل رگرسیون و مدل شبکه عصبی را نشان می‌دهد (Jain & Rathore, 2011).

$$C_r = -4.92 - 0.12c + 0.0345n + 0.0134t \quad \text{رابطه (۳-۴)}$$

در این رابطه  $C_r$  نرخ برش،  $c$  چسبندگی،  $n$  سرعت محیطی و  $t$  نیروی کشش دستگاه به نیوتن است.

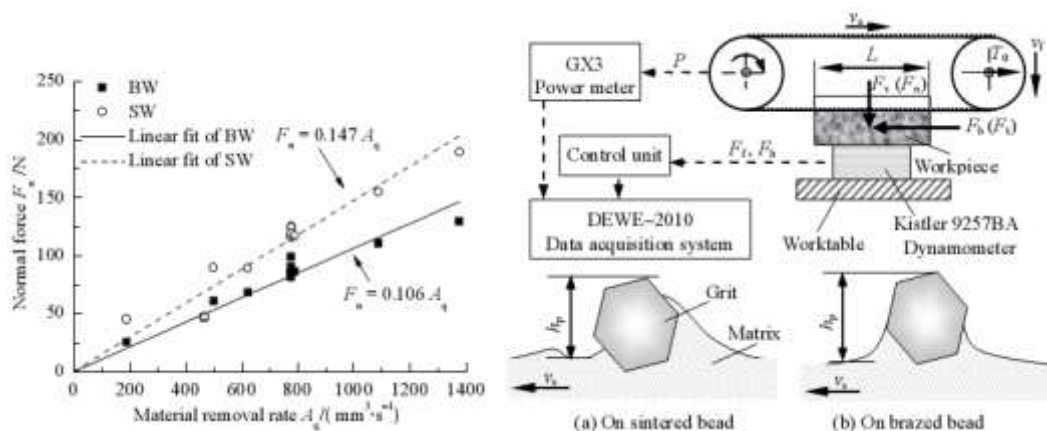


شکل ۳-۱۳: نمودارهای مقایسه دو مدل رگرسیون و شبکه عصبی با واقعیت (Jain & Rathore, 2011)

هوانگ<sup>۳</sup> و ژو<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) مقایسه‌ای میان مهره‌های الماسه آبکاری‌شده و اشباع‌شده انجام دادند. در این تحقیق، به‌منظور مقایسه این دو نوع مهره، از دو آزمایش استفاده کردند. اولین آزمایش با نرخ ثابت خوراک‌دهی به مهره‌ها و آزمایش دیگر را با وارد کردن نیروی ثابت بر مهره‌ها در هنگام برش انجام داده‌اند.

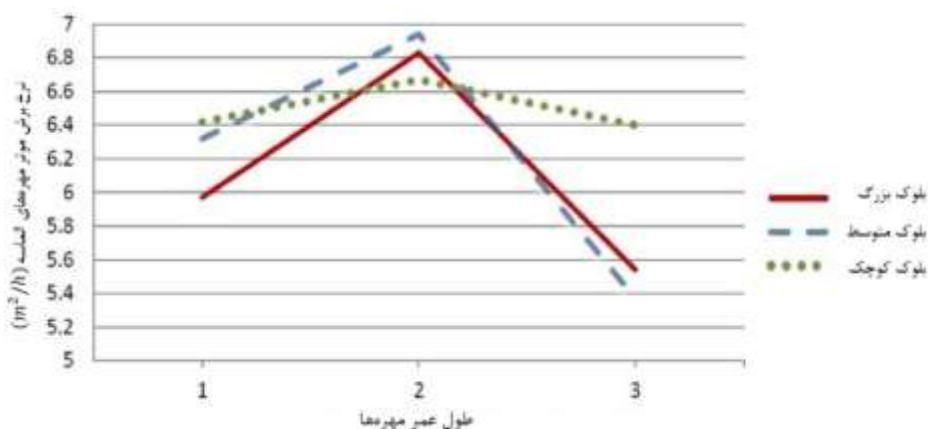
1 Jain  
2 Rathore  
3 Huang  
4 Xu

نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مهره‌های آبرکاری‌شده عملکرد بهتری نسبت به مهره‌های اشباع‌شده دارند. شکل ۳-۱۴ تاثیر ساختار مهره‌ها بر نیروی برش را نشان می‌دهد (Huang & Xu, 2013).



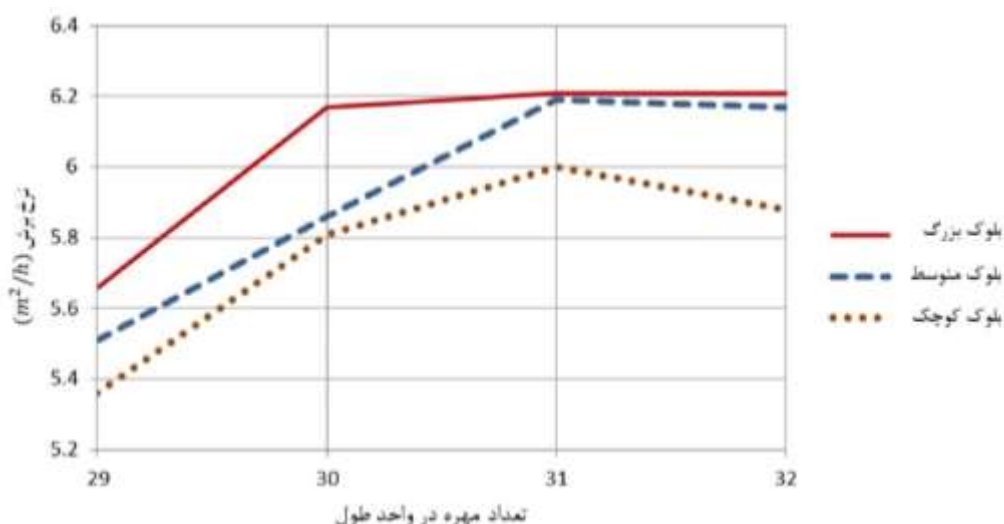
شکل ۳-۱۴: تاثیر نوع ساختار مهره بر روی نیروی برش در سیم الماسه (Huang & Xu, 2013)

باقرپور و همکاران (۲۰۱۴) مطالعاتی بر روی نمونه سنگ تراورتن به منظور محاسبه نرخ برش سیم الماسه انجام دادند. در این پژوهش، به این نتیجه دست یافتند که نرخ برش، وابسته به سالم بودن مهره‌های سیم الماسه نیست. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که بیش‌ترین نرخ برش مربوط به یک سوم میانی عمر مهره‌ها است. شکل ۳-۱۵ تغییرات نرخ برش در طول عمر مهره‌ها را نشان می‌دهد. در این تحقیق، تعداد بهینه مهره‌ها در هر متر سیم برش الماسه، ۳۱ عدد بدون توجه به ابعاد بلوک استخراجی در نظر گرفته شده است. در بیشتر از این مقدار نرخ برش تقریباً ثابت می‌ماند. شکل ۳-۱۶ نشانگر تغییرات نرخ برش نسبت به تعداد مختلف مهره‌ها با توجه به ابعاد بلوک استخراجی است (Bagherpour et al., 2014).



شکل ۳-۱۵: نمودار نرخ برش در طول عمر مهره‌ها (طول عمر مهره‌ها به سه قسمت ابتدایی، میانی و انتهایی تقسیم شده

است) (Bagherpour et al., 2014)

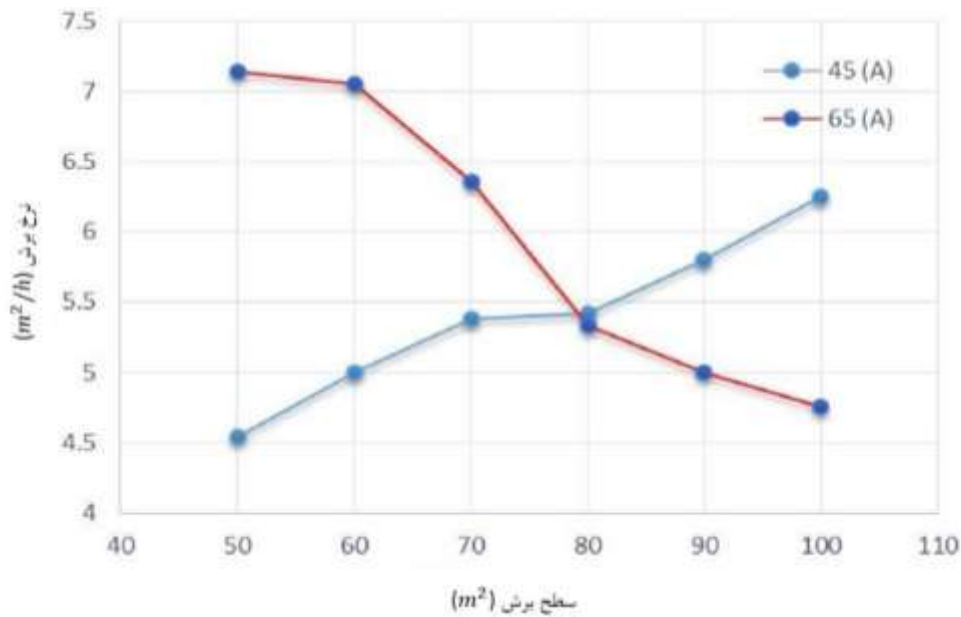


شکل ۳-۱۶: نمودار نرخ برش با تغییر تعداد مهره در واحد طول در ابعاد مختلف بلوک استخراجی (Bagherpour et al., 2014)

تورچتا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴) با توجه به نقص‌های سیم برش الماسه همانند قیمت بالا و پاره شدن سیم هنگام کار، نوع جدیدی از ماشین‌آلات را ارائه کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با این ماشین‌آلات نشان می‌دهد که با ایجاد نیروی کشش و تاب دادن در سیم الماسه، می‌توان نرخ تولید و برش را افزایش داد. همچنین با افزایش فشار ویژه بر هر مهره، نرخ برش افزایش می‌یابد (Turchetta et al., 2014).

الماسی و همکاران (۲۰۱۵) به منظور بررسی تاثیر نیروی کشش به عقب دستگاه بر نرخ برش سیم الماسه، آزمایش‌های میدانی را بر روی سنگ تراورتن انجام دادند. این آزمایش‌ها با شش نیروی کشش به عقب متفاوت و در سطح‌های برش با ابعاد مختلف انجام شده است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که در آمپراژ ۶۵، هر چه سطح برش بزرگ شود، نرخ برش کاهش یافته و در آمپراژ ۴۵، هر چه سطح برش بزرگتر شود، نرخ برش بیشتر می‌شود. از تحلیل این نتایج می‌توان به این دست یافت که برای برش سطح‌های بزرگ نیاز به آمپراژ کشش کم است. شکل ۳-۱۷ مقایسه تغییرات نرخ برش با ابعاد مختلف سطح برش در آمپراژهای کشش ۴۵ و ۶۵ را نشان می‌دهد (Almasi et al., 2015).

<sup>1</sup> Turchetta

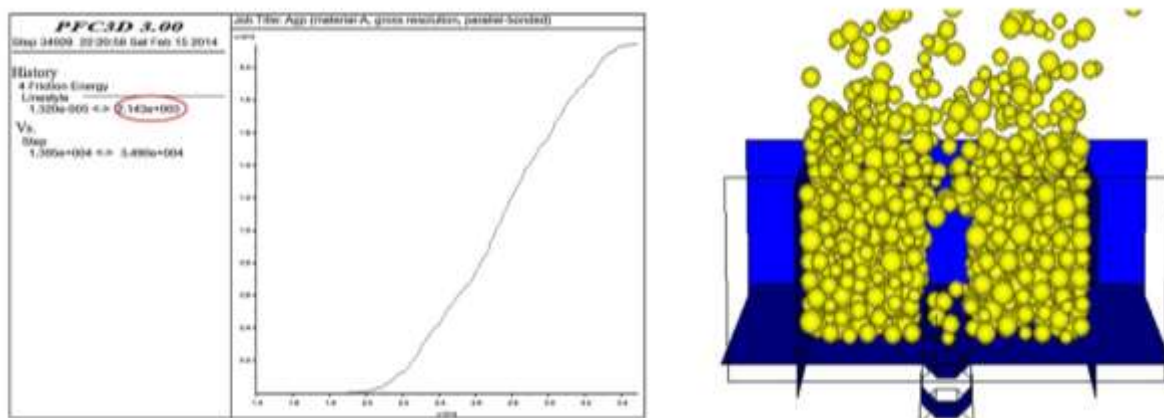


شکل ۳-۱۷: تغییرات نرخ برش نسبت به سطح برش در آمپراژهای مختلف (Almasi et al., 2015)

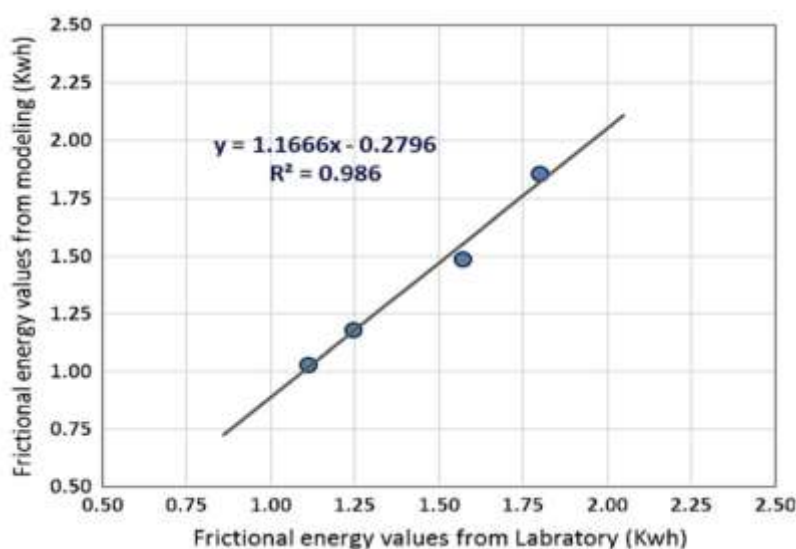
صبغیان (۱۳۹۵) با در نظر گرفتن استانداردهای ASTM برای سنگ تراورتن و مقاومت کششی سیم، قطر بهینه‌ای را برای مهره‌های سیم برش الماسه مورد استفاده در معدن تراورتن آستانه ارایه کرده است. نتایج حاصل از مطالعه میدانی نشان می‌دهد که نرخ برش بر روی فرسایش و بهره‌وری سیم تاثیر مستقیم دارد. نرخ برش بر روی میزان تولید تاثیر زیادی دارد و باعث افزایش تولید می‌شود (صبغیان، ۱۳۹۵).

حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۶) با دیدگاه مصرف انرژی در برش سنگ مرمر با استفاده از سیم برش الماسه آزمایش‌هایی را انجام داده‌اند. در این آزمایش‌ها انرژی اصطکاک حاصل از برش سنگ نسبت به سرعت‌های محیطی متفاوت ثبت شده است. نرخ برش در طول آزمایش ثابت در نظر گرفته شده است. آن‌ها این آزمایش‌ها را توسط نرم‌افزار PFC3D مدل‌سازی کردند. در این مدل، ابعاد بلوک آزمایشگاهی که ۱×۱×۱ مترمکعب بوده را به منظور کاهش زمان محاسبات به ۶۰×۴۰×۲۰ میلی‌مترمکعب تغییر دادند. پس از اعتبارسنجی مدل، با ثابت نگه داشتن سرعت محیطی سیم، نرخ‌های برش متفاوت در مدل بررسی شده و میزان انرژی اصطکاک ایجاد شده ثبت شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این مدل عددی، بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده است. شکل ۳-۱۸ نشان‌دهنده مدل عددی ساخته‌شده و نتایج حاصل از آن است. شکل

۱۹-۳ مقایسه میان مقادیر انرژی اصطکاک به دست آمده از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی است (Hasanpour et al., 2016).



شکل ۳-۱۸: مدل عددی و نمودار انرژی اصطکاک نسبت به زمان (Hasanpour et al., 2016)



شکل ۳-۱۹: مقایسه میان مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی (Hasanpour et al., 2016)

همان طور که در شکل ۳-۱۸ مشاهده می شود، در هنگام برش اجزای مدل به طور کامل گسیخته شده و در حال حرکت کردن به سمت بالا مدل هستند، این امر نشان می دهد که شرایط مرزی و ویژگی های ارتباطی میان اجزا مدل به درستی انتخاب نشده است. قطر گلوله ها نسبت به ابزار برش بسیار بزرگ در نظر گرفته شده است که موجب کاهش دقت مدل و نقص در فرآیند برش حاصل از قطع حداقل ارتباط میان دو گلوله می شود. همچنین در شکل ۳-۱۹ برای مقایسه میان مقادیر تخمینی و آزمایشگاهی، نتایج نسبت به نیم ساز ربع اول مقایسه نشده است.

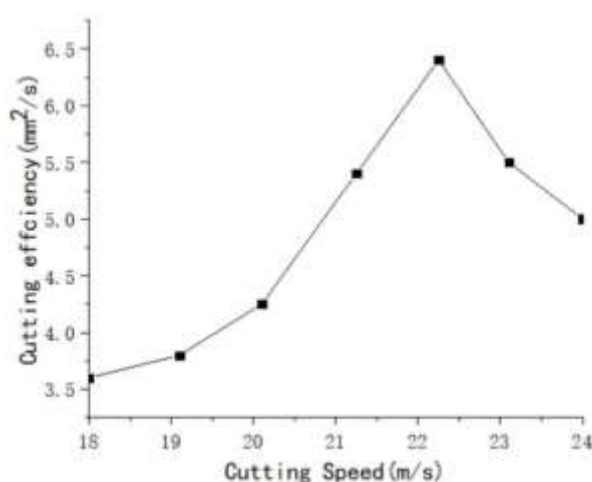
در پژوهش دیگر، تورچتا و همکاران (۲۰۱۷) مطالعاتی بر روی نیروهای برش و بهینه‌سازی سایش مهره‌ها با توجه به تاب سیم و کشش سیم انجام داده‌اند. این مطالعات همراه با آزمایشاتی در سه مرحله انجام شده است. هدف از این آزمایش‌ها طراحی بهتر سیستم برش و استفاده بهینه از ماشین‌آلات است (Turchetta et al., 2017). این مراحل عبارتند از:

۱- آزمایشی به منظور پیدا کردن رابطه‌ای میان تاب سیم و گشتاور ایجاد شده در سیم.

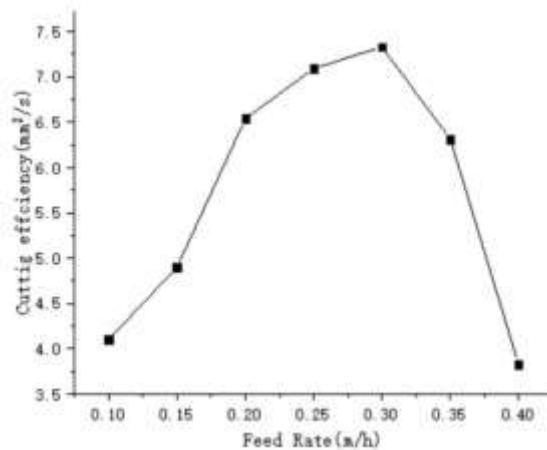
۲- انجام آزمایش در معدن به منظور اندازه‌گیری نیروهای وارده بر سیم الماسه در هنگام برش.

۳- ارزیابی سایش مهره‌ها در هنگام برش.

فنگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹) ماشین‌آلات برش صنعتی را به منظور بهینه‌سازی عملکرد برش، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها با انجام آزمایش‌های برش، تاثیر سرعت خطی سیم برش و میزان خوراک‌دهی را نسبت به بهره‌وری و سایش مهره‌های الماسه مطالعه کرده‌اند. از نتایج حاصل از این آزمایش‌ها یک کنترل‌کننده نرخ برش حاصل شده است. در شکل ۳-۲۰ نمودار تغییرات بهره‌وری نسبت به سرعت خطی سیم برش نشان داده شده است. شکل ۳-۲۱ نمودار تغییرات بهره‌وری نسبت به نرخ خوراک‌دهی را نمایش می‌دهد (Feng et al., 2019).

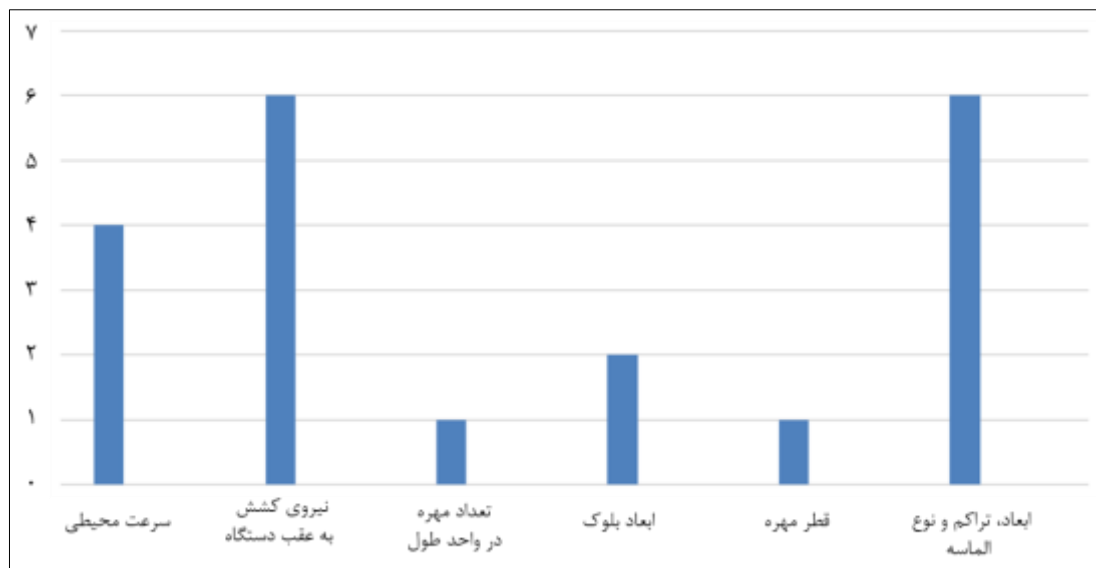


شکل ۳-۲۰: نمودار تغییرات بهره‌وری نسبت به سرعت خطی سیم (Feng et al., 2019)



شکل ۳-۲۱: نمودار تغییرات بهره‌وری نسبت به نرخ خوراک‌دهی (Feng et al., 2019)

با توجه به مطالعات پیشین بررسی شده در این پژوهش که در مورد تاثیر مشخصات دستگاه برش بر عملکرد برش با سیم الماسه است، می‌توان گفت که بیشترین مشخصه‌ها بررسی شده توسط محققین، نیروی کشش به عقب دستگاه و مشخصات دانه‌های الماسه (ابعاد، تراکم و نوع الماسه) بوده است. در شکل ۳-۲۲ تکرار مشخصات دستگاه برش در پژوهش‌های بررسی شده، نشان داده شده است. همچنین پارامترهایی همچون قطر مهره و تعداد مهره‌ها در واحد طول دارای کمترین مطالعات هستند، بنابراین پژوهش‌های بیشتری باید بر روی بررسی تاثیر این دو پارامتر بر عملکرد سیم برش الماسه انجام شود.



شکل ۳-۲۲: تکرار مشخصات دستگاه برش در پژوهش‌های بررسی شده

### ۳-۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بسیاری از مطالعاتی که تاکنون بر روی نرخ برش انجام شده است، بر روی پارامترهای غیرقابل کنترل و ارتباط آنها با نرخ برش است که در واقعیت تاثیر چندانی در بهینه‌سازی فرآیند برش و انتخاب پارامترهای عملیاتی درست که منجر به برشی اقتصادی شود، ندارند. لذا در این تحقیق تمرکز اصلی بر روی پارامترهای قابل کنترل و بررسی و شناخت نقش آنها در فرآیند برش است تا بتوان با تغییر آنها به برشی کارآمد دست یافت.

از طرف دیگر با توجه به مطالعاتی که در خصوص تاثیر پارامترهای ابزاری و عملیاتی بر فرآیند برش انجام شده است، می‌توان دریافت که تمامی این مطالعات بر روی یک یا دو پارامتر قابل کنترل تمرکز کرده‌اند. البته از آنجا که این مطالعات بر پایه مطالعات آزمایشگاهی استوار است، لذا بررسی و مطالعه چند پارامتر بسیار مشکل و پرهزینه خواهد بود. در این تحقیق سعی بر این است که تعداد بیشتری از پارامترهای قابل کنترل را به طور همزمان بررسی کرده و به رابطه‌ای جامع‌تر بر اساس تاثیر پارامترهای مختلف بر نرخ برش دست یافت.

همان طور که ذکر شد، با توجه به مطالعات پیشین، می‌توان به این نتیجه دست یافت که تقریباً تمامی مطالعات بر اساس آزمایش‌ها یا مطالعات صحرائی بوده است و تنها یک مدل عددی با رویکرد بررسی انرژی‌های درگیر در برش ارائه شده است. با کاربرد و توسعه مدل‌های عددی مناسب در خصوص افزایش بازدهی و نرخ برش، می‌توان در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرد. در ضمن این امکان بوجود می‌آید تا مطالعات گسترده‌تری در خصوص پارامترهای قابل کنترل درگیر فرآیند برش انجام شود.





## فصل چهارم

# مدل سازی عددی فرآیند برش سنگ توسط سیم الماسه

## ۴-۱- مقدمه

در برخورد با مسائل مهندسی، روش‌های مختلفی برای تحلیل و بررسی مسئله وجود دارد. این روش‌ها شامل روش‌های تجربی، آزمایشگاهی و مدل‌های فیزیکی، روش‌های تحلیلی و محاسباتی و روش‌های عددی هستند. تحلیل عددی، جدیدترین روش تحلیل نسبت به دیگر روش‌ها است که در سال‌های اخیر با توسعه و پیشرفت رایانه‌های پرسرعت، کاربرد بیشتری یافته‌اند. همان‌طور که در فصل پیش اشاره شد، بیش‌تر تحقیقات انجام‌شده در زمینه نرخ برش و نحوه عملکرد سیم برش الماسه، مربوط به روش‌های تجربی و تحلیلی است. محدودیت‌هایی همچون هزینه بالا و زمان‌بر بودن روش‌های آزمایشگاهی، دلیل استفاده پژوهشگران از تحلیل عددی است.

روش المان گسسته<sup>۱</sup> (DEM)، یک مدل عددی با توانایی توضیح رفتار مکانیکی گروه ذرات است. این روش بر اساس استفاده از یک رویه عددی صریح است که اثر متقابل بین ذرات از طریق تماس و حرکت ذرات را ذره به ذره بررسی می‌کند. توانایی مدل DEM این اجازه را به کاربر می‌دهد تا حرکت ذرات را به‌صورت جرم نقطه‌ای در حال حرکت در نظر بگیرد که شکل و حجم ذرات را شامل می‌شود (ITASCA, 2015). امروزه این روش در نرم‌افزار کد جریان ذرات (PFC<sup>2</sup>) ساخت شرکت آیتسکا قابل استفاده است. در این تحقیق، به‌منظور مدل کردن برش سنگ توسط مهره‌های الماسه و اندازه‌گیری نیروهای وارده بر مهره‌ها از نرم‌افزار کد جریان ذرات (PFC) استفاده شده است.

## ۴-۲- نرم افزار کد جریان ذرات (PFC)

نرم‌افزار PFC در سال ۱۹۹۴ برای نخستین بار عرضه شد. از آن زمان تاکنون، از این نرم‌افزار برای رفع مسایل آموزشی و صنعتی در زمینه‌های مدل‌سازی رفتار خاک و سنگ (آزمایشگاهی و میدانی)، شکست هیدرولیکی، انتشار امواج در جامدات، بررسی روش‌های تخریبی استخراج زیرزمینی، تجزیه و تحلیل پایداری پله، تغییر شکل گنبدی‌های نمکی، تعامل ابزار با خاک و سنگ و جریان سیالات استفاده شده است (ITASCA, 2015).

---

1 Discrete Element Method  
2 Particle Flow Code

این نرم‌افزار، رفتار مکانیکی سنگ را با مونتاژ تعداد زیادی ذره صلب دیسکی شکل در حالت دوبعدی یا کروی شکل در حالت سه‌بعدی، و پیوند آن‌ها به یکدیگر ارایه می‌دهد. در این نرم‌افزار، جابجایی‌ها و نیروهای برهم‌کنش ذرات با استفاده از قانون دوم نیوتن (برای تعیین حرکت ذرات متحرک تحت نیروی وارد از جانب تماس‌ها) و قانون نیرو-جابجایی (برای تعیین نیروی وارد بر تماس‌ها ناشی از حرکت ذرات) محاسبه می‌شوند. تماس‌های ایجادشده بین ذرات، از مدل‌های گوناگونی پیروی می‌کنند. بهترین مدل برای شبیه‌سازی سنگ، مدل پیوند موازی<sup>۱</sup> است (ITASCA, 2015).

### ۴-۳- مدل پیوند ذرات (BPM)

پوتیدی<sup>۲</sup> و کاندال<sup>۳</sup> (۲۰۰۴) بر این باور بوده‌اند که سنگ مانند یک ماده متشکل از دانه‌های سیمانی رفتار می‌کند که در آن، هم بخش دانه‌ها و هم بخش سیمانی، دچار تغییر شکل شده و حتی در صورت امکان، دچار شکست می‌شود. بنابراین یک مدل مفهومی باید بتواند به‌طور اصولی تمامی جنبه‌های رفتار مکانیکی سنگ را توضیح دهد. بر اساس این مدل مفهومی، مدل ذرات به هم پیوند شده<sup>۴</sup> برای سنگ، توسط این پژوهشگران تعریف شد (Potyondy & Cundall, 2004).

مطابق شکل ۴-۱، مدل اصلی ارتباطی ذرات در PFC، مدل تماس خطی بین دو ذره است. در این مدل، میزان نیرو و جابجایی‌ها بر اساس روابط (۴-۱) و (۴-۲) محاسبه می‌شود (Potyondy & Cundall, 2004).

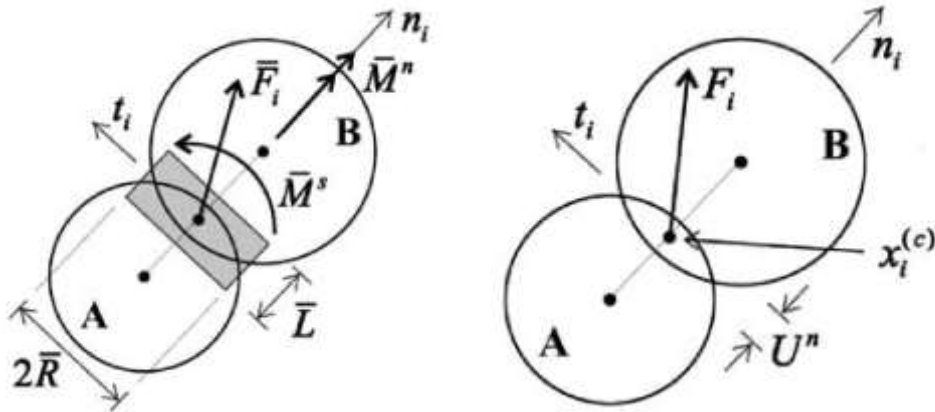
$$\begin{cases} F_n = K_n \cdot U_n \\ \Delta F_s = -K_s \Delta U_s \end{cases} \quad (\text{رابطه ۴-۱})$$

$$F_s \leq \mu \cdot F_n \quad (\text{رابطه ۴-۲})$$

در این روابط،  $F_n$  و  $F_s$  مولفه نیروهای قائم و نیروی برشی،  $U_n$  و  $U_s$  مقدار جابجایی قائم و برشی،  $K_n$  و  $K_s$  به ترتیب سختی قائم و برشی تماس و  $\mu$  مقدار ضریب اصطکاک است.

---

1 Parallel bond  
2 Potyondy  
3 Cundall  
4 Bonded particle



شکل ۴-۱: تصویر شماتیک از تماس خطی بین ذرات (راست) و پیوند سیمانی بین ذرات (چپ) (Potyondy & Cundall, 2004)

(2004)

به طور کلی، مدل تماسی خطی تنها قادر به پوشش حرکت نسبی ذرات است و قادر به عکس العمل نسبت به حرکات چرخشی و تامین گشتاور نیست. زمانی که گروهی از ذرات متصل مد نظر باشد، برای شبیه سازی، نیاز به تماس های سیمانی و محاسبه گشتاور است. در چنین مدل ارتباطی، تغییر کمیت ها با روابط زیر محاسبه می شود (Potyondy & Cundall, 2004).

$$\begin{cases} \Delta \bar{F}_n = \bar{K}_n \cdot A \cdot \Delta U_n \\ \Delta \bar{F}_s = -\bar{K}_s \cdot A \cdot \Delta U_s \end{cases} \quad (\text{رابطه ۳-۴})$$

$$\begin{cases} \Delta \bar{M}_n = \bar{K}_n \cdot J \cdot \Delta \theta_n \\ \Delta \bar{M}_s = -\bar{K}_s \cdot I \cdot \Delta \theta_s \end{cases} \quad (\text{رابطه ۴-۴})$$

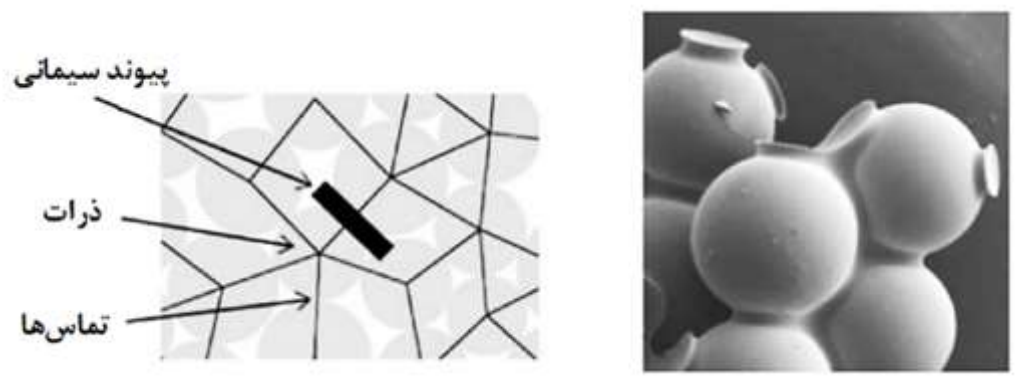
در این روابط،  $\Delta \bar{F}_n$ ،  $\Delta \bar{F}_s$ ،  $\Delta \bar{M}_n$  و  $\Delta \bar{M}_s$  به ترتیب مولفه های نیرو و ممان نسبت به مرکز ناحیه سیمانی هستند.  $\bar{K}_n$  و  $\bar{K}_s$  نیز سختی قائم و سختی برش مقطع سیمانی شده هستند.  $\Delta \theta_n$  و  $\Delta \theta_s$  زوایای چرخش،  $A$  سطح مقطع سیمانی شده،  $J$  ممان اینرسی و  $I$  ممان قطبی مربوط به پیوندهای سیمانی است. مقاومت این پیوند نیز بر اساس روابط زیر محاسبه می شود (Potyondy & Cundall, 2004).

$$\bar{\sigma}_{max} = \frac{-\bar{F}_n}{A} + \frac{-|\bar{M}_s| \cdot \bar{R}}{I} < \bar{\sigma}_c \quad (\text{رابطه ۵-۴})$$

$$\bar{\tau}_{max} = \frac{-\bar{F}_n}{A} + \frac{-|\bar{M}_s| \cdot \bar{R}}{J} < \bar{\tau}_c \quad (\text{رابطه ۶-۴})$$

در این روابط،  $R$  شعاع زون سیمانی،  $\bar{\sigma}_c$  مقاومت کششی و  $\bar{\tau}_c$  مقاومت برشی پیوند سیمانی است.

در نرم‌افزار PFC، پیوند سیمانی، مدل پیوند موازی نامیده می‌شود. شکل ۲-۴ نمایی از برقراری پیوند موازی بین ذرات را نشان می‌دهد (Potyondy & Cundall, 2004).



شکل ۲-۴: نمای برقراری پیوند موازی میان ذرات (Potyondy & Cundall, 2004)

#### ۴-۴- مدل سازی فرآیند برش در سنگ

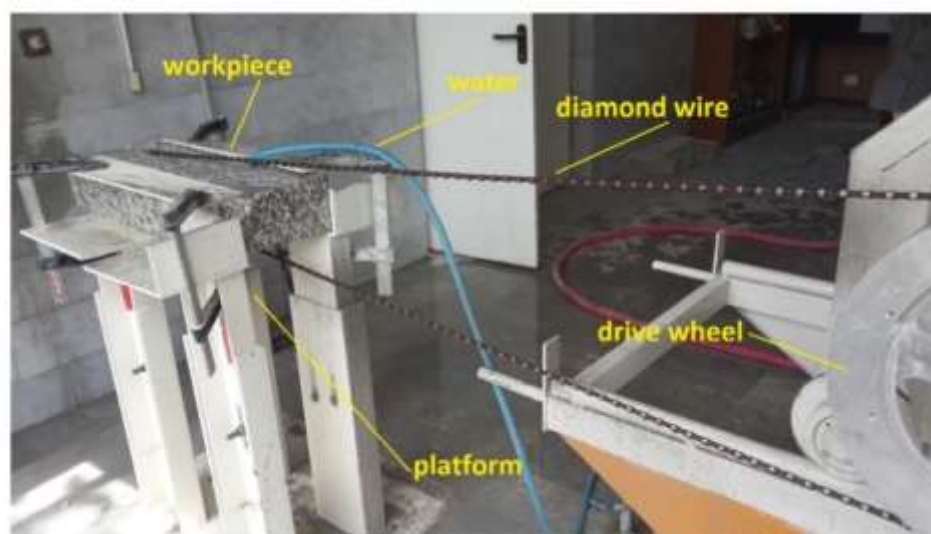
ورودی نرم‌افزار PFC برای ساخت مدل سنگ، خصوصیات میکرو مواد است. برای به دست آوردن خصوصیات ماکرو مواد، لازم است آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری در نرم‌افزار با مقادیر میکرو مواد مورد نظر به روش سعی و خطا انجام شوند. مراحل مدل‌سازی فرآیند برش در سنگ شامل، تعیین ابعاد حجم معرف<sup>۱</sup> (REV) برای آزمون‌ها مقاومتی، انجام آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری، شبیه‌سازی بلوک سنگی، شبیه‌سازی مهره‌های سیم برش الماسه و مدل‌سازی نحوه عملکرد برش است. در ادامه هر یک از این مراحل به تفکیک توضیح داده خواهند شد. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی نیز از نتایج حاصل از یک آزمون آزمایشگاهی بر روی سنگ گرانیت به عنوان مورد مطالعاتی استفاده شده است.

#### ۴-۴-۱- مورد مطالعاتی

به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام‌شده، نتایج حاصل با نتایج آزمون آزمایشگاهی که در دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده، مقایسه شده است. در آزمایش صورت گرفته در دانشگاه صنعتی اصفهان، دستگاه برش سنگ در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شده است. شکل ۳-۴ دستگاه برش ساخته شده را نشان

<sup>1</sup> Representative element volume

می‌دهد. در جدول ۱-۴ مشخصات ابزاری این دستگاه برش ارایه شده است. سنگ مورد آزمایش برش، گرانیت سفید افشار است که خاصیت‌های فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۲-۴ گنجانده شده است.



شکل ۳-۴: دستگاه برش ساخته شده برای انجام آزمایشات برش (الماسی، ۱۳۹۵)

جدول ۱-۴: مشخصات دستگاه برش ساخته شده (الماسی، ۱۳۹۵)

مشخصات ابزار	توضیحات
قدرت موتور اصلی (KW)	۳۰
قدرت موتور کوچک (KW)	۱۸
ولتاژ مورد نیاز ماشین (V)	۳۸۰
قطر پولی (cm)	۶۰
نوع مهره	اشباع شده و مخصوص سنگ سخت
تعداد مهره در واحد طول	۳۶
قطر مهره‌ها (cm)	۱
سرعت خطی سیم برش (m/s)	۲۰ تا ۲۴
آمپراژ کشش دستگاه (A)	۸۳

جدول ۲-۴: مشخصات خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ گرانیت افشار (الماسی، ۱۳۹۵)

مقدار	مشخصات	خواص سنگ
۲/۶	چگالی ( $gr/cm^2$ )	خواص فیزیکی
۲/۷	اندازه دانه‌ها (mm)	
۶۳/۷	کوارتز محتوی (%)	
۱۴۷	مقاومت فشاری (MPa)	خواص مکانیکی
۸۰/۱	مدول یانگ (GPa)	
۱۲/۸	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	
۶۳/۳	عدد چکش اشمیت	
۷۸۵۴	سرعت عبور امواج (m/s)	

## ۴-۴-۲- تعیین ابعاد حجم اولیه معرف برای شبیه‌سازی آزمون‌های مقاومتی

در مدل‌سازی عددی المان مجزا به روش تحلیل مکانیک ذرات، سه مساله مهم وجود دارد:

۱- چگونگی تعیین خواص ذرات و ویژگی‌های تماس در مقیاس میکرو

۲- تعیین ابعاد مدل برای ایجاد یک مدل قابل اعتماد

۳- تعیین ابعاد ذرات تشکیل‌دهنده مدل.

در واقع، موارد ۲ و ۳، زیرمجموعه‌ای از مساله اساسی تعیین خواص میکرو هستند؛ زیرا اندازه‌گیری خواص میکرو سنگ در آزمایشگاه غیرممکن است. بنابراین با توجه به وجود این چالش‌ها، پیش از انجام شبیه‌سازی، باید ابعاد مدل و ذرات و همچنین ابعاد آزمون‌ها جهت شبیه‌سازی تعیین شوند (افراسیابی، ۱۳۹۶).

دو مساله ابعاد مدل و اندازه‌ی ذرات، به هم وابسته‌اند و هیچ استاندارد برای پذیرش درستی اندازه این دو پارامتر در مدل‌سازی وجود ندارد. در کاربردهای متفاوت روش مکانیک ذرات، اندازه ذرات و ابعاد مدل، نه بر اساس ویژگی‌های واقعی، بلکه از روی نیازهای مهندسی و محدودیت‌های رایانه‌ای تعیین می‌شوند. دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ پیشنهاد کردند که برای افزایش دقت محاسبه‌های آزمون‌های مقاومتی در مطالعات PFC3D، نسبت اندازه مدل به اندازه ذرات معادل ۲۵ مناسب است (Ding et al., 2014). برای انتخاب قطر مناسب نمونه برای آزمون‌ها، یا به عبارت دیگر ابعاد حجم اولیه معرف (REV) مقاومتی، سه آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه‌هایی با قطرهای متفاوت ۳، ۵ و ۷ سانتی‌متر با توپ‌هایی به شعاع ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر انجام شده است. دلیل انتخاب شعاع توپ با این اندازه‌ها، این است که با توجه به حساسیت مدل، ابعاد ذرات باید به گونه‌ای باشد که در پهنای مهره‌های الماسه که حدود ۱۰ میلی‌متر است، حداقل دو ذره که دارای یک تماس مشترک هستند، وجود داشته باشد بدین ترتیب عمل برش سنگ توسط مهره‌ها می‌تواند به درستی شبیه‌سازی شود. هرچه تعداد ذرات در پهنای مهره بیشتر باشد، مدل از دقت بیشتری برخوردار است. در این پژوهش به دلیل محدودیت‌های محاسباتی، تعداد ۵ توپ در پهنای مهره در نظر گرفته شده است. در جدول ۴-۳، تغییرات مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه‌هایی با قطرهای مختلف آمده است.



جدول ۳-۴: مقادیر مقاومت فشاری سنگ در قطرهای متفاوت

قطر نمونه (cm)	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	زمان آماده‌سازی و محاسبه (دقیقه)
۳	۱۳۳/۹	۱۰
۵	۱۴۶	۳۰
۷	۱۴۸/۴	۶۰

همان‌طور که در جدول ۳-۴ مشاهده می‌شود، میزان مقاومت فشاری تک‌محوری با تغییر قطر نمونه از ۳ سانتی‌متر به ۵ سانتی‌متر، افزایش ناگهانی داشته و از ۵ سانتی‌متر به ۷ سانتی‌متر، تغییرات بسیار اندکی دارد. از این تغییرات می‌توان نتیجه گرفت که قطر ۵ سانتی‌متر ابعاد حجم اولیه معرف برای ویژگی مقاومتی است و می‌توان از آن برای انجام آزمون‌های مکانیک سنگی در نرم‌افزار استفاده کرد. همچنین در این جدول، زمان تقریبی آماده‌سازی هر مدل و محاسبه میزان مقاومت فشاری تک‌محوری (بر حسب دقیقه) آمده است.

#### ۳-۴-۴- شبیه‌سازی آزمون‌های مقاومتی

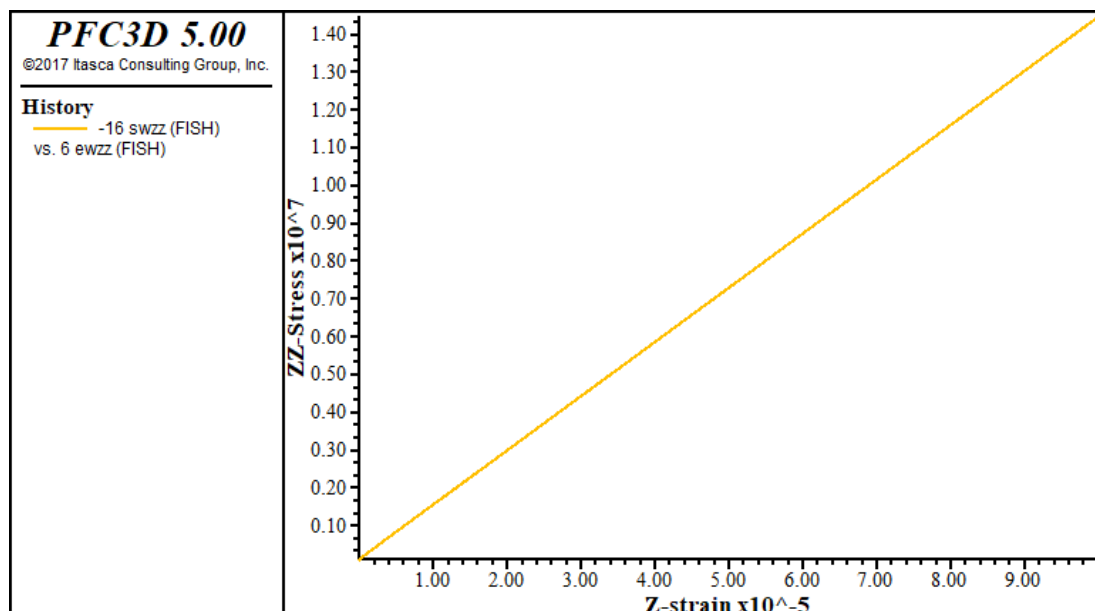
آزمون‌های مکانیک سنگی انجام‌شده شامل آزمون فشاری تک‌محوری و آزمون فشاری سه‌محوری است که در ادامه به جزئیات آن‌ها پرداخته خواهد شد.

هنگامی که رفتار شکست سنگ با استفاده از مدل عددی مکانیک ذرات مانند کد جریان ذرات PFC مدل‌سازی می‌شود، لازم است خواص ماکرو ذرات (با توجه به خواص آزمایشگاهی موجود) بر اساس خواص میکرو ذرات تعیین شوند. در مدل‌های ترکیب ذرات بین ویژگی‌های مکانیکی ذرات تکی (ویژگی میکرو) و گروهی از ذرات (ویژگی ماکرو) تفاوت عمده‌ای وجود دارد. در این مدل‌سازی، خواص ماکروی مهم سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون هستند. بنابراین خواص میکرو مناسب، با شبیه‌سازی آزمایش فشاری تک‌محوری برای دستیابی به مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری برای دستیابی به مقدار مدول الاستیسیته و ضریب پواسون تعیین می‌شوند. برای این منظور، بر اساس روش سعی و خطا، تغییرات خواص میکرو تا جایی ادامه پیدا می‌کند که خواص ماکرو حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری شبیه‌سازی شده، برابر مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده شود. شکل ۴-۴، آزمون فشاری سه‌محوری به همراه نمودار تنش-کرنش در راستای قائم را نشان می‌دهد. شکل ۴-۵، آزمون فشاری تک‌محوری به همراه نحوه گسیختگی نمونه و

نمودار تنش-کرنش این آزمون را نشان می‌دهد. در آزمون فشاری تک‌محوری و سه‌محوری، قطر نمونه ۵ سانتی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر نمونه برابر با ۲/۵ است. شکل ۴-۶، آزمون کششی برزیلی به همراه نحوه گسیختگی نمونه و نمودار تنش-کرنش این آزمون را نشان می‌دهد. مدل تماسی بین ذرات، از نوع پیوند موازی انتخاب شده است. مقادیر نهایی میکرو ویژگی‌های تماس موازی، تماس خطی اولیه و ذرات تشکیل‌دهنده مدل در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

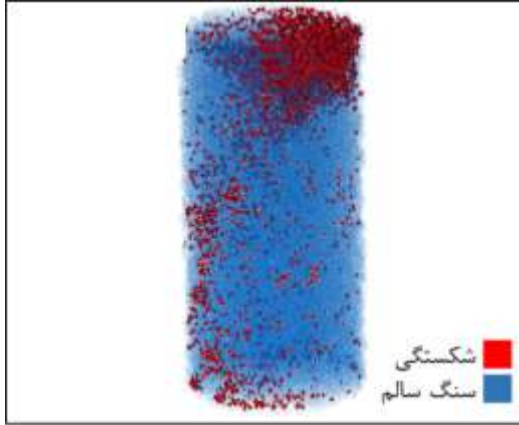


الف) آزمون مقاومت سه‌محوری

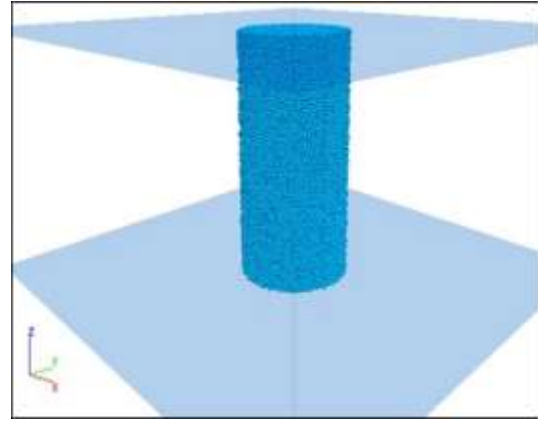


ب) نمودار تنش-کرنش در راستای قائم نمونه

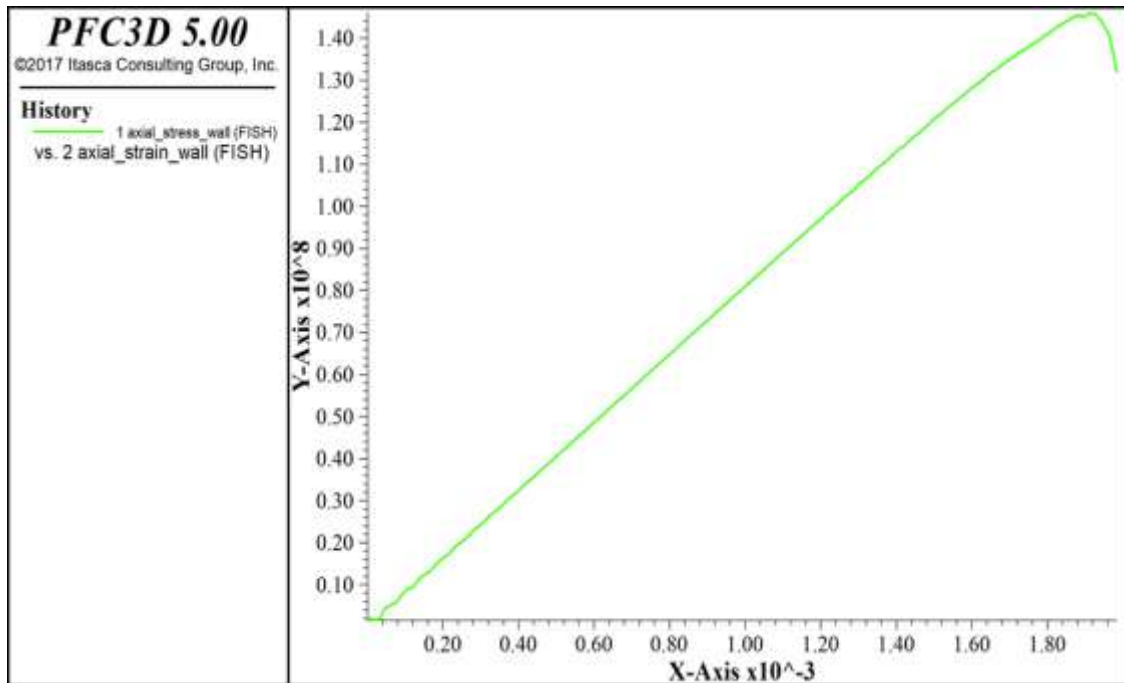
شکل ۴-۴: نتایج آزمون فشاری سه‌محوری



ب) نحوه گسیختگی نمونه سنگ

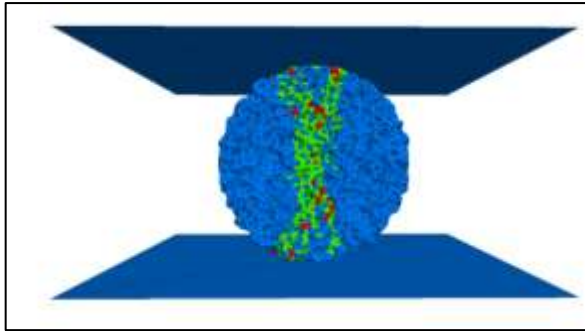


الف) آزمون مقاومت تکمحوری

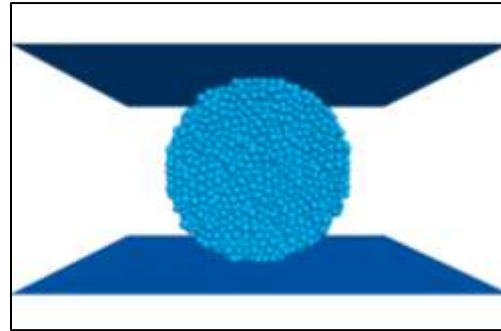


ج) نمودار تنش-کرنش

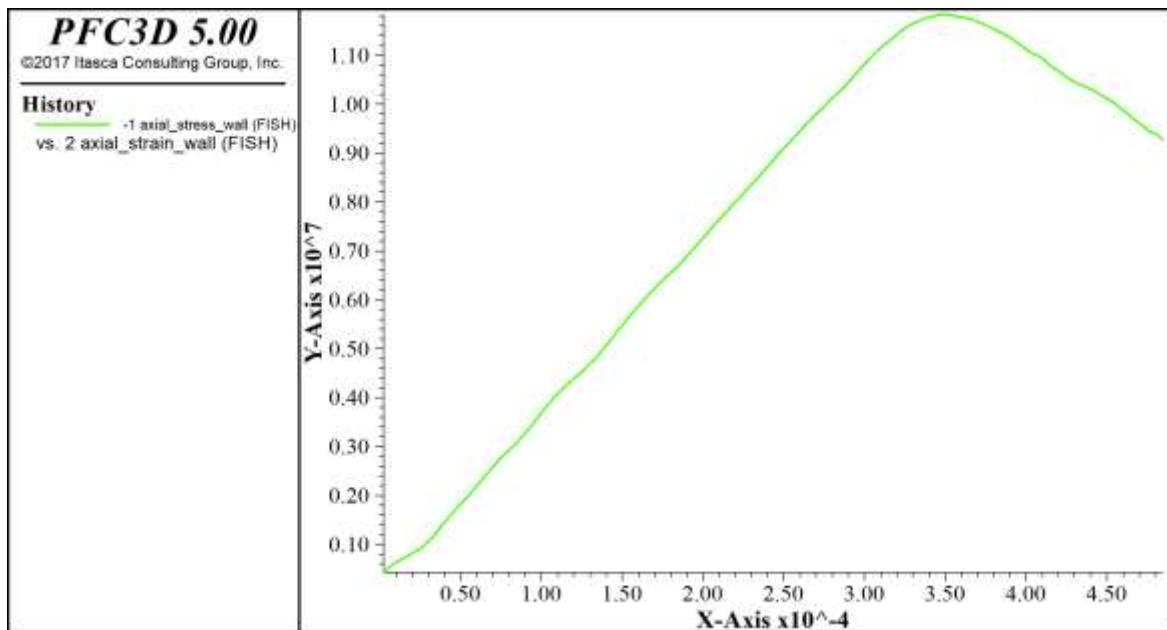
شکل ۴-۵: نتایج آزمون فشاری تکمحوری



ب) نحوه گسیختگی نمونه سنگ



الف) آزمون مقاومت کششی برزیلی



ج) نمودار تنش-کرنش

شکل ۴-۶: نتایج آزمون کششی برزیلی

جدول ۴-۴: پارامترهای میکرو ذرات، پیوند خطی و پیوند موازی

پارامتر					
مقدار	تماس موازی	مقدار	تماس خطی	مقدار	میکرو ذرات
۴	Kn/Ks	۴	Kn/Ks	۲۶۰۰	چگالی ( $\text{Kg/m}^3$ )
۷۰	مدول یانگ (GPa)	۵۰	مدول یانگ (GPa)	۱	شعاع ریزترین ذره (mm)
۷۳	مقاومت کششی (MPa)	۰/۵۷۷	ضریب اصطکاک	۱/۵	$R_{\max}/R_{\min}$
۶۰	چسبندگی (MPa)	۳۰	زاویه اصطکاک ( $^\circ$ )	۰/۷	ضریب دمپینگ

در جدول ۴-۴،  $\text{Kn/Ks}$  نسبت سختی قائم به سختی برشی و  $R_{\max}/R_{\min}$  نسبت شعاع بزرگ‌ترین

ذره به کوچک‌ترین ذره است.

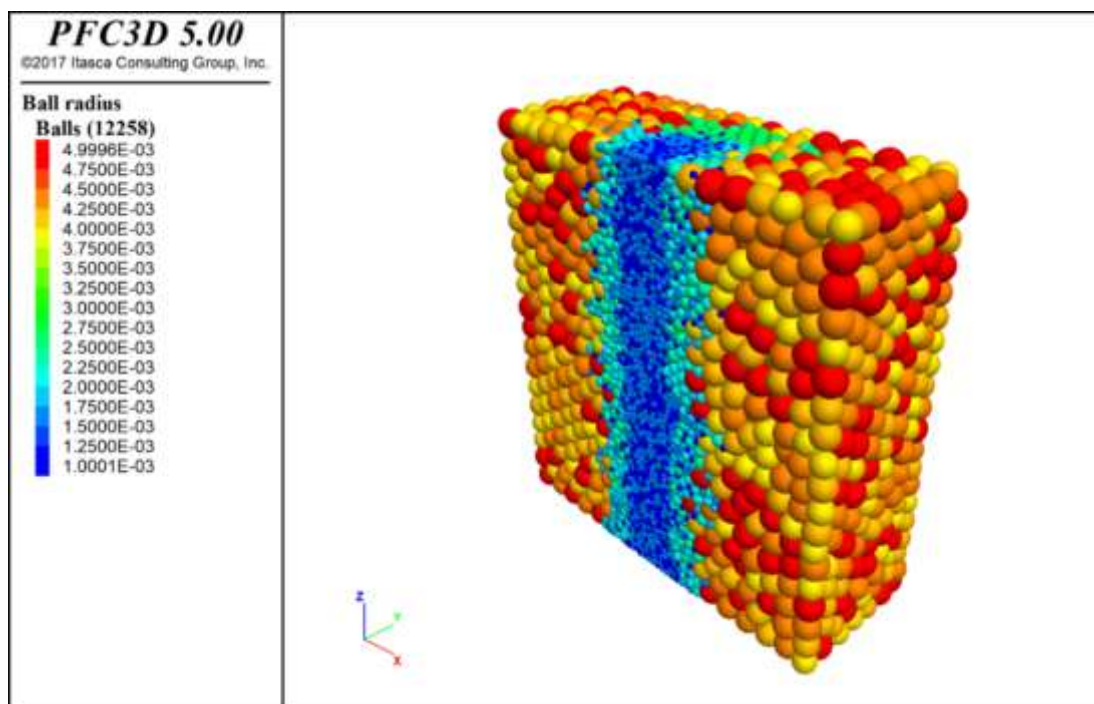
در جدول ۴-۵، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج آزمون‌های مکانیک سنگی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ارایه شده است.

جدول ۴-۵: مقایسه نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و عددی

پارامتر	مقدار آزمایشگاهی (الماسی، ۱۳۹۵)	مقدار عددی (PFC)
مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	۱۴۷	۱۴۶
مدول یانگ (GPa)*	۸۰/۱	۷۸
نسبت پوآسون*	۰/۲	۰/۲۲
مقاومت کششی برزیلی (MPa)	۱۲/۸	۱۱/۶
* میزان مدول یانگ و نسبت پوآسون از شبیه‌سازی آزمون سه محوره به دست آمده است.		

#### ۴-۴-۴- شبیه‌سازی بلوک سنگی

یکی از عوامل تاثیرگذار در تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار PFC، میزان ابعاد مدل و تعداد ذرات تشکیل‌دهنده این مدل است. انتخاب صحیح تعداد ذرات می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش زمان محاسبه‌ها داشته باشد. ابعاد بلوک گرانیتی استفاده شده توسط الماسی در آزمایشگاه،  $۱۵ \times ۳۵ \times ۱۵$  سانتی‌متر مکعب است (الماسی، ۱۳۹۵). ابعاد بلوک مدل شده، با توجه به نکته ذکر شده برای کاهش زمان محاسبه، به  $۱۴ \times ۵/۵ \times ۱۵$  سانتی‌متر مکعب کاهش یافته است. این ابعاد، به‌گونه‌ای انتخاب شده است که فقط قسمت‌هایی که درگیر برش هستند، در مدل حضور داشته باشند. از طرف دیگر، اثرات مرزی نیز در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، ناحیه تخریب یا برش ایجاد شده نباید در حین آزمایش به مرزهای مدل برسد. شعاع ذرات به‌صورت بازه‌ای از ۱ تا ۵ میلی‌متر انتخاب شده است. ذراتی که در تماس مستقیم با مهره‌ها هستند و قرار است فرآیند برش بر روی آن‌ها اجرا شود، دارای شعاع ۱ میلی‌متر و ذرات دورتر که به نوعی نگهدارنده بلوک هستند و در فرآیند برش نقشی ندارند، شعاع ۲ تا ۵ میلی‌متر اختصاص داده شده است. شکل ۴-۷، نحوه توزیع شعاع توپ‌ها در مدل را نشان می‌دهد.



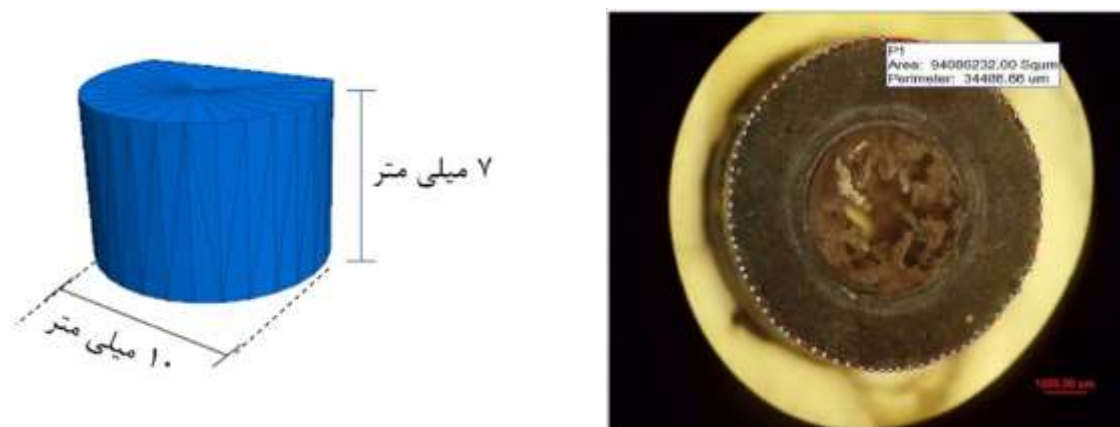
شکل ۴-۷: توزیع شعاع توپ‌ها در مدل

#### ۴-۵- شبیه‌سازی مهره‌های الماسه

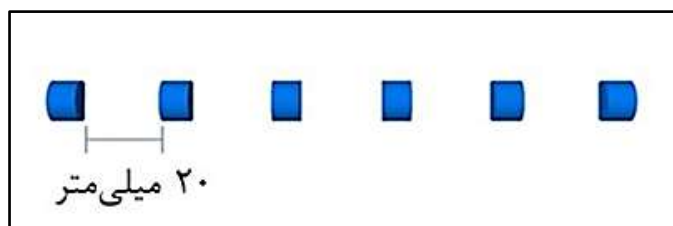
مهره‌های الماسه استفاده‌شده در آزمایش برش انجام شده توسط الماسی، از نوع مهره‌های اشباع‌شده است. این مهره‌ها دارای قطر ۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۷ میلی‌متر است (الماسی، ۱۳۹۵). به‌منظور جلوگیری از افزایش زمان محاسبه و با فرض اینکه سیم برش در هنگام برش سنگ چرخش نمی‌کند، نیمی از شکل کامل مهره‌های الماسه در نرم افزار شبیه‌سازی شده است. مهره‌ها در نرم افزار اتوکد طراحی شده و سپس به نرم افزار PFC منتقل شده‌اند. شکل ۴-۸، نشانگر یک مهره برش‌خورده که در آزمایشگاه استفاده شده (الماسی، ۱۳۹۵) و مهره طراحی و اجرا شده در نرم‌افزار PFC است.

با توجه به این که در مورد مطالعاتی آزمایشگاهی، میزان تعداد مهره‌ها در واحد طول ۳۶ عدد است (الماسی، ۱۳۹۵)، فاصله میان مهره‌ها ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بنابراین در ۱۵ سانتی‌متر طول برش نمونه آزمایشگاهی، تعداد ۶ مهره همواره درگیر برش هستند. شکل ۴-۹ نشانگر موقعیت فضایی ۶ مهره را نشان می‌دهد. حرکت مهره‌ها، بدین‌گونه طراحی شده است که پس از پیمایش طول برش، توسط یک شرط در نرم‌افزار به مختصات ابتدایی قطعه سنگ انتقال داده می‌شوند تا دوباره در برش شرکت کنند.

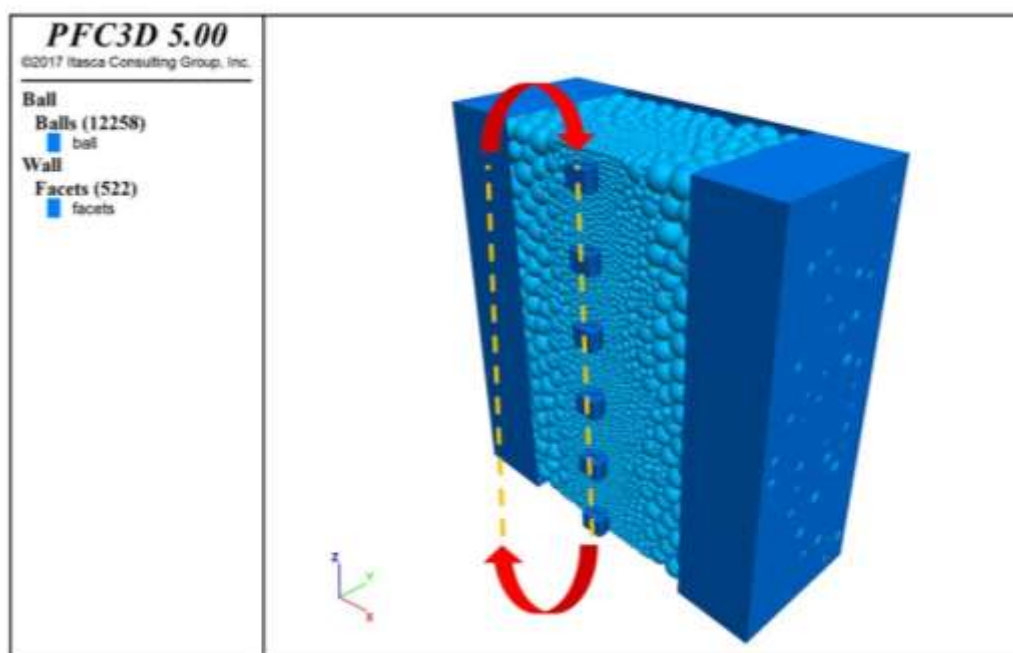
این کار، باعث کاهش اجزای مدل و پایین آمدن زمان محاسبه می‌شود. شکل ۴-۱۰ مسیر حرکت مهره‌ها را بر روی قطعه کار نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸: مهره برش خورده مورد استفاده در آزمایشگاه (الماسی، ۱۳۹۵) و مهره طراحی شده در نرم‌افزار PFC



شکل ۴-۹: موقعیت فضایی ۶ مهره



شکل ۴-۱۰: مسیر حرکت مهره‌ها در نرم‌افزار

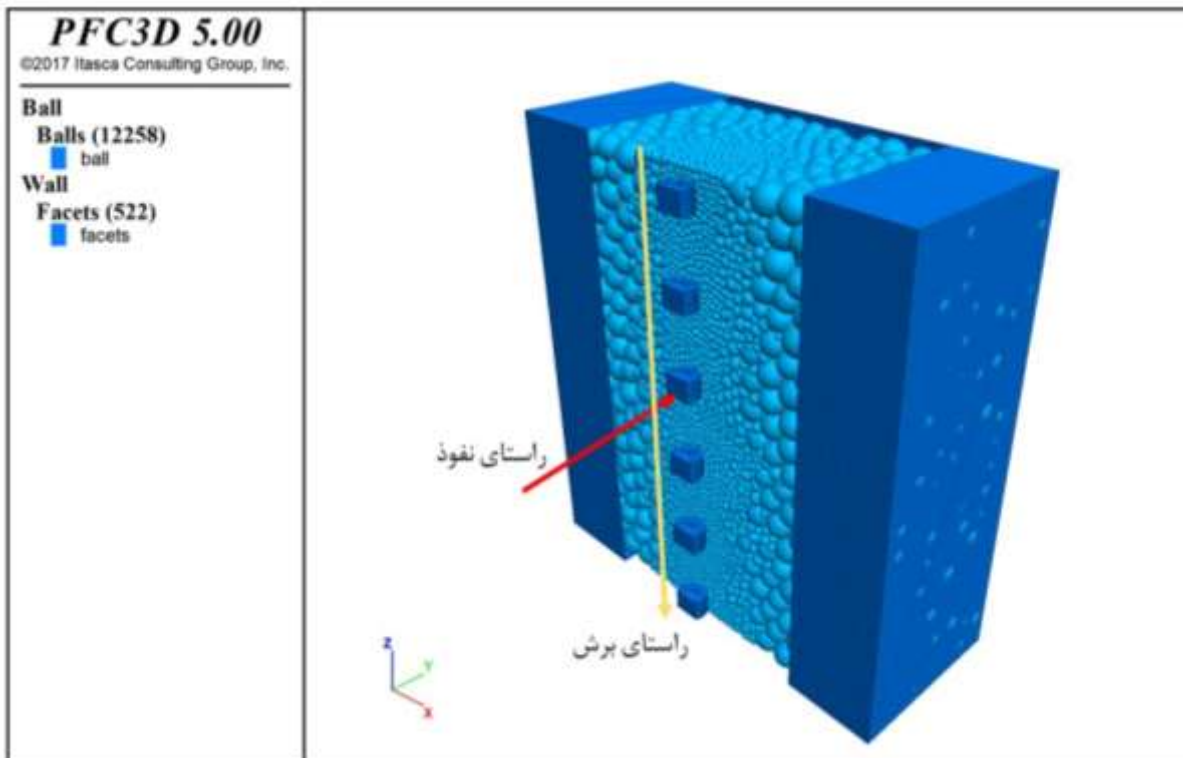
#### ۴-۴-۶- مدل سازی فرآیند برش

شبیه سازی فرآیند و نحوه عملکرد برش یکی از مهم ترین مراحل مدل سازی محسوب می شود. در فرآیند برش سیم الماسه، ترکیب دو عامل سرعت محیطی و نیروی کشش سیم، سبب برش سنگ می شود. این دو عامل به مهره که در تماس مستقیم با سنگ است، وارد می شود.

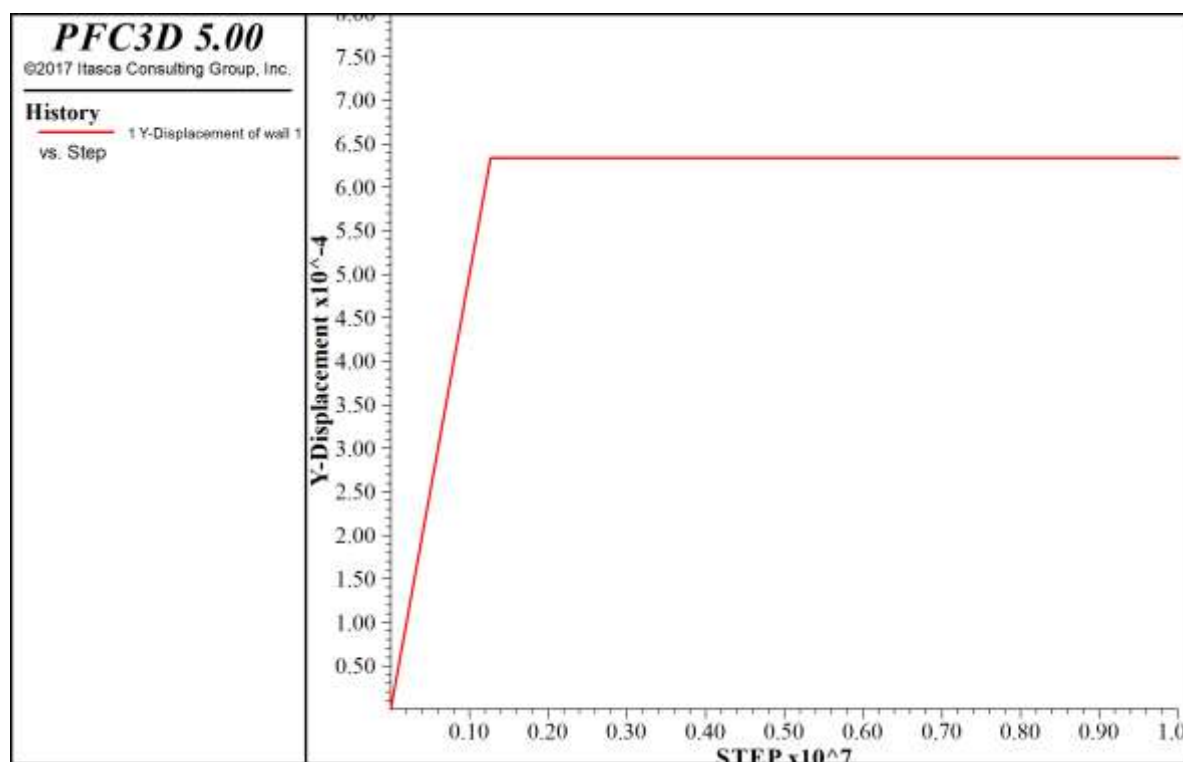
به منظور مدل سازی فرآیند برش سیم الماسه با نرم افزار، برای هر مهره، سرعت در راستای برش (سرعت محیطی) و نیرو در راستای نفوذ، تعیین شده است. در شکل ۴-۱۱، راستای برش و نفوذ مهره ها نشان داده شده است. سرعت در راستای برش، برابر با سرعت محیطی یا خطی سیم است. به منظور اعمال نیرو در راستای نفوذ، شرط تعادل نیرو اعمال شده است. بدین ترتیب نیروهای اعمال شده توسط مهره بر سنگ، که در واقع همان نیروی کشش سیم است، از حد مجازی که توسط کاربر انتخاب شده، تجاوز نمی کند. به منظور راستی آزمایی این شرط، آزمایشی طراحی شده است که مهره ها فقط در راستای نفوذ شروع به حرکت کنند و هنگامی که نیروهای وارده از طرف مهره به سنگ در این راستا به یک مقدار مشخص (برای این مثال برابر ۲۰۰ نیوتن) برسد، مهره ها ثابت شده و دیگر حرکت نمی کنند. شکل ۴-۱۲ نمودار تغییرات جابجایی مهره در راستای نفوذ و شکل ۴-۱۳ شرط تعادل نیروها در این آزمون را نشان می دهند.

با شروع حرکت مهره ها در راستای برش و شروع شدن فرآیند برش، نیروهای نشان داده شده در شکل ۴-۱۳ مغشوش شده و به صورتی که در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده اند، تبدیل می شوند. در ادامه، به تشریح این موضوع پرداخته شده است.

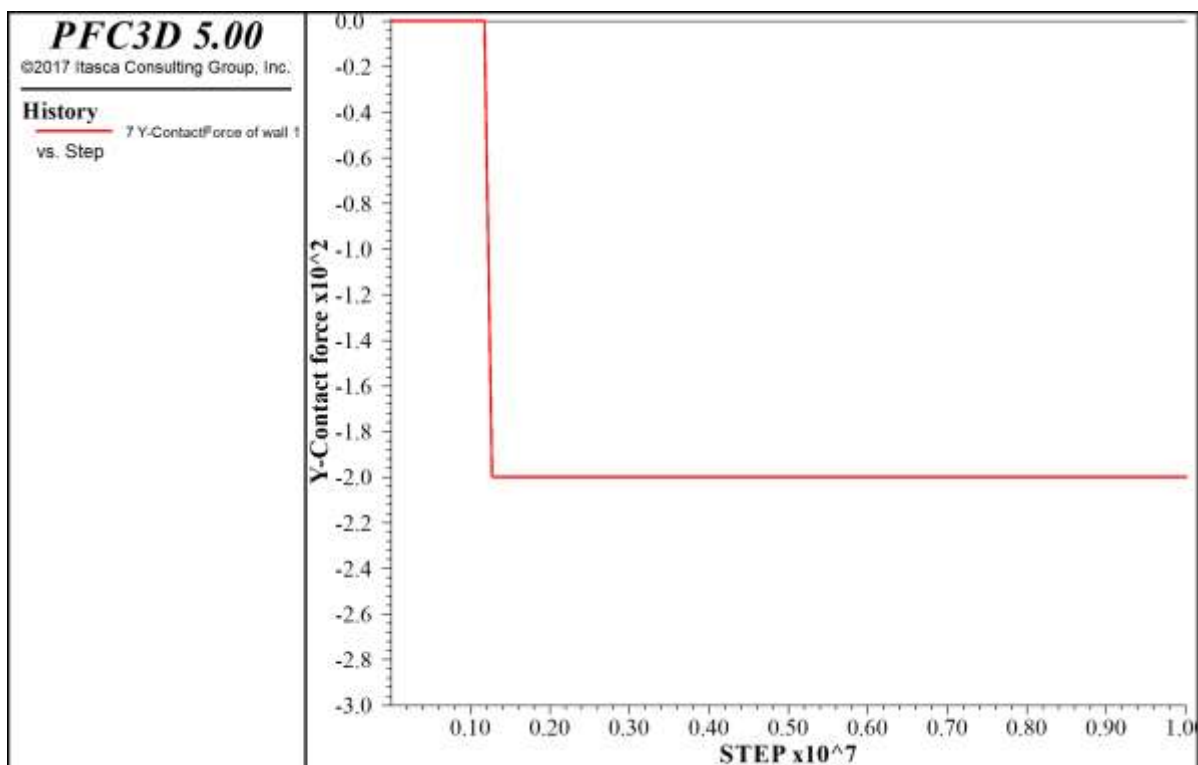




شکل ۴-۱۱: راستای نفوذ و برش مهره‌ها

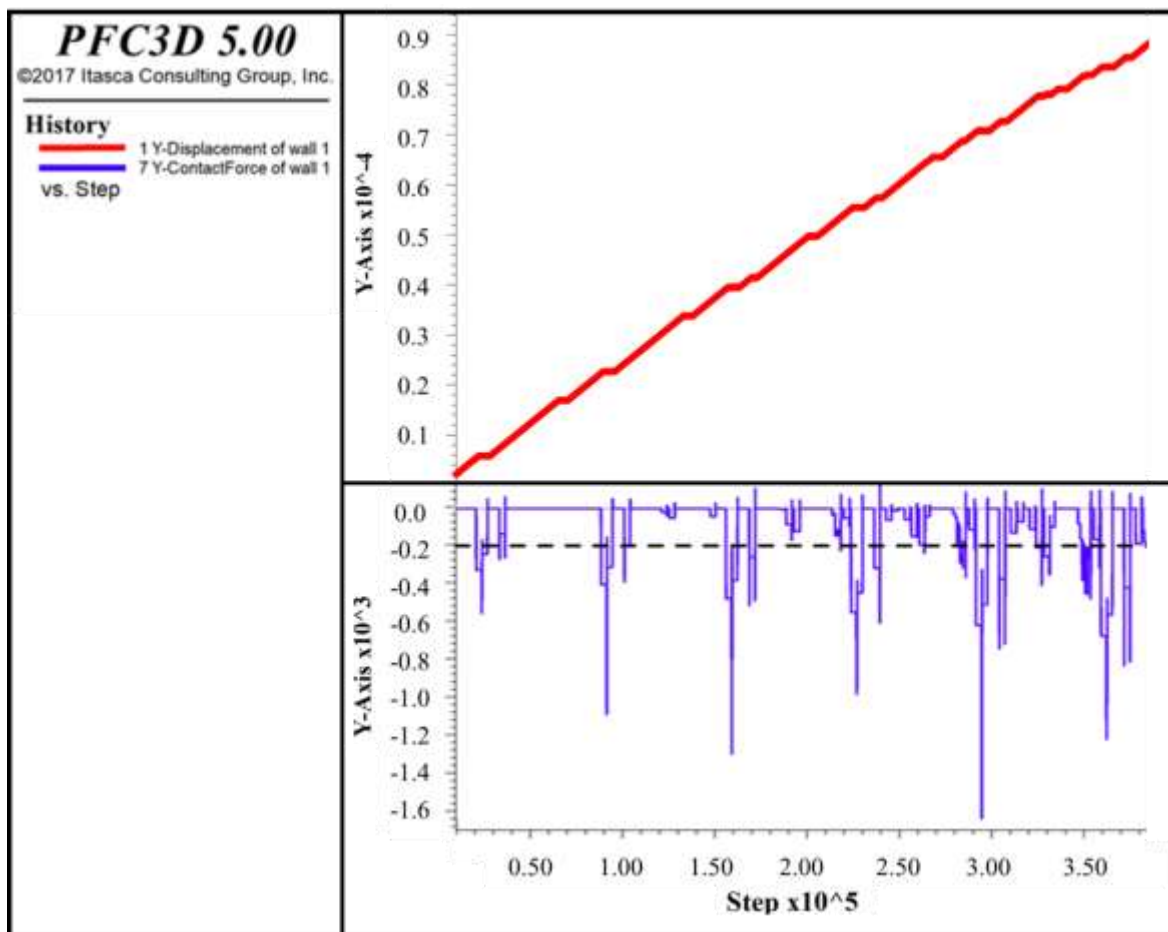


شکل ۴-۱۲: تغییرات جابجایی در راستای نفوذ



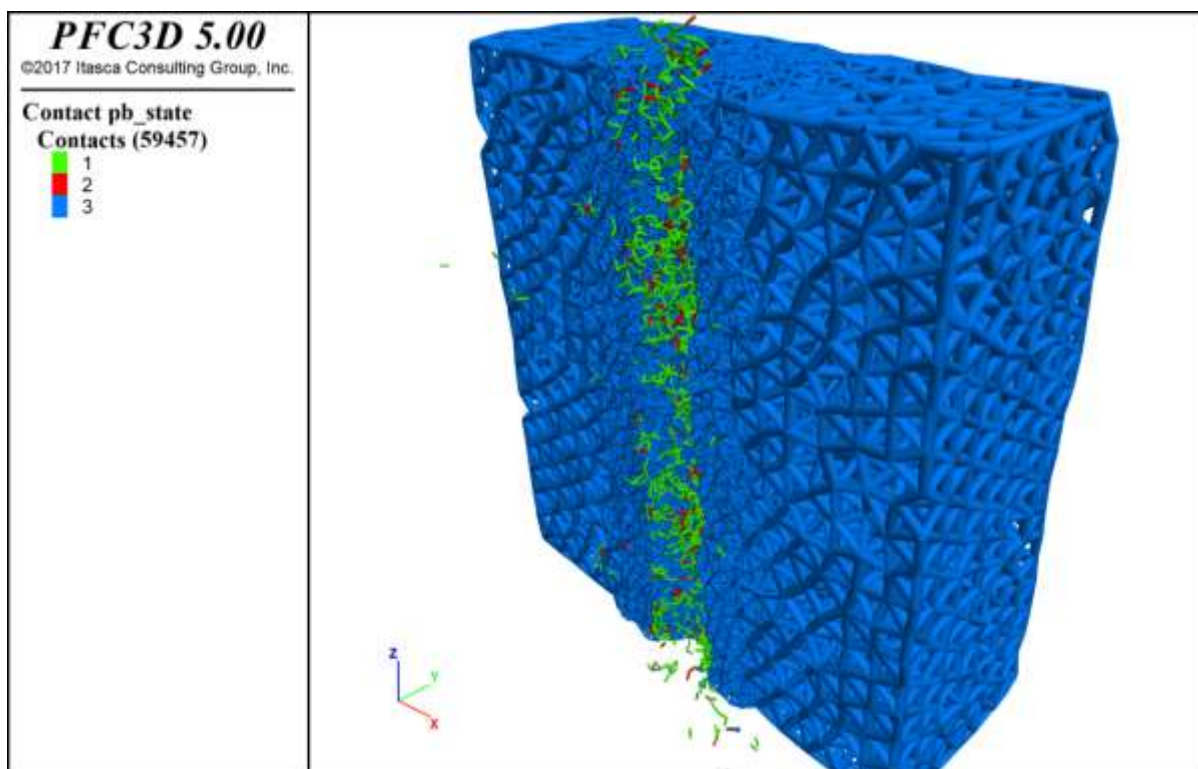
شکل ۴-۱۳: تغییرات نیرو در راستای نفوذ بر روی مهره

شکل ۴-۱۴، نمودار جابجایی و نیروهای اعمال شده از طرف مهره بر سنگ در راستای نفوذ، در هنگام مدل سازی فرآیند برش است. به منظور درک بهتر از این نیروها فقط از ثانیه ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۴ در این شکل نشان شده است. با توجه به این نمودار و شرط نیرویی که پیش تر ذکر شده است، می توان مشاهده کرد که میانگین نیروی اعمال شده از طرف مهره در راستای نفوذ، در حد مجاز تعیین شده (۲۰۰ نیوتن) است و هنگامی این نیروها از این حد عبور می کنند، میزان جابجایی مهره برابر با صفر می شود که این وضعیت در نمودار جابجایی ۴-۱۴ قابل مشاهده است. بخش هایی از این نمودار که شیب آن صفر است، در هنگامی رخ داده که نیروی اعمال شده بر مهره بیش از حد مجاز است. این روند در تمام مدت زمان فرآیند برش در مدل حفظ می شود. لازم به ذکر است که نقاط حداکثری در نمودار شکل ۴-۱۴ مشاهده می شود که برخی بیش تر از حد مجاز است. با توجه به تحلیل هایی که توسط توسعه دهندگان نرم افزار PFC انجام شده است، این نقاط حداکثری مربوط به لحظه تشکیل ریزترک ها است (ITASCA, 2015). در این لحظه ها نیرو به طور آنی افزایش می یابد و پس از آن با کنترل شرط، کاهش می یابد.



شکل ۴-۱۴: نمودار تغییرات جابجایی و نیروهای وارده به مهره در راستای نفوذ نسبت به گام‌های محاسباتی

در طی فرآیند برش، اتصالات میان توپ‌ها توسط مهره‌های برش‌دهنده الماسه از یکدیگر گسیخته می‌شوند. این گسیختگی‌ها به صورت گسیختگی کششی و برشی هستند. گسیختگی‌های ایجاد شده در مدل در واقع همان ریزترک‌های جانبی ایجاد شده توسط ابزار در هنگام برش است. شکل ۴-۱۵، محدوده گسیخته شده توسط مهره‌ها را نشان می‌دهد که در این شکل گسیختگی کششی با رنگ سبز، گسیختگی برشی با رنگ قرمز و محدوده گسیخته نشده به رنگ آبی مشخص شده است. همان‌طور که از شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود، ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب شده که تاثیر مرزها بر فرآیند برش حذف شده است.



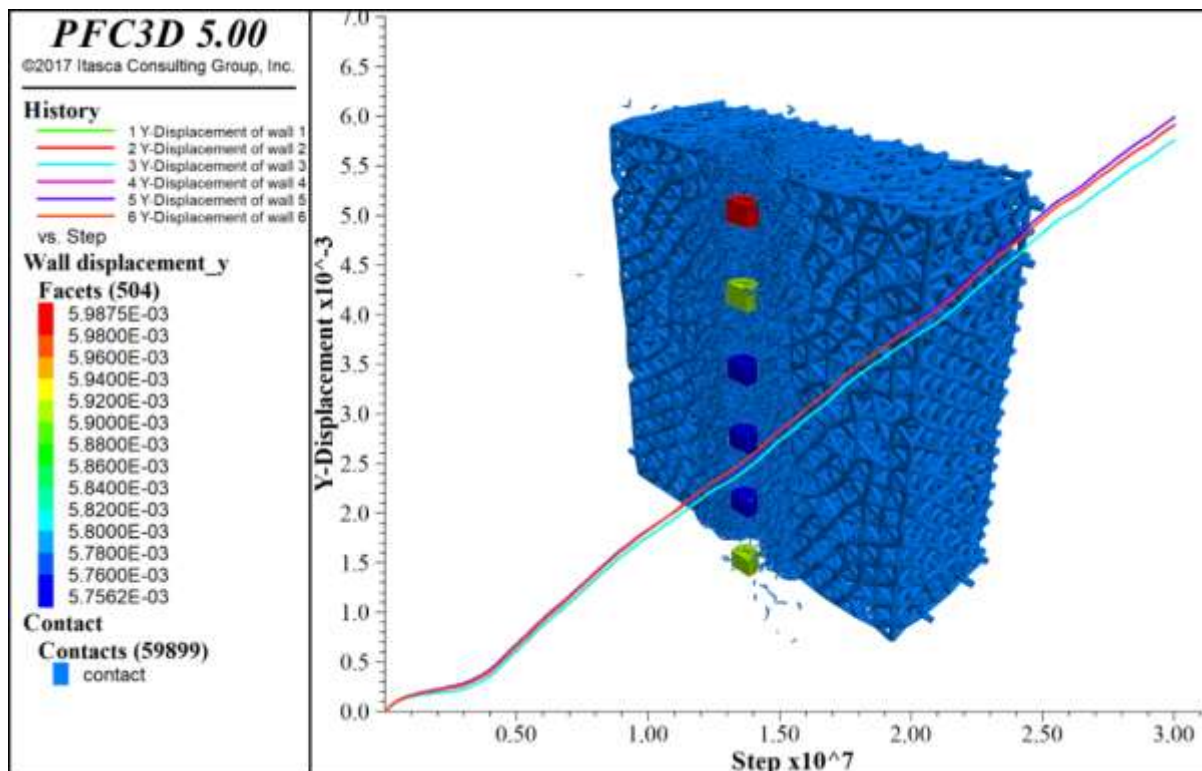
شکل ۴-۱۵: گسیختگی ایجادشده توسط مهره‌ها در هنگام برش

#### ۴-۴-۷- اعتبارسنجی مدل

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، مدل ساخته‌شده در این پژوهش، بر اساس آزمایش برش صورت‌گرفته در دانشگاه اصفهان بر روی یک قطعه سنگ گرانیتی است. نرخ برش در این آزمایش ۳/۰۶ سانتی‌متر مربع بر ثانیه و آمپراژ کشش ۸۳ آمپر بوده است (الماسی، ۱۳۹۵).

در این مدل‌سازی، با توجه به مشخصات فنی دستگاه برش که در جدول ۳-۴ آمده است، سرعت خطی سیم ۲۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. مدل ایجاد شده بر روی کامپیوتری با مشخصات فنی Intel core i7-2.9 GHz, RAM 64 GB اجرا شده است که شبیه‌سازی یک ثانیه از برش بر روی این کامپیوتر، به حدود ۲۴ ساعت زمان نیاز دارد. در این مدل هر ۱۰ میلیون گام محاسباتی، یک ثانیه در زمان واقعی است. نتایج حاصل از مدل‌سازی فرآیند برش، در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. میزان نفوذ حاصل شده در ۳ ثانیه از مدل‌سازی فرآیند، در این شکل دیده می‌شود. شکل ۴-۱۶، نمودار جابجایی مهره‌ها در راستای نفوذ نسبت به زمان است. میزان نفوذ مهره‌ها در هر ثانیه ثبت شده است و از حاصلضرب میانگین جابجایی مهره‌ها در ارتفاع بلوک میزان نرخ برش محاسبه شده است. میزان جابجایی هر مهره در هر ثانیه و

محاسبه نرخ برش در جدول ۴-۶ ارایه شده است. میزان نرخ برش حاصل شده ۲/۹۴ سانتی متر مربع بر ثانیه است. با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل عددی و نرخ برش اندازه گیری شده در آزمایشگاه، می توان همخوانی خوبی را میان این دو مشاهده کرد.



شکل ۴-۱۶: نمودار جابجایی مهره‌ها در راستای نفوذ نسبت به زمان

جدول ۴-۶: میزان جابجایی در هر ثانیه از برش

میزان جابجایی (cm)			شماره مهره
ثانیه سوم	ثانیه دوم	ثانیه اول	
۰/۱۹۹۶	۰/۲۰۰۲	۰/۱۷۷۸	۱
۰/۱۹۹۸	۰/۲۰۲۳	۰/۱۷۷۳	۲
۰/۱۹۹۷	۰/۲۰۳۵	۰/۱۷۹۴	۳
۰/۲۰۴۴	۰/۲۰۵۱	۰/۱۸۳۲	۴
۰/۲۰۵۲	۰/۲۰۷۵	۰/۱۸۴۷	۵
۰/۲۰۵۸	۰/۲۰۹۷	۰/۱۸۳۲	۶
۰/۲۰۴۷۱۷	۰/۲۰۲۴۱۷	۰/۱۸۰۹۳۳	میانگین جابجایی در هر ثانیه (cm)
۰/۱۹۶۰۲			میانگین کل (cm)
۲/۹۴			نرخ برش (cm <sup>2</sup> /s)

#### ۴-۵- جمع بندی

در این بخش، نحوه مدل سازی فرآیند برش توسط سیم برش الماسه و اجزای مدل تشریح شد و برای اعتبارسنجی آن، نتایج حاصل با آزمایش انجام شده توسط الماسی (۱۳۹۵) (در دانشگاه صنعتی اصفهان) مقایسه شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی و آزمایش های آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ گرانیت، مشاهده می شود که نتایج حاصل شده از تطابق قابل قبولی برخوردار هستند. در جدول ۴-۷، مقایسه ای بین پارامترهای مدل عددی و آزمایشگاهی و میزان نرخ نفوذ حاصل شده از فرآیند برش صورت گرفته است.

جدول ۴-۷: مقایسه پارامترهای مدل عددی و آزمایشگاهی و نرخ برش حاصل شده

پارامتر	مدل آزمایشگاهی	مدل عددی
مقاومت تک محوری (MPa)	۱۴۷	۱۴۶
مدول یانگ (GPa)	۸۰/۱	۷۸
نسبت پوآسون	۰/۲	۰/۲۲
مقاومت کششی برزیلی (MPa)	۱۲/۸	۱۱/۶
تعداد مهره در واحد طول	۳۶	۳۶
سرعت محیطی سیم (m/s)	۲۴	۲۴
نرخ برش (cm <sup>2</sup> /s)	۳/۰۶	۲/۹۴



## فصل پنجم

# بررسی عملکرد سیم برش الماسه نسبت به پارامترهای قابل کنترل



## ۵-۱- مقدمه

در این بخش، به منظور بررسی و بهبود عملکرد سیم برش الماسه، پس از انتخاب پارامترهای قابل کنترل در فرآیند برش، تحلیل پارامتری انجام شده است. نتایج حاصل از این محاسبات، با استفاده از رگرسیون تک‌متغیره و چند متغیره مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای انتخابی در این پژوهش، به منظور رسیدن به هدف بهبود عملکرد سیم برش الماسه، مشتمل بر تعداد مهره در واحد طول سیم، سرعت محیطی سیم، قطر مهره‌های الماسه و آمپراژ کشش دستگاه است.

## ۵-۲- انتخاب پارامترهای مورد بررسی بر اساس محدودیت‌های مدل

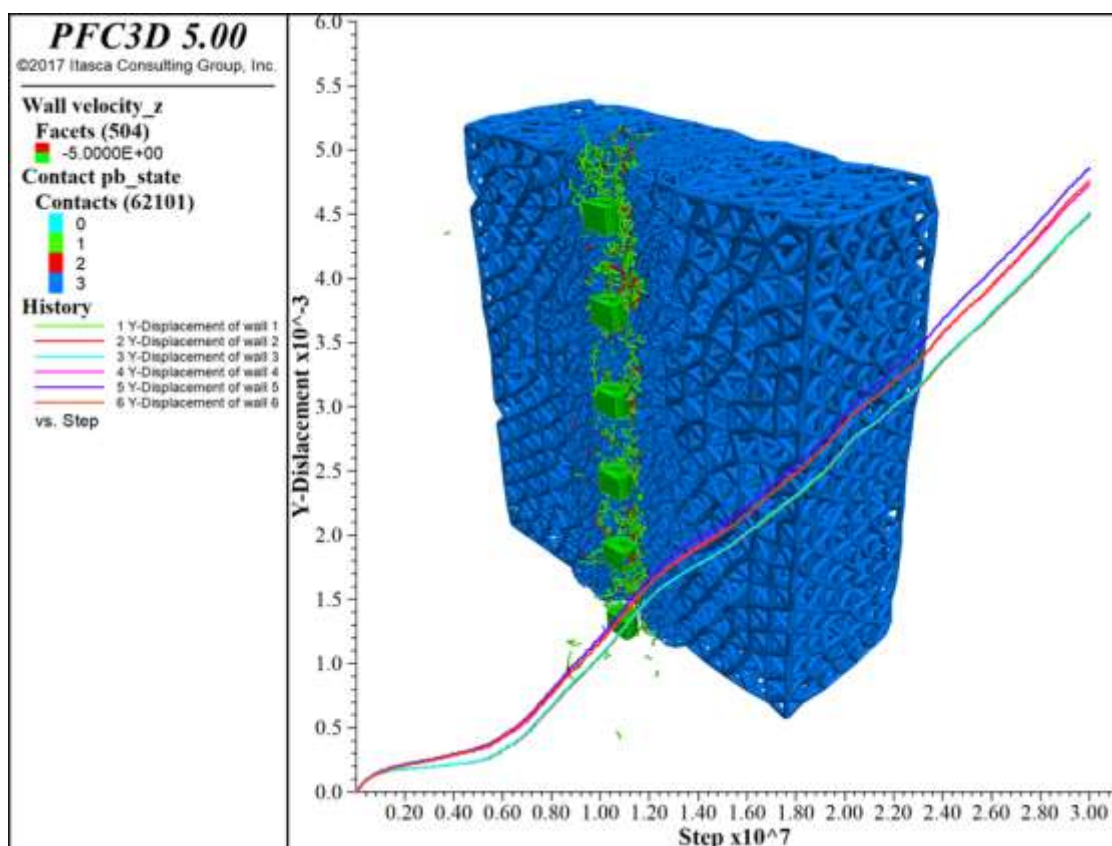
همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، پارامترهای موثر در فرآیند برش به دو گروه پارامترهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم می‌شوند. پارامترهای غیرقابل کنترل نظیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ است که بسیاری از پژوهشگران پیشین، این پارامترها را از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. پارامترهای قابل کنترل که بیشتر به مشخصات دستگاه برش اشاره می‌کند، در طی سال‌های اخیر، با توجه به توسعه صنعت برش و بکارگیری ابزارهای صنعتی برای بلوک‌کردن سنگ‌های ساختمانی و تزئینی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

در این پژوهش از میان پارامترهای قابل کنترل و موثر در نرخ برش، پارامترهای عملیاتی انتخاب شده است. از میان پارامترهای عملیاتی با توجه به محدودیت‌های مدل، به تحلیل اثرگذاری چهار پارامتر سرعت محیطی سیم برش، آمپراژ کشش دستگاه، تعداد مهره‌ها در واحد طول و قطر مهره‌ها بر نرخ برش پرداخته شده است.

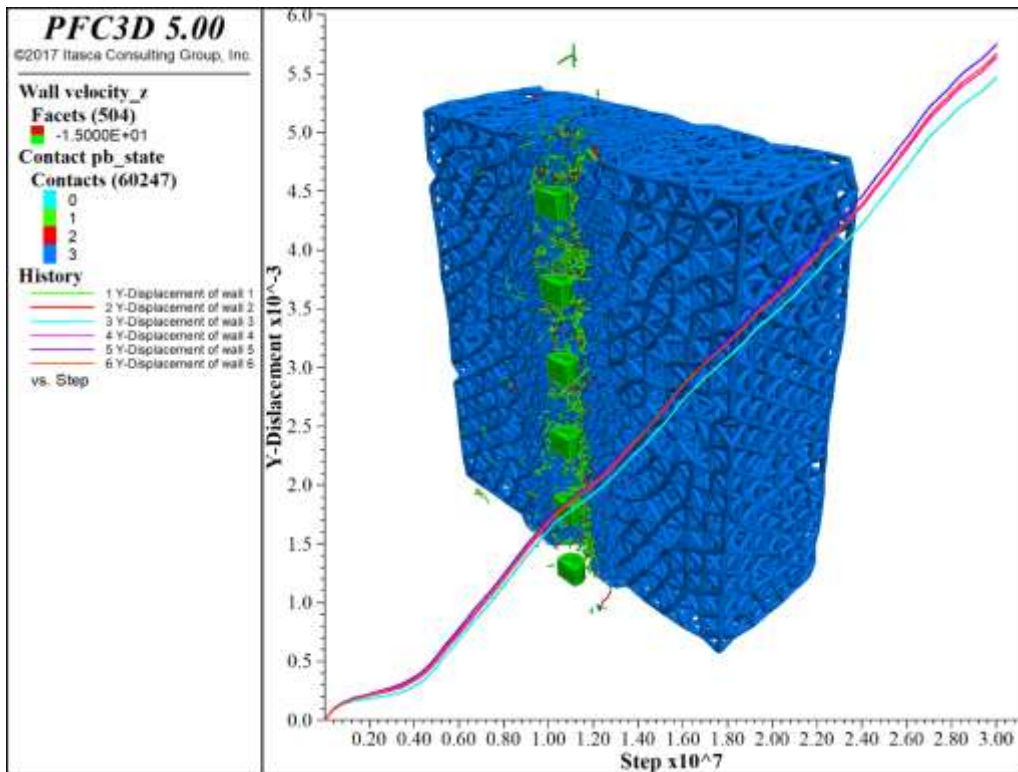
## ۵-۳- سرعت محیطی سیم و تاثیر آن بر نرخ برش

برای بررسی تغییرات نرخ برش نسبت به سرعت محیطی سیم در مدل ارایه شده، با توجه به سرعت محیطی دستگاه‌های برش موجود، مدل در چهار سرعت محیطی مختلف ۵، ۱۵، ۲۴ و ۳۵ متر بر ثانیه حل شده است. سرعت محیطی ۵۰ و ۷۰ متر بر ثانیه نیز بررسی شده است تا روند تغییرات نرخ برش

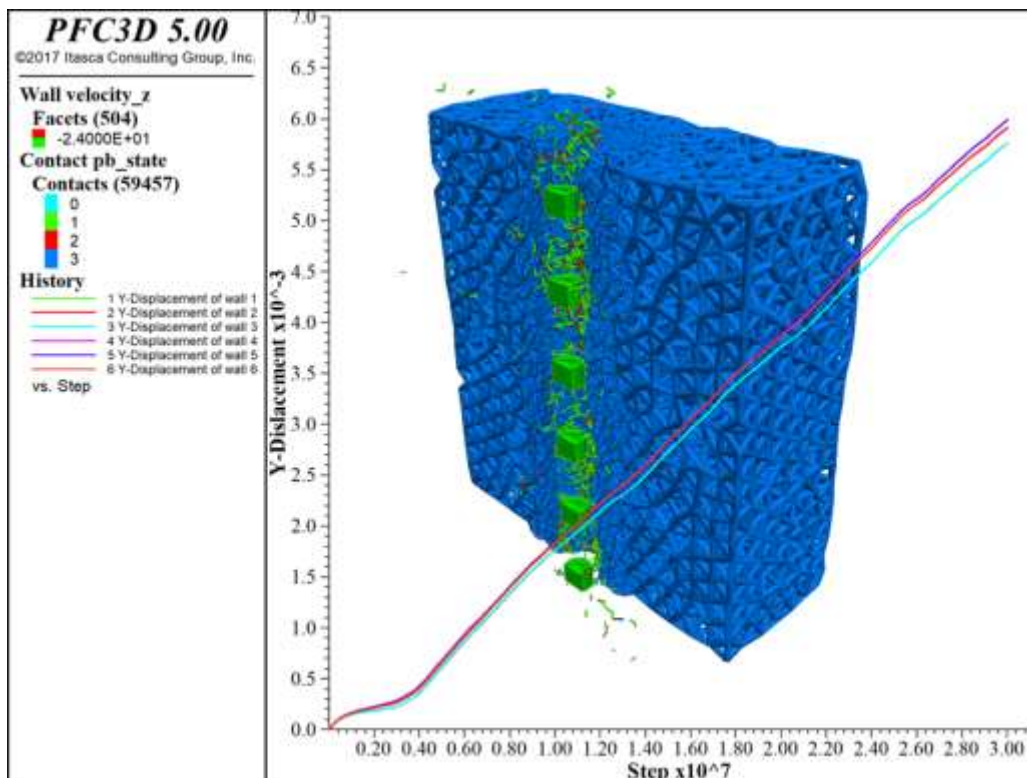
در صورت افزایش سرعت محیطی مشخص شود. فرآیند برش در مدل‌های ساخته شده به مدت سه ثانیه انجام شده و نرخ برش از میانگین این سه ثانیه به دست آمده است. در این مدل‌ها، تعداد مهره‌ها در واحد طول برابر ۳۶ عدد، قطر مهره ۱ سانتی‌متر و آمپراژ کشش ۸۳ آمپر است. در شکل ۵-۱ تا شکل ۵-۶، به ترتیب برش انجام شده توسط سیم الماسه و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ در سرعت‌های محیطی مختلف ۵، ۱۵، ۲۴، ۳۵، ۵۰ و ۷۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است.



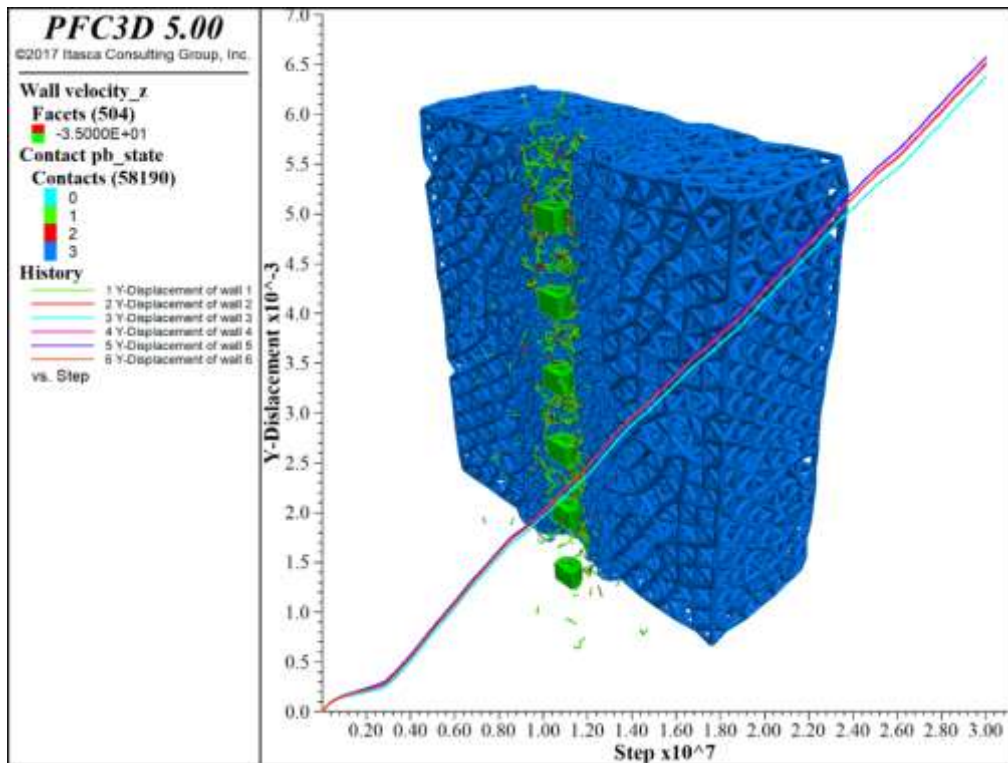
شکل ۵-۱: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ در سرعت محیطی ۵ متر بر ثانیه



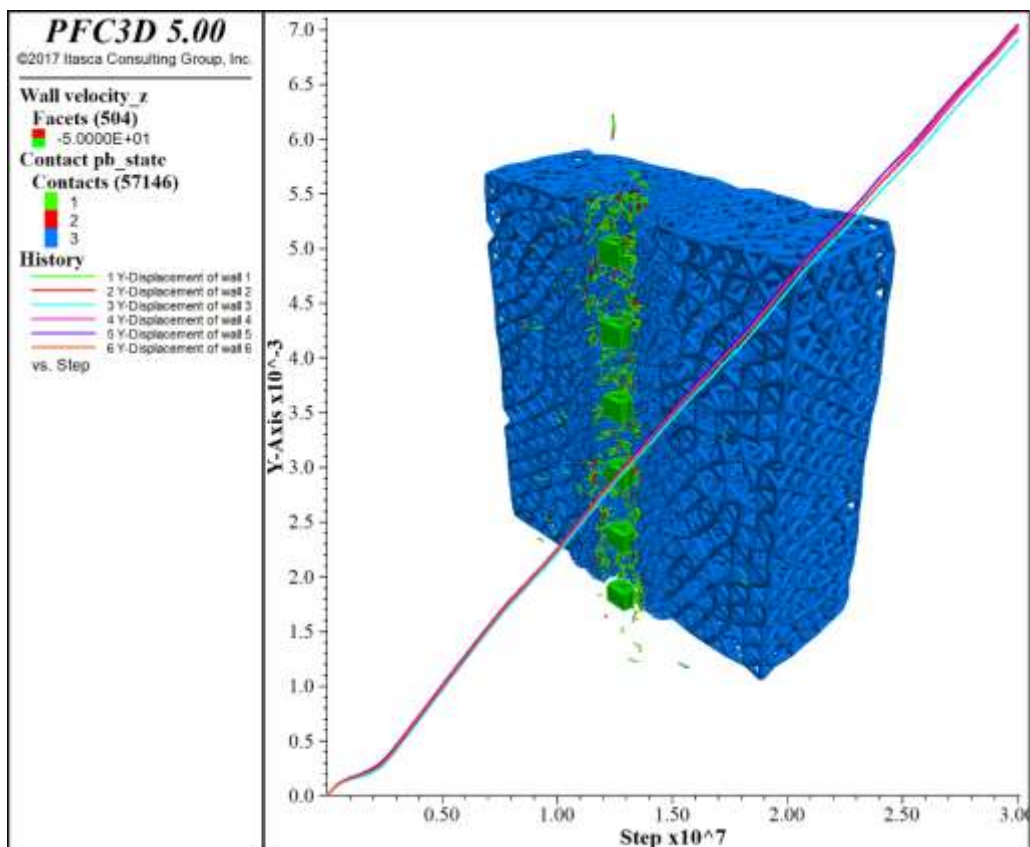
شکل ۵-۲: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ در سرعت محیطی ۱۵ متر بر ثانیه



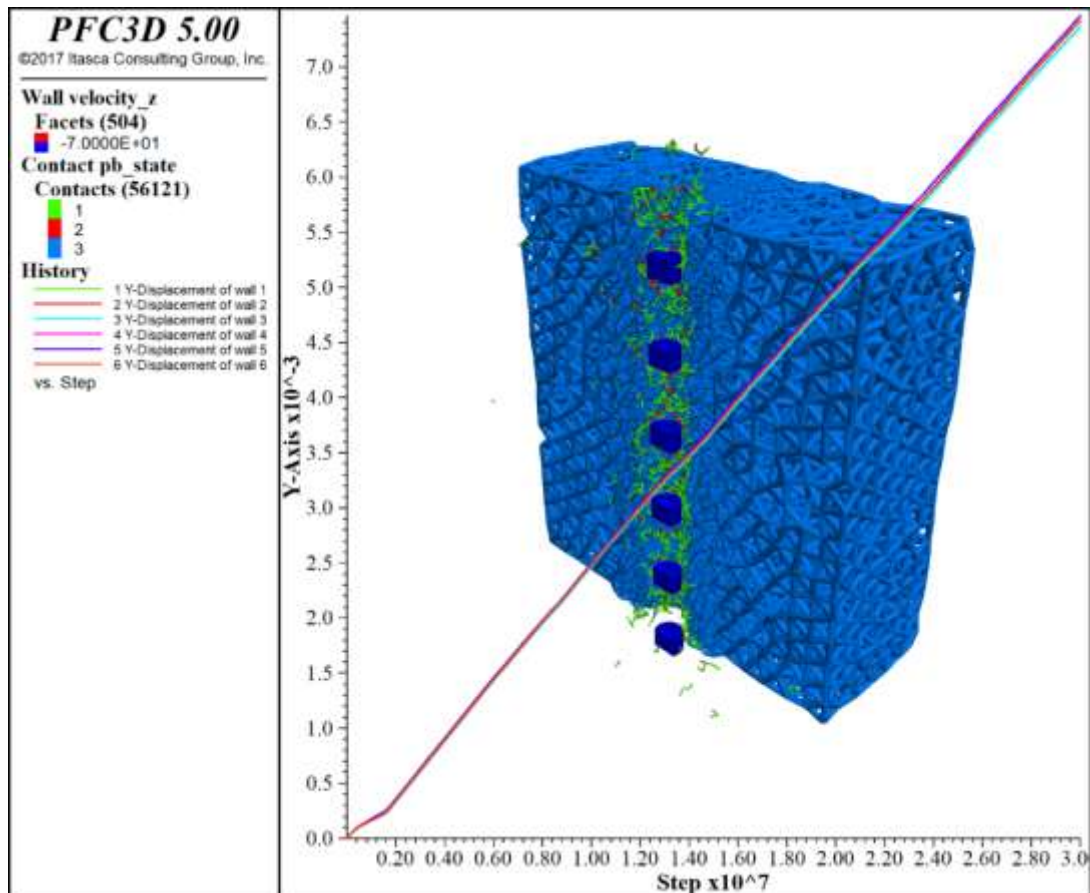
شکل ۵-۳: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ در سرعت محیطی ۲۴ متر بر ثانیه



شکل ۴-۵: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ در سرعت محیطی ۳۵ متر بر ثانیه

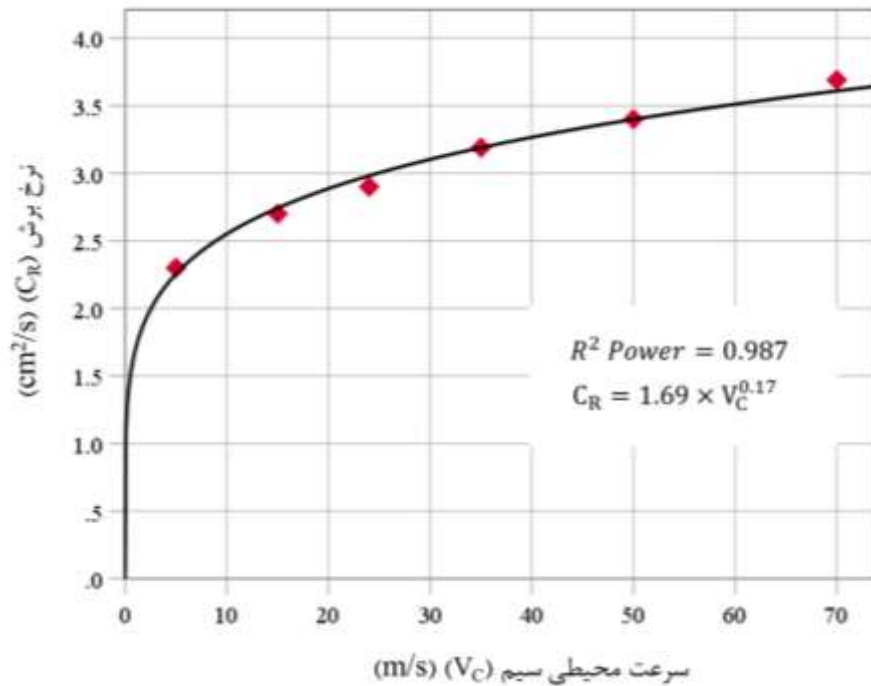


شکل ۵-۵: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ در سرعت محیطی ۵۰ متر بر ثانیه



شکل ۵-۶: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ در سرعت محیطی ۷۰ متر بر ثانیه

همان‌طور که در شکل ۵-۱ تا ۵-۶ مشاهده می‌شود، نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ برای سرعت‌های محیطی متفاوت به‌دست آمده است. در هر یک از این شکل‌ها درستی میزان سرعت محیطی انتخاب شده، بررسی شده است. با توجه به آن که با افزایش سرعت محیطی میزان نیروهای وارده بر مهره‌ها کاهش می‌یابند (Denkena et al., 2010)، در این مدل‌ها با توجه به شرط نیروی اعمال شده، با افزایش سرعت محیطی میزان نرخ برش نیز افزایش می‌یابد. برای نشان دادن روند میان تغییرات نرخ برش و سرعت محیطی سیم الماسه، با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل عددی، برازش تک‌متغیره میان این دو پارامتر ایجاد شده است. نتایج حاصل در شکل ۵-۷ نشان داده شده است.



شکل ۵-۷: نتایج حاصل از برازش تک متغیره میان سرعت محیطی و نرخ برش

همان‌طور در شکل ۵-۷، مشاهده می‌شود، رابطه مستقیم (صعودی) بین سرعت محیطی سیم الماسه و نرخ برش وجود دارد. ضریب همبستگی این برازش برابر با ۰/۹۸۷ است که نشان می‌دهد، رابطه‌ی ارائه شده به خوبی گویای ارتباط میان این دو پارامتر است. از رابطه ۵-۱، می‌توان به‌منظور پیش‌بینی نرخ برش در سنگ‌های گرانیتی به ازای سرعت‌های محیطی مختلف استفاده کرد.

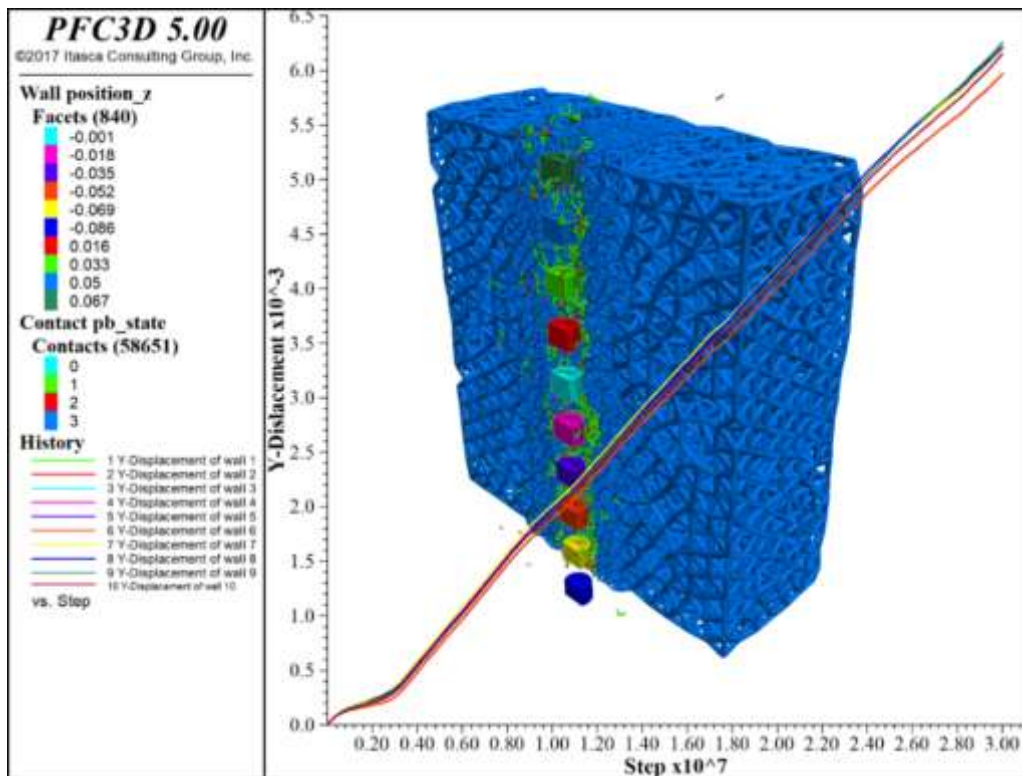
$$C_R = 1.69 \times V_C^{0.17} \quad (۱-۵)$$

در این رابطه،  $C_R$  نرخ برش برحسب سانتی‌متر مربع بر ثانیه و  $V_C$  سرعت محیطی سیم بر حسب متر بر ثانیه است.

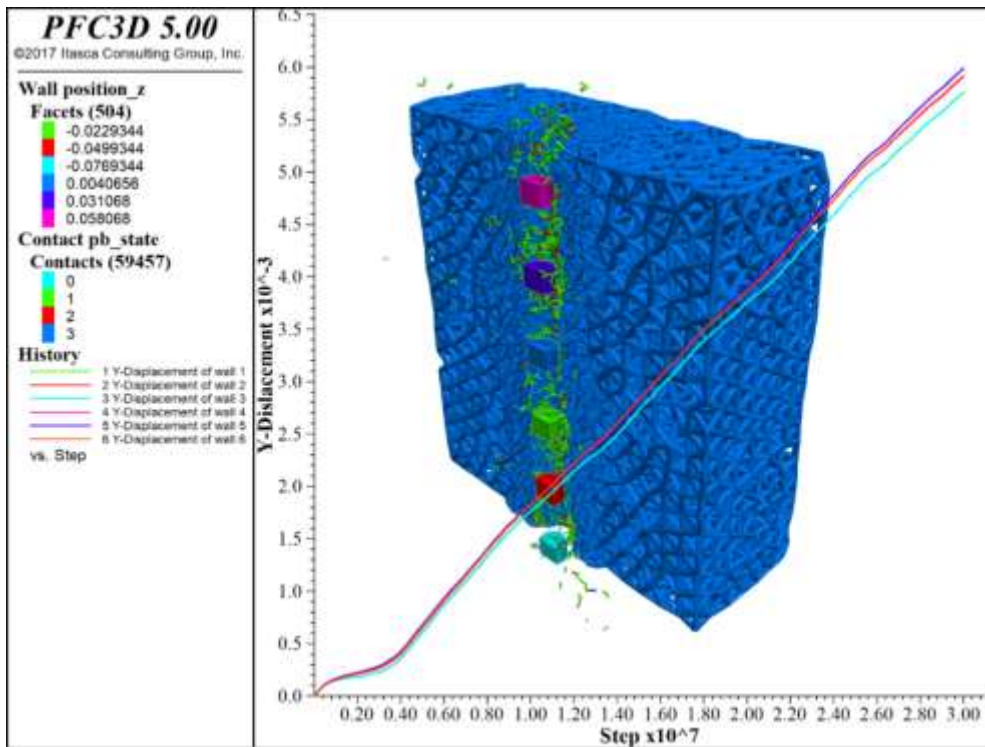
بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۵-۷، با پیشرفت تکنولوژی و ساخت دستگاه‌های سیم برش با سرعت محیطی بیشتر، می‌توان با شیبی یکنواخت به نرخ‌های برش بیشتر دست یافت. به عبارت دیگر، مقدار بهینه برای پارامتر سرعت محیطی سیم، بیشترین مقدار ممکن با توجه به محدودیت دستگاه‌های سیم برش، توان کششی سیم و تکنولوژی موجود است.

## ۵-۴- تعداد مهره‌ها در واحد طول و تاثیر آن بر نرخ برش

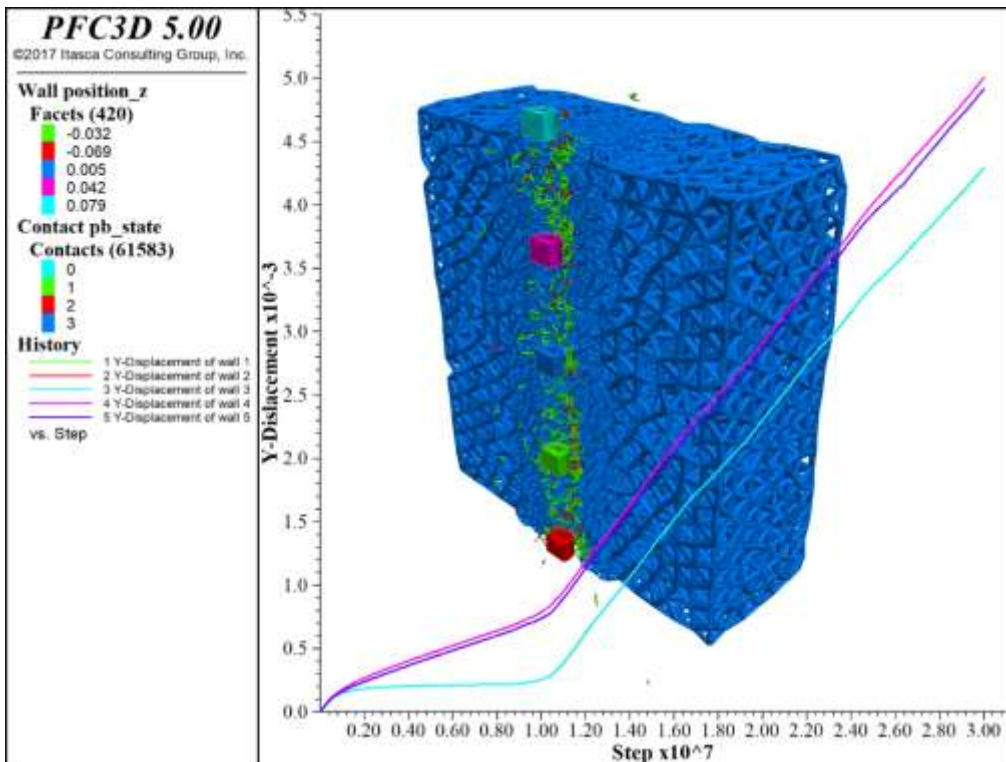
به منظور بررسی تغییرات نرخ برش نسبت به تعداد مهره‌ها در واحد طول، مدل در دو وضعیت مختلف ۲۷ و ۳۶ مهره در واحد طول که معمولاً برای برش گرانیت در صنعت استفاده می‌شوند، حل شده است. تعداد مهره ۵۸ و ۲۱ مهره در واحد طول نیز بررسی شده است تا روند تغییرات نرخ برش در صورت تغییرات تعداد مهره در واحد طول نیز مشخص شود. در این مدل‌ها سرعت محیطی ۲۴ متر بر ثانیه، قطر مهره ۱ سانتی‌متر و آمپراژ کشش ۸۳ آمپر است. فرآیند برش در مدل‌های ساخته شده به مدت سه ثانیه انجام شده و نرخ برش از میانگین این سه ثانیه به دست آمده است. در شکل ۵-۸ تا شکل ۵-۱۱، به ترتیب، برش انجام شده توسط سیم الماسه و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ بر اساس تعداد مهره‌ها در واحد طول برابر با ۲۷، ۳۶، ۵۸ و ۲۱ مهره نشان داده شده است.



شکل ۵-۸: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ برای ۵۸ مهره در واحد طول سیم

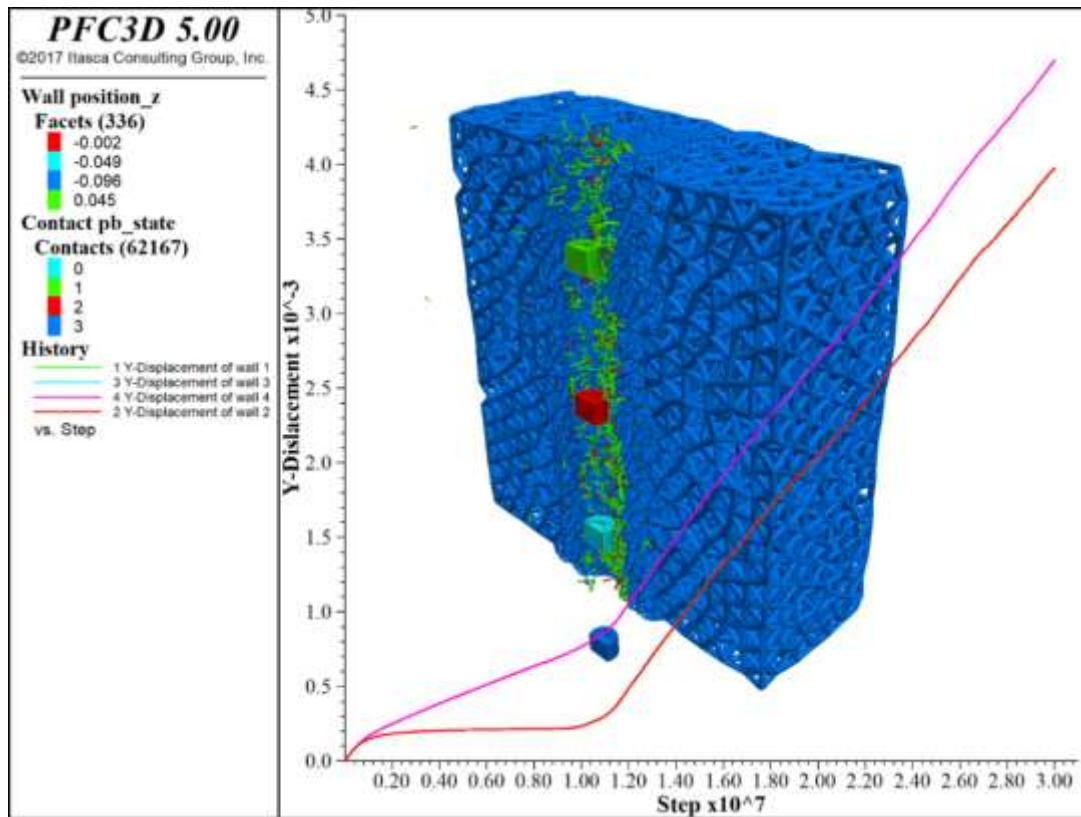


شکل ۵-۹: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ برای ۳۶ مهره در واحد طول سیم



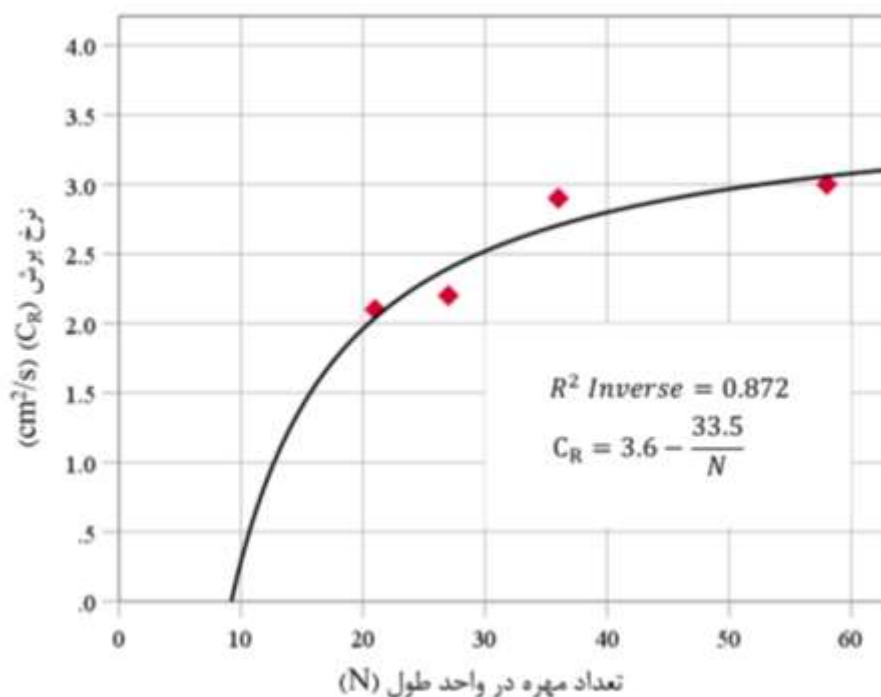
شکل ۵-۱۰: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ برای ۲۷ مهره در واحد طول سیم





شکل ۵-۱۱: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ برای ۲۱ مهره در واحد طول سیم

همان‌طور که در شکل ۵-۸ تا ۵-۱۱ مشاهده می‌شود، نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ برای تعداد مهره مختلف در واحد طول به دست آمده است. در هر یک از این شکل‌ها درستی فاصله این مهره‌ها با یکدیگر در طول برش، بررسی شده است. با کاهش تعداد مهره‌ها در واحد طول، تعداد مهره‌های درگیر در برش سنگ کاهش می‌یابند، در نتیجه میزان نرخ برش نیز کاهش می‌یابد. به منظور تحلیل روند میان تغییرات نرخ برش و تعداد مهره‌ها در واحد طول سیم، با توجه به نتایج به دست آمده از حل مدل عددی، برازش تک‌متغیره میان این دو پارامتر ایجاد شده و نتایج حاصل در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: نتایج حاصل از برازش تک متغیره میان تعداد مهره‌ها در واحد طول و نرخ برش

همان‌طور که در شکل ۵-۱۲ مشاهده می‌شود، ارتباط بین تعداد مهره‌ها در واحد طول و نرخ برش، دارای روندی صعودی است. همچنین ضریب همبستگی بین این دو پارامتر که برابر با ۰/۸۷۲ است، نشان می‌دهد که رابطه قابل قبولی بین پارامترهای مذکور برقرار است. علاوه بر این با توجه به شکل ۵-۱۲، افزایش تعداد مهره‌ها در واحد طول پس از رسیدن به مقدار ۳۶ مهره در هر متر از سیم الماسه، اثر چندانی بر افزایش نرخ برش نداشته است و روند بین این دو پارامتر تقریباً ثابت شده است. بنابراین می‌توان تعداد ۳۶ مهره در واحد طول سیم را به عنوان تعداد بهینه مهره‌ها برای برش سنگ‌های گرانیتی در نظر گرفت. از رابطه ۵-۲، می‌توان به‌منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های گرانیتی در تعداد مهره‌های مختلف استفاده کرد.

$$C_R = 3.6 - \frac{33.5}{N} \quad (۲-۵)$$

در این رابطه،  $C_R$  نرخ برش برحسب سانتی‌متر مربع بر ثانیه و  $N$  تعداد مهره در واحد طول است.

## ۵-۵- آمپراژ کشش و تاثیر آن بر نرخ برش

در نرم افزار PFC3D نمی توان به صورت مستقیم از پارامتر آمپراژ کشش استفاده کرد. بدین منظور با استفاده از نرخ های برش حاصل شده از آمپراژهای مختلف که توسط الماسی (۱۳۹۵) بر روی قطعه سنگ مورد مطالعه این پژوهش صورت گرفته است، به صورت سعی و خطا مدل هایی با اعمال نیروهای کشش مختلف ساخته شده است تا رابطه ای میان میزان نیروی کشش در مدل عددی و آمپراژ کشش دستگاه در آزمایشگاه حاصل شود. در جدول ۱-۵ مقایسه بین نرخ برش به دست آمده از آمپراژهای مختلف در آزمایشگاه و نرخ برش حاصل شده از مدل عددی با اعمال نیروهای کشش متفاوت ارایه شده است.

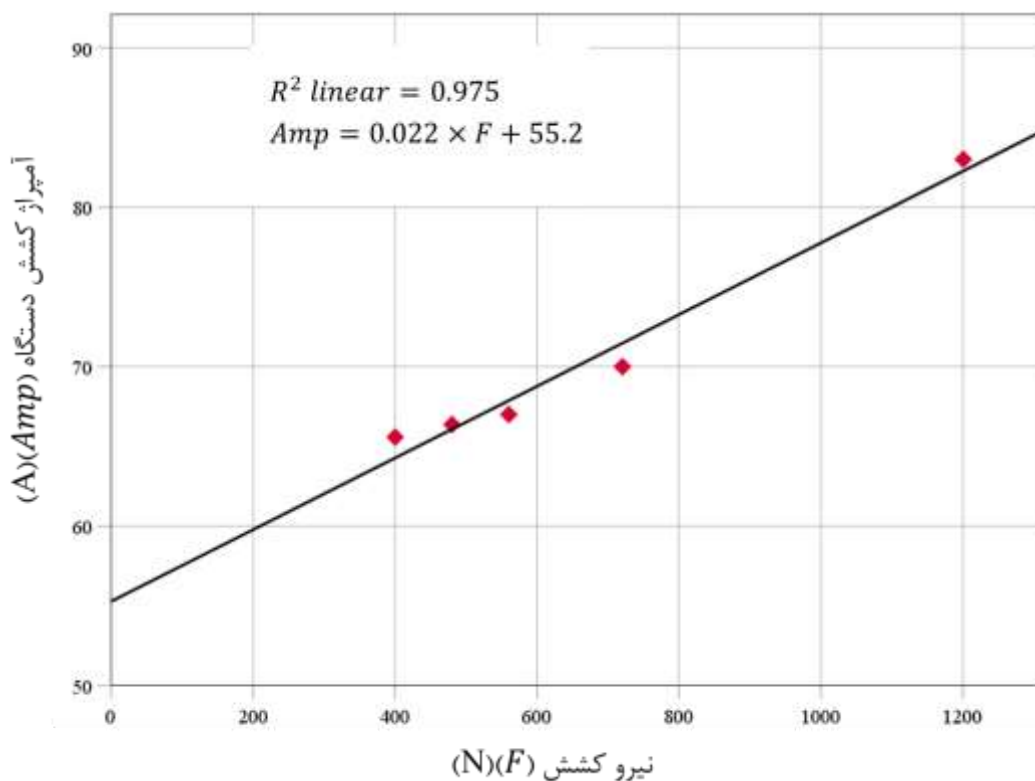
جدول ۱-۵: مقایسه میان نرخ برش حاصل از مدل عددی و آزمایشگاه

نتایج حاصل از مدل عددی		نتایج حاصل از برش آزمایشگاهی (الماسی، ۱۳۹۵)	
نرخ برش (cm <sup>2</sup> /s)	نیروی کشش (N)	نرخ برش (cm <sup>2</sup> /s)	آمپراژ کشش (A)
۱/۰۲۵	۴۰۰	۱/۰۲	۶۵/۵۸
۱/۲	۴۸۰	۱/۲۸	۶۶/۳۸
۱/۴۱	۵۶۰	۱/۴۴	۶۷
۱/۷۹	۷۲۰	۱/۷۵	۷۰
۲/۹۴	۱۲۰۰	۳/۰۶	۸۳

با استفاده از رگرسیون خطی تک متغیره میان میزان نیرو کشش اعمال شده در مدل عددی و آمپراژ کشش دستگاه، رابطه ۳-۵ با ضریب همبستگی ۰/۹۷۵ ارایه شده است. از این رابطه، برای به دست آوردن میزان نیرو کشش بر حسب آمپراژ در مدل های عددی استفاده شده است. شکل ۵-۱۳ نمودار و رابطه ای میان آمپراژ کشش و مقدار نیروی کشش را نشان می دهد.

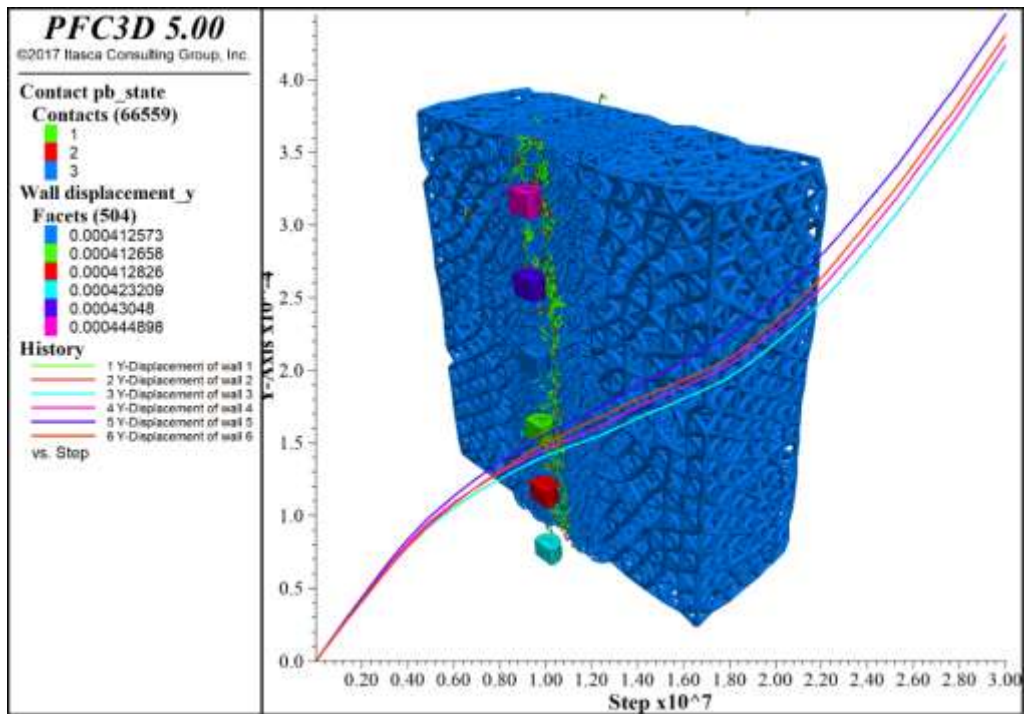
$$Amp = 0.022 \times F + 55.2 \quad (3-5)$$

در این رابطه،  $Amp$  آمپراژ کشش بر حسب آمپر و  $F$  نیرو کشش بر حسب نیوتن در مدل عددی است.

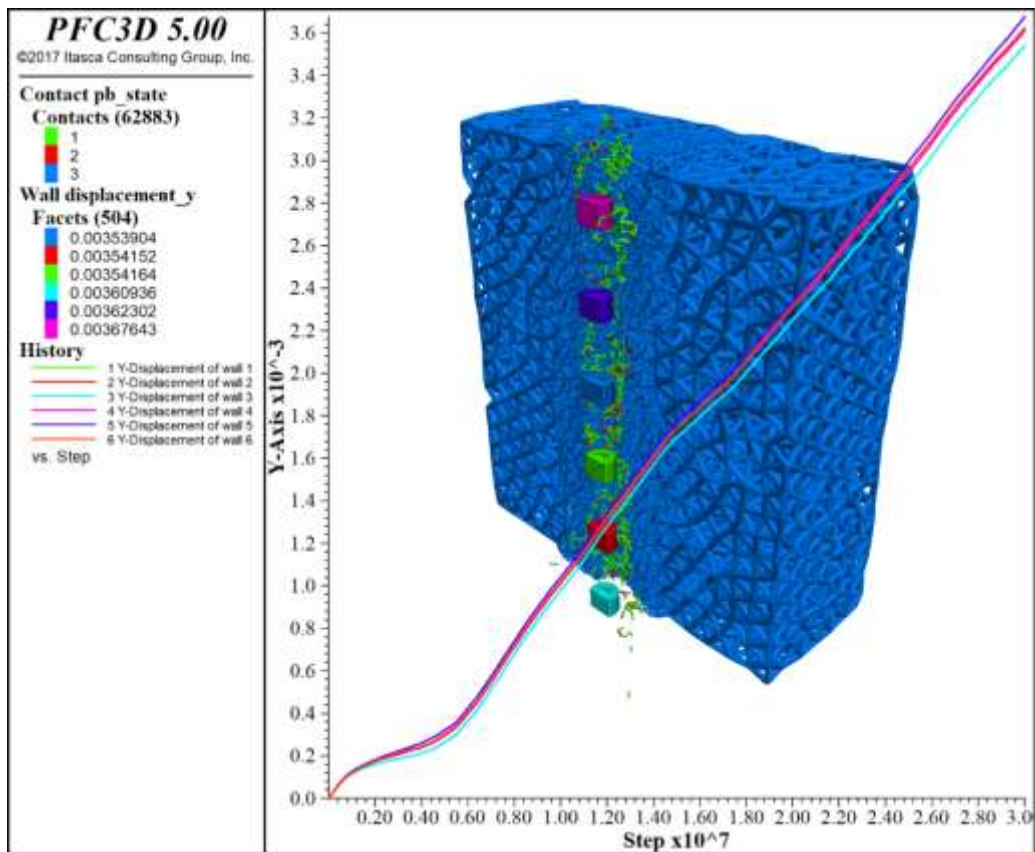


شکل ۵-۱۳: نمودار و رابطه میان آمپراژ کشش و نیروی کشش در مدل عددی

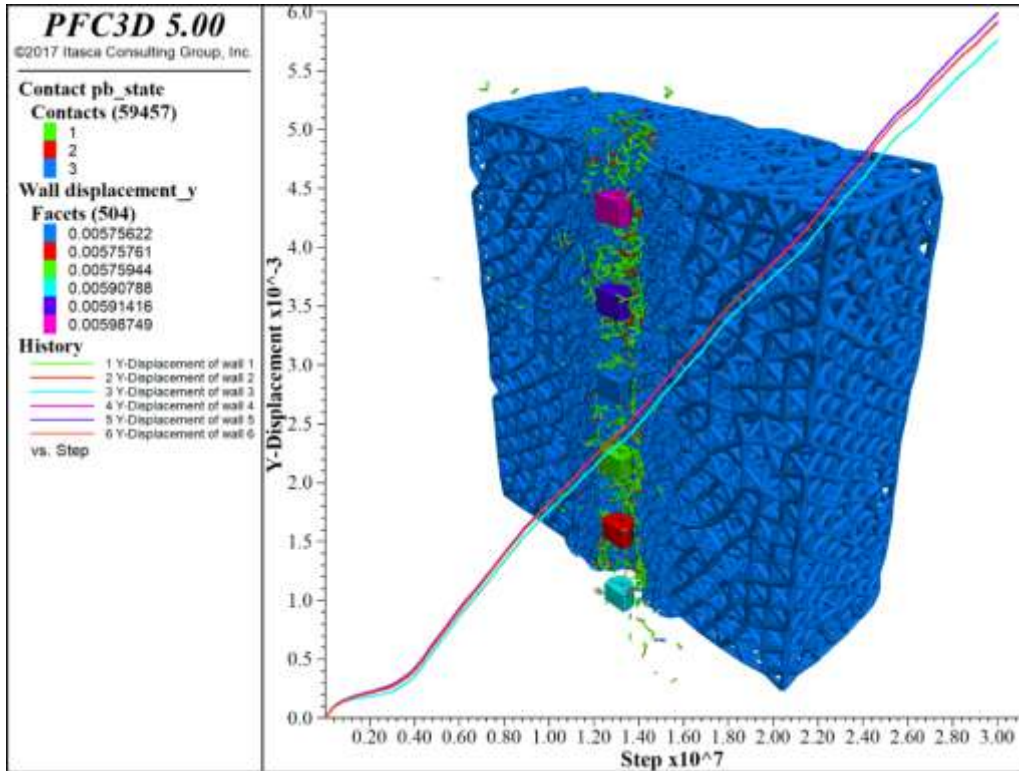
به منظور بررسی تغییرات نرخ برش بر اساس آمپراژ کشش دستگاه، مدل عددی با آمپراژ کشش مختلف، با توجه به دستگاه‌های مورد استفاده در بازار و آزمایشگاه، در سه وضعیت ۷۰، ۸۳، ۱۰۰ آمپر حل شده است. هم چنین برای تحلیل و تعیین روند نرخ برش در خارج از دامنه دستگاه‌های موجود، دو آمپراژ ۵۵ و ۱۲۰ آمپر نیز بررسی شده است. فرآیند برش در مدل‌های ساخته شده به مدت سه ثانیه انجام شده و نرخ برش از میانگین این سه ثانیه به دست آمده است. در این مدل‌ها، تعداد مهره‌ها در واحد طول برابر ۳۶ عدد، قطر مهره ۱ سانتی‌متر و سرعت محیطی سیم ۲۴ متر بر ثانیه است. در شکل ۵-۱۴ تا شکل ۵-۱۸، به ترتیب برش انجام شده توسط سیم الماسه و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ نسبت به آمپراژ کشش دستگاه برای پنج آمپراژ مذکور، نشان داده شده است.



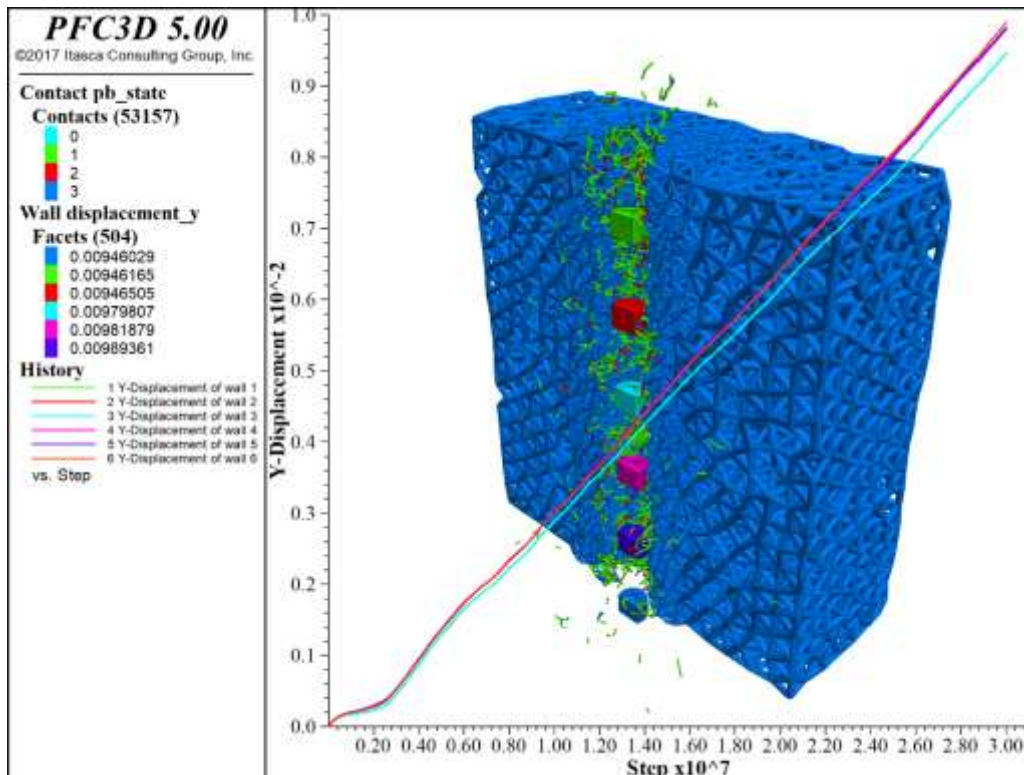
شکل ۵-۱۴: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۵۵ آمپر



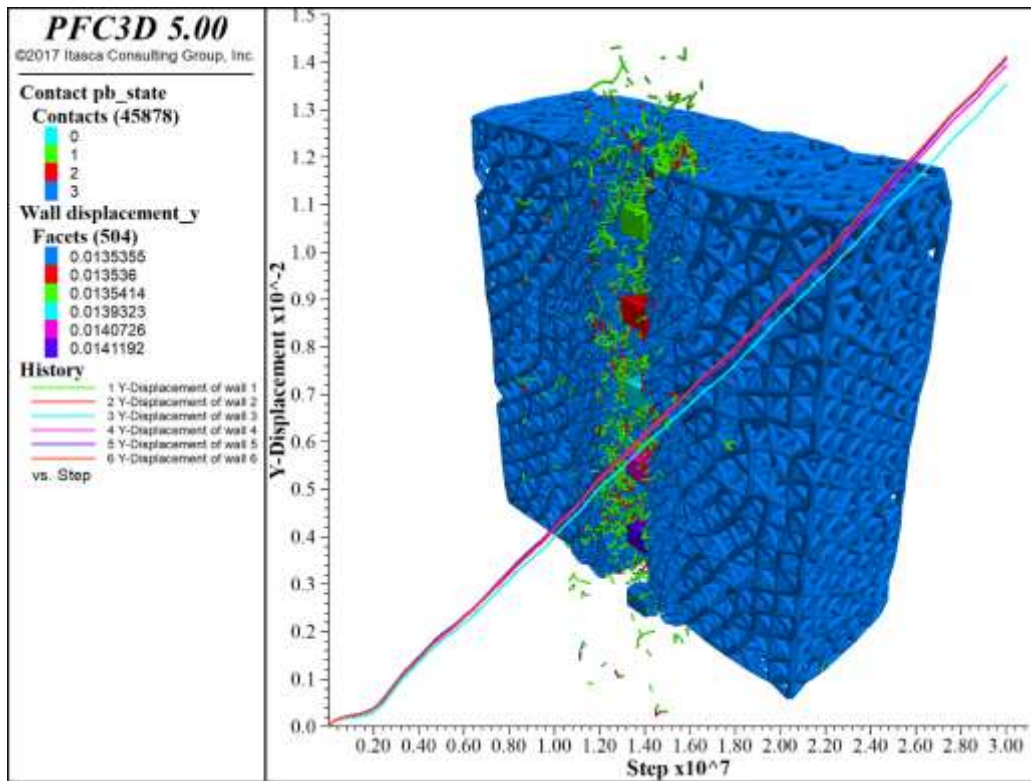
شکل ۵-۱۵: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۷۰ آمپر



شکل ۵-۱۶: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۸۳ آمپر

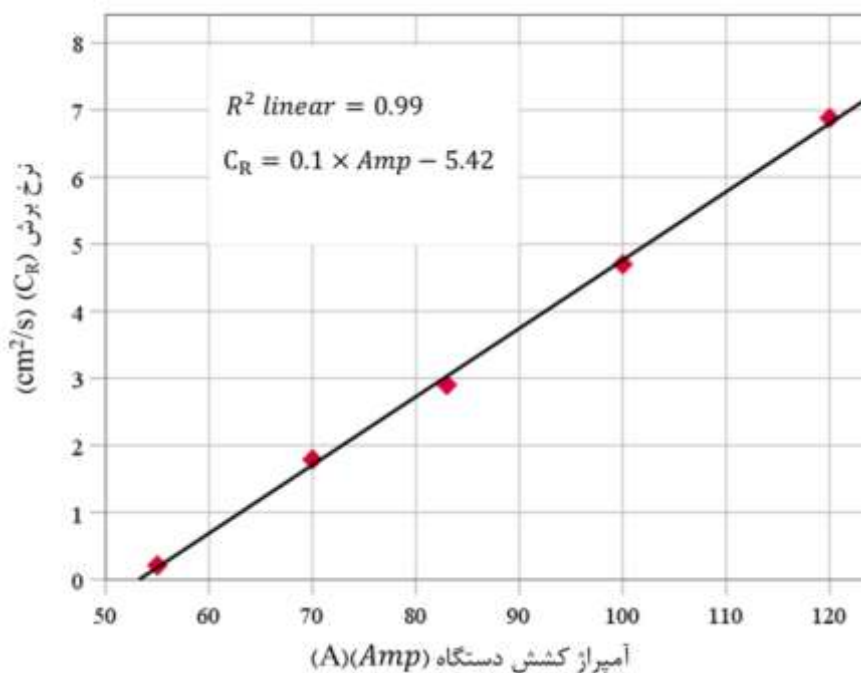


شکل ۵-۱۷: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۱۰۰ آمپر



شکل ۵-۱۸: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای آمپراژ کشش ۱۲۰ آمپر

همان‌طور که در شکل ۵-۱۴ تا ۵-۱۸ مشاهده می‌شود، نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ برای آمپراژهای کشش به عقب مختلف به دست آمده است. با افزایش مقدار آمپراژ کشش به عقب، توان ماشین افزایش خواهد یافت، در نتیجه میزان نرخ برش نیز افزایش می‌یابد. برای تحلیل روند میان تغییرات نرخ برش و آمپراژ کشش دستگاه، بر مبنای نتایج به دست آمده از حل مدل، برازش خطی تک‌متغیره میان این دو پارامتر انجام شده و نتایج حاصل در شکل ۵-۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۹: نتایج حاصل از برازش تک متغیره میان آمپراژ کشش دستگاه و نرخ برش

همان‌طور در شکل ۵-۱۹، مشاهده می‌شود، رابطه خطی مستقیم بین سرعت کشش به عقب دستگاه و نرخ برش وجود دارد. ضریب همبستگی این برازش برابر با ۰/۹۹ است که نشان می‌دهد، رابطه‌ی ارائه شده به خوبی گویای ارتباط میان این دو پارامتر است. از رابطه ۵-۴، می‌توان به‌منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های گرانیتی در آمپراژهای مختلف استفاده کرد.

$$C_R = 0.1 \times Amp - 5.42 \quad (۴-۵)$$

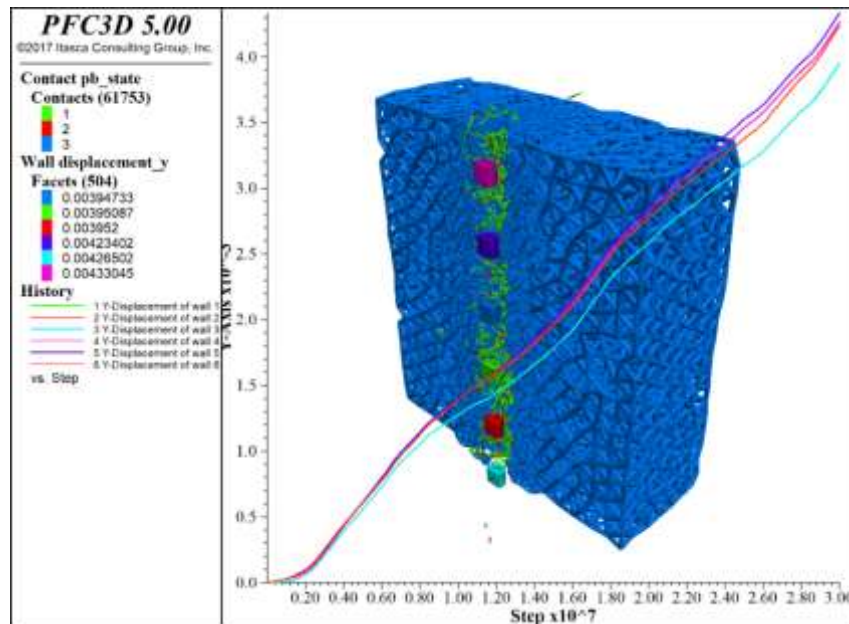
در این رابطه،  $C_R$  نرخ برش برحسب سانتی‌متر مربع بر ثانیه و Amp آمپراژ کشش دستگاه بر حسب آمپر است.

همچنین بر اساس شکل ۵-۱۹، می‌توان بیان کرد با پیشرفت تکنولوژی و ساخت دستگاه‌هایی که بتواند آمپراژ کشش بیشتری را تولید کنند، می‌توان با شیبی یکنواخت به نرخ‌های برش بیشتر دست یافت. به عبارت دیگر، مقدار بهینه پارامتر آمپراژ کشش دستگاه، در صورتی که عامل محدودکننده دیگری وجود نداشته باشد، بیشترین مقدار ممکن است. نکته دیگر اینکه نرخ برش در آمپراژ کشش ۵۴ آمپر تقریباً برابر صفر است و به منظور ایجاد برش در سنگ‌های گرانیتی باید کششی بیشتر از این مقدار در نظر گرفت.

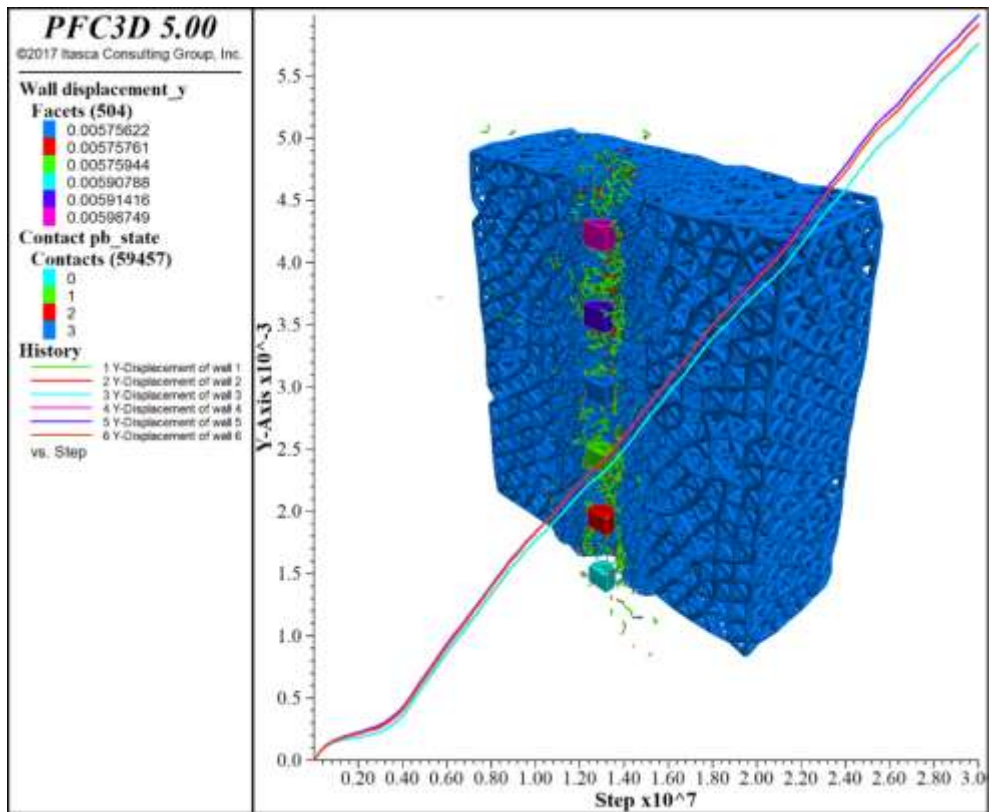


## ۵-۶- قطر مهره‌های الماسه و تاثیر آن بر نرخ برش

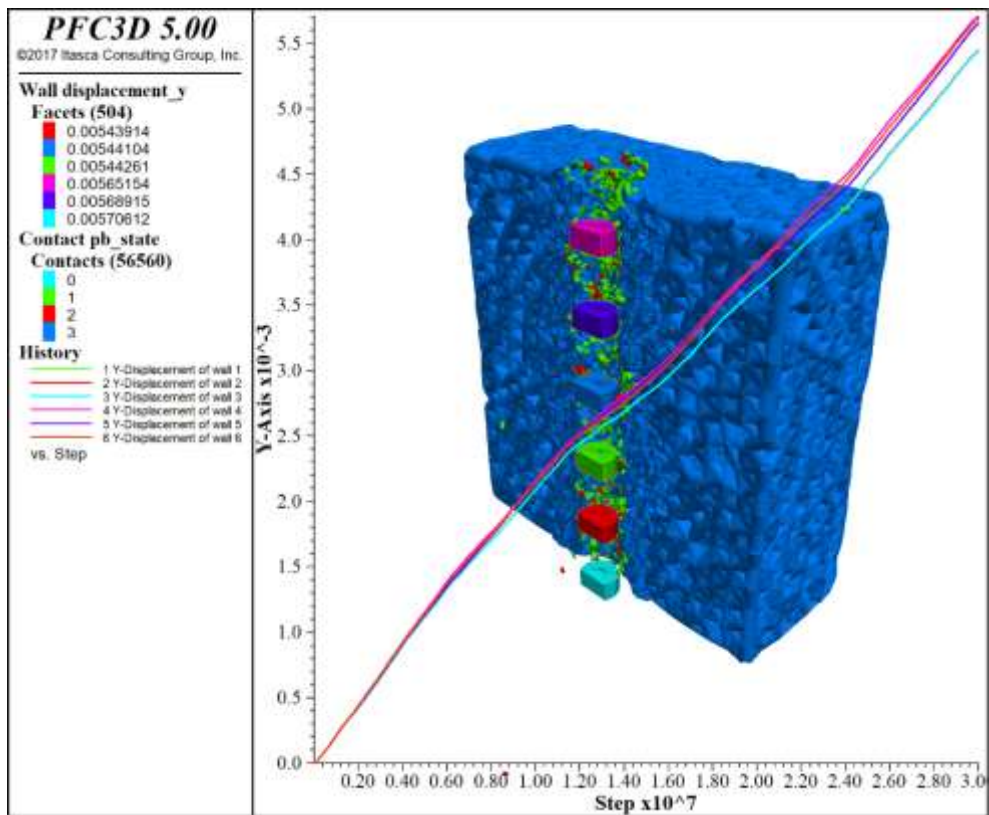
در برش سنگ توسط سیم برش الماسه با توجه به نوع محصول خروجی از قطرهای متفاوت مهره بر روی سیم استفاده می‌شود. به عنوان مثال برای بلوک کردن سنگ در معدن از قطرهای بزرگ‌تر مهره نسبت به دستگاه‌های سنگ‌بری ورقه‌کن استفاده می‌شود. در این بخش برای بررسی تاثیر اندازه قطر مهره‌ها بر نرخ برش، مدل عددی با دو قطر مهره مختلف  $0/8$  و  $1$  سانتی‌متر، که قطر مهره متداول در بازار برای برش سنگ‌های گرانیتی است، حل شده است. سپس به منظور شناخت و تحلیل روند تغییرات نرخ برش نسبت به قطر مهره، دو قطر مهره برابر  $1/5$  و  $2$  سانتی‌متر نیز با استفاده از مدل عددی بررسی شده است. فرآیند برش در مدل‌های ساخته شده به مدت سه ثانیه انجام شده و نرخ برش از میانگین این سه ثانیه به دست آمده است. در این مدل‌ها، تعداد مهره‌ها در واحد طول برابر  $36$  عدد، سرعت محیطی سیم  $24$  متر بر ثانیه و آمپراژ کشش دستگاه  $83$  آمپر است. در شکل ۵-۲۰ تا شکل ۵-۲۳، به ترتیب برش انجام شده توسط سیم الماسه و نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ برای قطرهای مختلف مهره ذکر شده، نشان داده شده است.



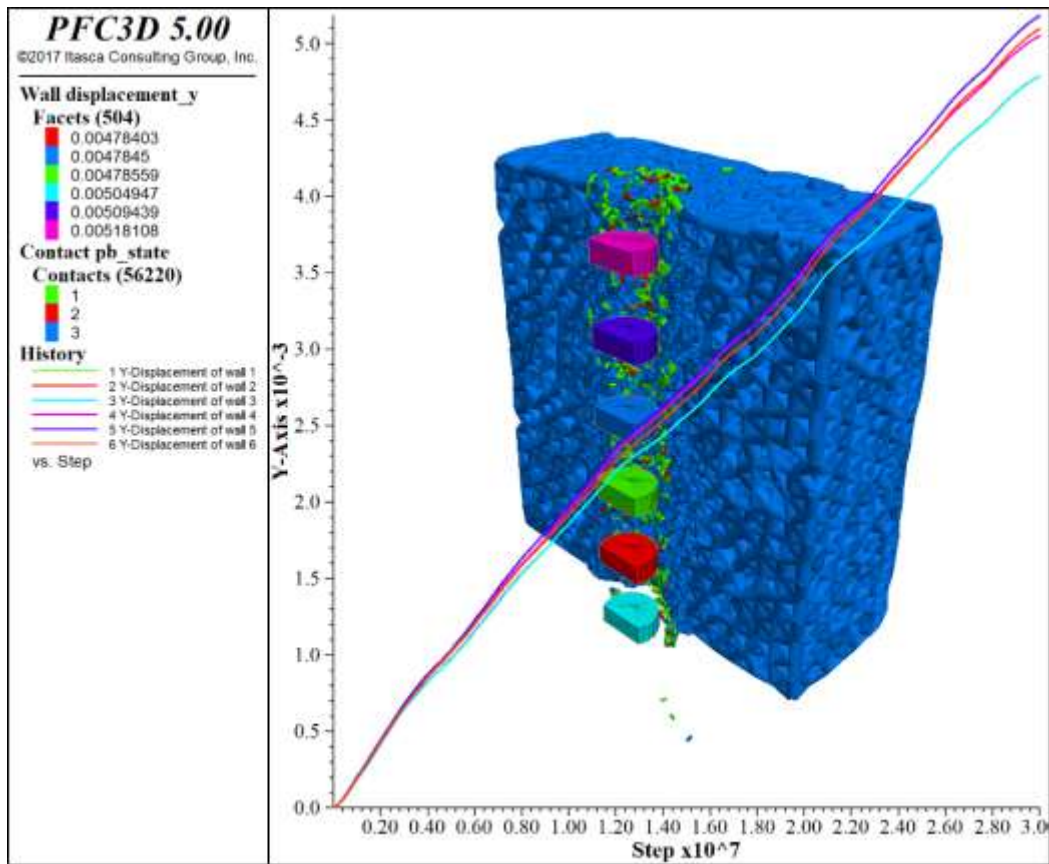
شکل ۵-۲۰: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای قطر مهره  $0/8$  سانتی‌متر



شکل ۵-۲۱: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای قطر مهره ۱ سانتی‌متر

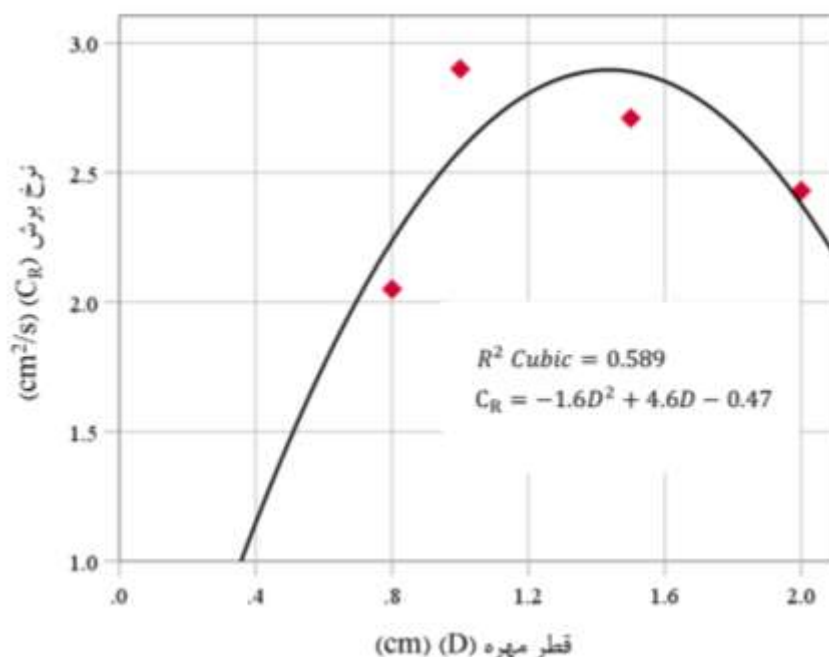


شکل ۵-۲۲: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای قطر مهره ۱/۵ سانتی‌متر



شکل ۵-۲۳: برش انجام شده و نمودار تغییرات جابجایی برای قطر مهره ۲ سانتی متر

همان طور که در شکل ۵-۲۰ تا ۵-۲۳ مشاهده می شود، نمودار تغییرات جابجایی در راستای نفوذ برای قطرهای مختلف مهره به دست آمده است. با افزایش قطر مهره ها از یک سانتی متر، سطح درگیر مهره ها در برش سنگ نیز افزایش می یابد و تعداد تماس های مهره ها با سنگ در مدل نیز افزایش پیدا می کند که این امر باعث افزایش نیروهای مقاومتی می شود. با افزایش نیروهای مقاومتی و ثابت ماندن آمپراژ کشش، نرخ برش کاهش می یابد. برای تحلیل روند میان تغییرات نرخ برش و قطر مهره های الماسه، بر مبنای نتایج به دست آمده از حل مدل، برازش تک متغیره میان این دو پارامتر انجام شده و نتایج حاصل در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۴: نتایج حاصل از برازش تک متغیره میان قطر مهره‌ها الماسه و نرخ برش

همان‌طور در شکل ۵-۲۴، مشاهده می‌شود، با افزایش قطر مهره‌ها نرخ برش افزایش می‌یابد و به میزان حداکثر خود در قطر مهره برابر ۱ سانتی‌متر می‌رسد، سپس این روند نزولی شده و نرخ برش کاهش می‌یابد. این روند نشانگر این است که اندازه‌ی قطر مهره برابر ۱ سانتی‌متر، میزان بهینه قطر مهره‌ها در برش سنگ‌های گرانیتی است. در رابطه‌ی برازش شده میان قطر مهره‌ها و نرخ برش، ضریب همبستگی برابر با ۰/۵۸۹ است که نشان می‌دهد، رابطه‌ی ارایه شده گویای ارتباط نسبتاً خوب میان این دو پارامتر است. از رابطه ۵-۵، می‌توان به‌منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های گرانیتی با مهره‌های الماسه با قطر مختلف استفاده کرد.

$$C_R = -1.6D^2 + 4.6D - 0.47 \quad (5-5)$$

در این رابطه،  $C_R$  نرخ برش برحسب سانتی‌متر مربع بر ثانیه و  $D$  قطر مهره الماسه بر حسب سانتی‌متر است.

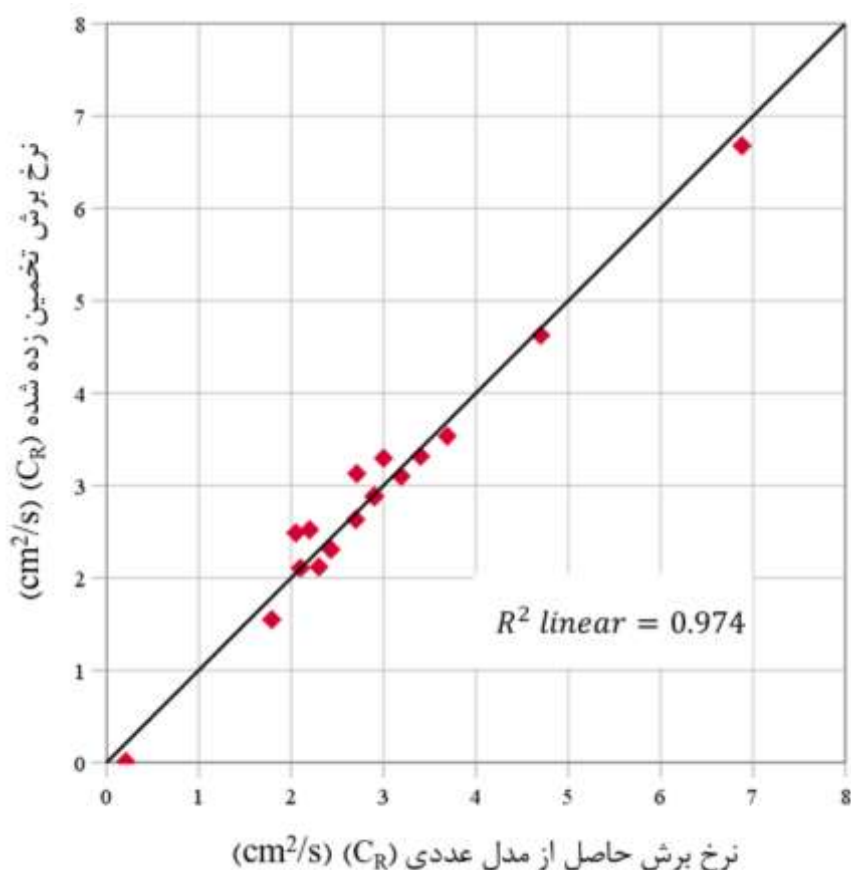
## ۵-۷- ارایه رابطه تجربی میان نرخ برش و پارامترهای قابل کنترل

به‌منظور ارایه رابطه تجربی بین نرخ برش و پارامترهای سرعت محیطی سیم، تعداد مهره در واحد طول سیم، قطر مهره‌های الماسه و آمپراژ کشش دستگاه از رگرسیون چندمتغیره استفاده شده است. شرط

شرکت متغیرهای ذکر شده در رگرسیون چندمتغیره، دارا بودن ضریب همبستگی بیش تر از ۰/۵ بین متغیرها و نرخ برش است. بر این اساس و با توجه به نتایج مدل سازی های عددی، رابطه ی (۶-۵) میان نرخ برش و پارامترهای قابل کنترل دستگاه برش با ضریب همبستگی ۰/۹۷۴ ارایه شده است.

$$C_R = (1.904 \times V_c^{0.17}) + (0.103 \times \text{Amp}) + \left(\frac{-39.1}{N}\right) + (-2.13D^2 + 5.825D) - 11.504 \quad (6-5)$$

در این رابطه،  $C_R$  نرخ برش برحسب سانتی متر مربع بر ثانیه،  $V_C$  سرعت محیطی سیم بر حسب متر بر ثانیه،  $N$  تعداد مهره در واحد طول سیم،  $D$  قطر مهره های الماسه بر حسب سانتی متر و  $\text{Amp}$  آمپراژ کشش دستگاه بر حسب آمپر است. این رابطه از لحاظ دارا بودن تعداد چهار پارامتر دربرگیرنده و موثر بر نرخ برش و بررسی همزمان آنها، حایز اهمیت فراوان است. در شکل ۵-۲۵، مقایسه میان نرخ برش تخمین زده شده توسط رابطه تجربی و نرخ برش حاصل شده از مدل عددی ارایه شده است.



شکل ۵-۲۵: مقایسه نرخ برش تخمین زده شده و نرخ برش حاصل شده از مدل عددی

## ۵-۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل با در نظر گرفتن پارامترهای قابل کنترل دستگاه برش شامل سرعت محیطی سیم، تعداد مهره‌ها در واحد طول سیم برش الماسه، قطر مهره‌های الماسه و آمپراژ کشش دستگاه برش، نتایج حاصل از حل مدل عددی نسبت به تغییرات پارامترهای مذکور بررسی شد. پس از تحلیل نتایج حاصل از حل مدل عددی، روابط تجربی مختلف بین این پارامترها و نرخ برش تهیه شد. در نهایت رابطه‌ای تجربی بین نرخ برش سنگ‌های گرانیته و چهار پارامتر قابل کنترل دستگاه برش با ضریب همبستگی بالا توسعه داده شد. با مقایسه تاثیر هر یک از پارامترهای بررسی شده بر نرخ برش، می‌توان از آمپراژ کشش دستگاه به‌عنوان موثرترین پارامتر در تغییرات نرخ برش نام برد.



## فصل ششم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادها



## ۶-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش، فرآیند برش سنگ توسط سیم الماسه با هدف بررسی و بهبود عملکرد سیم برش با استفاده از نرم افزار PFC3D مدل سازی شد. مدل ساخته شده با آزمایش برش سنگ گرانیتی که در دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده، اعتبارسنجی شد. پس از اعتبارسنجی مدل عددی ساخته شده، با تغییر پارامترهای قابل کنترل در برش، تاثیر هر یک از پارامترها بر نرخ برش ارزیابی شده است. پارامترهای ارزیابی شده در این پژوهش شامل سرعت محیطی سیم، تعداد مهره در واحد طول سیم، قطر مهره ها و آمپراژ کشش دستگاه هستند. در ادامه، نتایج حاصل شده به اختصار ارائه می شود:

- نرخ برش با سرعت محیطی سیم، رابطه مستقیم دارد و هرچه سرعت محیطی سیم افزایش یابد، نرخ برش نیز افزایش پیدا می کند. مقدار بهینه برای پارامتر سرعت محیطی سیم، بیشترین مقدار ممکن با توجه به محدودیت دستگاه های سیم برش، توان کششی سیم و تکنولوژی موجود است.
- نرخ برش و تعداد مهره ها در واحد طول، رابطه مستقیم با یکدیگر دارند. با افزایش تعداد مهره ها در واحد طول، نرخ برش نیز افزایش می یابد. البته افزایش تعداد مهره ها بیش از ۳۶ عدد مهره در واحد طول سیم الماسه تاثیری بر نرخ برش ندارد و پس از این تعداد نرخ برش تقریباً ثابت باقی می ماند. بنابراین می توان تعداد ۳۶ مهره در واحد طول سیم را به عنوان تعداد بهینه مهره ها برای برش سنگ های گرانیتی در نظر گرفت.
- نرخ برش نسبت به آمپراژ کشش دستگاه، رابطه ای مستقیم و خطی دارد و با افزایش این پارامتر، نرخ برش نیز افزایش می یابد. مقدار بهینه پارامتر آمپراژ کشش دستگاه، در صورتی که عامل محدود کننده دیگری وجود نداشته باشد، بیشترین مقدار ممکن است.
- در صورت کاربرد دستگاه با میزان آمپراژ کشش حدود ۵۴ آمپر برای سنگ های گرانیتی، نرخ برش تقریباً برابر با صفر خواهد بود.
- با بررسی تاثیر قطر مهره ها بر روی نرخ برش، این نتیجه حاصل می شود که با افزایش قطر مهره های الماسه نرخ برش روند صعودی دارد و پس از رسیدن به میزان حداکثر خود به ازای قطر

مهره برابر ۱ سانتی‌متر، نرخ برش روند نزولی می‌گیرد. بنابراین اندازه‌ی قطر مهره برابر ۱ سانتی‌متر، میزان بهینه قطر مهره‌ها در برش سنگ‌های گرانیتی است.

- با مقایسه تاثیر هر یک از پارامترهای بررسی شده بر نرخ برش، می‌توان از آمپراژ کشش دستگاه به‌عنوان موثرترین پارامتر در تغییرات نرخ برش نام برد.
- با توجه به نتایج مدل‌سازی‌های عددی، رابطه‌ای تجربی بین نرخ برش و چهار پارامتر قابل کنترل سرعت محیطی سیم، تعداد مهره در واحد طول سیم، قطر مهره‌های الماسه و آمپراژ کشش دستگاه با ضریب همبستگی ۰/۹۷۴ ارائه شده است. این رابطه از لحاظ دارا بودن تعداد پارامترهای دربرگیرنده و موثر بر نرخ برش و بررسی همزمان آنها، حایز اهمیت فراوان است.

## ۶-۲- پیشنهادها

در این پژوهش، بررسی عملکرد سیم برش الماسه با توجه به پارامترهای قابل کنترل، مد نظر بوده است. از میان پارامترهای قابل کنترل چهار پارامتر سرعت محیطی سیم، تعداد مهره در واحد طول سیم، قطر مهره‌ها و آمپراژ کشش دستگاه بررسی و تاثیر آنها بر نرخ برش توسط مدل عددی انجام شده است. بنابراین با بررسی سایر پارامترهای قابل کنترل نظیر ابعاد برش، زاویه ورودی سیم و هندسه سیم در هنگام برش می‌توان نتایج بیشتری حاصل کرد.

## منابع

افراسیابی، ن. (۱۳۹۶). مدل سازی اثر پارامترهای هندسی درزه بر خردایش سنگ توسط دیسک های برش دهنده در سنگ سخت درزه دار. پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود.

الماسی، ن. (۱۳۹۵). ارزیابی قابلیت برش سنگ های گرانیتی با سیم برش الماسه بر اساس مشخصات سنگ و مشخصات عملیات برش. رساله مقطع دکترای تخصصی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.  
سخن سنج، ا. (۱۳۹۰). بهبود خواص سایشی سگمنت الماسه. پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه تهران.

صباغیان، ا. (۱۳۹۵). تعیین قطر بیرونی سیم برش براساس استاندارد ASTM در معدن تراورتن آستانه. پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود.

قیصری، ن. (۱۳۸۹). پیش بینی عملکرد سیم برش الماسه با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ. پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود.

عطایی، م. (۱۳۸۷). استخراج سنگ های ساختمانی. شاهرود: انتشارات صنعتی شاهرود. چاپ اول.  
عطایی، م.، قنبری، س. (۱۳۹۷). پیش بینی عملکرد آهنگ حفاری و برش در معادن سنگ ساختمانی (کربناته) با توجه به خصوصیات بافتی سنگ ها. نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد دوازدهم.

نبیان، ا.، فرهادیان، م.، حمیدی، غ. (۱۳۷۰). استخراج سنگ های ساختمانی. تهران: انتشارات وزارت معادن و فلزات. چاپ اول.

Agus, M., Bortolussi, A., Cateddu, N., Ciccu, R., Grosso, B., & Massacci, G. (2003). Influence of stone properties on diamond wire performance. In Fourth international conference on computer applications in the minerals industries.

Almasi, S. N., Bagherpour, R., Mikaeil, R., & Khademian, A. (2015). Influence of cutting wire tension on travertine cutting rate. In 24th international mining congress and exhibition of turkey, pp.1096-1102.

Ataei, M., Mikaeil, R., Sereshki, F., & Ghaysari, N. (2012). Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(6), pp.1289-1295.

- 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), pp.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.
- Denkena, B., de Leon, L., & Seiffert, F. (2010). Process influences in the wire cutting of concrete. In *Advanced Materials Research*, pp.70-76.
- Ding X., Zhang L., Zhu H., Zhang Q. (2014), "Effect of Model Scale and Particle Size Distribution on PFC3D Simulation Results", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, pp.2139–2156.
- Feng, J., Liang, H., Liu, J., & Mao, G. (2019). Research on Cutting Performance Optimization of Diamond Wire Saw. In *Journal of Physics: Conference Series*, 32-49.
- Filgueira, M., & Pinatti, D. G. (2005). In situ diamond wires: diameter determination of the external cutting rope. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 23(2), pp.85-90.
- Ghaysari, N., Ataei, M., Sereshki, F., & Mikaiel, R. (2012). Prediction of performance of diamond wire saw with respect to texture characteristics of rock. *Archives of Mining Sciences*, 57.
- Hasanpour, R., Ozcelik, Y., Yilmazkaya, E., & Sohrabian, B. (2016). DEM modeling of a monowire cutting system. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(20), pp.739.
- Howarth, D. F., & Rowlands, J. C. (1986). Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotechnical Testing Journal*, 9(4), pp.169-179.
- Huang, G., & Xu, X. (2013). Sawing performance comparison of brazed and sintered diamond wires. *Chinese journal of mechanical engineering*, 26(2), pp.393-399.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2015). "PFC (Particle Flow Code)." <http://www.itascacg.com/software/pfc>.
- 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(3), pp.367-371.
- Konstanty, J. (1991). The materials science of stone sawing. *IDR. Industrial diamond review*, 51(542), pp.27-31.
- Konstanty, J. (2002). Theoretical analysis of stone sawing with diamonds. *Journal of materials processing technology*, 123(1), pp.146-154.

- Korre, A., & Durucan, S. (2000). The effects of granite microstructure on the sawing performance of diamond wires. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 14(2), pp.87-102.
- Mikaeil, R., Ataei, M. A., & Hoseinie, H. (2008). Predicting the production rate of diamond wire saws in carbonate rock cutting. *IDR. Industrial Diamond Review*, 68(3), pp.28-34.
- Mikaeil, R., Ozcelik, Y., Ataei, M., & Shaffiee Haghshenas, S. (2019). Application of harmony search algorithm to evaluate performance of diamond wire saw. *Journal of Mining and Environment*, 10(1), pp.27-36.
- Mikaeil, R., Shaffiee Haghshenas, S., Ozcelik, Y., & Shaffiee Haghshenas, S. (2017). Development of intelligent systems to predict diamond wire saw performance. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 1(2), pp.52-69.
- Mikaeil, R., Yousefi, R., & Ataei, M. (2011). Sawability ranking of carbonate rock using fuzzy analytical hierarchy process and TOPSIS approaches. *Scientia Iranica*, 18(5), pp.1106-1115.
- Mikaeil, R., Yousefi, R., Ataei, M., & Farani, R. A. (2011). Development of a new classification system for assessing of carbonate rock sawability. *Archives of Mining Sciences*, 56(1), pp.59-70.
- Molfino, R. M., & Zoppi, M. (2012). A robotic system for underwater eco-sustainable wire-cutting. *Automation in construction*, 24, pp.213-223.
- Ozcelik, Y. (2005). Optimum working conditions of diamond wire cutting machines in the marble industry. *Industrial diamond review*, (1), pp.58-64.
- Ozcelik, Y., & Bayram, F. (2004). Optical investigations of bead wear in diamond wire cutting. *Industrial Diamond Review*, (3), pp.60.
- Ozcelik, Y., & Yilmazkaya, E. (2010). Performance analysis of a diamond bead in its lifetime by using single bead test machine. In *Proceedings of the Global Stone Congress*, Alicante, Spain, pp.2-5.
- Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(8), pp.1329-1364.
- 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), pp.275-285.
- Samani, H. Y., & Bafghi, A. R. Y. (2012). Prediction of the sawing quality of Marmarit stones using the capability of artificial neural network. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(7), pp.881-891.
- Tönshoff, H. K., Denkena, B., & Apmann, H. H. (2003). Diamond tools for wire sawing metal components. In *Key Engineering Materials* , pp.33-40.

- Turchetta, S., Polini, W., Gelfusa, G., & Venafro, E. (2014). A new sawing machine by diamond wire. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1-4), pp.73-78.
- Turchetta, S., Sorrentino, L., & Bellini, C. (2017). A method to optimize the diamond wire cutting process. *Diamond and Related Materials*, 71, pp.90-97.
- Wang, C. Y., & Clausen, R. (2002). Marble cutting with single point cutting tool and diamond segments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(9), pp.1045-1054.
- Wei, X., Wang, C. Y., & Zhou, Z. H. (2003). Study on the fuzzy ranking of granite sawability. *Journal of materials processing technology*, 139(1-3), pp.277-280.
- 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(2), pp.523-539.

## **Abstract**

In recent decades, cutting stone with diamond wire has become one of the most widely used methods in the building stone industry. The cutting rate of stone in the diamond wire method is one of the important criteria in evaluating this method. Many uncontrollable and controllable parameters can affect the cutting efficiency of the stone. Physical and mechanical properties of the stone, operational and instrumental parameters could be mentioned as these effective parameters. In recent years, extensive laboratory and field studies have been conducted on how uncontrollable and controllable parameters effect the cutting rate. Due to the high cost and time of experiments and field studies, numerical models can be of great help in evaluating various parameters on the stone cutting process. Numerical modeling can also be used to investigate a wide range of parameters that are out off the laboratory and technology limits. In this research with using PFC3D software, a numerical model is presented to calculate the cutting rate and analyze the controllable parameters that affecting it, including the peripheral speed of the diamond wire, the number of beads per unit length, pull-back amperage of the machine and the diameter of the beads. Numerical simulation and its validation is based on experiments performed on a granite rock sample. The results of numerical modeling show that the parameters of the peripheral speed of the diamond wire and the pull-back amperage of the machine are directly related to the cutting rate. The optimal value for these parameters is the maximum as possible. In other words, with the advancement of technology and the ability to increase the values of these parameters, higher cutting rates can be achieved. Examination of the number of beads per unit length of diamond cutting wire showed that by increasing it to 36 beads, the cutting rate increases, but with increasing more, the cutting rate remains almost constant. Therefore, this number can be considered as the optimal value for this parameter. Examining the effect of bead diameter on cutting rate, it was concluded that with increasing diameter, the cutting rate would be increased. When bead diameter equals to one centimeter, the cutting rate is maximized. Further increasing of the bead diameter will reduce the cutting rate. Therefore, one centimeter is introduced as the optimal value for bead diameter. By comparing the effect of each of the mentioned parameters on the cutting rate, the pull-back amperage of the machine can be expressed as the most effective parameter on the cutting rate. Finally, with using multivariate regression an experimental relationship between the cutting rate and the studied parameters with a correlation coefficient of 0.974 was presented. This relationship can be used to predict and improve the performance of diamond cutting wire in granite stones.

**Keywords:** numerical modeling, diamond wire cut, building stone, PFC3D



Shahrood University of Technology  
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

Optimization of diamond wire performance using of numerical  
modeling

**By: Ardeshir Amirsharafi**

**Supervisors:**

**Dr. Mehdi Noroozi**

**Dr. Farhang Sereshki**

February 2021