

## مطالعه عددی تأثیر محصورشدگی سنگ بر نفوذ ابزار در آزمون پانچ

رضا اعلائی<sup>۱</sup>؛ جعفر خادمی حمیدی<sup>۲\*</sup>؛ هادی صبوری<sup>۳</sup>؛ مهدی محمدی<sup>۴</sup>؛ منصور صبری<sup>۵</sup>

۱- کارشناس ارشد استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار گروه استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

۴- دکتری استخراج معدن، گروه استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۵- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰

### چکیده

شکندگی یکی از خصوصیات مهم سنگ است که به پیش‌بینی رفتار خرد شدن سنگ، انرژی مصرف‌شده در برش سنگ و انتخاب هندسه برش بهینه می‌پردازد. آزمون نفوذ پانچ یکی از روش‌های مستقیم اندازه‌گیری شکندگی و نیروی واردشده به ابزار طی نفوذ در سنگ است که در این آزمون از قالب فولادی و پرکننده سیمانی برای شبیه‌سازی محصورشدگی سنگ استفاده می‌شود. با توجه به انعطاف‌پذیری روش‌های عددی، در این مطالعه، با مدل‌سازی فرآیند نفوذ به روش المان محدود و اعتبارسنجی آن با آزمون آزمایشگاهی، به بررسی تأثیر محصورشدگی سنگ بر نفوذ ابزار و شکندگی سنگ پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد، با مدل‌سازی عددی آزمون نفوذ پانچ به روش المان محدود، می‌توان نتایج این آزمون را با دقت بالایی بدست آورد. همچنین مشاهده شد، مقدار حداکثر نیروی واردشده به نفوذگر و شاخص شکندگی در حالت محصورشده سنگ نسبت به آزمون نفوذ پانچ افزایش می‌یابد و این افزایش در سنگ‌های صلب‌تر مانند گرانیت بیشتر مشاهده می‌شود.

### واژگان کلیدی

شکندگی سنگ، آزمون نفوذ پانچ، مدل‌سازی عددی، روش المان محدود

### ۱- مقدمه

خصوصیات فیزیکی سنگ‌ها مانند سختی<sup>۳</sup> و چقرمگی<sup>۴</sup> توسعه داده شد. در سال ۱۹۹۸ این آزمون برای اندازه‌گیری سختی سنگ استفاده و این نتیجه حاصل شد که از این آزمون می‌توان برای پیش‌بینی برش‌پذیری<sup>۵</sup> سنگ استفاده کرد [۱]. پس از آن دالینچر و هندویت<sup>۶</sup> نشان دادند که

تعیین شکندگی<sup>۱</sup> سنگ یکی از ملاحظات مهم در پروژه‌های مکانیک سنگی، حفاری مکانیکی و ساخت و سازهای زیرزمینی محسوب می‌شود. محققان مختلفی [۱]- [۴] با استفاده از رویکردهای متفاوت، شکندگی سنگ را به صورت غیرمستقیم تعریف کردند. آزمون نفوذ پانچ<sup>۲</sup> قبل از سال ۱۹۶۰ برای اندازه‌گیری آزمایشگاهی مستقیم برخی از

۳ . Hardness

۴ . Toughness

۵ . Cut ability

۶ . Dollinger and Handewith

۱ . Brittleness

۲ . Punch Penetration Test (PPT)

و سرعت امواج  $P$  و  $S$  ارائه داد [۱۰].

با رشد سریع تکنولوژی کامپیوتر، روش‌های عددی برای شبیه‌سازی فرآیند شکست سنگ توسط محققان مختلف معرفی شد. در سال ۱۹۸۴، کوک و همکاران [۱۱] مدل دو بعدی ساده‌ای را با روش المان محدود پیاده کردند و با نتایج آزمایش‌های شکست سنگ با استفاده از یک نفوذگر مقایسه کردند. پس از آن در سال ۲۰۰۲، لیو و همکاران [۱۲] با استفاده از کد اندرکنش ابزار و سنگ با نام تجاری  $R-T2D$  فرآیند برش سنگ با فرورونده تکی و دوتایی بررسی کردند. با این روش، گسترش ترک‌ها به صورت دینامیکی مدل شد. پارک و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۶ مدل همگنی را با استفاده از روش عددی تفاضل محدود با نرم‌افزار  $FLAC2D$  ساختند و تأثیر فشار جانبی و فاصله‌داری تیغه‌ها بر مکانیزم تشکیل تراشه در سنگ را بررسی کردند.

در آزمون نفوذ پانچ از قالب فولادی و پرکننده گچ یا سیمان برای ایجاد شرایط محصورشدگی سنگ استفاده می‌شود که ممکن است به‌طور کامل شرایط محصورشدگی سنگ در مقیاس واقعی و در میان توده سنگ را ایجاد نکند. به دلیل پیچیدگی تأثیر فشارهای جانبی بر نفوذ ابزار و مدل‌سازی آزمایشگاهی آن، مطالعات اندکی در زمینه بررسی تأثیر فشارهای جانبی بر نفوذ ابزار انجام گرفته است. با این حال با وجود انعطاف‌پذیری مدل‌سازی عددی در اعمال نیروها و شرایط مختلف، این روش امکان مدل‌سازی و مقایسه شرایط مختلف را فراهم می‌آورد.

در تحقیق حاضر، برای بررسی تأثیر محصورشدگی سنگ بر نفوذ ابزار، آزمون نفوذ پانچ به روش المان محدود با استفاده از دو نوع سنگ مدل‌سازی شده و پس از صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی با آزمون‌های انجام‌شده در آزمایشگاه، فرآیند نفوذ در شرایط محصورشدگی نمونه بلوکی بزرگ، بدون فشار جانبی مدل‌سازی و نتایج بررسی و مقایسه می‌شود.

## ۲- آزمون نفوذ پانچ

آزمون نفوذ پانچ ( $PPT$ ) اولین بار توسط هندویت در سال

آزمون نفوذ پانچ اطلاعات کمی برای بررسی رفتار سنگ زیر نفوذگر فراهم می‌کند؛ ولی با این حال، روشی مشخص برای کمی‌سازی چقرمگی، شکنندگی یا سختی توسعه ندادند [۵]. یاجیز<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۶ اظهار داشت که از آزمون نفوذ پانچ می‌توان به‌طور مستقیم برای اندازه‌گیری چقرمگی و شکنندگی استفاده کرد. او اظهار داشت که این آزمون پتانسیل بسیار خوبی برای تخمین نرخ پیشروی ماشین‌های تونل‌سازی دارد [۶]. سپس در سال ۲۰۰۹ با انجام این آزمون بر روی نمونه‌های مختلف، روابطی برای تخمین شاخص شکنندگی از پارامترهای مقاومتی و چگالی سنگ ارائه داد و شکنندگی سنگ‌ها را با استفاده از شاخص شکنندگی آن مطابق جدول ۱ نام‌گذاری کرد [۷]. در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۰، از سیستم استنتاج فازی و مدل رگرسیون غیرخطی برای پیش‌بینی شکنندگی سنگ استفاده شد [۸].

### جدول ۱- دسته‌بندی شکنندگی انواع سنگ بر حسب

#### شاخص شکنندگی [۷]

مشخصات	اندازه (سانتی‌متر)
شکنندگی بسیار بالا	$\leq 40$
شکنندگی بالا	۳۵-۳۹
شکنندگی متوسط	۳۰-۳۴
نسبتاً شکننده	۲۵-۲۹
شکنندگی پایین	۲۰-۲۴
غیر شکننده (شکل‌پذیر)	$\geq 19$

در ادامه مطالعات، منگ و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۵ نتیجه گرفتند، شاخص‌های شکنندگی که بر پایه خصوصیات مقاومتی توسعه یافته‌اند، معمولاً تأثیر کرنش الاستیک و تنش‌های محصورشدگی که برای توصیف مقدار انرژی تجمع یافته طی بارگذاری قبل از شکست و نحوه مصرف انرژی لازم است را در نظر نمی‌گیرند [۹]. رنی و بریان<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۶ با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ( $ANN$ ) و تشکیل بانک اطلاعاتی از نتایج ثبت شده از آزمون پانچ در موسسه مکانیک زمین ( $EMI$ ) مدرسه معدن کلرادو، روشی غیر مخرب برای تخمین شکنندگی از خصوصیات الاستیکی

<sup>4</sup> . Cook et al.

<sup>5</sup> . Liu

<sup>6</sup> . Park et al.

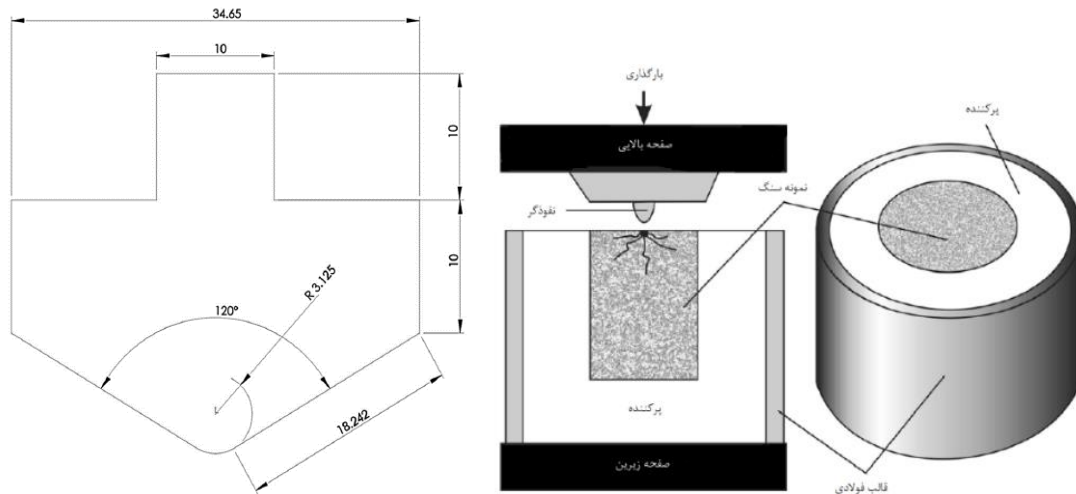
<sup>1</sup> . Yagiz

<sup>2</sup> . Meng et al.

<sup>3</sup> . Rennie and Brian

که تخمین بهره‌وری و هزینه‌های حفاری ضروری است، معمولاً غیر ممکن است [۱۶].

آزمون پانچ شامل نفوذ یک نفوذگر در نمونه سنگ با نرخ جابجایی و عمق نفوذ مشخص و ثبت نمودار نیرو-جابجایی حین نفوذ است. نفوذگر آزمون پانچ شکل مخروطی با زاویه نوک ۱۲۰ درجه و گردش‌دگی نوک با شعاع  $3/175$  میلی‌متر دارد (شکل ۱). برای جلوگیری از تغییر شکل آن تحت تجمع بالای تنش‌ها، این پین از جنس کاربید تنگستن ساخته می‌شود [۵]، [۷] و [۱۵]. در این آزمون، از نمونه سنگ مغزه استوانه‌ای استاندارد ۵۴ میلی‌متری یا بزرگ‌تر با نسبت طول به قطر حداقل ۱ استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی شرایط محصورشده سنگ برجا، نمونه سنگ داخل قالب فولادی استوانه‌ای با قطر بیرونی ۱۵۸ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر با مخلوط گچ و سیمان (پرکننده) قالب گرفته می‌شود. همچنین یک صفحه فولادی زیر قالب فولادی در برگزیده نمونه سنگ قرار می‌گیرد [۷] و [۱۵]. در شکل ۱ اجزای مختلف آزمون پانچ و ابعاد مقطع نفوذگر نمایش داده شده است.



شکل ۱- اجزای مختلف آزمون نفوذ پانچ و ابعاد مقطع نفوذگر به میلی‌متر [۷]، [۱۴]

نفوذگر قرار گرفته و آن‌ها را به هم متصل می‌کند. در آزمون پانچ، نفوذگر با نرخ جابجایی  $0/0254$  میلی‌متر بر ثانیه تا عمق حداکثر  $6/5$  میلی‌متر در نمونه سنگ نفوذ می‌کند. جابجایی نفوذگر با  $LVDT$  نصب شده بین فریم و نفوذگر

برای اندازه‌گیری آزمایشگاهی مستقیم نیروی قائم وارد شده به تیغه، طی حفاری با ابزار فرورونده توسعه داده شد [۵]. این آزمون برای پیش‌بینی راندمان  $TBM$ ، نرخ نفوذ، چال‌خوری و نیروهای وارد بر تیغه مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین محققان مختلفی رابطه نتایج آزمون پانچ با سایر اندیس‌ها و خصوصیات مکانیکی مختلف سنگ مثل شاخص شکنندگی، چقرمگی شکست، مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی برزیلی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳]، [۵]، [۷]، [۱۴] و [۱۵].

آزمون نفوذ پانچ همانند آزمون‌های برش سنگ در دسته آزمون‌های آزمایشگاهی مستقیم اندازه‌گیری نیروهای وارد بر تیغه، طی برش سنگ محسوب می‌شود. مزایای اصلی این آزمون شامل ابعاد کوچک نمونه سنگ، ارزان قیمت بودن و روش ساده آزمایش نسبت به آزمون‌های برش سنگ است. نمونه مورد نیاز برای این آزمایش را می‌توان به راحتی از مغزه‌های حفاری اکتشافی بدست آورد؛ در حالی که آزمون‌های مقیاس کامل برش سنگ نیازمند بلوک‌های سنگی بزرگ است و تهیه این نمونه‌ها در مراحل اولیه پروژه

برای انجام آزمون پانچ از ماشین تک‌محوره سروو-کنترل با صلبیت بالا استفاده می‌شود. این ماشین به دلیل داشتن قابلیت اعمال نرخ نفوذ ثابت برای آزمون پانچ مناسب می‌باشد. صفحه نگهدارنده بین صفحه اعمال نیروی ماشین و

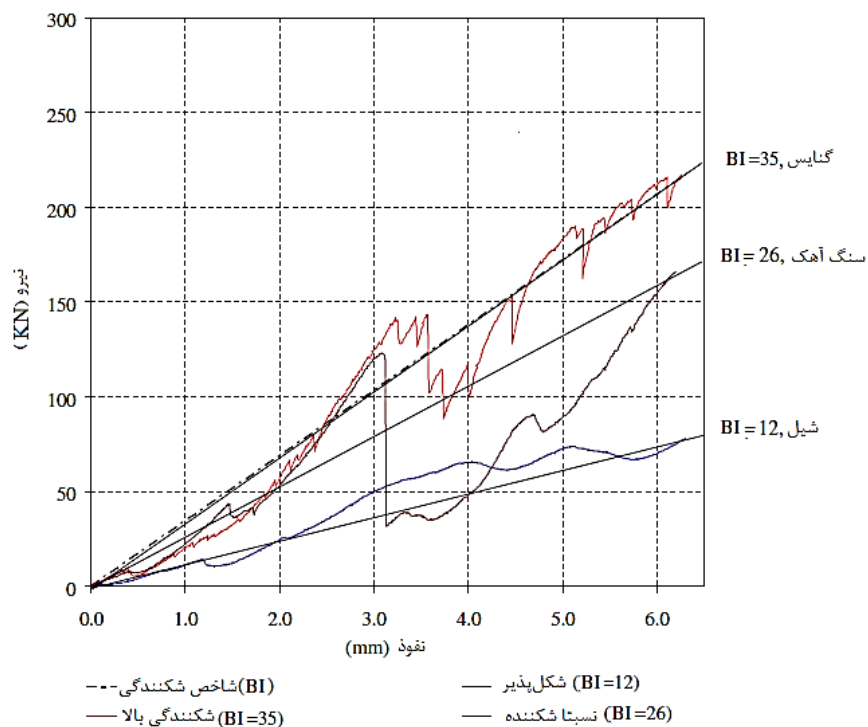
$$BI = \frac{F_{max}}{P} \quad (1)$$

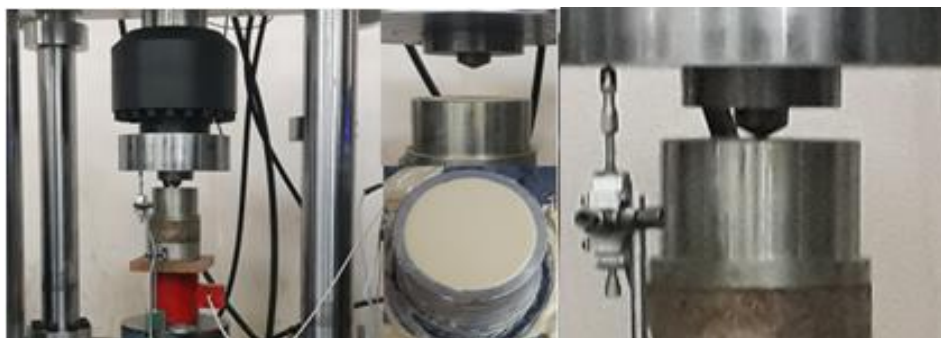
## ۲-۱- اندازه‌گیری آزمایشگاهی

در مطالعه حاضر، آزمون نفوذ پانچ بر روی دو نمونه مغزه سنگ گچ طبیعی و گرانیت به قطر ۶۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۱ مطابق با روش پیشنهادی انجام آزمون پانچ [۷]، با پرکننده گچ دندانپزشکی انجام گرفت. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، با استفاده از ماشین بارگذاری تک محوره سروو-کنترل، نفوذگر تا عمق ۶/۵ میلی‌متر با نرخ ۰/۰۲۵۴ میلی‌متر بر ثانیه در نمونه سنگ‌ها نفوذ داده شد. نتایج نیروی وارد شده با استفاده از نیروسنج زیر نمونه و مقدار نفوذ با استفاده از *LVDT* نصب شده بین نفوذگر و بدنه دستگاه در طی آزمایش ثبت شد. بنابراین نمودار نیرو-نفوذ آزمایش قابل رسم است. در شکل ۳، قالب‌گیری نمونه سنگ و مراحل انجام آزمون پانچ نمایش داده شده است.

حین آزمایش ثبت می‌شود. نیروی محوری وارد شده به نفوذگر نیز با نیروسنج قرار گرفته در بین صفحه زیرین قالب و فریم دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از داده‌های ثبت شده، نمودار نیرو-نفوذ سنگ تهیه می‌شود [۱۵]. در اثر نفوذ پانچ در نمونه سنگ نواحی مختلفی از منظر ترک‌خوردگی مشابه ترک‌های ایجاد شده در نفوذ تیغه دیسکی در سنگ ایجاد می‌شود [۱۷].

نمودار نیرو-نفوذ حاصل از آزمایش به عنوان مقدار کمی، برای تعیین شکنندگی سنگ استفاده می‌شود. در شکل ۲ نتایج آزمون پانچ برای سنگ‌های با شکنندگی مختلف نمایش داده شده است. شاخص شکنندگی (*BI*) از آزمون نفوذ پانچ مطابق گزاره‌ی (۱) محاسبه می‌شود. در این رابطه  $F_{max}$ ، بیشترین نیروی وارد شده به تیغه بر حسب کیلو نیوتن و  $P$  مقدار نفوذ معادل بیشترین نیرو بر حسب میلی‌متر می‌باشد [۷].





شکل ۳- مراحل انجام آزمون پانچ در آزمایشگاه

## ۲-۲- مدل سازی عددی

برای مدل سازی فرآیند نفوذ ابزار در سنگ از نرم افزار المان محدود آباکوس<sup>۱</sup> استفاده شده است. این نرم افزار به دلیل قابلیت انجام تحلیل های دینامیکی خطی و غیرخطی و همچنین مسائل تغییر شرایط تماس، به طور گسترده در مدل سازی شکست و برش سنگ به کار رفته است [۱۸] و [۱۹]. در این مطالعه به منظور بررسی تأثیر محصورشدگی سنگ بر نفوذ ابزار در آن، ابتدا فرآیند نفوذ ابزار در آزمون نفوذ پانچ مدل سازی و پس از اعتبارسنجی نتایج با آزمون آزمایشگاهی، فرآیند نفوذ در سنگ بلوکی بزرگ مدل سازی و نتایج آن با آزمون نفوذ پانچ مقایسه و بررسی می شود.

برای شبیه سازی فرآیند نفوذ پانچ، اجزاء اصلی درگیر در آن شامل نفوذگر، مغزه نمونه سنگ، پرکننده، قالب نمونه و صفحه زیرین نمونه سنگ مدل سازی شده است. هندسه اجزای مختلف مطابق با آزمون انجام گرفته و تشریح شده در بخش قبل طراحی شده است. با توجه به این که نفوذگر و قالب های فولادی در طی آزمایش آسیب نمی بیند، رفتار آنها الاستیک فرض شده و برای نفوذگر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب ۵۵۰ گیگا پاسکال و ۰/۲۲ و برای قالب فولادی به ترتیب ۲۱۰ گیگا پاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. برای تعریف رفتار نمونه سنگ و پرکننده از ترکیب مدل الاستیک خطی، مدل تسلیم دراگر-پراگر و شکست شکل پذیر<sup>۲</sup> استفاده شده است. ضرایب مدل رفتاری برای نمونه سنگ ها و پرکننده مطابق جدول ۲ اعمال شده است.

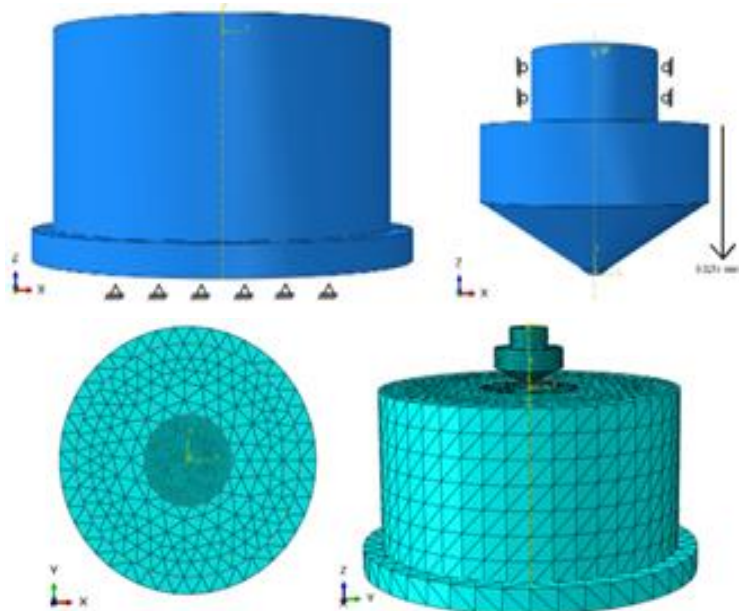
پس از مدل سازی اجزاء مدل، برای شبیه سازی فرآیند نفوذ، مشابه آزمون، موقعیت نسبی اجزاء پیش از شروع فرآیند تنظیم شده و سپس جابجایی صفحه زیرین قالب در راستای قائم و جابجایی جانبی نفوذگر محدود و حرکت خطی در راستای قائم با نرخ ۰/۲۵۴ میلی متر بر ثانیه برای نفوذگر اعمال شده است. با در نظر گرفتن عمق نفوذ ۶/۵ میلی متر و نرخ نفوذ، زمان مدل تنظیم و با حل گر *ABAQUS/Explicit* تحلیل شده است. با استفاده از نتایج ثبت شده برای نیرو و جابجایی قائم نفوذگر، نمودار نیرو-نفوذ برای نمونه سنگ قابل رسم است. در شکل ۴ تصاویری از مونتاژ، شرایط مرزی و مش بندی اجزاء مدل آزمون استاندارد نفوذ پانچ نمایش داده شده است.

<sup>۱</sup> . ABAQUS

<sup>۲</sup> . Ductile Damage

جدول ۲- پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی رفتار نمونه‌ها و پرکننده [۲۰]

دسته‌بندی	مدل	پارامترهای ورودی	سنگ گچ	گرانیت	گچ دندانپزشکی
الاستیک	خطی	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	۲/۴۱	۴۰/۹	۷/۸
		نسبت پواسون	۰/۳۹	۰/۲۷	۰/۲۴
تسلیم و سخت‌شوندگی	دار-کر-پراگر	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۸/۸	۲۵/۴	۳۷
		مقاومت فشاری تک‌محوره (مگا پاسکال)	۹/۳۱	۱۳۳	۳۵/۲
		مقاومت کششی برزیلی (مگا پاسکال)	۲/۱۹	۱۰/۴۸	۳/۸۳
شکست	آسیب شکل‌پذیر	کرنش پلاستیک معادل شروع آسیب	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
		انرژی شکست	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲
		حذف المان	Yes	Yes	Yes



شکل ۴- مونتاژ، شرایط مرزی و مش‌بندی اجزاء مدل آزمون نفوذ پنج

## ۲-۳- صحت‌سنجی

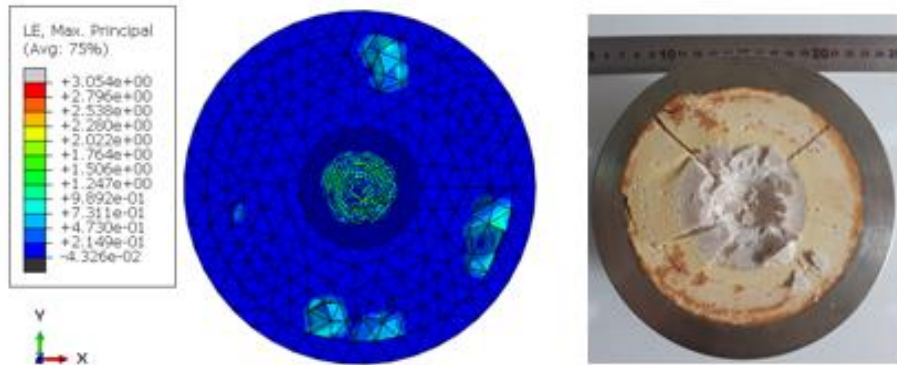
شکندگی سنگ و میزان نیروی وارد شده به تیغه طی نفوذ ابزار خارجی، به‌عنوان نتایج اصلی آزمون پنج به شمار می‌آید. پس از مدل‌سازی آزمون پنج، اعتبار مدل با مقایسه نتایج مدل‌سازی با آزمون نفوذ پنج انجام شده روی گرانیت و سنگ گچ طبیعی سنجیده شده است. در شکل ۵ سطح نمونه سنگ گچ پس از فرآیند نفوذ در آزمون آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی نمایش داده شده است. در آزمون آزمایشگاهی، ترک‌های شعاعی در پرکننده در لحظات آخر نفوذ به وجود آمد که این تغییر شکل در نتایج مدل‌سازی

نیز مشاهده شده است.

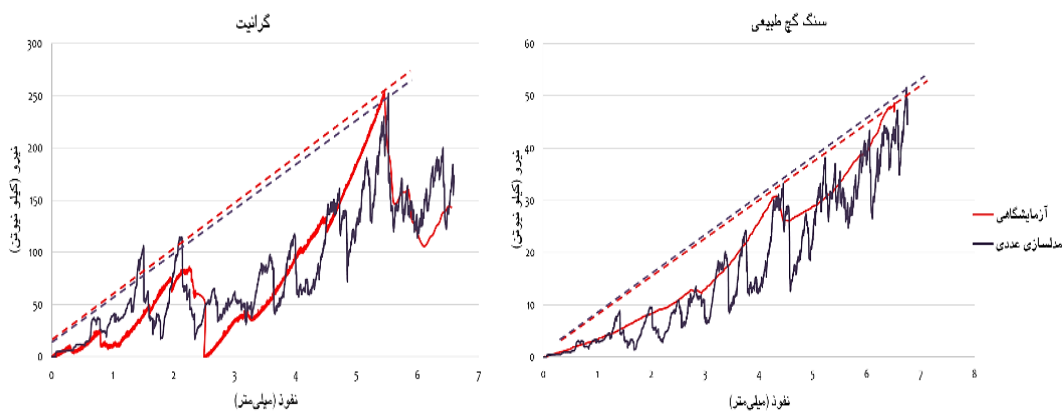
برای اعتبارسنجی مدل‌سازی، نتایج حاصل از مدل‌سازی شامل حداکثر نیروی وارد شده به تیغه و شاخص شکندگی، با نتایج آزمون آزمایشگاهی مقایسه شد. در نمودار شکل ۶ نتایج نیرو-نفوذ حاصل از آزمون نفوذ پنج برای گچ طبیعی و گرانیت به دو روش آزمایشگاهی و عددی نمایش داده شده است. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج ثبت شده در آزمایشگاه مطابقت دارد ولی نتایج مدل‌سازی عددی به دلیل کاهش ناگهانی نیروی وارد شده به تیغه در لحظه

دو نوع سنگ، کمتر از ۷ درصد محاسبه می‌شود (جدول ۳).

حذف المان، دارای نوسان بیشتری است. با این حال، شاخص شکنندگی و حداکثر نیروی وارد شده به نفوذگر برای



شکل ۵- سطح نمونه سنگ پس از فرآیند نفوذ در آزمون آزمایشگاهی (راست) و مدل‌سازی عددی (چپ)



شکل ۶- مقایسه نتایج نیرو-نفوذ و شاخص شکنندگی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی

جدول ۳- مقایسه شاخص شکنندگی آزمایشگاهی و عددی

نمونه سنگ	شاخص شکنندگی (KN/mm)	حداکثر نیرو (KN)
گچ طبیعی	آزمایشگاهی	۴۸/۶
	عددی	۵۱/۶۲
	انحراف (%)	۶/۳۱
گرانیت	آزمایشگاهی	۲۵۳/۸
	عددی	۲۵۲/۴۴
	انحراف (%)	۰/۵۳

فرآیند نفوذ ابزار در نمونه سنگ نسبتاً بزرگ در شرایط مشابه آزمون نفوذ پانچ تحلیل و نتایج آن با مدل‌سازی شرایط استاندارد آزمون نفوذ پانچ مقایسه شده است. فرآیند نفوذ، با شرایط مشابه آزمون نفوذ پانچ روی

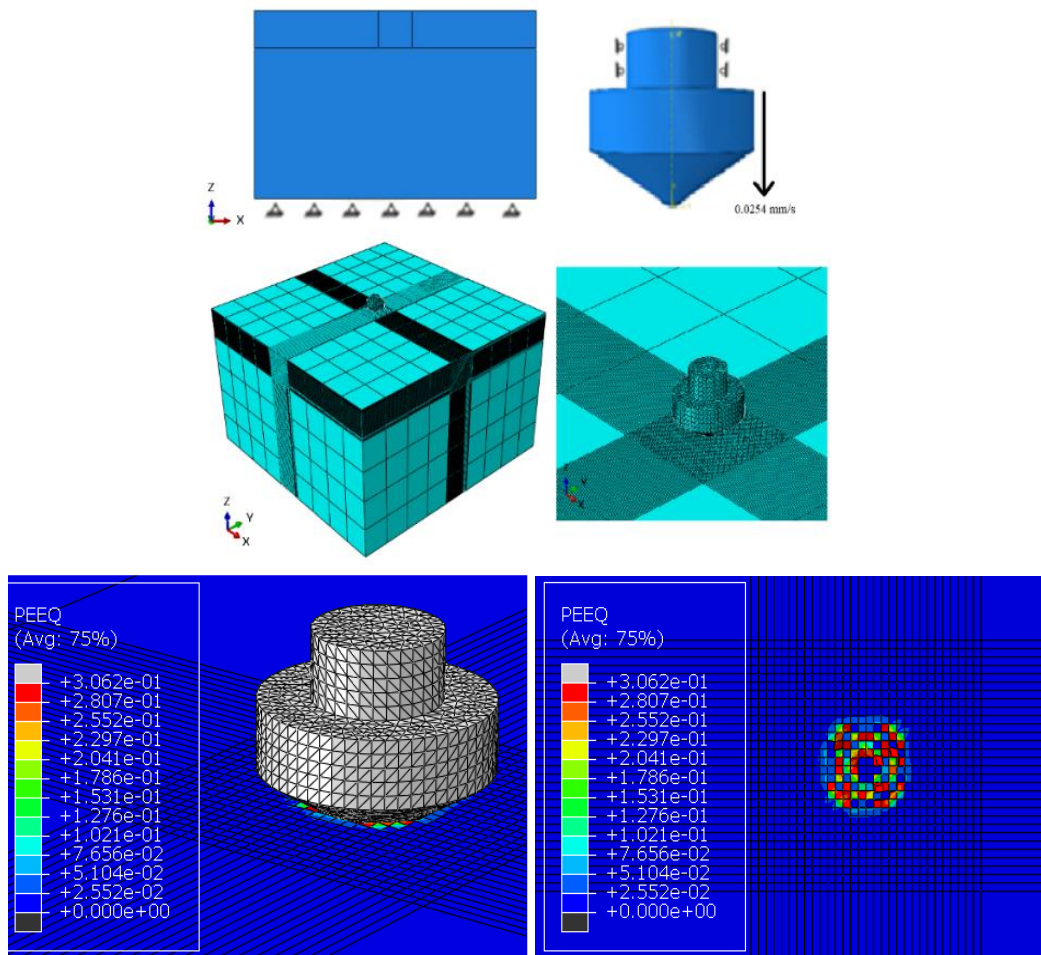
### ۳- نتایج و بحث

پس از اعتبارسنجی مدل عددی، برای بررسی تأثیر محصورشدگی بر نتایج شکنندگی در آزمون نفوذ پانچ،



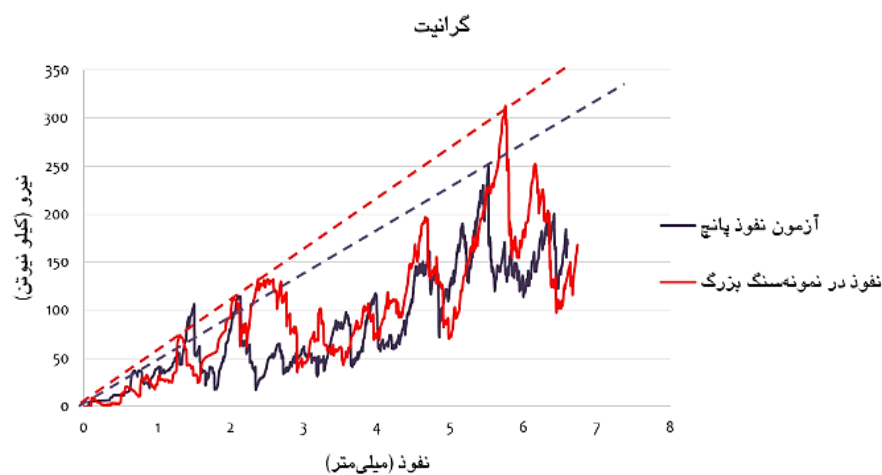
شکل ۸ و ۹، نتایج نیرو-نفوذ مدل‌سازی در شرایط استاندارد آزمون و سنگ محصور شده برای دو نوع سنگ گچ طبیعی و گرانیت نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، نیروی وارد شده به نفوذگر در نمونه سنگ محصور شده نسبت به شرایط مشابه در آزمون نفوذ پانچ و همچنین مقدار شاخص شکنندگی افزایش یافته است. در جدول ۴ مقدار تغییر شاخص شکنندگی و حداکثر نیروی وارد شده در سنگ محصور شده نسبت به آزمون نفوذ پانچ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شاخص شکنندگی سنگ محصور شده نسبت به آزمون نفوذ پانچ در سنگ گچ طبیعی و گرانیت به ترتیب ۱۳/۹۷ و ۱۸/۹۹ درصد افزایش می‌یابد.

نمونه سنگ بلوکی با ابعاد  $30 \times 50 \times 50$  سانتی‌متر برای سنگ گچ طبیعی و گرانیت مدل‌سازی شد. در این مدل‌ها جابجایی سطح پشت نمونه سنگ محدود شده است. برای کاهش تعداد المان‌ها به منظور کاهش زمان تحلیل مدل، با پارتیشن‌بندی نمونه سنگ، ناحیه زیر تیغه با ابعاد کوچک (۱ میلی‌متر) و اطراف آن با ابعاد بزرگ‌تر مش‌بندی شده است. برای ایجاد شرایط یکسان، بقیه شرایط مدل مشابه آزمون استاندارد نفوذ اعمال شده است. در شکل ۷ تصاویری از مونتاژ، شرایط مرزی، مش‌بندی اجزاء و نتایج مدل فرآیند نفوذ با نمونه سنگ بزرگ نمایش داده شده است. با حل مدل مشابه مدل آزمون استاندارد، نتایج نیرو-نفوذ و شاخص شکنندگی فرآیند قابل رسم است. در نمودار

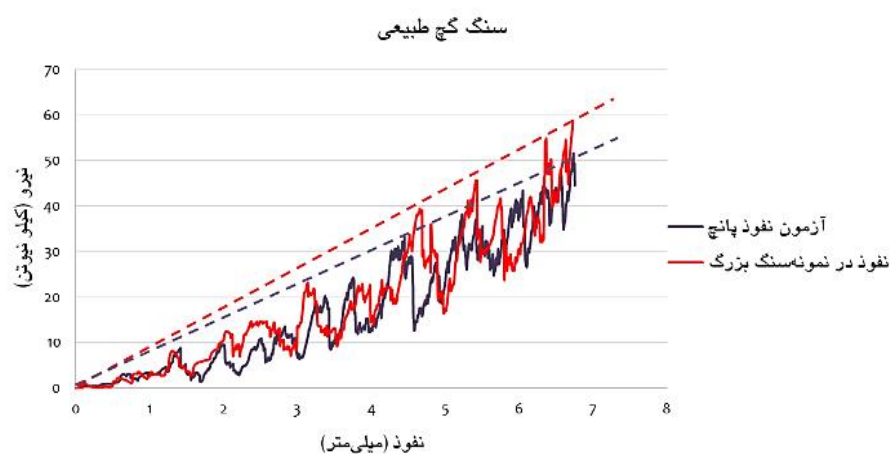


شکل ۷- مونتاژ، شرایط مرزی، مش‌بندی اجزاء و نتایج مدل پانچ با نمونه سنگ بلوکی بزرگ





شکل ۸- مقایسه نتایج نیرو-نفوذ و شاخص شکنندگی آزمون نفوذ پانچ و سنگ محصورشده گرانیت



شکل ۹- مقایسه نتایج نیرو-نفوذ و شاخص شکنندگی آزمون نفوذ پانچ و سنگ محصورشده گچ طبیعی

جدول ۴ مقایسه شاخص شکنندگی و حداکثر نیرو در آزمون نفوذ پانچ و سنگ محصورشده

نمونه سنگ	شاخص شکنندگی (KN/mm)	حداکثر نیرو (KN)
گچ طبیعی	۷/۶۶	۵۱/۶۲
سنگ محصورشده	۸/۷۳	۵۸/۷۵
تغییر (%)	۱۳/۹۷	۱۳/۸۱
گرانیت	۴۵/۷۱	۲۵۲/۴۴
سنگ محصورشده	۵۴/۳۹	۳۱۲/۷۸
تغییر (%)	۱۸/۹۹	۲۳/۹۰

## ۴- نتیجه گیری

آزمون نفوذ پانچ، یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی وارد

1967. 4(4): p. 395-406.
- [3] Cook, N.G.W., M. Hood, and F. Tsai, Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984.
- [4] Kahraman, S. and R. Altindag, A brittleness index to estimate fracture toughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004. 2(41): p. 343-348.
- [5] Dollinger, G.L., H.J. Handewith, and C.D. Breeds, Use of the punch test for estimating TBM performance. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998. 13(4): p. 403-408.
- [6] Yagiz, S. A model for prediction of tunnel boring machine performance. *Substructures and underground space. in Engineering geology for tomorrow's cities. In: The 10th IAEG Congress, Paper*. 2006.
- [7] Yagiz, S., Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009. 24(1): p. 66-74.
- [8] Yagiz, S. and C. Gokceoglu, Application of fuzzy inference system and nonlinear regression models for predicting rock brittleness. *Expert Systems with Applications*, 2010. 37(3): p. 2265-2272.
- [9] Meng, F., et al., Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015. 48(5): p. 1787-1805.
- [10] Kaunda, R.B. and B. Asbury, Prediction of rock brittleness using nondestructive methods for hard rock tunneling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016. 8(4): p. 533-540.
- [11] Cook, N.G.W., M. Hood, and F. Tsai, Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984. 21(2): p. 97-107.
- [12] Liu, H.Y., Kou, S.Q., Lindqvista, P.-A., and Tang C.A., Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002. 39(4): p. 491-505.
- [13] Park, G.-I., Jang, S.-H., Choe, S.-U., and Jeon, S.-W., Prediction of the optimum cutting condition of TBM disc cutter in Korean granite by the linear cutting test. in *Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics conference*. 2006. Korean Society for Rock Mechanics.

شده به جسم خارجی در طی نفوذ در سنگ و همچنین محاسبه شاخص شکنندگی سنگ است. در این آزمون برای اعمال شرایط مصور شده سنگ، از قالب فولادی و پرکننده سیمان یا گچ استفاده می‌شود که قادر نیست شرایط محصورشدگی سنگ را به طور کامل شبیه‌سازی کند. از این‌رو، در این تحقیق برای بررسی تأثیر محصورشدگی سنگ بر نفوذ ابزار، فرآیند نفوذ در سنگ به روش المان محدود مدل‌سازی و نتایج آن با آزمون نفوذ پانچ انجام شده روی سنگ گچ طبیعی و گرانیب اعتبارسنجی شد. سپس برای ایجاد شرایط محصور شده سنگ از نمونه سنگ به اندازه کافی بزرگ استفاده و در شرایط مشابه فرآیند نفوذ مدل‌سازی شد. مقایسه نتایج نشان داد در سنگ محصورشده، مقدار شاخص شکنندگی برای سنگ گچ و گرانیب به ترتیب ۱۳/۹۷ و ۱۸/۹۹ درصد و مقدار حداکثر نیروی وارد شده به نفوذگر به ترتیب ۱۳/۸۱ و ۲۳/۹۰ درصد نسبت به آزمون نفوذ پانچ افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار نیروی وارد شده به نفوذگر و همچنین شاخص شکنندگی سنگ در شرایط محصورشدگی سنگ بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برای آن‌ها در آزمون نفوذ پانچ است. همچنین مقدار تغییر این پارامترها در سنگ‌های صلب‌تر مانند گرانیب بیشتر از سنگ‌های سست مانند سنگ گچ است.

##### ۵- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
<b>BI</b>	<i>KN/mm</i>	شاخص شکنندگی
<b>F<sub>max</sub></b>	<i>KN</i>	حداکثر نیرو
<b>P</b>	<i>mm</i>	نفوذ معادل حداکثر نیرو

##### ۶- منابعها

- [1] Szwedzicki, T. Draft ISRM suggested method for determining the indentation hardness index of rock materials. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. 1998.
- [2] Bieniawski, Z.T., Mechanism of brittle fracture of rock: Part I—theory of the fracture process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*,

- [17] Lindqvist, P.A., H.H. Lai, and O. Alm, Indentation fracture development in rock continuously observed with a scanning electron microscope. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984. 21(4): p. 165-182.
- [18] Li, G., et al., Mechanism and numerical analysis of cutting rock and soil by TBM cutting tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018. 81: p. 428-437.
- [19] Geng, Q., Z. Wei, and J. Ren, New rock material definition strategy for FEM simulation of the rock cutting process by TBM disc cutters. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017. 65: p. 179-186.
- [20] Papadopoulos, Z., E. Kolaiti, and N. Mourtzas, The effect of crystal size on geotechnical properties of Neogene gypsum in Crete. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1994. 27(3): p. 267.

- [14] Jeong, H.-Y., et al., Performance Assessment of Hard Rock TBM and Rock Boreability Using Punch Penetration Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016. 49(4): p. 1517-1532.
- [15] Yagiz, S., Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model basic penetration for hard rock tunneling machines, in Colorado School of Mines. 2002.
- [16] Yagiz, S., The Punch Penetration Test for Estimating Machine Performance. 2015.

