مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار ۱۳۹۹، جلد سیزدهم، شماره ۱، صفحه ٦١ تا ٨٦

تحلیل الگوی شکست ماسه سنگ‌ها (مطالعه موردی: ماسه سنگ‌های استان مرکزی)

مهران نوری[۱]، غلامرضا خانلری* [۲]، وهاب سرفرازی[۳]، بهروز رفیعی [٤]

دریافت مقاله: ۹۸/۰٦/۱۳ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۲۰

چکیده

هدف از این پژوهش، تحلیل الگوهای شکست ماسه سنگ‌های دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک استان مرکزی با توجه به تغییرات مقاومت فشاری آنها می‌باشد. برای این منظور، الگوهای شکست پنج تیپ مختلف از ماسه سنگ‌های با مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) متفاوت حاصل از نتایج آزمایشگاهی و آنالیز عددی مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین در این مطالعه اثر الگوهای شکست بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره کمی‌سازی گردید. برای انجام این پژوهش نمونه‌های بلوکی از ماسه سنگ‌های سازندهای مختلف واقع در بخش شمالی استان مرکزی جمع‌آوری و براساس ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی به پنج تیپ (تیپ‌های ۱ تا ۵) تقسیم گردیده و تحت آزمایش UCS قرار گرفتند. بررسی الگوهای شکست این ماسه سنگ‌ها در محدوده‌های مختلف مقاومتی نشان داد که در مقادیر پایین مقاومت، الگوی شکست عمدتا از نوع برشی ساده (Simple shear) می‌باشد که با افزایش مقاومت فشاری به نوع کششی چندگانه (Multiple extenssion) تغییر می‌یابد. الگوی غالب شکست برای تیپ‌های ۱، ۲ و ٤ از نوع برشی ساده و برای تیپ‌های ۳ و ۵ از نوع کششی چندگانه می‌باشد. بررسی الگوهای شکست در بازه‌های مقاومتی مختلف برای کل نمونه‌های ماسه‌سنگی نشان داد که تا مقادیر ۱٤۰ مگاپاسکال، الگوی شکست غالب از نوع برشی ساده و برای مقادیر بیش از ۱٤۰ مگاپاسکال، الگوی شکست از نوع کششی چندگانه می‌باشد. همچنین در این مطالعه، الگوهای شکست نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار PFC^{2D} به صورت عددی شبیه‌سازی شدند و ملاحظه گردید که نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی، همخوانی قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

کلید واژه‌ها: *ماسه سنگ‌ها، الگوی شکست، مقاومت فشاری تک‌محوره، نرم‌افزار* PFC^{2D}

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
۲. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان Khanlari_reza@Yahoo.com
۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان
٤. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

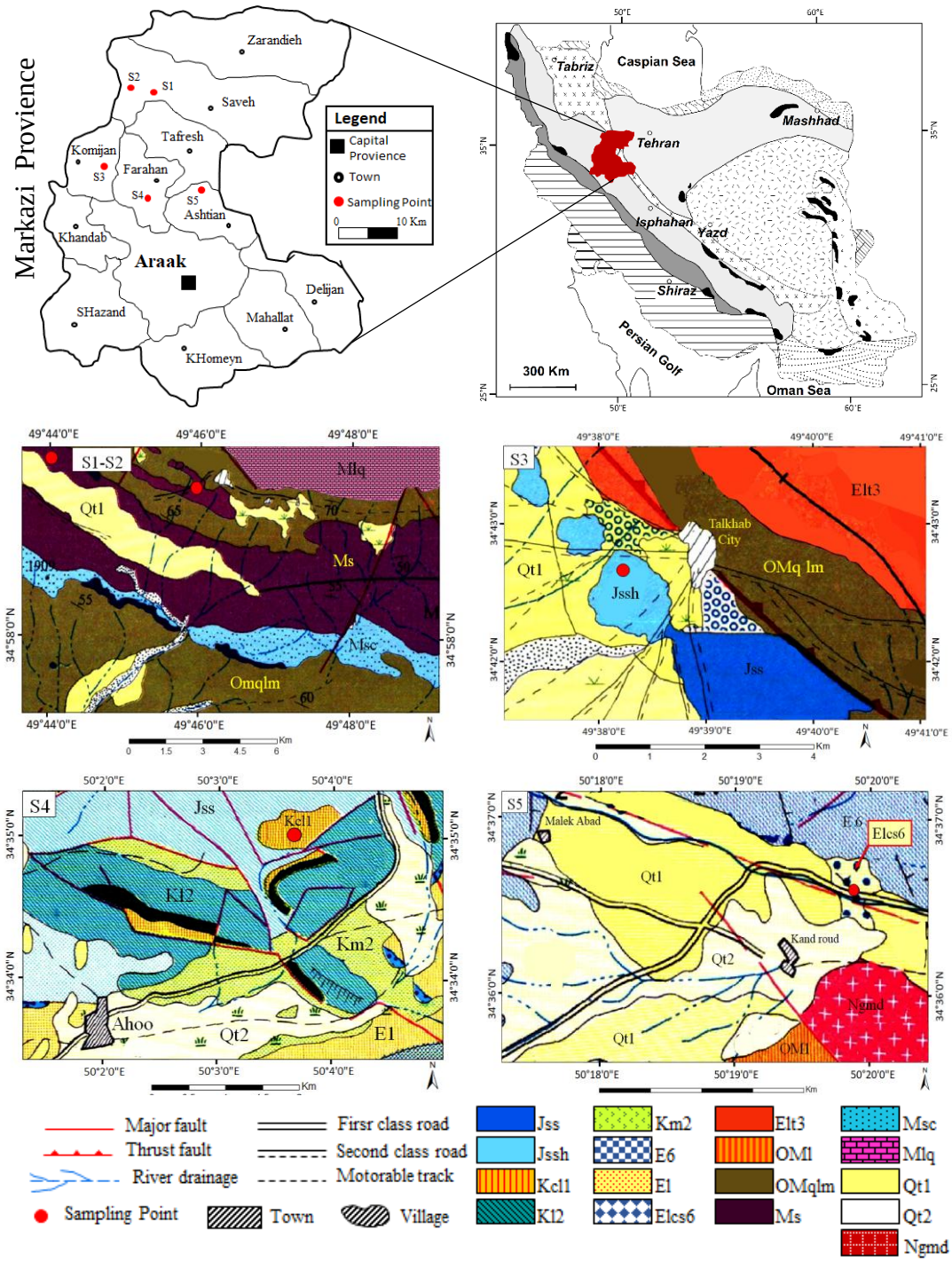
چگونگی شکست سنگ یک مساله جدی در مکانیک سنگ است. در مصالح سنگی عواملی مانند کانی‌شناسی، آرایش هندسی ذرات، حفرات و ریزترک‌ها رفتار مکانیکی سنگ را کنترل می‌کنند. مصالح سنگی شکننده با ضعف‌های اولیه مثل ریزترک‌ها و غیره تحت تنش‌های فشاری (تک‌محوره و سه‌محوره) متحمل مجموعه‌ای از فرایندهای پیچیده همچون بسته شدن ترک، شروع ایجاد ترک، رشد پایدار ترک، تشکیل ناپایدار ترک و در نهایت شکست می‌شوند (Sammis and Ashby 1986; Akesson et al., 2004; Hudyma et al., 2004; Basu 2006; Szwedzicki 2007; Basu et al., 2009).

تعیین خصوصیات توده سنگ مستلزم شناخت ویژگی‌های پتروگرافیکی سنگ بکر است. خصوصیات مکانیکی توده‌های سنگی تحت تاثیر ناپیوستگی‌هایی مانند سطوح ضعف، تغییرات کانی‌شناسی، صفحات لایه‌بندی، ترک‌ها و شکاف‌ها می‌باشد. همچنین رفتار نمونه‌های سنگ بکر در مقیاس آزمایشگاهی تحت تاثیر ناپیوستگی‌های میکروسکوپی همچون ریزترک‌ها می‌باشد. وجود ناپیوستگی‌های میکروسکوپی موجب تغییر در مقادیر خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری تک‌محوره می‌گردد، حتی زمانیکه نمونه‌های مورد آزمایش ترکیب کانی‌شناسی یکسانی داشته باشند (Szwedzicki and Shamu, 1996). عموما ناپیوستگیها در سنگ، به دو صورت اثرگذار هستند: ۱- موجب کاهش مقاومت و سختی سنگ می‌شوند. ۲- منشا آغاز ناپیوستگی‌های جدیدی هستند که به نوبه خود می‌توانند انتشار یابند و با دیگر ترک‌ها ادغام شوند و موجب کاهش بیشتر مقاومت و سختی سنگ گردند (Bobet 1997; Dyskin et al., 2003; Park and Bobet, 2010). در حال حاضر در آزمون‌های آزمایشگاهی ، اثرات ناپیوستگی‌های میکروسکوپی بر روی خواص مکانیکی در نظر گرفته نمی‌شود. پارامترهایی مانند موقعیت، جهت‌یابی، اندازه، تراکم و وسعت ناپیوستگی‌های میکروسکوپی، کنترل‌کننده الگوهای مختلف شکست در نمونه‌های سنگی هستند (Szwedzicki and Shamu, 1999). در بررسی مقاومت سنگ، معمولا به الگوی شکست نمونه و توده سنگ به اندازه کافی توجه نمی‌شود. در حالیکه این پارامتر می‌تواند دلیل محدوده تغییرات وسیع در مقادیر مقاومت بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی نمونه‌های سنگی را توضیح دهد. البته الگوهای شکست پیچیده هستند و پیش‌بینی آنها دشوار است. تلاش‌هایی برای بررسی و طبقه‌بندی الگوهای مختلف شکست در نمونه‌های استوانه‌ای صورت گرفته است (Basu et al., 2013; Szwedzicki 2003). استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی مصالح سنگی می‌تواند در شناخت الگوهای شکست مفید باشد. با درک اثر الگوی شکست بر روی مقاومت سنگ تفسیر مناسبتری از نتایج آزمون‌های مقاومتی آزمایشگاهی بدست می‌آید. مطالعه جامع الگوهای شکست به منظور پایدارسازی مهندسی تودههای سنگی بسیار ضروری است. این امر به شناخت و طراحی مناسب تقویت کننده‌ها بر اساس نوع سازه‌های مهندسی کمک می‌کند. به منظور بررسی الگوهای شکست در انواع مختلفی از سنگ‌ها، تحت فشارهای تک‌محوره و سه‌محوره مطالعاتی انجام شده است. در تست‌های سه محوره اثر فشارهای محصور اعمال شده بر روی الگوی شکست سنگ بررسی شده است. در فشارهای محصور صفر (تحت مقاومت فشاری تک‌محوره) سنگ به صورت جداشدگی محوری (Spilliting) می‌شکند. در فشارهای محصور کم تا متوسط سنگ معمولا در امتداد صفحات برشی مجزا یا متقاطع می‌شکند. در حالیکه در فشار محصور بالا شکست در امتداد چندین صفحه برشی رخ می‌دهد (Jaeger and Cook, 1979; Santarelli and Brown, 1989; Klein et al., 2001). نتایج مطالعات باسو (Basu, 2013) و سویزسکی (Szwedzicki, 2007) نشان داد که حتی اگر نمونه‌ها با ترکیب کانی‌شناسی یکسان تحت آزمایش قرار بگیرند، ممکن است محدوده تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره زیاد باشد و الگوهای شکست مختلفی دیده شود. این امر ناشی از تفاوت در ناپیوستگی‌های میکروسکوپی بویژه ریزترک‌ها است. ماجی (Majji, 2011) در گرانیت‌ها،

الگوهای شکست متفاوتی همچون جداشدگی در امتداد یک صفحه دور از محور مرکزی، جداشدگی در امتداد چندین صفحه کششی موازی محور مغزه و شکست در امتداد صفحات برش را مشاهده کرد. او نشان داد که نوع الگوی شکست سنگ تحت فشار اعمالی، مقاومت نمونه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مقاومت فشاری تک‌محوره برآوردی از حداقل مقاومت مصالح سنگی تحت فشار را بدست می‌دهد. بنابراین الگوهای شکست مصالح سنگی تحت فشار تک‌محوره می‌تواند اطلاعات مفیدی برای طراحی ایمن و اقتصادی سازه‌های مهندسی فراهم آورد. توده سنگ را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های سنگ بکر که توسط ناپیوستگی‌ها از یکدیگر جدا شده‌اند در نظر گرفت. یکی از بزرگترین چالش‌هایی که در علم مکانیک سنگ وجود دارد، تعیین خواص مکانیکی توده‌های سنگی است. دلیل این مشکل، ماهیت ذاتا متغیر اجزا تشکیل دهنده توده سنگ، سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها می‌باشد که منجر به تفاوت‌های زیادی در مقاومت و تغییرشکل‌پذیری آنها می‌شود، حتی زمانی که نمونه از یک سنگ بکر و از یک زون تهیه می‌شود. مطالعات عددی بسیاری با استفاده از تکنیک‌های مختلف به شکل موفقیت‌آمیزی به منظور مدل‌سازی فرایند شکست به کار برده شده است. این امر منجر به پیشرفت قابل توجهی در درک فرایند شکست سنگ‌های شکننده شده است (Taoying 1989). از آنجا که انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا، زمان‌بر و پرهزینه هستند لذا مدل‌سازی عددی رویکرد مناسبی برای درک بهتر آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشند (Mogi 2007). نرم‌افزار PFC2D از گروه المان مجزا (DEM) می‌باشد که در آن سنگ بکر به صورت مجموعه‌ای از ذرات مجزا (دایره‌ای شکل در PFC2D و کروی شکل در PFC3D) که در نقاط تماس به یکدیگر متصل شده‌اند، شبیه‌سازی می‌گردد. یکی از ویژگی‌های بارز این نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی، ایجاد، گسترش و ادغام ترک است که موجب شده این نرم‌افزار، ابزار توانمندی برای درک فرایند مکانیزم شکست سنگ‌ها تحت رژیم‌های مختلف بارگذاری باشد (Potyondy & Cundall, 2004; Bahaaddini, et al., 2013). هدف از این مطالعه، شناخت الگوهای شکست در تیپ‌های مختلفی از ماسه سنگ‌ها، تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره و بررسی ارتباط میان الگوهای شکست و مقادیر UCS می‌باشد.در واقع این مطالعه تلاشی در راستای کمی‌سازی تاثیر الگوهای شکست بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر می‌باشد. در این پژوهش، همچنین سعی شده است با شبیه‌سازی عددی نمونه‌های ماسه‌سنگی از تیپ‌های مختلف تحت شرایط بارگذاری فشاری تک‌محوره، الگوهای شکست و ارتباط میان مقاومت سنگ با الگوهای شکست رخ داده مورد بررسی قرار گیرد.

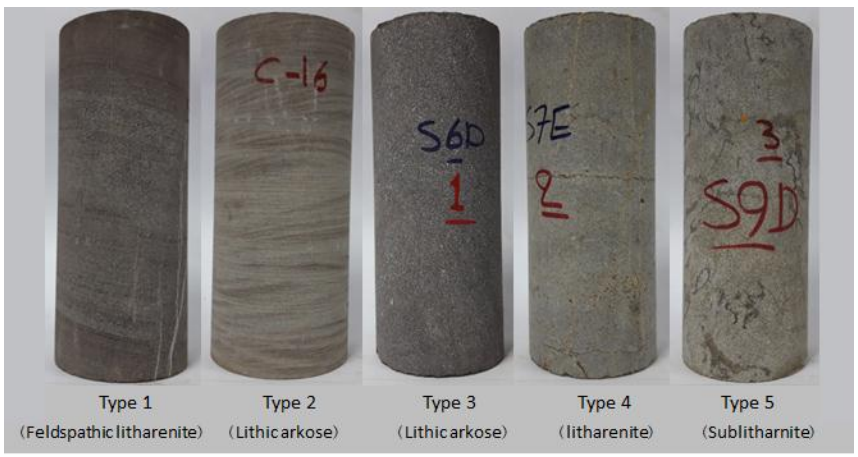
۲. مواد و روش ها

نمونه‌های بلوکی با ابعاد تقریبی 30×50×50 cm از تیپ‌های متفاوت ماسه سنگ‌ها از محل رخنمون‌ها و ترانشه‌های موجود در امتداد جاده‌ها در بخش شمالی استان مرکزی جمع آوری شدند. نقشه زمین‌شناسی و موقعیت نقاط نمونه برداری در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۲ محل‌های نمونه‌برداری و تعدادی از بلوک‌های جمع‌آوری شده نشان داده شده است. شرایط متفاوت نقاط نمونه برداری از نظر رسوب‌گذاری، دیاژنز و تکتونیک منجر به ایجاد طیف وسیعی از خصوصیات پتروگرافیکی در ماسه سنگ‌های مورد مطالعه شده است. بطوریکه بر اساس تغییرات ظاهری (تفاوت در رنگ، بافت و اندازه ذرات نمونه‌ها) ماسه سنگ‌های انتخاب شده به ۵ تیپ مختلف تقسیم‌بندی شدند (شکل ۳ و جدول۱).



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی مناطق مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

شکل ۲. تصویر برخی از محل‌های نمونه‌برداری و بلوک‌های اخذ شده جهت انجام مطالعه حاضر



شکل ۳. تیپ‌های مختلف ماسه سنگ‌های مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات ماسه سنگ‌های جمع‌آوری شده

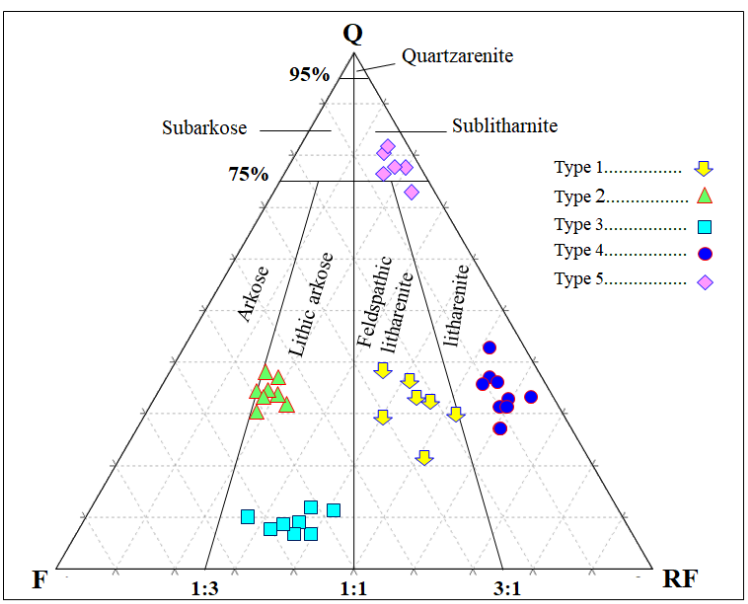
Type	Folk Classification	Geological Formation	Geological Age
1	Feldspathic litharenite	Upper Red	Miocene
2	Lithic arkose	Upper Red	Miocene
3	Lithic arkose	Eocene rocks	Eocene
4	litharenite	Cretaceous rocks	Cretaceous
5	Sublitharnite	Shemshak	Jurassic

برای انجام مطالعات پتروگرافیکی، مقاطع نازک از بلوک‌های جمع‌آوری شده تهیه گردید. به منظور تهیه تصاویر دیجیتالی، از دوربین دیجیتالی ۱۰ Mp (مدل NETWORK CAMERA- SAMSUNG iPOLIS) متصل به میکروسکوپ استفاده شده است. مطالعات پتروگرافیکی شامل بررسی کانی‌شناسی دانه و سیمان و تحلیل مدال برای تعیین درصد حجمی هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده ماسه سنگ‌ها می‌باشد. به منظور انجام تحلیل‌های مدال از تکنیک نقطه شماری ارائه شده توسط گزی-دیکنسون استفاده شده است (Ingersoll et al., 1984). بدین منظور حدود ۷۰۰ نقطه از چند میدان دید تصادفی در هر مقطع نازک شمارش و ویژگی‌های ترکیبی آن بررسی گردید. تعداد دانه‌های برداشت شده در هر مقطع بین ٤۰۰ تا ٦۰۰ دانه می‌باشد و بقیه شامل سیمان، ماتریکس و حفرات است. برای تعیین میانگین اندازه ذرات ۳۰۰ دانه به صورت تصادفی از چند میدان دید هر مقطع نازک انتخاب شدند. متوسط اندازه‌گیری دو محور عمود بر هم که از مرکز هر دانه عبور می‌کند به عنوان میانگین اندازه ذرات هر مقطع در نظر گرفته شد. خصوصیات فیزیکی ماسه سنگ‌های مورد مطالعه شامل وزن مخصوص (Gs)، چگالی خشک و اشباع (γd , γsat)، تخلخل (n) و سرعت موج (Vp) می‌باشد. اندازه‌گیری تخلخل و چگالی ذرات جامد با استفاده از روش اشباع و غوطه‌وری انجام شده است. تمامی نمونه‌ها بر اساس روش استاندارد پیشنهاد شده توسط (ISRM, 1981) مورد آزمایش قرار گرفتند. برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای شکل، بلوکهای جمع آوری شده، مغزه گیری شدند. مغزه‌های استوانه‌ای شکل با قطر NX=54 mm از بلوک‌های جمع‌آوری شده بدست آمد. سطوح انتهایی نمونه‌ها بریده و صیقل داده شدند تا کاملا صاف شوند، بطوریکه دو سطح بالا و پایین نمونه موازی شده و عمود بر محور طولی نمونه باشند تا توزیع تنش در سراسر دو سطح نمونه به صورت یکنواخت باشد. به منظور تعیین خصوصیات مکانیکی ماسههای مورد مطالعه، آزمایش UCS مطابق با استاندارد پیشنهاد شده (ISRM, 1981) انجام شد. همچنین به منظور شبیه‌سازی فرایند شکست و نیز الگوهای شکست از نرم‌افزار کد جریان ذره دو بعدی (PFC^{2D}) استفاده شد. این نرم‌افزار می‌تواند مصالح سنگی را به صورت یک مجموعه متراکمی‌از دیسک‌های کروی با توزیع اندازه غیریکنواخت نشان دهد. به منظور طبقه‌بندی ماسه سنگ‌های مورد مطالعه از طبقه‌بندی ارائه شده توسط فولک (Folk., 1980) استفاده شده است. بر این اساس، ماسه سنگ‌های تیپ ۱، ۲، ۳، ٤ و ۵ به ترتیب فلدسپاتیک‌لیتارنایت، لیتیک‌آرکوز، لیتیک‌آرکوز، لیتارنایت، و ساب‌لیتارنایت می‌باشند (شکل ٤).

۲-۱. کانی‌شناسی

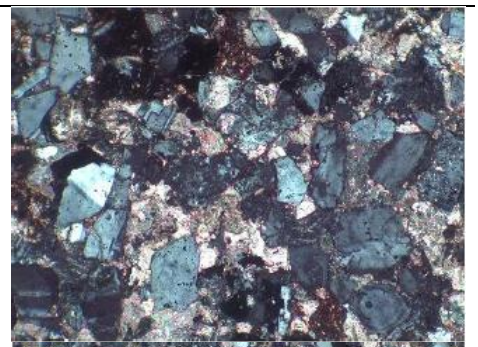
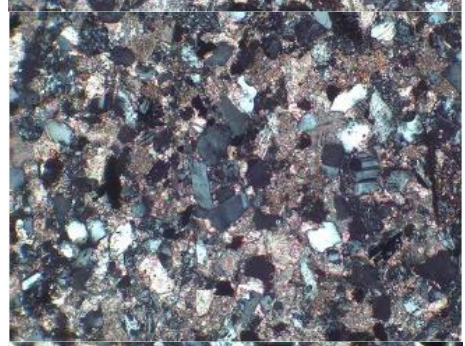
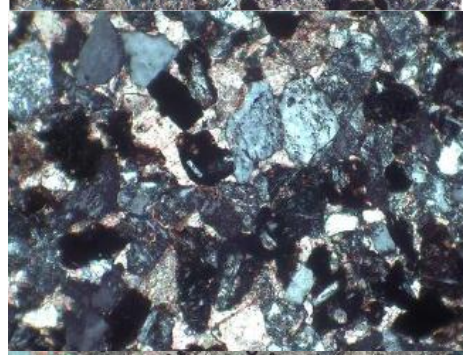
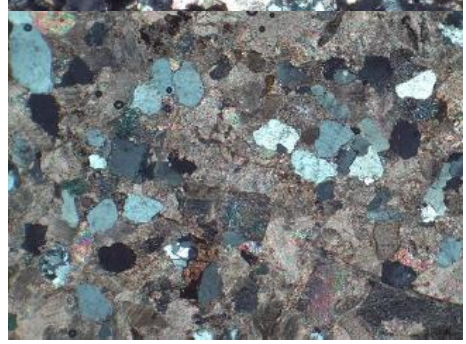
برای تعیین ترکیب کانی‌شناسی ماسه سنگ‌های مورد مطالعه، مقاطع نازک تهیه شده از هر بلوک (۳۸ مقطع نازک) مطالعه شدند که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. انواع دانه‌های کوارتز از ۵ درصد (تیپ ۳) تا ۵۷ درصد (تیپ ۵) تغییر می‌کند. فلدسپات‌ها در ماسه‌های مورد مطالعه، بین ۱ درصد (تیپ ۵) تا ٤۳ درصد (تیپ ۳) ترکیب کانی‌شناسی را تشکیل می‌دهند. خرده‌های سنگی مشاهده شده در ماسه سنگ‌ها مورد مطالعه به ترتیب فراوانی عبارتند از قطعات سنگی رسوبی از نوع کربناته، چرت و گلوکونیت، خرده‌های سنگی ولکانیکی (آتشفشانی) و در نهایت قطعات سنگی دگرگونی می‌باشد. در ماسه سنگ‌های مورد مطالعه سیمان

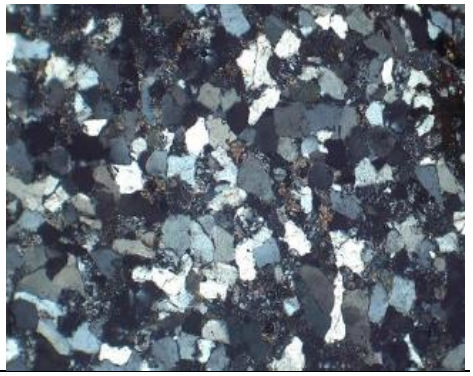
عمدتا از نوع کربناته (سیمان کلسیتی) (٨٦ درصد) و مقدار کمتری سیمان اکسید آهن (١٤ درصد) می‌باشد. میزان ماتریکس در ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه از ١ درصد (تیپ ٤) تا ٣١ درصد (تیپ ٥) در تغییر است. تخلخل در این ماسه سنگ‌ها عمدتا از نوع بین دانه‌ای است و نوع درون دانه‌ای مقادیر بسیار کمتری دارد. فضای خالی صفر درصد (تیپ ٤) تا ٥ درصد (تیپ ٢) از ترکیب مدال ماسه سنگ‌ها را تشکیل می‌دهد. در ماسه سنگ‌های نوع فلدسپاتیک لیتارنایت (تیپ ١) ذرات بسیار زاویه‌دار تا زاویه‌دار بوده و جورشدگی آنها خیلی خوب تا خوب می‌باشد که مبین تشکیل در یک محیط با انرژی بالا (محیط رودخانه‌ای) است. به موجب فراوانی ذرات آواری در مقایسه با سیمان و ماتریکس، بافت از نوع دانه‌پشتیبان می‌باشد. تماس‌های بین دانه‌های در ماسه سنگ‌های لیتیک‌آرکوز (تیپ ٢) بسیار کم هستند و ذرات درهم قفل‌شدگی پایینی نشان می‌دهند (بافت ماتریکس‌پشتیبان). ذرات بسیار زاویه‌دار بوده و از جورشدگی بسیار خوب تا خوبی برخوردارند. در ماسه سنگ‌های تیپ٣، ذرات آواری (کلست‌ها) در مقایسه با سیمان و ماتریکس فراوان‌تر هستند (بافت دانه پشتیبان). درهم قفل‌شدگی ذرات شدید بوده و بسیار زاویه‌دار هستند. جورشدگی ذرات خوب تا بسیار خوب است. در نمونه‌های لیتارنایتی (تیپ ٤) بافت از نوع دانه‌پشتیبان است و ذرات در زمینه‌ای از سیمان پراکنده هستند و سیمان فضای بین آنها را پر کرده است. درهم قفل‌شدگی ذرات کم است (تراکم پایین) و عمدتا نیمه گردشده تا گردشده با جورشدگی خوب تا بسیار خوب هستند که به معنی فاصله زیاد حمل ذرات از محل سنگ منشا تا محیط رسوب‌گذاری است. اجزای اصلی ساب‌لیتارنایت‌ها (تیپ ٥) به ترتیب کوارتز، ماتریکس، خرده‌های سنگی، سیمان (عمدتا اکسید آهن) و فلدسپات است. بافت در این تیپ از نوع دانه‌پشتیبان است و ذرات درهم قفل‌شدگی بسیار شدیدی دارند. ذرات زاویه‌دار تا نیمه گردشده هستند و جورشدگی خوبی دارند.



شکل ٤. ترکیب سنگ‌شناسی ماسه سنگهای مورد مطالعه بر اساس فولک (Folk, 1980)

جدول ۲. خلاصه مطالعات کانی‌شناسی ماسه سنگ‌های مورد مطالعه

Type	Folk Classification	Particle size	sample no.	Mineralogy	Thinsection image
Type 1	Feldspathic litharenite	Very fine to fine grain	24	Quartz: 14-24 % Feldspar: 11-18 % Rock fragment: 20-34 % Heavy minerals: 6-12 % Matrix: 1-5 % Total cement: 21-35 % Void: 0-1 %	
Type 2	Lithic arkose	Very fine grain	21	Quartz: 11-16 % Feldspar: 15-23 % Rock fragment: 5-9 % Heavy minerals: 2-4 % Matrix: 5-10 % Total cement: 42-53 % Void: 2-5 %	
Type 3	Lithic arkose	fine grain	24	Quartz: 5-8 % Feldspar: 35-43 % Rock fragment: 19-30 % Heavy minerals: 7-10 % Matrix: 6-1 % Total cement: 13-23 % Void: 0-1 %	
Type 4	litharenite	moderate to coarse grain	27	Quartz: 17-26 % Feldspar: 2-7 % Rock fragment: 32-40 % Heavy minerals: 0-1 % Matrix: 1 % Total cement: 35-41 % Void: 0 %	

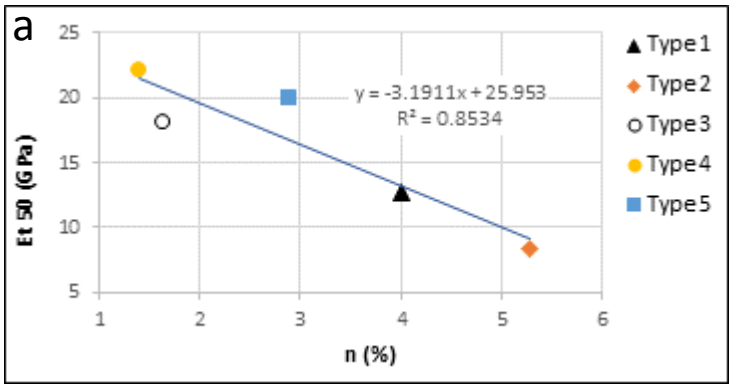
Type 5	Sublitharnite	fine grain	18	Quartz: 57-49 % Feldspar: 1-4 % Rock fragment: 10-16 % Heavy minerals: 0 % Matrix: 25-28 % Total cement: 3-6 % Void: 0-1 %	

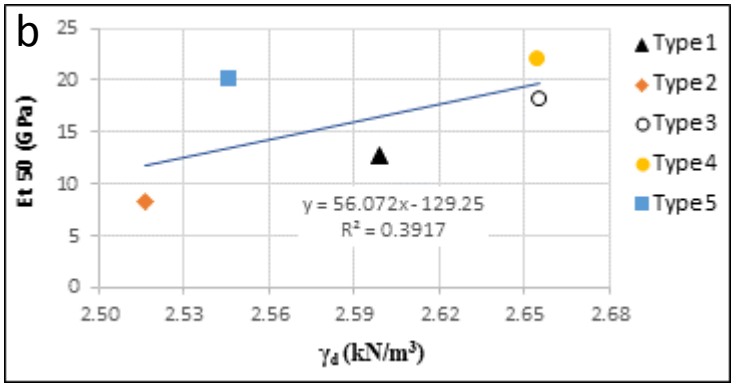
۲-۲. تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

نتایج مربوط به پارامترهای فیزیکی هر یک از تیپ‌های ماسه سنگی در جدول ۳ ارائه شده است. آزمایش های انجام شده جهت تعیین خصوصیات فیزیکی، بر اساس روش استاندارد پیشنهاد شده توسط (ISRM, 1981) می‌باشند. همچنین آزمایش مقاومت فشاری تک محوره (UCS) بر اساس استاندارد (ISRM, 1981) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با نسبت طول به قطر برابر ۲/۵ تا ۳ (سرعت بارگذاری MPa/s ۱-۰/۵) انجام شده است. دامنه تغییرات چگالی خشک (γ_d) نمونهها ۲/٦۸-۲/٤۸ و چگالی اشباع (γ_{sat}) ۲/٦۹-۲/۵۱ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. مقادیر تخلخل موثر (n) از ۵/۷٦-۱/۲۰ درصد متغیر است. بالاترین مقادیر میانگین سرعت موج (Vp) مربوط به نمونه های لیتارنایت (تیپ ٤) می‌باشد (۵۲۱۱ متر بر ثانیه) و پس از آن تیپ‌های ۳ (٤۷۸۹ متر بر ثانیه)، ۵ (٤٦۲۵ متر بر ثانیه)، ۱ (۳۷۵۷ متر بر ثانیه) و ۲ (۳۲۳۱ متر بر ثانیه) قرار دارند. بالاترین مقدار متوسط وزن مخصوص (Gs) مربوط به تیپ ۱ (۲/۷۱) می‌باشد. به نظر می‌رسد بالا بودن وزن مخصوص تیپ ۱ در ارتباط با مقادیر بالای کانی‌های سنگین اوپک (۸/۷۵ درصد) در این تیپ باشد. متوسط مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) از Mpa ۹۰ برای تیپ ۲ (لیتیک‌آرکوز) تا Mpa ۱۵۰ برای تیپ ۵ (ساب‌لیتارنایت‌ها) در تغییر است. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط (Deere and Miller, 1966) ماسه سنگ‌های مورد مطالعه در رده سنگ‌هایی با مقاومت متوسط (تیپ‌های ۱ و۲) تا بالا (تیپ‌های ۳، ٤ و ۵) قرار می‌گیرند. به نظر می‌رسد که مقاومت پایین تیپ ۲ عمدتا ناشی از تخلخل زیاد و پارامترهای بافتی ضعیف این تیپ باشد. ماسه سنگ‌های تیپ ٤ بالاترین مقدار میانگین مدول یانگ مماسی (E_{t50}) را نشان دادند (۲۲ Gpa). تیپ‌های ۵، ۳، ۱ و ۲ به ترتیب با ۲۰ Gpa، ۱۸/۱، ۱۲/۷ و ۸/۳ در رده‌های بعدی قرار دارند. بر اساس طبقه بندی آنون (Anon, 1979) این ماسه سنگ‌ها دارای تغییرشکل‌پذیری (Deformability) متوسط (تیپ های ۳، ٤ و ۵) تا بالا (تیپ‌های ۱ و ۲) هستند. بر این اساس مشاهده می‌شود که بالاترین مدول یانگ با مقدار متوسط ۲۲ Gpa مربوط به نمونه‌های ماسه‌سنگ لیتارنایت (تیپ ٤) است. در حالیکه کمترین مقدار متوسط مدول یانگ با ۸/۳ Gpa به لیتیک‌آرکوزهای تیپ ۲ تعلق دارد که با توجه به تخلخل بالا و پارامترهای بافتی ضعیف (مانند در هم قفل‌شدگی ضعیف و تراکم پایین و...)، این موضوع قابل پیش‌بینی می‌باشد. بر اساس نتایج، بیشترین و کمترین میزان تغییر شکل‌پذیری، مربوط به تیپ‌های ۲ و ٤ به ترتیب با مقدار متوسط مدول یانگ ۸/۳ GPa و ۲۲ می‌باشد. ماسه‌سنگ تیپ ٤ (لیتارنایت‌ها) علیرغم مقاومت فشاری کمتر نسبت به تیپ‌های ۵ و ۳ ، بالاترین مقادیر مدول الاستسیته را در بین همه تیپ‌ها نشان داد که با توجه به میزان تخلخل پایین و چگالی بالا در این تیپ، این امر قابل توجیه می‌باشد (شکل ۵). در شکل ٦ نمودار تنش-کرنش ماسه سنگ‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

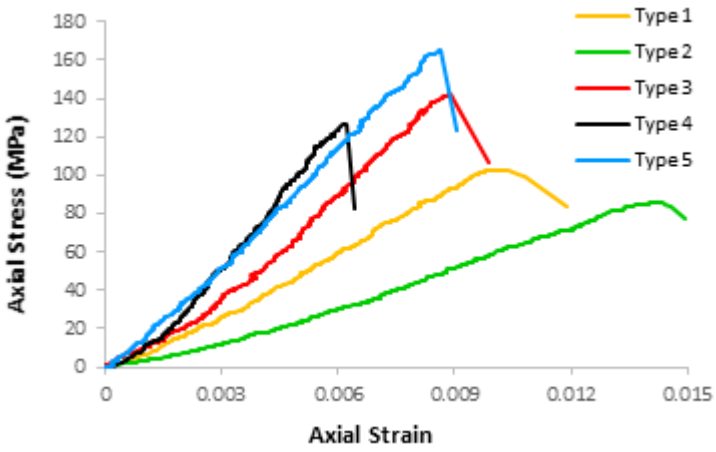
جدول ۳. ویژگی‌های مهندسی ماسه سنگ‌های مورد مطالعه

Type	Sample no.	γ_d (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	Gs	n (%)	Vp (m/s)	UCS (Mpa)	E (Gpa)
Type 1	1	2.58	2.62	2.70	4.34	3701.37	89.37	9.82
	2	2.59	2.63	2.70	4.06	3749.20	101.90	13.52
	3	2.61	2.63	2.70	3.98	3770.23	105.67	15.27
	4	2.59	2.62	2.70	4.25	3732.23	92.53	12.52
	5	2.60	2.63	2.71	4.00	3781.27	97.33	11.72
	6	2.60	2.63	2.70	4.10	3748.60	96.63	10.52
	7	2.63	2.65	2.72	3.25	3798.98	108.23	13.22
	8	2.62	2.65	2.72	3.70	3778.55	115.93	15.02
Type 2	9	2.48	2.51	2.67	5.76	3172.54	81.40	7.46
	10	2.54	2.57	2.68	5.04	3267.90	90.98	8.64
	11	2.53	2.57	2.68	5.08	3266.79	95.30	8.24
	12	2.53	2.56	2.68	4.92	3259.48	99.66	8.80
	13	2.53	2.57	2.68	4.68	3242.18	99.70	8.99
	14	2.51	2.54	2.67	5.62	3193.33	74.17	7.72
	15	2.52	2.56	2.68	5.22	3214.99	88.94	8.27
Type 3	16	2.66	2.67	2.71	1.41	4813.72	148.85	17.82
	17	2.66	2.68	2.71	1.46	4778.77	145.84	19.16
	18	2.68	2.69	2.72	1.20	4892.73	158.04	20.20
	19	2.64	2.67	2.66	1.75	4733.28	116.53	15.08
	20	2.65	2.67	2.69	1.93	4714.19	121.72	16.98
	21	2.65	2.67	2.70	1.90	4741.95	136.91	18.28
	22	2.66	2.68	2.71	1.80	4794.72	135.67	18.00
	23	2.66	2.68	2.72	1.33	4848.48	154.16	19.30
Type 4	24	2.65	2.67	2.69	1.36	5249.36	119.29	22.02
	25	2.66	2.67	2.69	1.33	5212.62	111.65	21.10
	26	2.66	2.67	2.70	1.31	5295.22	144.65	25.13
	27	2.65	2.66	2.68	1.57	5128.59	103.92	18.89
	28	2.65	2.66	2.69	1.55	5153.89	109.19	21.66
	29	2.66	2.67	2.69	1.35	5247.14	126.29	24.95
	30	2.66	2.67	2.69	1.40	5193.10	121.43	21.95
	31	2.66	2.67	2.69	1.30	5204.24	119.63	21.64
	32	2.66	2.66	2.69	1.38	5222.21	115.85	21.38
Type 5	33	2.58	2.60	2.64	2.47	4736.77	165.08	21.57
	34	2.54	2.57	2.62	2.71	4648.23	157.17	19.52
	35	2.55	2.57	2.63	2.78	4654.89	146.23	19.60
	36	2.53	2.56	2.61	3.28	4507.97	129.72	19.36
	37	2.54	2.57	2.61	3.22	4552.14	143.24	19.15
	38	2.56	2.60	2.64	2.78	4654.59	160.04	20.78
	Min	2.48	2.51	2.61	1.20	3172.54	74.17	7.72
	Max	2.68	2.69	2.72	5.76	5295.22	165.08	25.13
	Ave	2.60	2.63	2.68	2.91	4359.38	119.18	16.40
	SD	0.06	0.05	0.03	1.49	741.67	24.58	5.30





شکل ۵. تغییرات مدول الاستیسیته مماسی ماسه سنگ‌های مطالعه شده با تخلخل (a) و چگالی (b)



شکل ٦. نمایش منحنی‌های تنش-کرنش برای تیپ‌های مختلف ماسه سنگ‌های مورد مطالعه

۳. تحلیل الگوهای شکست مشاهده شده تحت آزمایش فشاری تک‌محوره

تحلیل الگوهای شکست درک صحیحی در رابطه با وضعیت تنش‌های اصلی در نمونه‌های سنگی تحت آزمایش در اختیار می‌گذارد. شکستگی‌های کششی در یک زاویه قائم نسبت به راستای تنش اصلی حداقل توسعه می‌یابند. در حالیکه این شکستگی‌ها با جهت تنش های متوسط و حداکثر هم‌راستا هستند (Szwedzicki, 2007). وجود ناپیوستگی‌های میکروسکوپی موجب بروز اثر مقیاس (مانند کاهش مقاومت با افزایش ابعاد نمونه) می‌شوند. در نمونه‌های با ابعاد بزرگتر، مقاومت نمونه بیشتر تحت تاثیر ناپیوستگی‌ها قرار گرفته و الگوی شکست عمدتا از نوع برشی رخ می‌دهد (Szwedzicki, 2007). مشخص شده است که فرایند آسیب در ابتدا بصورت ریزترک‌های کششی آغاز می‌شود که ناشی از تمرکز موضعی تنش می‌باشد. فرایند لغزش اصطکاکی در محل ریزترک‌ها به عنوان عاملی برای متمرکز کردن تنش در نظر گرفته می‌شود که موجب رشد ترک تحت تنش‌های فشاری می‌شود (Taoying, 1989). به منظور بررسی الگوهای شکست رخ داده در این پژوهش، بطور کلی تعداد ۱۱٤ نمونه ماسه سنگ تحت آزمایش فشاری قرار گرفته و آزمایش

شدند. از این تعداد ماسه سنگ، ۲٤ نمونه فلدسپاتیک‌لیتارنایت (تیپ ۱)، ۲۱ نمونه لیتیک‌آرکوز (تیپ ۲)، ۲٤ نمونه لیتیک‌آرکوز (تیپ ۳)، ۲۷ نمونه لیتارنایت (تیپ ٤) و ۱۸ نمونه ساب‌لیتارنایت (تیپ ۵) هستند. در سنگ‌های همسانگرد، نمونه‌های استوانه‌ای شکل در شرایط آزمایش فشاری تک‌محوره، بعلت تمرکز تنش‌های منطقه‌ای در اطراف ناپیوستگی‌های ریزمقیاس می‌توانند به صورت کشش، برشی و یا ترکیبی از تنش‌های کششی-برشی گسیخته شوند (Shamu and Szwedzicki, 1999). سویزسکی (Szwedzicki 2007) برای نمونه استوانه‌ای سنگ‌های سخت و شکننده پنج الگوی گسیختگی شامل کشش ساده (Simple Extension)، کشش چندگانه (Multiple Extension)، شکستگی چندگانه (Multiple Fracturing)، برش ساده (Simple Shear) و برش چندگانه (Multiple Shear) معرفی کردند. الگوی گسیختگی کشش ساده نشان دهنده گسیختگی در طول یک صفحه موازی با راستای فشار اعمال شده است. این نوع گسیختگی اغلب به ندرت اتفاق می‌افتد و مبین این است که نمونه فاقد ناپیوستگی‌های میکروسکوپی است. زمانیکه دو یا چند شکستگی به موازات محور طولی نمونه رخ می‌دهد، الگوی گسیختگی از نوع کشش چندگانه خواهد بود. شکستگی‌های چندگانه (ترکیبی کششی و برشی) در امتداد چندین صفحه با زوایای مختلف، شکل می‌گیرند. این نوع گسیختگی اغلب به صورت دینامیک و شدید بوده و با آزاد شدن مقدار زیادی انرژی همراه است. در حالتی که شکست در طول دو یا چند صفحه که نسبت به راستای اعمال فشار به صورت مورب و غیر موازی هستند رخ دهد، الگوی شکست از نوع برش چندگانه است. زمانیکه یک یا چند صفحه برشی اصلی و موازی هم نسبت به راستای فشار حداکثر به صورت مورب قرار گیرند، الگوی شکست از نوع برش ساده خواهد بود. در این حالت، سطح شکست معمولا در سراسر عرض نمونه توسعه می‌یابد. این برش همچنین می‌تواند ناشی از اعمال بار غیر یکنواخت روی نمونه باشد. در جدول ٤ انواع الگوهای گسیختگی مشاهده شده در ماسه سنگ‌های مورد مطالعه را نشان داده شده است. در نمونه‌های تیپ ۱، الگوی شکست بیشتر نمونه‌ها از نوع برشی ساده می‌باشد. الگوی شکست کششی ساده در هیچ یک از نمونه‌های این تیپ مشاهده نشده است. برای نمونه‌های این تیپ، الگوی شکست برشی ساده با ۱۲ نمونه، فراوان ترین الگوی شکست مشاهده شده می‌باشد و پس از آن الگوی شکست کششی چندگانه (٦ نمونه)، شکستگی چندگانه (۵ نمونه) و در نهایت برشی چندگانه (۱ نمونه) قرار دارند (شکل ۷a).

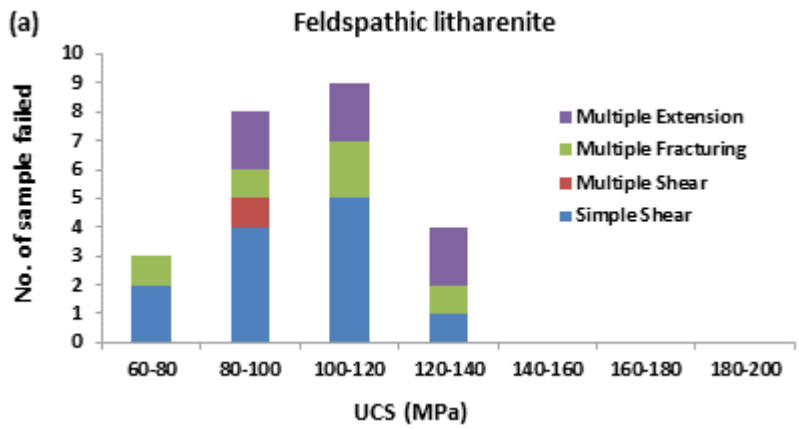
الگوی شکست غالب در نمونه‌های تیپ ۲ از نوع برشی ساده می‌باشد (۱۳ نمونه) و الگوهای شکست کششی چندگانه، برش و شکستگی چندگانه در رده‌های بعدی هستند. در این تیپ نیز همانند تیپ ۱ الگوهای شکست کششی ساده مشاهده نگردید (شکل ۷b). بیشترین الگوی شکست مشاهده شده در تیپ‌های ۳، ٤ و ۵ به ترتیب از نوع کششی چندگانه، برشی ساده و کششی چندگانه تعیین شد. الگوهای شکست برشی چندگانه در هیچ یک از تیپهای ۳، ٤ و ۵ مشاهده نگردید (شکل ۷c,d,e). همانطور که قبلا ذکر شد، محدوده تغییرات زیاد مقاومت فشاری تک‌محوره تاثیر گذار بر الگوهای مختلف شکست نمونه‌های سنگی تحت فشار محوری می‌باشد. بنابراین، تحلیل الگوهای شکست می‌تواند دلیل این محدوده تغییرات زیاد را توضیح دهد. مقادیر UCS متناظر با هر یک از الگوهای شکست مشاهده شده در هر نمونه، برای تیپ‌های مختلف ماسه سنگی در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی شکست غالب در نمونه‌های تیپ ۱، در مقادیر UCS تا ۱۲۰ مگاپاسکال از نوع برشی ساده می‌باشد در حالیکه برای نمونه‌های با مقادیر بیش از ۱۲۰ مگاپاسکال، الگوی شکست غالب از نوع کشش چندگانه است (شکل ۷aو جدول۵). برای ماسه سنگ‌های تیپ ۲، در مجموع ۲۱ نمونه تحت فشار تک‌محوره آزمایش گردیدند. از این تعداد ۱۵ نمونه در محدوده مقاومت فشاری ۱۰۰-۸۰ مگاپاسکال شکسته شدند. الگوی شکست غالب در این محدوده از نوع برشی ساده می‌باشد. سه نمونه در محدوده ۸۰-٦۰ مگاپاسکال به صورت برشی ساده گسیخته شدند.

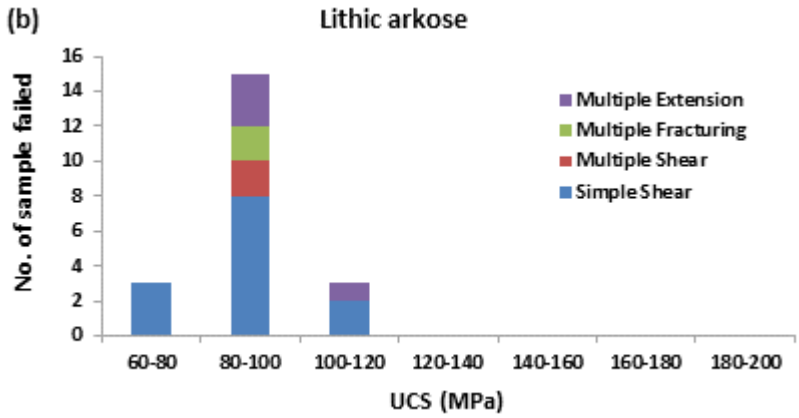
جدول ٤. انواع الگوهای گسیختگی مشاهده شده در ماسه سنگ‌های مورد مطالعه

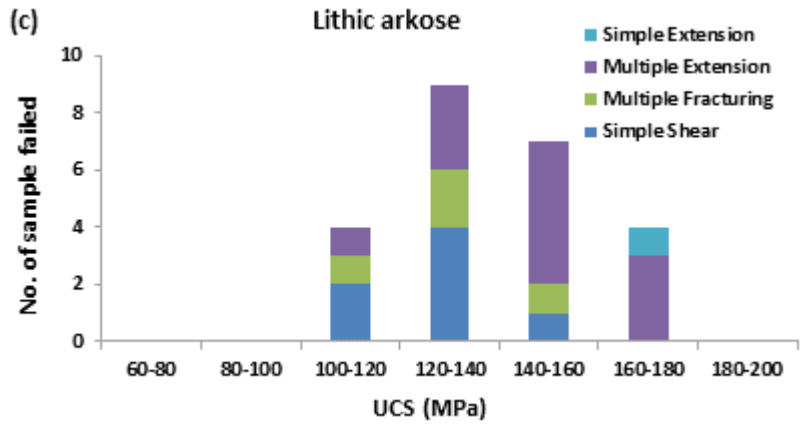
	Simple Shear	Multiple Shear	Multiple Fracturing	Multiple Extension	Simple Extension
Type 1					No observed
Type 2					No observed
Type 3		No observed			
Type 4		No observed			
Type 5		No observed			

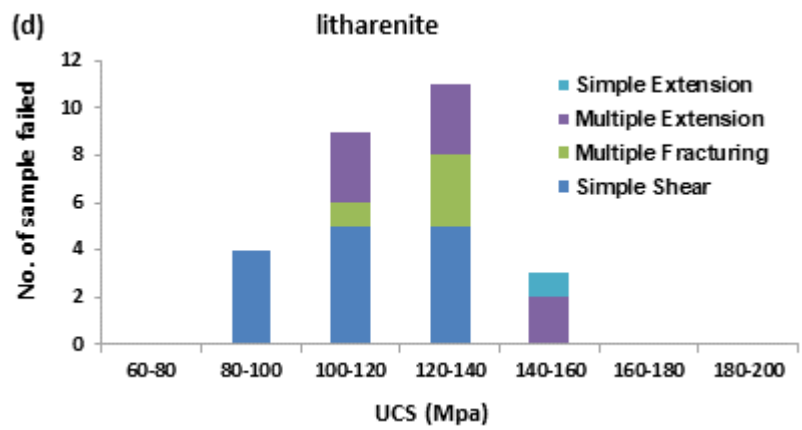
الگوی شکست برای نمونه‌های گسیخته شده در مقاومت بالای ۱۰۰ مگاپاسکال از نوع برشی ساده (۲ نمونه) و کششی چندگانه (۱ نمونه) می‌باشد (شکل ۷b و جدول۵).

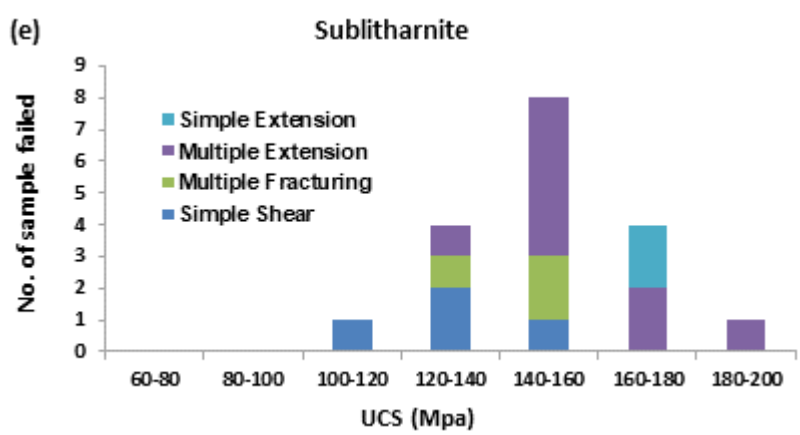
در نمونه‌های تیپ ۳، برای مقادیر UCS تا ۱٤۰ مگاپاسکال، الگوی شکست غالب از نوع برشی ساده می‌باشد. در حالیکه برای مقادیر بیشتر از ۱٤۰ مگاپاسکال الگوی شکست غالب از نوع کششی چندگانه است (شکل ۷c و جدول۵). برای تیپ ٤ تعداد ۲۷ نمونه تحت آزمایش بارگذاری تک‌محوره قرار گرفتند. برای مقاومت فشاری در محدوده ۸۰ تا ۱٤۰ مگاپاسکال، بیشترین نوع شکست از نوع برشی ساده می‌باشد (۱٤ نمونه). برای مقادیر UCS بیش از ۱٤۰ مگاپاسکال، ۳ نمونه به صورت کششی گسیخته شدند. در نمونه‌های گسیخته شده تیپ ۵، برای مقادیر UCS کمتر از ۱٤۰ مگاپاسکال، می‌توان الگوی شکست برشی ساده را به عنوان الگوی غالب در نظر گرفت (۳ نمونه از ۵ نمونه شکسته شده). برای مقادیر بیش از ۱٤۰ مگاپاسکال، الگوی شکست کششی چندگانه در بیشتر نمونه‌های این تیپ مشاهده گردید (۸ نمونه) (شکل ۷e و جدول ۵).











شکل ۷. انواع گسیختگی‌های مشاهده شده در محدوده‌های مختلف مقاومت فشاری برای ماسه سنگ‌های مورد مطالعه

جدول ۵. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره و الگوهای شکست مشاهده شده در هر یک از تیپ‌های ماسه سنگی

Sample no.	Type 1		Type 2		Type 3		Type 4		Type 5	
	UCS (MPa)	failure mode	UCS (MPa)	failure mode	UCS (MPa)	failure mode	UCS (MPa)	failure mode	UCS (MPa)	failure mode
1	90.50	SS	88.13	SS	154.77	MT	87.00	SS	143.85	MT
2	74.00	MF	83.80	SS	125.45	SS	149.16	MT	178.64	ST
3	103.60	MT	72.26	SS	166.34	MT	121.70	SS	172.74	ST
4	97.00	MS	87.46	MF	147.85	SS	95.47	SS	185.12	MT
5	121.70	SS	90.52	SS	132.66	MF	113.48	SS	134.55	MS
6	87.00	SS	94.96	SS	157.00	MT	126.00	MT	151.85	MT
7	111.00	SS	114.76	MT	137.30	MT	127.76	MT	159.61	MT
8	70.00	SS	88.65	SS	175.28	MT	157.46	MT	157.30	MT
9	136.00	MF	82.48	MS	161.54	ST	148.73	ST	121.79	MT
10	64.30	SS	100.37	MF	136.31	SS	123.35	MF	124.51	SS
11	111.30	SS	101.36	SS	108.19	MF	105.14	MT	157.86	MF
12	102.00	MF	97.25	SS	105.10	SS	83.27	SS	106.80	SS
13	95.00	MT	96.05	MT	117.16	MT	108.28	SS	148.55	MF
14	115.00	SS	104.26	MT	110.85	SS	102.55	SS	136.17	MF
15	82.00	SS	98.80	MT	137.16	MT	116.75	SS	145.00	MT
16	90.00	SS	90.24	MT	139.87	MT	126.40	MF	167.20	MT
17	104.90	SS	70.71	SS	129.22	MS	123.81	SS	165.00	MT
18	95.00	SS	61.57	SS	142.30	MT	128.70	MT	148.64	SS
19	102.63	MF	86.00	SS	122.71	SS	119.29	MF		
20	122.00	MT	84.16	SS	144.35	MF	125.64	MT		
21	100.00	SS	95.00	MS	139.96	MF	119.36	MT		
22	126.00	MT			168.47	MT	118.76	MT		
23	102.80	SS			150.25	MT	122.18	SS		
24	119.00	MT			143.76	MT	117.94	SS		
25							126.76	SS		
26							83.14	SS		
27							137.64	MF		

SS: Simple Shear, MS: Multiple Shear, MF: Multiple Fracturing, SE: Simple Extension, ME: Multiple Extension

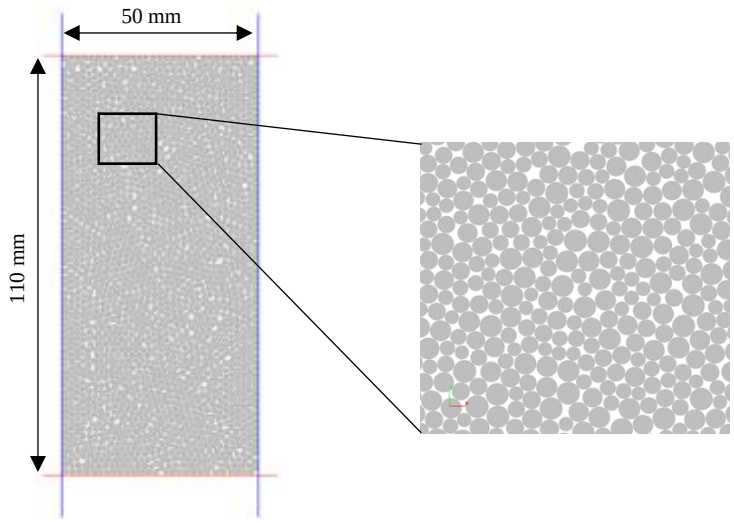
٤. کاربرد شبیه‌سازی عددی در تحلیل الگوهای شکست

قابلیت‌های روش مدل‌سازی المان مجزا (DEM) به منظور شبیه‌سازی شروع و گسترش ترک محققان را قادر ساخته است تا درک بهتری در زمینه فرآیند شکست بدست آورند. DEM سنگ را به عنوان یک آرایش متراکم‌می از ذرات سیمان شده بوسیله اتصالات نشان می‌دهد که رفتار اندرکنشی بین ذرات را شبیه‌سازی می‌کند (Xueliang et al., 2016). در این مطالعه به منظور بررسی الگوهای شکست ماسه سنگ‌های مورد مطالعه از نرم‌افزار PFC^{2D} از گروه المان مجزا استفاده گردید. این نرم‌افزار به منظور شبیه‌سازی رفتار اندرکنشی میان ذرات سنگ به کار می‌رود. برای این منظور PFC ذرات دایره ای صلب را به همدیگر متصل می‌کند و یک مجموعه‌ای از میکروپارامترها را برای ذرات و تماس‌ها به کار می‌برد (Imani et al., 2017). مدل‌های باندی اولیه (مدل پیوند تماسی و مدل پیوند موازی) در نرم افزار PFC در شبیه‌سازی سنگ‌هایی با نسبت مقاومت فشاری به کششی بالا عملکرد مناسبی ندارند و بنابراین برای توضیح رفتار سنگ‌هایی با شکنندگی بالا مناسب نیستند (Diederichs, 1999; Potyondy and Cundall, 2004; Schopfer et al., 2009; Zhang et al., 2012). مدل پیوند مسطح (FJM) توسط پوتیاندی (Potyondy, 2012) پیشنهاد شد که برای سنگ‌های شکننده مناسب است و توانست به شکل موفقیت‌آمیزی رفتار این سنگها را شبیه‌سازی کند. با توجه به حداکثر نسبت UCS/BTS معادل ١٤ در ماسه سنگ‌های مورد مطالعه در این پژوهش، مدل FJM به عنوان روش مناسب برای شبیه‌سازی رفتار این سنگ‌ها انتخاب گردید.

٤-١. ساخت و کالیبراسیون مدل عددی

در این بخش ابتدا مدل‌های عددی ساخته شدند و سپس برای اینکه رفتار ماکرومکانیکی مدل‌های عددی ساخته شده مشابه

رفتار ماکرومکانیکی نمونه‌هاای آزمایشگاهی باشد، این مدل‌ها کالیبره شدند. فرایند ساخت مدل در PFC^{2D} شامل تولید ذرات، تراکم اولیه ذرات، اعمال یک تنش ایزوتروپیک پایین، حذف ذرات شناور و در نهایت نصب یک مدل باندی مناسب می‌باشد (Potyondy and Cundall, 2004: Itasca, 2004). برای انجام مدل‌سازی عددی نمونه‌هایی با ارتفاع ۱۱۰ و عرض ۵۰ میلی متر تهیه شدند (شکل ۸). فرایند تهیه نمونه شامل ایجاد مجموعه ای از ذرات دایروی متراکم، غیر هم‌اندازه با اتصال مناسب و نصب باند در نقاط تماس بین ذرات می‌باشد. برای این منظور ابتدا محدوده اطراف مدل که شامل دیواره‌هایی فاقد اصطکاک می‌باشد ایجاد شده و این محفظه با دیسک‌هایی با موقعیتی کاملا تصادفی پر می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸. محفظه حاوی ذرات تشکیل دهنده نمونه عددی برای آزمایش فشاری تک‌محوره

اندازه ذرات با استفاده از دو پارامتر حداقل و حداکثر شعاع ذرات کنترل می‌گردد، بگونه‌ای که نسبت شعاع حداکثر به شعاع حداقل ۱/٦٦ می‌باشد و توزیع اندازه ذرات به صورت نرمال است. پس از ساخت مدل خواص میکروپارامترها کالیبره شدند. فرایند کالیبراسیون نیازمند استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد بگونه‌ای که رفتار ماکرومکانیکی مدل های عددی مشابه رفتار ماکرومکانیکی نمونه سنگ مورد نظر باشد. در این مطالعه به منظور کالیبره کردن میکروپارامترهای ذرات و باندهای مسطح از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده گردید (جدول ٦). برای رسیدن به خواص ماکروسکوپی مطلوب، آزمایش UCS در نرم‌افزار PFC^{2D} شبیه سازی شد و با استفاده از فرایند سعی و خطا یک مجموعه مناسبی از میکروپارامترها بدست آمد. در مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار PFC^{2D} اولین مرحله قبل از انجام آزمایش‌ها، تعیین خواص میکروپارامترها است. از آنجا که خواص ذرات و باند بین آنها (میکروپارامترها) متفاوت از رفتار بزرگ مقیاس سنگ‌ها است. تعیین میکروپارامترها یکی از چالش‌های این روش است که غالبا از طریق کالیبراسیون تعیین می‌گردد. در این روش میکروپارامترها بگونه‌ای انتخاب می‌گردند که خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه بدست آید. پارامترهای کالیبره شده برای تیپ‌های مختلف ماسه سنگی در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ٦. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره تیپ‌های مختلف ماسه سنگ‌های مورد مطالعه

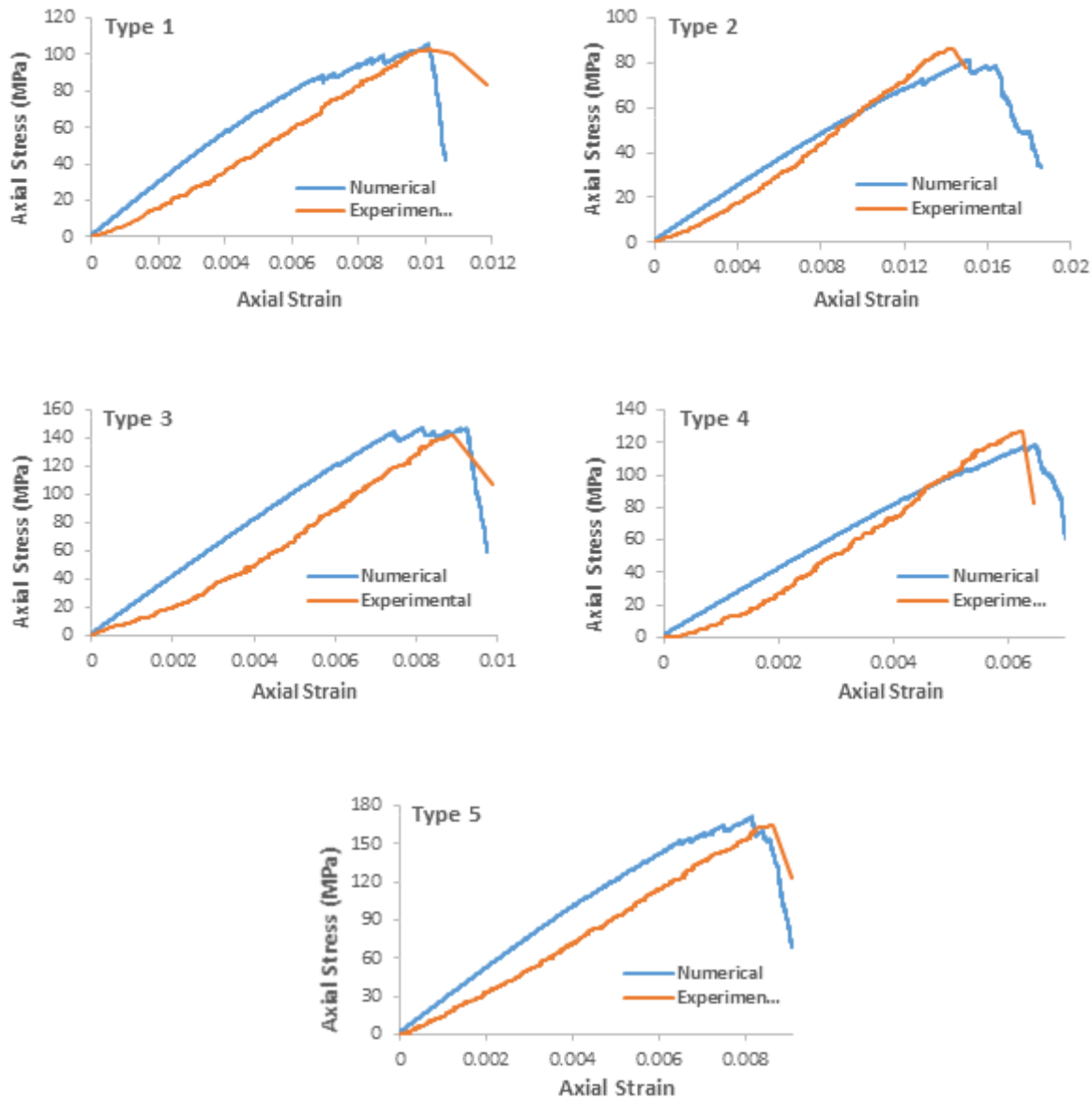
Macro-mechanical properties	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Uniaxial compressive strength at peak (MPa)	102.63	86	142.3	126.4	165
Axial strain at peak (%)	1.01	1.41	0.89	0.62	0.86
Elasticity modulus (GPa)	10.5	7	18.5	21.6	20

جدول ۷. میکروپارامترهای تعیین شده به منظور کالیبراسیون مدل

Microparameter	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Number of ball	10542	12626	10011	8048	9030
Density (kg/m^3)	2603	2525	2657	2654	2657
Minimum ball diameter, d_{min} (mm)	0.6	0.55	0.62	0.69	0.65
Maximum to minimum ball diameter ratio, d_{max}/d_{min}	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
Young's modulus E, (GPa)	31	45	54	62	65
Normal to shear stiffness ratio	1.25	3.6	3.33	5	4
Friction coefficient	0.62	0.5	0.7	0.65	0.7
Normal strength, mean (MPa)	57	44	75	60	88
Normal strength, SD (MPa)	30	20	35	30	36
Shear strength, mean (MPa)	119	107	180	152	208
Shear strength, SD (MPa)	40	45	74	50	75

شعاع ذرات دایره‌ای (دیسک‌ها یا کره‌ها) و چگونگی توزیع آنها از پارامترهای مهم ورودی مساله می‌باشند. با توجه به اطلاعات حاصل از تعیین اندازه ذرات برای هر تیپ و نیز در نظر گرفتن محدودیت تعداد دیسک‌های مورد استفاده در نرم‌افزار PFC^{2D} جهت مدل‌سازی آزمایش UCS، مقدار حداکثر و حداقل قطر دیسک‌ها متناسب با میانگین اندازه ذرات برای هر تیپ تعیین شد. بطوریکه نسبت بین حداکثر و حداقل شعاع ذرات ۱/٦٦ می‌باشد و ذرات دارای توزیع نرمال هستند. با توجه به یکسان نبودن میانگین اندازه ذرات در ماسه سنگ‌های مورد مطالعه، تعداد دیسک‌های ایجاد شده در مدل‌های عددی تیپ‌های مختلف متفاوت از یکدیگر هستند. ماسه سنگ‌های تیپ ٤ با بیشترین میانگین اندازه ذرات، کمترین تعداد دیسک را به خود اختصاص دادند (۸۰٤۸). در حالیکه ماسه سنگ‌های تیپ ۲، با کمترین میانگین اندازه ذرات، بیشترین تعداد دیسک را در مدل عددی ساخته شده دارند (۱۲٦۲٦). لازم به ذکر است که زمان آنالیز در مرحله ساخت مدل و بارگذاری به شدت به ابعاد و تعداد دیسک وابسته است که با افزایش تعداد دیسک‌ها، زمان آنالیز نیز بیشتر می‌شود. مقادیر دانسیته دیسک‌ها برابر مقادیر آزمایشگاهی و یا مقداری نزدیک به آن انتخاب گردیدند.نرخ کرنش در مدلهای عددی ساخته شده، ۰/۰۱٦ m/s در نظر گرفته شد تا نمونه به صورت شبه استاتیکی رفتار کند. به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده با مدل سازی عددی، بررسی همبستگی میان رفتارماکرومکانیکی (منحنی تنش- کرنش محوری، مقاومت تک محوری حداکثر (پیک) و مدول الاستیسیته، الگوی شکست نهایی و فرایند ادغام ترک) نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی الزامی‌می‌باشد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی نمونه‌های ماسه سنگی تحت فشار تک‌محوره در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطوریکه در این شکل دیده می‌شود منحنی‌های تنش- کرنش شبیه‌سازی شده به صورت عددی تطابق خوبی با منحنی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند. منحنی‌های تنش- کرنش عددی و آزمایشگاهی در قسمت ابتدایی منحنی‌ها تطابق کمتری دارند. منحنی های تنش کرنش آزمایشگاهی در سطوح پایین تنش یک تقعر رو به پایین از خود نشان می‌دهند که بیانگر تغییر شکل غیرخطی در این فاز است. این رفتار،

عمدتا ناشی از بسته شدن برخی ترک‌های اولیه (از پیش موجود)، حفرات و منافذ در نمونه‌های تحت آزمایش است. مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول الاستیسیته بدست آمده از شبیه‌سازی عددی نمونه‌های بکر تقریبا معادل مقادیر حاصل از نتایج آزمایشگاهی است. همچنین حداکثر کرنش نمونه‌های بکر حاصل از شبیه‌سازی عددی نیز تقریبا معادل مقادیر آزمایشگاهی این پارامتر است. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر با مقاومت نهایی برای پنج مدل عددی مذکور در جدول ۸ ارائه شده است. مقایسه بین نتایج حاکی از تطابق خوب نتایج مدل‌های عددی با آزمونهای آزمایشگاهی می‌باشد. منحنی‌های تنش کرنش برای مدل‌های ساخته شده در شکل ۱۰ ارائه شده است. در شکل ۱۱ نیز مکانیزم شکست نمونه‌های باند مسطح با فرایند شکست نمونه‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که از این اشکال مشخص است، الگوی شکست نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

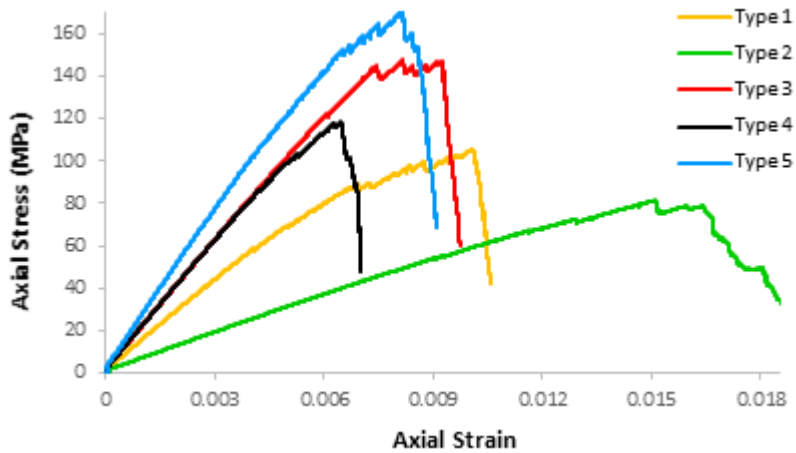


شکل ۹. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نمونه‌های بکر ماسه سنگ‌های مورد مطالعه

جدول ۸. مقایسه میان نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی تیپ‌های مختلف ماسه سنگی

Mechanical properties	Type 1		Type 2		Type 3		Type 4		Type 5	
	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num
UCS (MPa)	102.63	105.6	86	81.4	142.3	147.5	126.4	118.2	165	171.4
ε (%)	1.01	1.04	1.41	1.51	0.89	0.81	0.62	0.64	0.86	0.81
E (GPa)	10.5	12.5	7	5.6	18.5	19.5	21.6	19.3	20	23.5

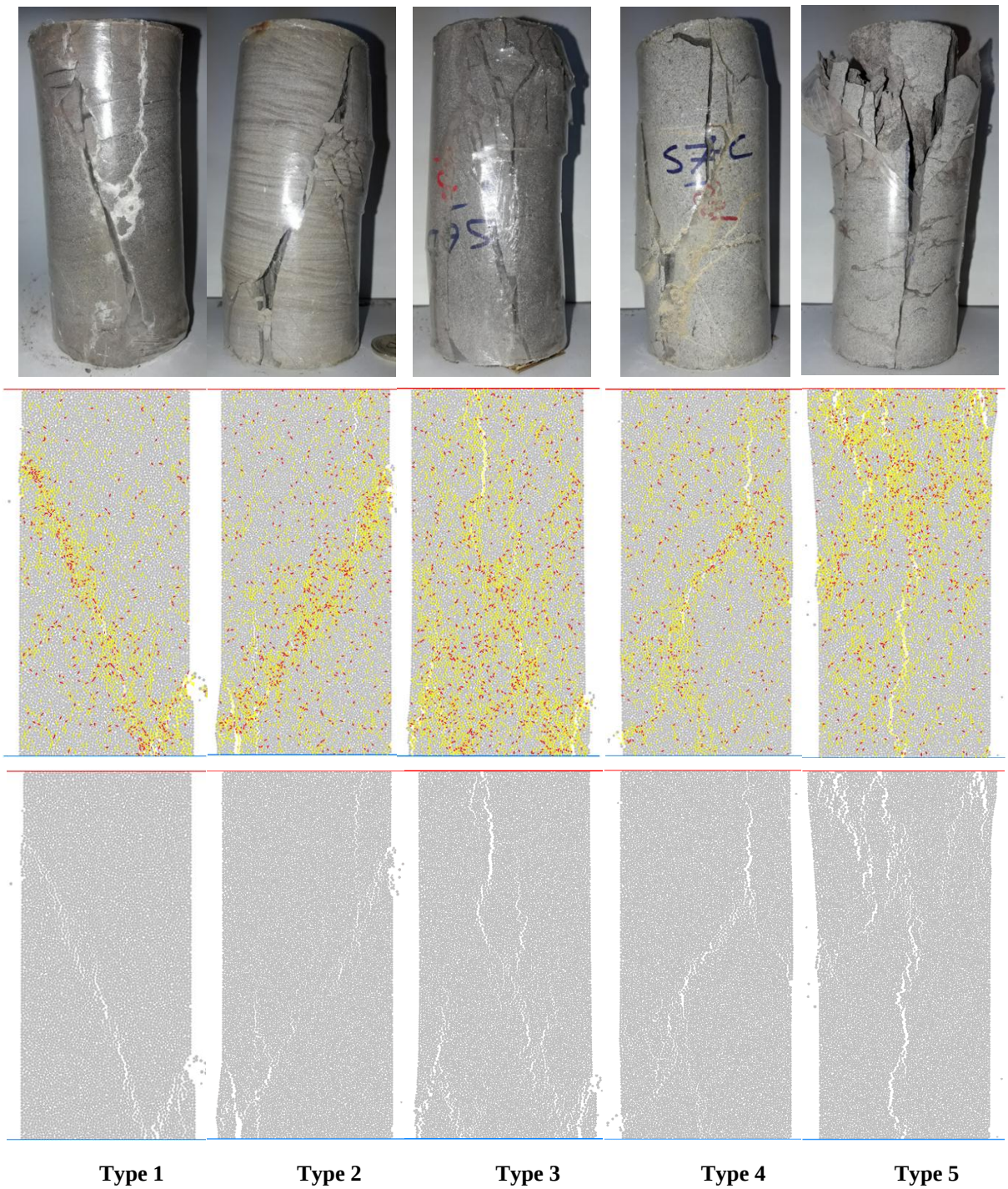
Exp: Experimental, Num: Numerical,



شکل ۱۰. نمایش منحنی‌های تنش کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی برای ماسه سنگ‌های مورد مطالعه

الگوی شکست غالب مشاهده شده در نمونه‌های عددی تیپهای ۱ و ۲ از نوع برشی ساده است. نتایج شبیه‌سازی عددی برای این تیپ‌ها نشان داد که الگوی شکست در نمونه‌های عددی مشابه الگوی شکست غالب در نمونه‌های آزمایشگاهی است. الگوی شکست در نمونه عددی تیپ ٤ از نوع شکستگی چندگانه می‌باشد که در ٤ نمونه آزمایشگاهی این تیپ رخ داده است. الگوی شکست عددی تیپ‌های ۳ و ۵ از نوع کششی چندگانه است که انطباق خوبی با الگوی شکست مشاهده شده در بیشتر نمونه‌ها دارد. در شکل نقاط زردرنگ نشان دهنده ترک‌های کششی هستند در حالیکه ترکهای برشی با نقاط قرمز رنگ نشان داده شده‌اند. این مساله بخوبی اثبات شده است که در تست‌های فشاری، ترک‌های کششی در ایجاد فرایند شکست سنگ نقش غالب را دارند، در حالیکه ترک‌های برشی در نتیجه ادغام ترک‌های کششی در شکل گیری گسیختگی‌های بزرگ مقیاس نقش دارند (Diederichs, 2003; Martin and Chandler, 1994; Tapponnier and Brace, 1976). در مراحل آغازین بارگذاری، تعداد ترک‌های ایجاد شده محدود است، سپس با افزایش تنش محوری بر تعداد ترک‌ها افزوده می‌شود. ترک‌های ایجاد شده در مدل‌های ساخته شده عمدتا از نوع کششی می‌باشند. درحالیکه ترک‌های برشی در ترازهای بالای تنش ظاهر می‌شوند و تعدادشان کمتر از ترک‌های کششی است. در نمونه‌هایی که الگوی غالب شکست در آنها از نوع برشی می‌باشد، تعداد ترک‌های برشی بیشتر از نمونه‌هایی است که الگوی غالب در آنها از نوع کششی می‌باشد (شکل ۱۱). بالا بودن نسبت ترک‌های کششی به برشی از ویژگی‌های سنگهای شکننده است (Shunchuan and Xueliang, 2016).

بر اساس مقایسه الگوهای نهایی شکست نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی می‌توان گفت که نرم افزار PFC^{2D} از قابلیت مناسبی جهت شبیه‌سازی ویژگی‌های شکل‌گیری ترک در نمونه‌های ماسه سنگی شکننده در این پژوهش برخوردار است.



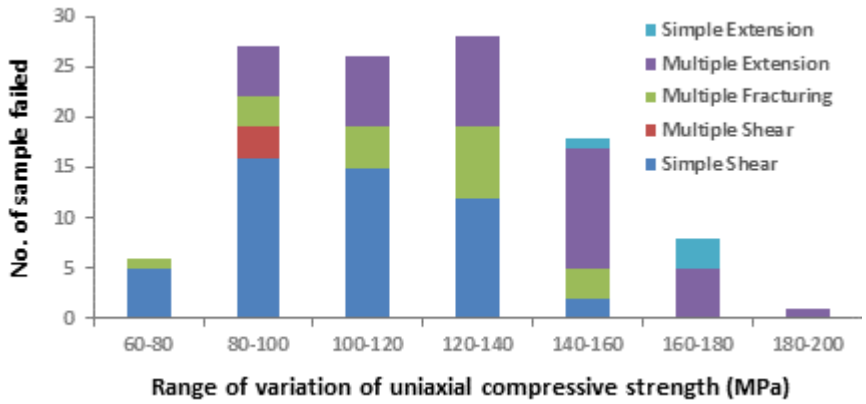
شکل ۱۱. مقایسه الگوهای شکست حاصل از شبیه‌سازی عددی با الگوهای شکست نمونه‌های آزمایشگاهی

۵. بحث

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی ماسه سنگ‌های مورد مطالعه، می‌توان محدوده وسیعی از تغییرات را در مقادیر UCS برای ۵ تیپ ماسه سنگ مشاهده نمود. نتایج این پژوهش نشان داد که الگوی شکست می‌تواند به عنوان یک عامل اثرگذار در مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره مطرح باشد. خصوصیات مکانیکی نمونه‌های سنگ بکر در مقیاس آزمایشگاهی عمدتا تحت تاثیر ناپیوستگی‌های

میکروسکوپی همچون ریزترک‌ها قرار دارد. وجود این ناپیوستگی‌های میکروسکوپی موجب تغییر خواص مکانیکی همچون UCS می‌شوند، حتی با وجود اینکه نمونه‌های مورد آزمایش ترکیب کانی‌شناسی یکسانی داشته باشند (Szwedzicki, 2007). این ناپیوستگی‌ها اثر خود را بر روی خواص مکانیکی به صورت شکست سنگ در غالب الگوهای مختلف شکست نشان می‌دهند. زمانیکه ساختارهای میکروسکوپی در سنگ زیاد باشد، تحت بارگذاری، این ساختارها رشد کرده و تمرکز آنها در بخش‌های مشخصی از نمونه افزایش می‌یابد. همزمان با افزایش بار، این ساختارها با همدیگر ادغام شده و جهت‌یابی مشخصی پیدا می‌کنند و موجب شکل‌گیری صفحات شکستگی در یک راستای مشخص می‌گردند. در این حالت بروز الگوی شکست از نوع برشی بسیار محتمل می‌باشد (Szwedzicki, 2007). فراوانی ناپیوستگی‌های میکروسکپی موجب شکست نوع برشی در نمونه‌های سنگ بکر در مقاومت‌های پایین می‌شود. همچنین زمانیکه قفل و بست میان ذرات کم باشد، اعمال بار موجب لغزش ذرات بر روی همدیگر شده و ترک‌های ایجاد شده عمدتا از نوع برشی هستند. ادغام ترک‌های برشی منجر به شکل‌گیری صفحات برشی شکست و ایجاد الگوی شکست برشی می‌شود. زمانیکه قفل و بست ذرات ضعیف باشد، نمونه سنگ بکر حاوی ساختارهای میکروسکوپی زیادی است. در این حالت، مقاومت نمونه تحت بارگذاری به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. بنابراین، الگوی شکست نوع برشی اغلب در سطوح پایین مقاومت رخ می‌دهد و مقدار مقاومت بدست آمده در این حالت بیانگر خصوصیات در طول ناپیوستگی‌های سنگ می‌باشد. زمانیکه نمونه سنگ بکر فاقد ساختارهای میکروسکوپی باشد و یا میزان این ساختارها خیلی کم باشد، بار اعمالی به نمونه موجب شکل‌گیری ترک‌های کششی می‌گردد. این ترک‌ها در یک زاویه قائم نسبت به راستای تنش اصلی حداقل توسعه می‌یابند در حالیکه با جهت تنش‌های حداکثر و متوسط هم راستا هستند. با افزایش میزان بار اعمالی، ادغام ترک‌های کششی موجب تشکیل صفحه یا صفحات گسیختگی به موازات راستای فشار می‌شود. در این حالت مقدار مقاومت بدست آمده بیانگر مقاومت ماده بکر سنگ است که فاقد ساختارهای میکروسکوپی می‌باشد. بررسی الگوهای شکست در نمونه‌های تیپ ۲ نشان می‌دهد که الگوی شکست غالب در این تیپ از نوع برشی ساده است. محدوده تغییرات مقاومت فشاری این تیپ در مقایسه با دیگر تیپ‌ها کمتر است. این موضوع می‌تواند به علت یکسان بودن الگوی شکست در بیشتر نمونه‌های این تیپ باشد (شکل ۷b). همچنین مقادیر پایین متوسط مقاومت فشاری این تیپ نسبت به دیگر تیپ‌ها را می‌توان ناشی از غالب بودن الگوی شکست برشی ساده دانست. تغییرات محدوده UCS در تیپ ۱ در مقایسه با تیپ ۲ بیشتر است. نتایج نشان داد که وقوع الگوهای شکست در محدوده‌های مختلف مقاومت روند مشخص‌تری دارد. به این ترتیب که در مقاومت‌های کمتر از ۱۲۰ مگاپاسکال، الگوی شکست غالب از نوع برشی ساده است در حالیکه در مقادیر بیش از ۱۲۰ مگاپاسکال، شکست عمدتا از نوع کششی چندگانه است (شکل ۷a). بطور کلی الگوی شکست برشی ساده در این تیپ غالب است. مقدار متوسط مقاومت فشاری ماسه سنگهای تیپ ۳ بیشتر از تیپ‌های ۱ و ۲ است (با مقدار متوسط ۱۳۹ مگاپاسکال). در این تیپ الگوی شکست نوع کششی چندگانه با۵۰ درصد بیشترین نوع شکست است. این الگوی شکست در محدوده مقاومتی ۱٤۰ تا ۱۸۰ مگاپاسکال، الگوی غالب است (شکل ۷c). در ماسه‌های تیپ ٤، از ۲۷ نمونه گسیخته شده، ۱٤ نمونه (۵۲ درصد نمونه‌ها) به صورت برشی ساده شکسته شدند (شکل ۷d). این الگوی شکست برای مقادیر مقاومت کمتر از ۱٤۰مگاپاسکال بیشترین رخداد را دارد. با توجه به وجود ناپیوستگی‌های بزرگ مقیاس از نوع رگه‌ای (رگه‌های کلسیتی به صورت سیمان)، بیشتر نمونه‌ها در امتداد این رگه‌ها به صورت برشی گسیخته شدند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت این تیپ تحت تاثیر خصوصیات این رگه‌ها قرار دارد. ماسه سنگ‌های تیپ ۵ بیشترین مقدار متوسط UCS را در بین ماسه سنگ‌های مورد

مطالعه نشان دادند (با میانگین ۱۵۰ مگاپاسکال). در این تیپ بیشتر نمونه‌های گسیخته شده مقاومتی بیش از ۱٤۰ مگاپاسکال دارند (۱۳ نمونه). الگوی شکست غالب در این نمونه‌ها از نوع کششی چندگانه است. تعداد محدودی از نمونه‌های این تیپ تحت برش شکسته شدند. بررسی روند تغییرات الگوهای شکست با توجه به مقادیر مقاومت فشاری برای کل نمونه‌های ماسه سنگی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است با افزایش مقاومت، تعداد شکستگی‌های نوع برشی کاهش می‌یابد. بطوریکه این الگوی شکست تا مقاومت ۱٤۰ مگاپاسکال، الگوی شکست غالب است و پس از آن کاهش می‌یابد. در حالیکه الگوی شکست کششی چندگانه بتدریج با افزایش مقاومت، افزایش می‌یابد و برای مقادیر بالای ۱٤۰ مگاپاسکال، الگوی شکستگی غالب است.



شکل ۱۲. تغییرات الگوی شکست در محدوده‌های مقاومتی مختلف بر حسب تعداد نمونه‌های گسیخته شده

بر اساس نتایج، مشخص گردید که فقط ٤ نمونه از کل ۱۱٤ نمونه ماسه سنگ به صورت کششی ساده شکسته شده است. این امر نشان دهنده این است که اکثریت نمونه‌ها دارای ناپیوستگی های میکروسکوپی هستند. بنابراین بر اساس نتایج می‌توان گفت که الگوی شکست نوع برشی عمدتا به مقاومت‌های فشاری پایین اختصاص دارد. در حالیکه الگوی شکست کششی بیانگر مقادیر بالای مقاومت فشاری است. به نظر می‌رسد برای ماسه سنگ‌های مورد مطالعه می‌توان یک نقطه انتقال یا گذار (Transisson point) برای تغییر الگوی شکست بر مبنای مقاومت فشاری در نظر گرفت. این نقطه گذار را می‌توان یک محدوده‌ای از مقاومت در نظر گرفت که در آن محدوده الگوی شکست از یک نوع به نوعی دیگر تبدیل می‌شود. بر اساس نتایج، این نقطه گذار برای ماسه سنگ‌های مورد مطالعه، محدوده مقاومتی ۱۲۰ تا ۱٤۰ مگاپاسکال است. الگوی شکست برای مقادیر پایین تر از این محدوده مقاومتی عمدتا از نوع برشی ساده و برای مقادیر بیش از این محدوده، الگوی شکست کششی چندگانه غالب می‌باشد. بنابراین در محدوده مقاومتی ۱٤۰-۱۲۰ مگاپاسکال به عنوان نقطه گذار، الگوی شکست از نوع برشی ساده به نوع کششی چندگانه تبدیل می‌شود. نکته قابل توجه ای که در این بازه مقاومتی می‌توان به آن اشاره نمود، بیشترین رخداد الگوی شکستگی چند گانه است که می‌تواند به عنوان یک ویژگی منحصر به فرد برای این بازه در نظر گرفته شود. رخداد این الگوی شکست ناشی از شکل‌گیری ترکیبی از شکستگی‌هاای کششی و برشی می‌باشد. با توجه به اینکه این الگوی شکست در بازه مقاومتی ۱٤۰-۱۲۰ Mpa بیشترین رخداد را نشان می‌دهد، بنابراین می‌توان انتخاب این بازه مقاومتی را به عنوان نقطه گذار برای ماسه سنگ‌های مورد مطالعه منطقی دانست. روش مدل‌سازی عددی نوع DEM با استفاده از PFC^{2D} نشان داد که این تکنیک به منظور بررسی الگوهای شکست بسیار سودمند است. الگوهای شکست

حاصل از شبیه سازی عددی انطباق خوبی با الگوهای شکست نمونه‌های آزمایشگاهی دارد. در مدل‌های عددی بر اساس فراوانی ترک‌های کششی و برشی، می‌توان الگوهای شکست را بررسی نمود. همانطور که در مدل عددی ماسه سنگ تیپ ۲ مشخص است، فراوانی ترک های برشی (نقاط قرمز رنگ) بسیار بیشتر از ترک‌های کششی می‌باشد. مدل عددی این تیپ کمترین مقدار متوسط مقاومت را نشان داد که ناشی از ایجاد ترک‌های برشی بسیار زیاد در این مدل است که با ادغام آنها الگوی شکست نوع برشی ساده رخ داده است. برای تیپ ۵ که بیشترین مقدار متوسط UCS را دارد، فراوانی ترک‌هاای کششی بسیار بیشتر از ترک‌های برشی می‌باشد. در این تیپ الکوی شکست نوع کششی ساده رخ داده است.

٦. نتیجه گیری

۱. با توجه به نتایج حاصله از بررسی الگوهای شکست و تحلیل عددی آن‌ها، بیشترین فراوانی الگوی شکست برشی ساده در نمونه‌های تیپ ۳ و کمترین تعداد آن در نمونههای تیپ ۵ مشاهده گردید. نمونه‌های تیپ ۵ بیشترین رخداد الگوی شکست کششی چندگانه را نشان دادند. شکستگی‌های چندگانه (شکست ترکیبی) در همه تیپ‌های ماسه سنگی مشاهده شدند.

۲. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که تغییرات مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) نمونه‌ها در هر تیپ با وجود کانی‌شناسی یکسان ناشی از الگوهای شکست می‌باشد که شاخصی از شرایط ناپیوستگی‌های میکروسکوپی نمونه‌های سنگی می‌باشد

۳. ٦۲ درصد نمونه‌های تیپ ۲ الگوی شکست یکسانی نشان دادند در حالیکه برای تیپ های دیگر حداکثر در ۵۲ درصد نمونه‌ها الگوی شکست یکسانی مشاهده شد. نتایج نشان دادند که تغییرات UCS در نمونه‌های تیپ ۲ در مقایسه با سایر تیپ‌ها کمتر می‌باشد. بنابراین بر اساس این نتایج اثبات می‌شود در شرایطی که الگوهای شکست یکسان باشند، محدوده تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره کم می‌باشد. لذا می‌توان گفت که عامل اصلی تغییرات مقادیر UCS الگوی شکست می‌باشد بگونه ای که بیشترین مقادیر UCS در الگوی شکست از نوع کششی بدست آمده، در حالیکه مقادیر UCS حاصل از شکست برشی، کمترین مقادیر را نشان می‌دهند.

٤. برای ماسه سنگهای مورد مطالعه، مقاومت ۱٤۰ مگاپاسکال، به عنوان نقطه گذار تعیین گردید که در آن الگوی شکست از برشی ساده به کششی چند گانه تغییر می‌یابد. ۵- با استفاده از شبیه‌سازی عددی، بررسی الگوهای شکست رخ داده در شرایط آزمایشگاهی امکان‌پذیر شد و مشخص گردید که فراوانی ترک‌های کششی و برشی، اساس شکل‌گیری الگوهای مختلف شکست در شبیه‌سازی عددی می‌باشد که خود تابعی از مقادیر مقاومت سنگ است.

منابع

Akesson, U., Hansson, J., Stigh, J., 2004. Characterization of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. Eng Geol, 72:131–142.

Anon., 1979. Classification of rocks and soils for engineering geo logical mapping. Part 1—Rock and soil materials. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 19, 364–371.

Bahaaddini, M., Sharrock, G., Hebblewhite, B.K., 2013. Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression. Computers and Geotechnics, 49: 206-25.

Basu., A. 2006. Mechanical characterization of granitic rocks of Hong Kong by improved index testing procedures with reference to weathering induced microstructural changes. PhD thesis, The University of Hong Kong.

Basu, A., Celestino, T.B., Bortolucci, A.A., 2009. Evaluation of rock mechanical behaviours under uniaxial compression for different weathering grades. Rock Mech Rock Eng, 42:73–93.

Basu, A., Mishra, D.A., Roychowdhury, K., 2013. Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests. Bull Eng Geol Environ, 72:457–475.

Bobet, A., 1997. Fracture Coalescence in Rock Materials: Experimental Observations and Numerical Predictions, MIT, Massachusetts, Cambridge, 1997.

Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Tech. Rep. AFWL-TR- 65-116, Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Force Base, 308 pp.

Diederichs, M., 2003. Manuel rocha medal recipient rock fracture and collapse under low confinement conditions. Rock Mech Rock Eng, 36(5):339–381.

Diederichs, M.S., 1999. Instability of hard rockmasses: the role of tensile damage and relaxation. Ph.D Thesis, University of Waterloo, Canada.

Dyskin, A.V., Sahouryeh, R.J.Jewell. 2003. Influence of Shape and Locations of Initial 3-D Cracks on Their Growth in Uniaxial Compression. Engineering Fracture Mechanics, 70:2115-2136.

Folk, E., 1980. Petrography of Sedimentary Rocks, Hemphill Publishing Company, 182p.

Hudyma, N., Avar, B.B., Karakouzian, M., 2004. Compressive strength and failure modes of lithophysae-rich Topopah Spring Tuff specimens and analog models containing cavities. Eng Geol, 73:179–190.

Ingersoll, R.V., Bullard, T.F., Ford, R.L., Grimm, J.P., Pickle, J.D., Sars, S.W., 1984. The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi–Dickinson point-counting method. Journal of Sedimentary Petrology 54 (1), 103–116.

ISRM., 1981. The complete ISRM Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring, edited by Brown. Pergamon Press, Oxford, UK.

Itasca Consulting Group Inc., 2004/2005. PFC2D/3D (Particle Flow Code in 2/3 Dimensions) User's Guides, Minneapolis, MN, USA.

Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., 1979. Fundamentals of rock mechanics, 3rd edn. Chapman & Hall, London.

Klein, E., Baud, P., Reuschle, T., Wong, T.F., 2001. Mechanical behavior and failure mode of Bensteim sandstone under triaxial compression. Phys Chem Earth (A) 26:21–25.

Maji, V.B., 2011. Understanding failure mode in uniaxial and triaxial compression for a hard brittle rock. In: Proceedings of the 12th ISRM international congress on rock mechanics. CRC Press/ Balkema, Leiden, pp 723–726.

Martin, C., Chandler, N., 1994. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr Pergamon, 31(6):643–659.

Imani, M., Nejati, H.M., Goshtasbi, K., 2017. Dynamic response and failure mechanism of Brazilian disk specimens at high strain rate. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 100: 261–269.

Mogi, K., 2007. Experimental rock mechanics. Taylor & Francis Group, London.

Park, C.H., Bobet, A., 2010. Crack Initiation, Propagation and Coalescence from Frictional Flaws in Uniaxial Compression. Engineering Fracture Mechanics, 77: 2727-2748.

Potyondy, D.O., 2012. A flat-jointed bonded-particle material for hard rock. In: Proceedings of the 46th US Rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association.

Potyondy, D.O., Cundall, P.A., 2004. A bonded-particle model for rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci, 41(8):1329-64.

Sammis, C.G., Ashby, M.F., 1986. The failure of brittle porous solids under compressive stress state. Acta Metall, 30:511–526.

Santarelli, F.J., Brown, E.T., 1989. Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 26:401–413.

Schopfer, M.P., Abe, S., Childs, C., Walsh, J.J., 2009. The impact of porosity and crack density on the elasticity, strength and friction of cohesive granular materials: insights from DEM modelling. Int J Rock Mech Min Sci, 46(2):250–261.

Shunchuan, W.u., Xueliang, X.u., 2016. A Study of Three Intrinsic Problems of the Classic Discrete Element Method Using Flat-Joint Model. Rock Mech Rock Eng, 49(5): 1813–1830.

Szwedzicki, T., 2007. A Hypothesis on Modes of Failure of Rock Samples Tested in Uniaxial Compression Rock Mech. Rock Engng, 40(1): 97–104.

Szwedzicki, T., Shamu, W., 1996. Detection of planes of weakness in rock samples using nondestructive testing method. In: Proc., ’96 International Symposium on Mining Science and Technology, China. AA Balkema, Rotterdam, pp 759–763.

Szwedzicki, T., Shamu, W., 1999. The effect of material discontinuities on strength of rock samples. In: Proc., Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 304(1): 23–28.

Taoying, l., Ping, C., 1989. Failure Mechanisms Of Brittle Rocks under Uniaxial Compression. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia, 47(3): 59-80.

Xueliang, X., Shunchuan, W., Yongtao, G., Miaofei, X., 2016. Effects of Micro-structure and Micro-parameters on Brazilian Tensile Strength Using Flat-Joint Model Rock Mech Rock Eng, 49:3575–3595.

Zhang, Q., Zhu, H., Zhang, L., Ding, X., 2012. Effect of micro-parameters on the Hoek–Brown strength parameter mi for intact rock using particle flow modeling. In: The 46th US rock mechanics geomechanics symposium, ARMA-12-672.