

بررسی پارامترهای معیار شکست (رامامورتی-هوک) در سنگ آهک یکپارچه و درزه‌دار

حسن مومیوند^{۱*}؛ سیده هدی معدنی^۲؛ فروش حاجی‌زاده^۳؛ میرعلی محمدی^۴

۱- دانشیار گروه مهندسی معدن دانشگاه ارومیه، h.moomivand@urmia.ac.ir

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن دانشگاه ارومیه، h_madani1362@yahoo.com

۳- استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه ارومیه، f.hajizadeh@urmia.ac.ir

۴- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه ارومیه، m.ahmadi@urmia.ac.ir

(دریافت ۱ دی ۱۳۹۲، پذیرش ۴ دی ۱۳۹۵)

چکیده

سنگ آهک یکی از سنگ‌های رسوبی است که به وفور در پوسته زمین وجود دارد و مهندسیین برای حفر سازه‌ها به‌عنوانین مختلف به کرات با این سنگ روبرو می‌شوند. در این تحقیق به شیوه‌ای نو، تأثیر جهت یافتگی، فراوانی و تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع در مقاومت سنگ تحت تنش-های سه محوری به روش تجربی و با اجرای پژوهشی گسترده روی سنگ آهک بررسی شده است. نمونه‌هایی شامل سنگ فاقد ناپیوستگی، دارای یک دسته ناپیوستگی، دو دسته ناپیوستگی، سه دسته ناپیوستگی متقاطع منفرد و سه دسته ناپیوستگی متقاطع که یک دسته آنها را ۴ ناپیوستگی موازی بوده در گروه‌های مختلف با زاویه شیب صفحه ناپیوستگی‌ها با جهت افقی (جهت تنش جانبی) به ترتیب ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه آماده سازی شده اند. سپس مقاومت هر گروه تحت فشارهای جانبی مختلف به ترتیب ۰، ۵، ۷، ۱۰، ۱۴ و ۲۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. پارامترهای معیار شکست رامامورتی شامل نسبت مقاومت فشاری یک محوری سنگ درزه‌دار به مقاومت فشاری یک محوری سالم $(\sigma_{cj} / \sigma_{ci})$ ، توان \square_j و ضریب مقاومت فشاری سه محوری (B_j) حاصل از نتایج این تحقیق تغییرات قابل توجهی با مقادیر آنها با استفاده از روابط موجود به ویژه در حالتی که فراوانی و تعداد دسته ناپیوستگی‌ها افزایش یافته و درزه غالبی با زاویه ۶۰ درجه در سیستم ناپیوستگی‌ها وجود داشته باشد، دارند. چنین تغییراتی باعث شده است که رابطه دیگری بین ضریب مقاومت فشاری سه محوری (B_j) و نسبت $\sigma_{cj} / \sigma_{ci}$ برای سنگ آهک از یکپارچه تا به شدت درزه‌دار حاصل شود. مقدار پارامتر s و ضریب مقاومت فشاری سه محوری (m_b) در معیار شکست هوک و همکاران با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آنها کاهش می‌یابند و کمترین مقدار آنها در حالتی است که یک دسته ناپیوستگی غالب با زاویه ۶۰ درجه در سیستم ناپیوستگی‌ها وجود داشته باشد. در حالتی که نمونه‌ها دارای دو و سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم و زاویه جهت یافتگی آنها (\square) برابر ۳۰ و ۶۰ درجه باشد، s به سمت مقدار صفر میل می‌کند و برای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم و دارای ۴ ناپیوستگی موازی با زاویه جهت یافتگی ۳۰ و ۶۰ درجه، مقدار آن برابر صفر است. در حالتی که s دارای مقدار حداقل باشد، مقدار توان a برعکس دارای مقدار حداکثر است. رابطه جدیدی بین نسبت ضریب مقاومت فشاری سه محوری (m_b/m_i) ، مقدار ثابت s و توان a با نسبت $\sigma_{cj} / \sigma_{ci}$ برای سنگ آهک یکپارچه تا به شدت درزه‌دار ارائه شده است به طوری که نسبت $\sigma_{cj} / \sigma_{ci}$ نیز با استفاده از ضریب درزه‌داری قابل تعیین است.

کلمات کلیدی

جهت یافتگی، فراوانی، تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع، معیار شکست، تنش‌های سه محوری

۱- مقدمه

سنگ برجا و سازه‌های حفر شده در آن همواره تحت اثر تنش-های سه‌محوری قرار دارند. تخمین مقاومت (معیار شکست) سنگ تحت تنش‌های سه‌محوری یکی از موضوعات اساسی در تحلیل پایداری یک سازه سنگی است. توده‌سنگ یک جسم جامد پیوسته، همگن و همسان‌گرد نیست و دارای انواع ناپیوستگی‌ها است. ناپیوستگی‌ها دارای ویژگی‌هایی همچون جهت یافتگی، فراوانی و تعداد دسته (ناپیوستگی‌های متقاطع) هستند که می‌توانند در مقاومت سنگ تحت تنش‌های سه-محوری مؤثر واقع شوند. وجود ناپیوستگی‌ها باعث شده است که معیار شکست توده‌سنگ تحت اثر تنش‌های سه‌محوری به‌عنوان موضوعی مهم مطرح شود.

طی دهه‌های گذشته تلاش‌های زیادی توسط محققان از کشورهای مختلف در زمینه تأثیر برخی ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها در مقاومت سنگ تحت تنش‌های سه‌محوری به عمل آمده است. تأثیر پارامترهایی همچون جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها در مقاومت (معیار شکست) سنگ تحت تنش‌های سه‌محوری بیشتر برای یک دسته ناپیوستگی بررسی شده است [۶-۱]. همچنین بررسی تأثیر جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌های متقاطع در مقاومت سنگ بیشتر تحت تنش یک محوری به عمل آمده است [۷، ۸]. ورما و سینگ [۲] توده‌سنگ دارای یک دسته درزه با جهت‌یافتگی ۰ تا ۹۰ درجه نسبت به حالت قائم تحت تنش‌های سه‌محوری به روش عددی با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی FALC^{3D} مدل‌سازی کردند. نتایج مدل‌سازی با استفاده از نرم-افزار سه‌بعدی FALC^{3D} همبستگی خوبی با تئوری جیگر نشان داد. نکته جالب توجه این است که در نرم‌افزار FALC برای مدل‌سازی درزه‌ها از تئوری جیگر استفاده می‌شود. تئوری جیگر به علت ساده‌سازی بیش از حد با نتایج تجربی انطباق نشان نمی‌دهد. بنابراین روش عددی با استفاده از نرم‌افزار FALC کاری شبیه محاسبات رابطه تئوری جیگر انجام می‌دهد.

علی‌رغم انجام پژوهش‌های ارزنده‌ای در مورد تأثیر ویژگی‌هایی همچون جهت یافتگی ناپیوستگی‌های متقاطع در مقاومت سنگ تحت تنش‌های سه‌محوری به ویژه به روش عددی [۹، ۱۰]

هنوز تأثیر تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع دارای فراوانی مختلف در مقاومت سنگ تحت تنش‌های سه‌محوری به روش تجربی مورد بررسی جدی قرار نگرفته است. با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آنها، سنگ به سمت توده‌های خرد شده میل می‌کند. وجود ویژگی بارز تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع دارای فراوانی مختلف مصداق تمایز میزان خردشدگی توده‌های سنگ از سنگ یک پارچه است. توده‌های سنگ اغلب دارای دسته ناپیوستگی‌های متقاطع هستند که در این تحقیق به علاوه تأثیر جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها، تأثیر دسته ناپیوستگی‌های متقاطع دارای فراوانی مختلف در مقاومت سنگ تحت تنش سه‌محوری مورد پژوهش قرار گرفته است. مشخص کردن تأثیر ویژگی بارزی همچون تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع همراه با تأثیر سایر ویژگی-های آنها در پارامترهای معیارهای شکست توده‌سنگ از حالت یکپارچه (فاقد ناپیوستگی) تا خرد شده تحت تنش‌های سه-محوری که تا کنون در عمل تجربه نشده است، می‌تواند راهگشا باشد.

۲- آماده سازی و انجام آزمایش‌ها

مصالح، دستگاه‌ها و ابزارهای مورد نیاز آماده سازی نمونه‌ها شامل: بلوک‌های سنگ آهک همگن که بتوان نمونه‌های مناسبی از آنها تهیه نمود، اره بزرگ الماسه برای بریدن نمونه‌های بزرگ، دستگاه کرگیری، اره کوچک الماسه مغزه بُر و تجهیزات جانبی ساخته شده برای ایجاد نمونه‌های استاندارد و دارای جهت یافتگی، فراوانی و دسته‌های مختلف ناپیوستگی‌های متقاطع، سیستم سلول سه محوری، فشار جانبی (σ_3) و جک اعمال بار و اندازه گیری مقاومت محوری (σ_1) هستند. نمونه‌های فاقد ناپیوستگی، دارای یک دسته ناپیوستگی، دو دسته ناپیوستگی، سه دسته ناپیوستگی متقاطع منفرد و سه دسته ناپیوستگی متقاطع که یک دسته آنها دارای ۴ ناپیوستگی موازی در گروه‌های مختلف با زاویه شیب صفحه ناپیوستگی‌ها با جهت افقی (جهت تنش جانبی) به ترتیب ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در کل شامل ۲۰ گروه آماده‌سازی شدند. در آماده‌سازی نمونه‌ها



شکل ۱: نمونه دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود برهم شامل یک دسته قائم، دو دسته ناپیوستگی عمود بر هم دارای زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه و در جهت مخالف همدیگر، دسته ناپیوستگی با زاویه ۳۰ درجه با ۴ ناپیوستگی موازی



شکل ۲: نمونه دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود برهم شامل یک دسته قائم، دو دسته ناپیوستگی عمود بر هم هر یک دارای زاویه ۴۵ درجه و در جهت مخالف همدیگر و یک دسته با ۴ ناپیوستگی موازی

مقدار پارامتر مقاومت درزه (r) و زاویه اصطکاک سطح درزه (ϕ'_j) به ترتیب برابر ۰/۷۱۷ و ۳۵/۶۲ درجه به شرح زیر حاصل شد [۱۴].

$$r = \frac{\tau_j}{\sigma_{nj}} = \tan \phi'_j = 0.717 \quad (1)$$

ابتدا درزه‌ها با زوایای مورد نظر ایجاد شد سپس دو صفحه انتهایی آنها بر اساس استاندارد با اره الماسه بریده شد. با ایجاد درزه قائم در جهت طول نمونه‌ها پس از برش باعث می‌شد که قطر آنها به اندازه حدود ۲ میلی‌متر کاهش یابد. در هنگام آزمایش نمونه‌ها در داخل سلول سه‌محوری از این بابت مشکلی مشاهده نشد. آماده‌سازی نمونه‌ها به ویژه نمونه‌هایی با سه دسته ناپیوستگی متقاطع با یک دسته دارای ۴ ناپیوستگی موازی، کاری بسیار مشکل بود، به طوری که هر نمونه متشکل از تعداد ۲۰ قطعه با زوایای مختلف در کنار هم بود (شکل، ۱ و ۲). در شکل ۱ نمونه درزه‌دار برای گرفتن تصویر در جهت دسته ناپیوستگی دارای زاویه ۶۰ درجه باز شده است و همچنین در شکل ۲ نمونه در جهت دسته قائم از وسط باز شده است. چنین نمونه‌هایی مصداق سنگ به شدت درزه‌دار بوده و حجم عملیاتی آماده‌سازی آنها چندین برابر نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های منفرد است. همچنین آزمایش چنین نمونه‌هایی تحت تنش‌های سه‌محوری و بازیابی آنها پس از پایان آزمایش‌ها از داخل سلول سه‌محوری نیز بسیار دشوار بود. علی‌رغم طاقت فرسا بودن آماده‌سازی و آزمایش نمونه‌ها، پروژه به مرحله اجرا در آمد. مقاومت هر گروه تحت فشاری‌های جانبی مختلف به ترتیب ۰، ۷، ۵ و ۱۰، ۱۴، ۲۰ مگاپاسکال با استفاده از دستگاه آزمایش سه‌محوری بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ [۱۱] تعیین شد و برای هر فشار جانبی تعداد سه آزمایش انجام شد.

پارامتر مقاومت درزه (r) حاصل از زاویه اصطکاک سطح درزه (ϕ'_j) برای تعیین ضریب درزه‌داری و پارامترهای معیار شکست رامامورتی [۱۲] نیاز است. با استفاده از زوج داده‌های مقاومت برشی (ϕ_j) و تنش عمودی (σ_{nj}) بر صفحه ناپیوستگی‌های حاصل از آزمایش مقاومت برشی مستقیم بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ [۱۳] به‌منظور تعیین پارامتر مقاومت درزه (r) نیز اندازه‌گیری شد.

$$\phi'_j = \tan^{-1} 0.717 = 35.62^\circ \quad (2)$$

=n ضریب جهت‌یافتگی درزه.

ضریب درزه‌داری (J_f) تأثیر ترکیب سه عامل جهت‌یافتگی درزه ها (n)، فراوانی درزه (J_n) در واحد طول به متر و زاویه اصطکاک (مقاومت درزه) (r) است [۱۲]. نسبت $\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}}$ با استفاده از ضریب درزه‌داری و پارامترهای معیار شکست توده‌سنگ رامامورتی با استفاده از نسبت $\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}}$ تعیین می‌شوند. ضریب درزه‌داری برای سنگ سالم صفر است و برای سنگ به شدت درزه‌دار می‌تواند در هر متر بیش از ۵۰۰ باشد. J_f را می‌توان به ازای هر متر عمق توده‌سنگ محاسبه کرد و مقادیر بزرگتر J_f نشان‌دهنده ضعیف‌تر بودن توده‌سنگ است [۱۲].

ضریب درزه‌داری (J_f) برای ۲۰ گروه مختلف نمونه‌ها تعیین شد. افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها و فراوانی آنها باعث افزایش ضریب درزه‌داری می‌شود. نمونه‌های دارای سه دسته ناپیوستگی متقاطع که یک دسته آنها دارای ۴ عدد ناپیوستگی است، دارای بیشترین مقدار ضریب درزه‌داری هستند.

رابطه بین نسبت σ_{cj}/σ_{ci} و ضریب درزه‌داری (J_f) برای نتایج این تحقیق که تأثیر دسته ناپیوستگی‌های متقاطع نیز اعمال شده است، توسط برنامه DataFit [۲۱] به صورت رابطه زیر حاصل شد [۱۴].

$$\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} = \exp(-0.016J_f) \quad (9)$$

با اعمال دسته ناپیوستگی‌های متقاطع دارای فراوانی مختلف برای سنگ آهک ضریب $-0/0.8$ در معادله (۶) به $-0/0.16$ در معادله (۹) کاهش یافت. نسبت σ_{cj}/σ_{ci} با استفاده از ضریب درزه‌داری (J_f) (معادله، ۹) قابل محاسبه است و پارامتر \square_j را نیز می‌توان با استفاده از نسبت σ_{cj}/σ_{ci} محاسبه شده، تعیین نمود.

۲۰ گروه نمونه‌های G1 تا G20 به ترتیب در جداول ۱ و ۲ شرح داده شده‌اند. رابطه بین مقاومت محوری (\square_1) و فشار جانبی (\square_3) برای ۲۰ گروه نمونه‌های سنگ فاقد ناپیوستگی، دارای یک دسته ناپیوستگی، دو دسته ناپیوستگی، سه دسته ناپیوستگی متقاطع منفرد و سه دسته ناپیوستگی متقاطع که یک دسته آنها دارای ۴ ناپیوستگی موازی بوده و دارای زاویه شیب صفحه ناپیوستگی‌ها با جهت افقی به ترتیب ۰، ۳۰، ۴۵،

۳- تحلیل نتایج

از بین تعداد محدود معیارهای شکست [۱۲، ۱۷-۱۵]، معیارهای شکست هوک و همکاران [۱۳] و رامامورتی [۱۲] بیشتر مورد توجه بوده که یک علت آن می‌تواند جامع بودن آنها باشد. نتایج ابتدا با معیار شکست رامامورتی و سپس با معیار شکست هوک و همکاران مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. رامامورتی و همکاران [۱۸، ۱۹] صورت اصلی معیار شکست خود برای سنگ سالم اصلاح کردند و آن را برای توده‌سنگ تعمیم دادند. معیار شکست رامامورتی [۱۲، ۲۰] برای توده‌سنگ درزه‌دار تحت تنش‌های سه محوری به شرح زیر است.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + B_j \sigma_3 \left[\frac{\sigma_{cj}}{\sigma'_3} \right]^{a_j} \quad (3)$$

$$J_f = \frac{J_n}{n \times r} \quad (4)$$

$$r = \frac{\tau_j}{\sigma_{nj}} = \tan \phi'_j \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} = \exp(-0.008J_f) \quad (6)$$

$$\alpha_j = \alpha_i \sqrt{\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}}} \quad (7)$$

$$B_j = B_i \frac{1}{\left[0.13 \exp\left(2.04 \frac{\alpha_j}{\alpha_i} \right) \right]} = B_i \frac{1}{\left[0.13 \exp\left(2.04 \sqrt{\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}}} \right) \right]} \quad (8)$$

که در آن،

$$\square_3 = \text{تنش اصلی حداقل به MPa؛}$$

$$\square_1 = \text{تنش اصلی حداکثر به MPa؛}$$

$$\square_{cj} = \text{مقاومت فشاری یک محوری توده‌سنگ درزه‌دار به MPa؛}$$

$$B_j = \text{پارامتر ثابت ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری سنگ درزه‌دار؛}$$

$$\square_j = \text{توان ثابت برای توده‌سنگ درزه‌دار؛}$$

$$\sigma_{ci} = \text{مقاومت فشاری یک محوری سنگ سالم،}$$

$$B_i = \text{پارامتر ثابت ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری؛}$$

$$\square_i = \text{توان ثابت برای سنگ سالم و برابر } 0/8؛$$

$$J_n = \text{فراوانی درزه در هر متر طول؛}$$

تحقیق (جدول، ۱ و ۲) در شکل ۵ نشان داده شده است. ضریب B_j حاصل از نتایج اندازه‌گیری آزمایش مقاومت فشاری سه-محوری نمونه‌های دارای دو و سه دسته ناپیوستگی که دارای نسبت $\frac{\sigma_{ej}}{\sigma_{ci}}$ کمتری هستند، خیلی کمتر از ضریب مقاومت فشاری سه محوری (B_j) حاصل از ضریب درزه‌داری ارائه شده توسط رامامورتی است. مقادیر کم نسبت σ_{ej}/σ_{ci} مربوط به دسته ناپیوستگی غالب دارای شیب ۶۰ درجه در سیستم ناپیوستگی‌های متقاطع است. اما با افزایش نسبت σ_{ej}/σ_{ci} ضریب مقاومت فشاری سه محوری (B_j) حاصل از دو روش به هم نزدیک می‌شوند (شکل، ۵).

یکی از مهم‌ترین معیارهای شکست توده‌سنگ، معیار هوک و براون است که به شکل‌های مختلفی از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۲ ارائه شده است [۱۵، ۲۶-۲۲]. هوک و همکاران [۱۵] آخرین شکل معیار شکست اصلاح شده را به شرح زیر ارائه کردند.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (10)$$

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a \quad (11)$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (12)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (13)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right] \quad (14)$$

که در آن،

$$\sigma'_3 = \text{تنش اصلی حداقل به MPa؛}$$

$$\sigma'_1 = \text{تنش اصلی حداکثر (یا مقاومت محوری) به MPa؛}$$

$$\sigma_{ci} = \text{مقاومت فشاری محوری سنگ سالم به MPa؛}$$

$$m_{ii} = \text{پارامتر ثابت ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری مربوط به سنگ سالم؛}$$

$$m_b = \text{پارامتر ثابت ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری مربوط به توده سنگ؛}$$

$$s = \text{پارامتر ثابت مربوط به توده سنگ؛}$$

$$a = \text{توان ثابت؛}$$

$$\sigma_c = \text{مقاومت فشاری یک‌محوری توده‌سنگ به MPa؛}$$

$$GSI = \text{شاخص مقاومت زمین شناسی؛}$$

۶۰ و ۹۰ درجه با استفاده از نرم‌افزار DataFit [۲۱] تحلیل شد. پارامتر \square_j حاصل از نتایج اندازه‌گیری مستقیم نسبت σ_{ej}/σ_{ci} و پارامتر B_j با استفاده تحلیل نتایج توسط نرم‌افزار DataFit برای ۱۲ گروه نتایج نمونه‌های فاقد ناپیوستگی و دارای ۱ و ۲ دسته ناپیوستگی و زوایای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین پارامتر \square_j و B_j برای ۸ گروه دیگر نمونه‌های دارای ۳ دسته ناپیوستگی و زوایای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در جدول ۲ نشان داده شده است. رابطه بین مقاومت محوری (\square_1) و فشار جانبی (\square_3) برای نتایج حاصل از ۲۰ گروه نمونه‌های G1 تا G20 همراه بهترین تابع معیار شکست رامامورتی منطبق بر هریک از گروه‌های نتایج با ضریب همبستگی مربوطه و پارامترهای این معیار در شکل ۳ نشان داده شده است

رابطه بین پارامتر \square_j و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها (\square) در دو حالت وقتی که پارامتر \square_j از نتایج آزمایش نسبت σ_{ej}/σ_{ci} تعیین شده و در حالتی که با استفاده از ضریب درزه‌داری (J_f) (معادله ۶، رابطه رامامورتی) محاسبه شده در شکل ۴ با هم مقایسه شده‌اند. مقادیر پارامتر \square_j حاصل از ضریب درزه‌داری (J_f) (معادله ۶) بیشتر از مقادیر آن با استفاده از نسبت $\frac{\sigma_{ej}}{\sigma_{ci}}$ حاصل از نتایج اندازه‌گیری است. پارامتر \square_j دارای یک مقدار حداقل در زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها (\square) برابر ۶۰ درجه برای یک دسته ناپیوستگی است. وقتی که نمونه دارای دو دسته ناپیوستگی یا بیشتر است، مقدار حداقل پارامتر \square_j در زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها (\square) برابر ۳۰ درجه نیز اتفاق می‌افتد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد وقتی که زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی‌های متقاطع برابر ۳۰ و ۶۰ درجه است، نسبت σ_{ej}/σ_{ci} به صفر نزدیک شده و در نتیجه مقدار پارامتر \square_j نیز به سمت صفر میل می‌کند. این باعث می‌شود رابطه بین مقاومت محوری (\square_1) و فشار جانبی (\square_3) در معیار شکست رامامورتی (معادله ۳) به سمت رابطه خطی $\square_3 = (1 + B_j) \square_1$ میل کند.

رابطه بین ضریب مقاومت فشاری سه محوری (B_j) و نسبت σ_{ej}/σ_{ci} در دو حالت شامل: تعیین پارامتر ضریب مقاومت فشاری سه محوری معیار شکست (B_j) با استفاده از ضریب درزه‌داری ارائه شده توسط رامامورتی و آنالیز آماری نتایج این

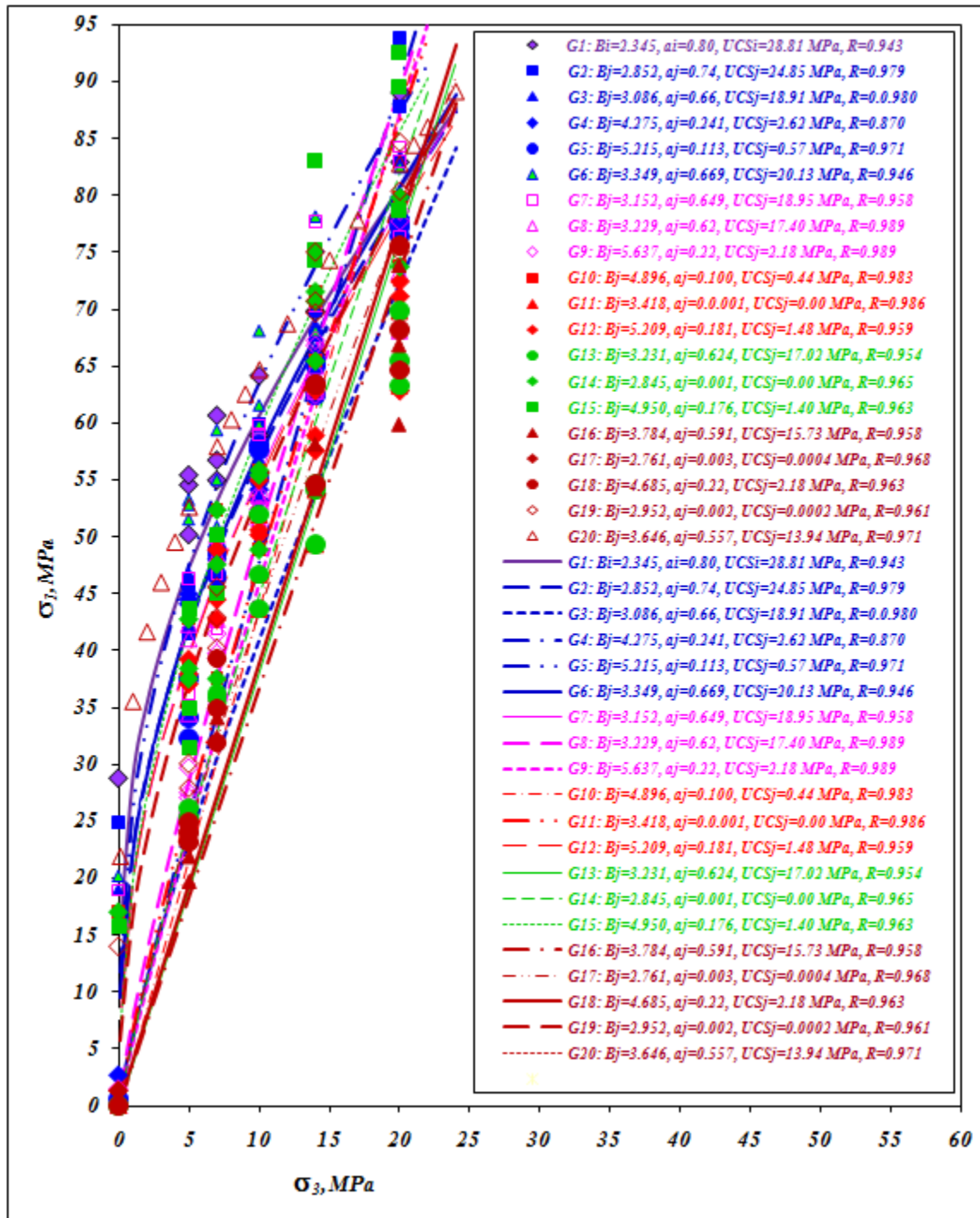
D = ضریب مربوط به درجه آشفته‌گی توده‌سنگ است و مقدار آن از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند.

جدول ۱: پارامترهای معیار شکست رامامورتی برای ۱۲ گروه نمونه های فاقد ناپیوستگی و دارای ۲ دسته ناپیوستگی و زوایای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با جهت افقی

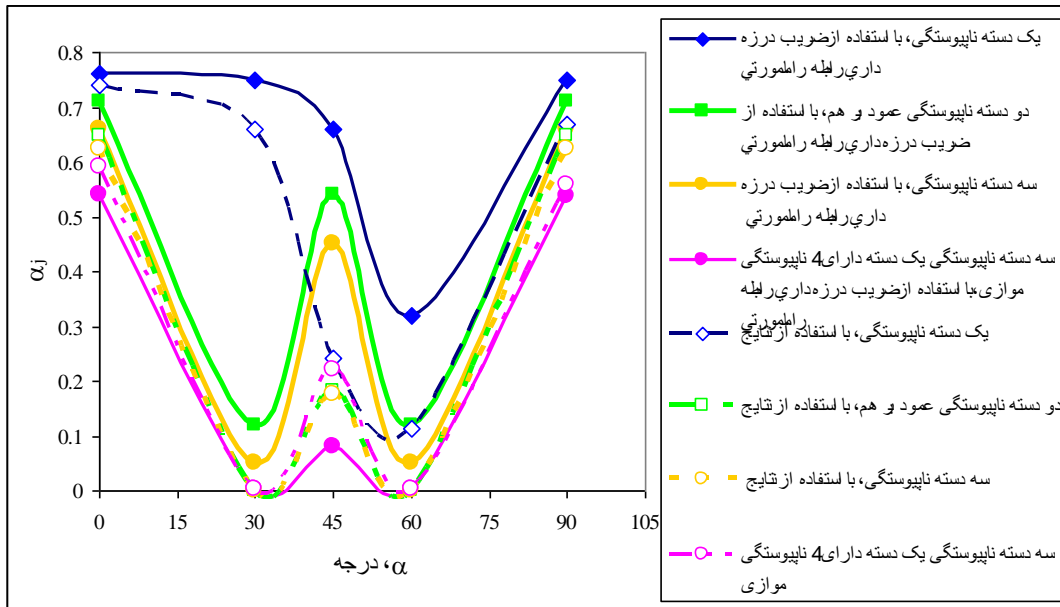
انحراف از معیار S MPa	ضریب همبستگی R	ضریب B _j	توان ثابت \square_j	σ_{cj}/σ_{ci} حاصل از اندازه‌گیری مستقیم	زاویه دسته ناپیوستگی با افق به درجه و جهت غالب صفحه شکست	تعداد دسته ناپیوستگی	گروه نتایج (G)
۶,۸۰	۰,۹۴۳	۲,۳۴۵	۰,۸۰۰	۱,۰۰	سنگ سالم و فاقد ناپیوستگی شکست در بدنه سنگ سالم	۰	G1
۵,۶۰	۰,۹۷۹	۲,۵۸۲	۰,۷۴۰	۰,۸۶	شکست در بدنه سنگ سالم	۱	G2
۲,۷۶۳	۰,۹۸۰	۳,۰۸۶	۰,۶۶	۰,۶۶	۳۰ شکست گاه در بدنه سنگ سالم و گاه در ناپیوستگی	۱	G3
۵,۵۲۵	۰,۸۷۰	۴,۲۷۵	۰,۲۴۱	۰,۰۹	۴۵ شکست در صفحه ناپیوستگی دارای زاویه ۴۵ درجه	۱	G4
۱۰,۷۶	۰,۹۷۱	۵,۲۱۵	۰,۱۱۳	۰,۰۲۰	۶۰ شکست در صفحه ناپیوستگی دارای زاویه ۴۵ درجه	۱	G4
۴,۸۰۲	۰,۹۴۶	۳,۳۴۹	۰,۶۶۹	۰,۷۰	۹۰ شکست در بدنه سنگ سالم	۱	G6
۴,۷۴۳	۰,۹۵۸	۳,۱۵۲	۰,۶۴۹	۰,۶۶	۰ و ۹۰ (یک دسته ناپیوستگی قائم یک دسته افقی) شکست در بدنه سنگ سالم	۲	G7
۲,۱۲۳	۰,۹۸۹	۳,۲۲۹	۰,۶۲۰	۰,۶۰	۳۰ و ۹۰ (یک دسته ناپیوستگی قائم و یک دسته دارای زاویه ۳۰ با جهت افقی) شکست در صفحه ناپیوستگی دارای زاویه ۳۰ درجه	۲	G8
۹,۵۹۵	۰,۹۸۹	۵,۶۳۷	۰,۲۲۰	۰,۰۸	۴۵ و ۹۰ (یک دسته ناپیوستگی قائم و یک دسته دارای زاویه ۴۵ با جهت افقی) شکست در صفحه ناپیوستگی دارای زاویه ۴۵ درجه	۲	G9
۶,۷۴۵	۰,۹۸۳	۴,۸۹۶	۰,۱۰۰	۰,۰۲	۶۰ و ۹۰ (یک دسته ناپیوستگی قائم و یک دسته دارای زاویه ۶۰ با جهت افقی) شکست در صفحه ناپیوستگی دارای زاویه ۶۰ درجه	۲	G10
۹,۱۵۹	۰,۹۸۶	۳,۴۱۸	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۳۴	۳۰ و ۶۰ (دو دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم و در جهت مخالف) شکست در صفحه ناپیوستگی دارای زاویه ۶۰ درجه	۲	G11
۱۱,۷۸	۰,۹۵۹	۵,۲۰۹	۰,۱۸۱	۰,۰۵	۴۵ و ۴۵ (دو دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم و در جهت مخالف) شکست در یکی از صفحات ناپیوستگی دارای زاویه ۴۵ درجه	۲	G12

جدول ۲: پارامترهای معیار شکست رامامورتی برای ۸ گروه نمونه‌های دارای ۳ دسته ناپیوستگی متقاطع و زوایای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با جهت افقی و فراوانی مختلف

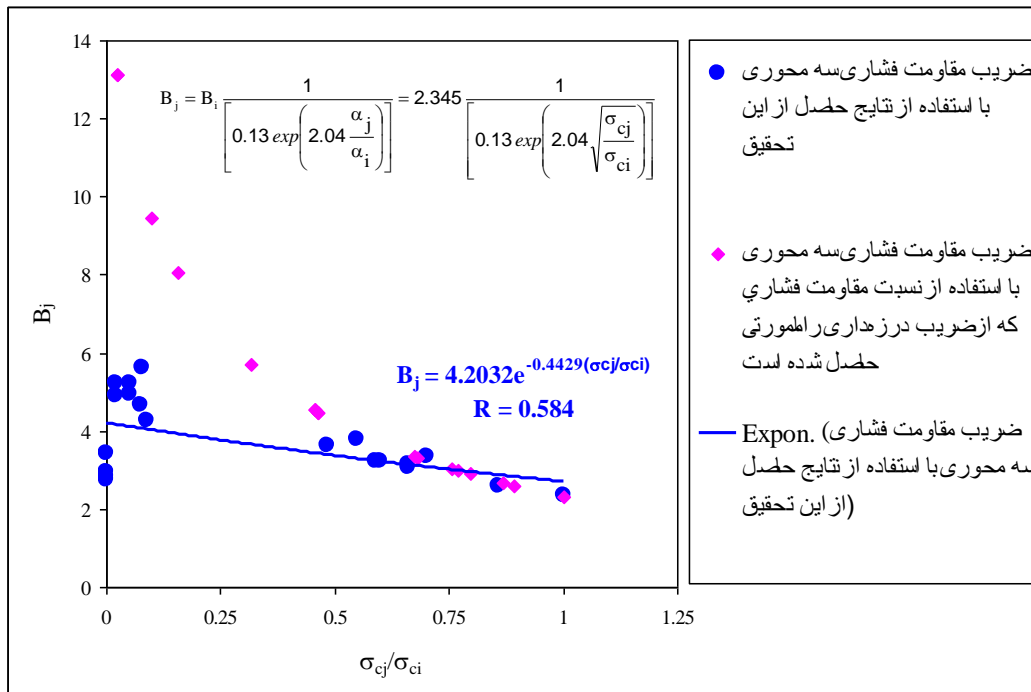
انحراف از معیار S MPa	ضریب همبستگی R	ضریب B _j	توان ثابت \square_j	σ_{ej}/σ_{ci} حاصل از اندازه‌گیری مستقیم	زاویه دسته ناپیوستگی با افق به درجه و جهت غالب صفحه شکست	تعداد دسته ناپیوستگی	گروه نتایج (G)
۴,۴۴۱	۰,۹۵۴	۳,۲۳۱	۰,۶۲۴	۰,۵۹	۹۰ و ۹۰,۰ (سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم، شامل دو دسته قائم و عمود بر هم و یک دسته افقی) شکست در بدنه سنگ سالم	۳	G13
۸,۵۹۵	۰,۹۶۵	۲,۸۴۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۰,۳۵	۹۰ و ۶۰,۳۰ (سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم شامل یک دسته قائم دارای زاویه ۹۰ درجه و دو دسته ناپیوستگی عمود بر هم دارای زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه و در جهت مخالف همدیگر) شکست در صفحه ناپیوستگی دارای زاویه ۶۰ درجه	۳	G14
۱۱,۲۱	۰,۹۶۳	۴,۹۵۰	۰,۱۷۶	۰,۰۵	۹۰ و ۴۵, ۴۵ (سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم شامل یک دسته قائم دارای زاویه ۹۰ درجه و دو دسته ناپیوستگی عمود بر هم دارای زوایای ۴۵ درجه و در جهت مخالف همدیگر) شکست در یکی از صفحات ناپیوستگی دارای زاویه ۴۵ درجه	۳	G15
۷,۸۸	۰,۹۵۸	۳,۷۸۴	۰,۵۹۱	۰,۵۵	۹۰ و ۹۰,۰ (سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم شامل دو دسته قائم و عمود بر هم و یک دسته در جهت افقی با زاویه ۰ درجه و دارای ۴ ناپیوستگی موازی) شکست در بدنه سنگ سالم	۳	G16
۶,۹۸	۰,۹۶۸	۲,۷۶۱	۰,۰۰۳	۰,۰۰۰۰,۱۵	۹۰ و ۶۰,۳۰ (سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم شامل یک دسته قائم دارای زاویه ۹۰ درجه، دو دسته ناپیوستگی عمود بر هم دارای زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه و در جهت مخالف همدیگر، دسته ناپیوستگی با زاویه ۳۰ درجه دارای ۴ ناپیوستگی موازی) شکست در صفحه ناپیوستگی دارای زاویه ۶۰ درجه	۳	G17
۷,۳۸	۰,۹۶۳	۴,۶۸۵	۰,۲۲	۰,۰۷۶	۹۰ و ۴۵, ۴۵ (سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم شامل یک دسته قائم دارای زاویه ۹۰ درجه و دو دسته ناپیوستگی عمود بر هم و هر یک دارای زاویه ۴۵ درجه و در جهت مخالف همدیگر، یکی از دسته ناپیوستگی‌های با زاویه ۴۵ درجه دارای ۴ ناپیوستگی موازی) شکست در یکی از صفحات ناپیوستگی دارای زاویه ۴۵ درجه	۳	G18
۸,۰۷	۰,۹۶۱	۲,۹۵۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۰۰,۰۸	۹۰ و ۳۰,۰,۶۰ (سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم شامل یک دسته قائم دارای زاویه ۹۰ درجه، دو دسته ناپیوستگی عمود بر هم دارای زوایای ۶۰ و ۳۰ درجه و در جهت مخالف همدیگر، دسته ناپیوستگی با زاویه ۶۰ درجه دارای ۴ ناپیوستگی موازی) شکست در صفحه ناپیوستگی دارای زاویه ۶۰ درجه	۳	G19
۷,۰۲۳	۰,۹۷۱	۳,۶۴۶	۰,۵۵۷	۰,۴۸۴	۹۰ و ۹۰,۰ (سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم شامل یک دسته در جهت افقی با زاویه ۰ درجه، دو دسته قائم و عمود بر هم دارای زاویه ۹۰ درجه با جهت افقی، یکی از دسته ناپیوستگی‌های با زاویه ۹۰ درجه دارای ۴ ناپیوستگی موازی) شکست در بدنه سنگ سالم	۳	G20



شکل ۳: رابطه بین مقاومت محوری (σ_1) و فشار جانبی (σ_3) برای نتایج ۲۰ گروه نمونه‌های G1 تا G20 تعریف شده در جداول ۱ و ۲ همراه با پارامترهای معیار شکست رامامورتی شامل B_j ، a_j ، UCS_j ، مقاومت فشاری یک محوری سنگ درزه‌دار (UCS_j) و ضریب همبستگی (R)



شکل ۴: مقایسه رابطه بین پارامتر α_z و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی ها (\square) در دو حالت \square حاصل از ضریب درزه‌داری (α_f) رامامورتی و نتایج این تحقیق



شکل ۵: رابطه بین ضریب مقاومت فشاری سه محوری (B_j) و نسبت σ_{cj}/σ_{ci} در دو حالت با استفاده از ضریب درزه‌داری ارائه شده توسط رامامورتی و آنالیز آماری نتایج این تحقیق

است (شکل ۸). همچنین پارامتر S در زاویه جهت‌یافتگی (\square) برابر ۴۵ درجه دارای مقدار ناچیزی است. وقتی که S به سمت مقدار صفر میل می‌کند مقاومت کششی و فشاری یک‌محوری توده‌سنگ نیز به سمت صفر میل می‌کنند و رابطه معیار شکست از مبدأ مختصات می‌گذرد. این همان مصداق توده‌های سنگ به شدت درزه‌دار و سست است که پارامترهای معیار شکست آن در این تحقیق تعیین شده‌اند. با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌ها به ویژه وقتی که مقدار زاویه جهت‌یافتگی آنها (\square) برابر ۳۰ و ۶۰ درجه است، توان a افزایش می‌یابد، بر عکس مقدار S کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار S برای یک دسته ناپیوستگی دارای زاویه جهت‌یافتگی (\square) برابر ۰ درجه اتفاق می‌افتد (شکل ۸).

رابطه بین ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری (m_b) در معیار شکست هوک و همکاران و زاویه جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها (\square) برای نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری نمونه‌های دارای یک، دو و سه دسته ناپیوستگی در شکل (۹) نشان داده شده است. با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌ها ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری (m_b) کاهش می‌یابد و مقدار حداقل آن در زاویه جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها (\square) برابر ۳۰ و ۶۰ درجه به ویژه برای ناپیوستگی‌های متقاطع اتفاق می‌افتد. تعداد دسته ناپیوستگی‌ها فراوانی و زاویه جهت‌یافتگی آنها (\square) تأثیر قابل توجهی بر ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری در معیار شکست هوک و همکاران دارند. با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع تأثیر جهت‌یافتگی در پارامترهای معیار شکست شدیدتر می‌شود. در تعیین پارامترهای معیار شکست با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) امتیاز مربوط به جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها در همه حالات دارای مقدار ثابت و صفر است. در توده‌های سنگ سست ($GSI < 25$) شاخص مقاومت زمین‌شناسی با استفاده از طبقه‌بندی Q تعیین می‌شود. در طبقه‌بندی Q پارامتر مربوط به تأثیر جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها وجود ندارد. این در صورتی است که جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌های متقاطع دارای تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای معیار شکست است.

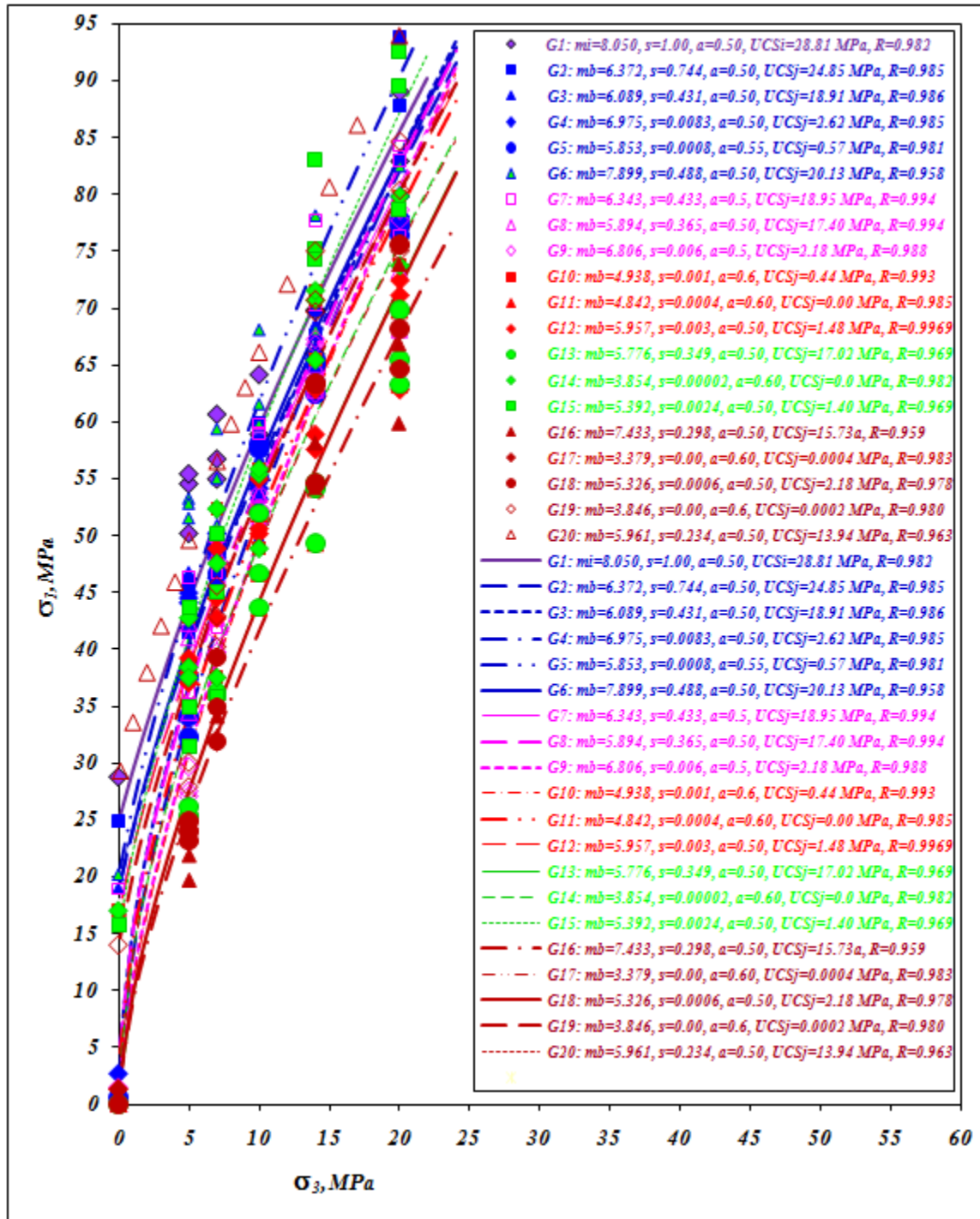
رابطه بین مقاومت محوری (\square_1) و فشار جانبی (\square_3) برای ۲۰ گروه نمونه‌ها از حالت سنگ سالم تا به شدت درزه‌دار با استفاده از نرم‌افزار DataFit [۲۱] توسط معیار شکست هوک و همکاران [۱۵] تحلیل آماری شد (شکل ۶) و مقادیر پارامترهای معیار شکست برای ۲۰ گروه نتایج تعیین شد. ضریب همبستگی معیار شکست هوک و همکاران بیشتر از معیار رامامورتی است (جداول ۱، ۲ و شکل ۶).

به جای مقاومت فشاری یک‌محوری توده‌سنگ (\square_c) در معیار شکست هوک و همکاران می‌توان مقاومت فشاری یک‌محوری سنگ درزه‌دار (\square_{cj}) قرار داد و رابطه بین پارامترهای S و توان a با استفاده از رابطه ۱۱ به صورت زیر حاصل می‌شود.

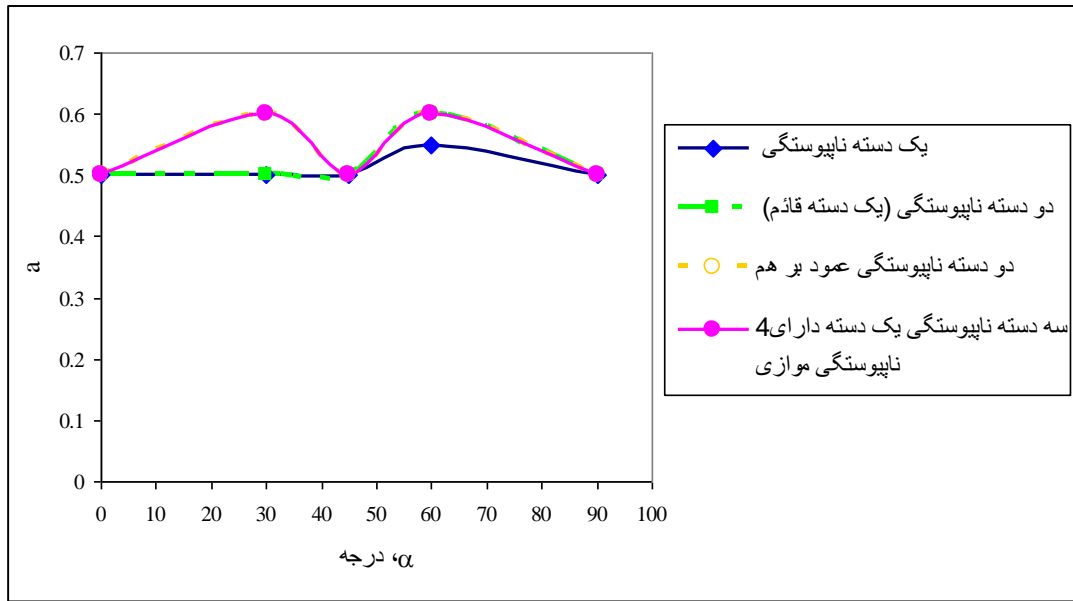
$$s = \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (15)$$

توان ثابت a در بیشتر حالات برابر ۰/۵ حاصل شد. در حالت وجود زاویه جهت‌یافتگی نمونه‌های دارای یک دسته ناپیوستگی (\square) برابر ۶۰ درجه، توان a برابر ۰/۵۵ حاصل شد. در حالت وجود زاویه جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها در نمونه‌های دارای دو دسته ناپیوستگی عمود بر هم و سه دسته ناپیوستگی متقاطع برابر ۳۰ و ۶۰ درجه، توان \square برابر ۰/۶ حاصل شد (شکل ۷).

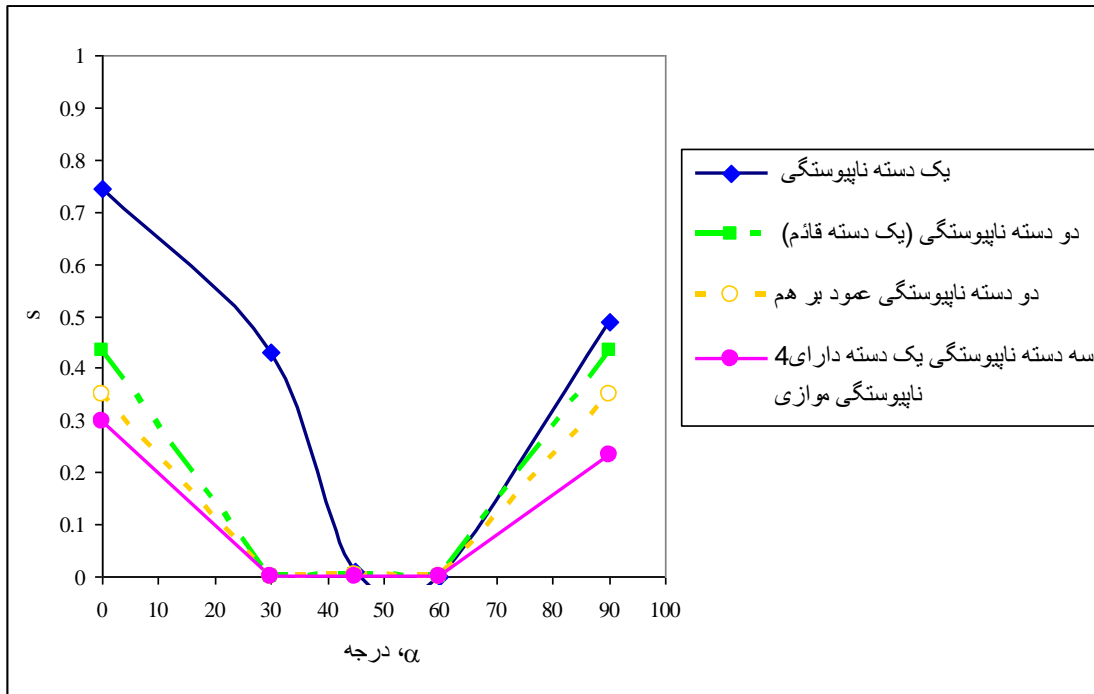
رابطه بین مقدار پارامتر s در معیار شکست هوک و همکاران و زاویه جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها (\square) با حالت افقی برای ۲۰ گروه نمونه‌های دارای یک، دو و سه دسته ناپیوستگی در شکل ۸ نشان داده شده است. مقدار پارامتر s با افزایش تعداد دسته درزه‌ها و فراوانی آنها کاهش می‌یابد و کمترین مقدار آن در حالتی است که یک دسته ناپیوستگی غالب با زاویه ۶۰ درجه در سیستم ناپیوستگی‌ها وجود داشته باشد. در حالتی که نمونه‌ها دارای دو و سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم و زاویه جهت‌یافتگی دو دسته ناپیوستگی‌ها (\square) برابر ۳۰ و ۶۰ درجه باشد، S به سمت مقدار صفر میل می‌کند و برای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم و دارای ۴ ناپیوستگی موازی با زاویه جهت‌یافتگی ۳۰ و ۶۰ درجه مقدار آن برابر صفر



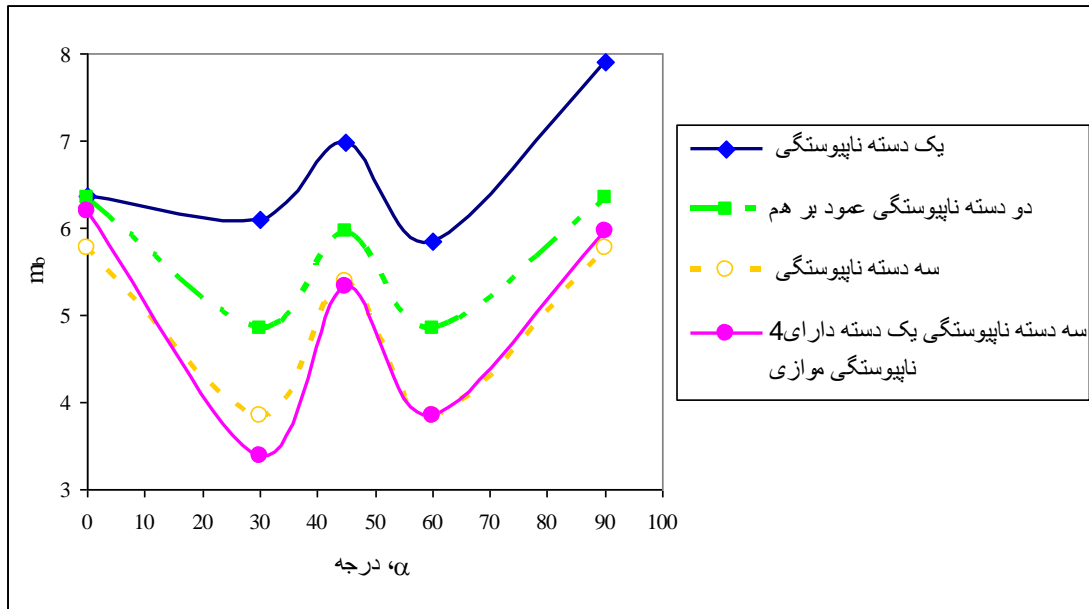
شکل ۶: رابطه بین مقاومت محوری (σ_1) و فشار جانبی (σ_3) برای نتایج ۲۰ گروه نمونه‌های G1 تا G20 تعریف شده در جدول ۱ و ۲ همراه با پارامترهای معیار شکست هوک و همکاران شامل m_b , s , a , مقاومت فشاری یک‌محوری سنگ درزه‌دار (UCS_j) و ضریب همبستگی (R)



شکل ۷: رابطه بین توان ثابت a در معیار شکست هوک و همکاران [۱۵] و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی ها (\square) با حالت افقی برای نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری نمونه های دارای یک، دو و سه دسته ناپیوستگی و فراوانی مختلف



شکل ۸: رابطه بین مقدار ثابت s در معیار شکست هوک و همکاران [۱۵] و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی ها (\square) با حالت افقی برای نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری نمونه های دارای یک، دو و سه دسته ناپیوستگی و فراوانی مختلف



شکل ۹: رابطه بین ضریب مقاومت فشاری سه محوری (m_b) در معیار شکست هوک و همکاران [۱۵] و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها (α) با حالت افقی برای نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری نمونه‌های دارای یک، دو و سه دسته ناپیوستگی و فراوانی مختلف

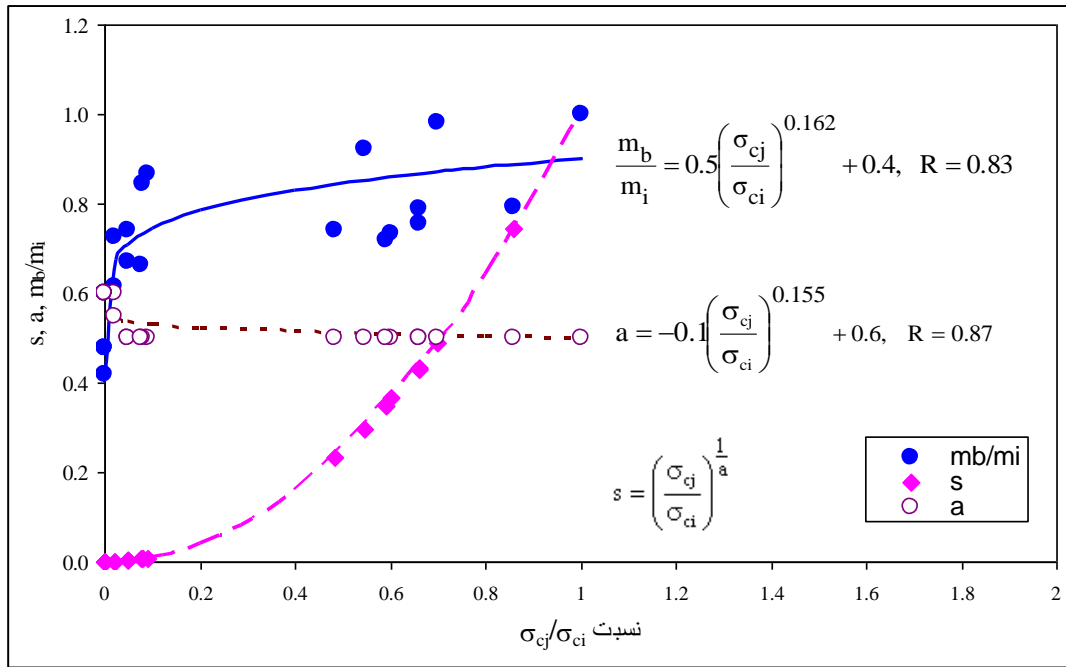
توان ثابت a برای مقادیر خیلی کم (نزدیک به صفر) نسبت σ_{cj}/σ_{ci} دارای مقادیر ۰/۵۵ تا ۰/۶ است و با افزایش نسبت σ_{cj}/σ_{ci} دارای مقدار ثابت ۰/۵ است و مقدار پارامتر S با افزایش نسبت σ_{cj}/σ_{ci} افزایش می‌یابد. نسبت ضریب مقاومت فشاری سه محوری (m_b/m_i) به صورت تابع توانی ابتدا در مقادیر کم نسبت σ_{cj}/σ_{ci} به شدت افزایش یافته و برای نسبت σ_{cj}/σ_{ci} بزرگتر از حدود ۰/۱۵ تغییرات افزایش آن در مقایسه کم است (شکل ۱۰). مقدار نسبت σ_{cj}/σ_{ci} با استفاده از ضریب درزه‌داری (رابطه ۴) تعریف شده توسط رامامورتی و سپس با استفاده از رابطه ۹ حاصل از این تحقیق برای سنگ آهک قابل تعیین است. بنابراین پارامترهای معیار شکست هوک و همکاران نیز با داشتن ضریب درزه‌داری قابل تعیین هستند.

رابطه بین نسبت ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری توده‌سنگ به سنگ سالم (m_b/m_i)، مقدار پارامتر S و توان a در معیار شکست هوک و همکاران با نسبت σ_{cj}/σ_{ci} نتایج با استفاده از نرم‌افزار DataFit تجزیه و تحلیل و روابط زیر حاصل شدند (شکل ۱۰).

$$a = -0.1 \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} \right)^{0.155} + 0.6 \quad (16)$$

$$s = \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (17)$$

$$\frac{m_b}{m_i} = 0.5 \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} \right)^{0.162} + 0.4 \quad (18)$$



شکل ۱: رابطه بین نسبت ضریب مقاومت فشاری سه محوری (m_b/m_i)، مقدار پارامتر s و توان a در معیار شکست هوک و همکاران و نسبت مقاومت فشاری یک محوری توده سنگ درزه دار به مقاومت فشاری یک محوری سنگ سالم (σ_{cj}/σ_{ci})

۴- نتیجه گیری

۱- نتیجه تحلیل داده‌ها با استفاده از معیار شکست رامامورتی نشان داد که پارامتر توان \square دارای یک مقدار حداقل در زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها (\square) برابر ۶۰ درجه برای یک دسته ناپیوستگی است و برای دسته ناپیوستگی یا بیشتر، مقدار حداقل پارامتر \square در زاویه جهت یافتگی برابر ۳۰ درجه نیز اتفاق می‌افتد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد وقتی که زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی‌های متقاطع برابر ۳۰ و ۶۰ درجه است، نسبت σ_{cj}/σ_{ci} به صفر نزدیک شده و در نتیجه مقدار پارامتر \square نیز به سمت صفر میل می‌کند. این باعث می‌شود رابطه بین مقاومت محوری (\square_1) و فشار جانبی (\square_3) در معیار شکست رامامورتی (معادله ۳) به سمت رابطه

$$\square_3 = (1 + B_j) \square_1 \quad \text{خطی} \quad \text{میل کند.}$$

۲- ضریب مقاومت فشاری سه محوری (B_j) حاصل از نمونه‌های دارای دو و سه دسته ناپیوستگی که دارای نسبت σ_{cj}/σ_{ci}

۳- در حالتی که نمونه‌ها دارای دو و سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم و زاویه جهت یافتگی دو دسته ناپیوستگی‌ها (\square) برابر ۳۰ و ۶۰ درجه باشد، S به سمت مقدار صفر میل می‌کند و برای سه دسته ناپیوستگی متقاطع و عمود بر هم و دارای ۴ ناپیوستگی موازی با زاویه جهت-یافتگی ۳۰ و ۶۰ درجه مقدار آن برابر صفر است. وقتی که S به سمت مقدار صفر میل می‌کند مقاومت کششی و فشاری یک محوری توده سنگ نیز به سمت صفر میل می‌کند و رابطه

مراجع

- [1] Lianyang, Z. 2010, "Estimating the strength of jointed rock masses", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 43, No. 4, pp 391-40.
- [2] Verma, AK, Singh T.N. Amit K.V. 2010, "Modeling of a jointed rock mass under triaxial conditions", Arab J Geosci., 3, pp. 91 - 103.
- [3] Arora, V.K. 1987, "Strength and deformational behavior of jointed rocks", Ph.D thesis Indian Institute of Technology", Delhi, India.
- [4] Karaku, H., Ulusay, R. and Isik, N.S. 2010, "Empirical models and numerical analysis for assessing strength anisotropy based on block punch index and uniaxial compression tests", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 47, 657-665.
- [5] Hossaini, S.M.F. 1993, "Some aspects of the strength characteristics of intact and jointed rocks", Ph.D. Thesis, University of New South Wales.
- [6] Singh T.N. Singh, V.K. 1999, "Effect of confined and unconfined stress on jointed rocks". J Ind Eng Mater Sci 65, pp. 108 - 205.
- [7] Lama, R.D. 1974, "The uniaxial compressive strength of jointed rock", Muller L. Festschrift, Institute of soil mechanics and rock mechanics, University of Karlsruhe.
- [8] Singh, M., Rao, K.S., Ramamurthy, T. 2002, "Strength and deformational behavior of a jointed rock mass", Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer-Verlag, Printed in Austria, Vol. 35, No. 1, pp. 45 - 64.
- [9] Chong, W.L., Haque, A. Gamage R.P. and Shahinuzzaman, A. 2013, "Modelling of intact and jointed mudstone samples under uniaxial and triaxial compression", Arab J Geosci, 6, pp 1639-1646.
- [10] Boon, C.W., 2013, "Distinct element modelling of jointed rock masses: algorithms and their verification", Ph.D. Thesis, The University of Oxford, 250 pages.
- [11] ISRM, 1983, "Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: Revised version". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 20, pp. 283 - 290.
- [12] Ramamurthy, T. 2001, "Shear strength response of some geological materials in triaxial compression", Int. J. Rock Mech. Min, 38, 683-697.
- [13] ISRM, 1981, "Suggested methods for determination of direct shear strength". Rock Characterization Testing and Monitoring, ed. by Brown, ET., pp. 135 - 137.
- [14] Moomivand. H., Mohammadi, M.A., Hajizadeh, F. and Saei, M.R., 2011, Final Rresearch Report, "An investigation into the effect of orientation, frequency

معیار شکست از مبدأ مختصات می‌گذرد. این همان مصداق توده‌های سنگ به شدت درزه‌دار و سست است که پارامترهای معیار شکست آن در این تحقیق تعیین شده‌اند.

۴- با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌ها به ویژه وقتی که مقدار زاویه جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها (\square) برابر ۳۰ و ۶۰ درجه است، توان ثابت a افزایش می‌یابد، بر عکس مقدار s کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار s برای یک دسته ناپیوستگی دارای زاویه جهت‌یافتگی (\square) برابر ۰ درجه اتفاق می‌افتد.

۵- با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌ها و فراوانی آنها ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری (m_b) کاهش می‌یابد و مقدار حداقل آن در زاویه جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها (\square) ۳۰ و ۶۰ درجه برای ناپیوستگی‌های متقاطع اتفاق می‌افتد. تعداد دسته ناپیوستگی‌ها، فراوانی و زاویه جهت‌یافتگی آنها (\square) تأثیر قابل توجهی بر ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری در معیار شکست هوک و همکاران دارند. به طوری که با افزایش تعداد دسته ناپیوستگی‌های متقاطع تأثیر جهت‌یافتگی در پارامترهای معیار شکست شدیدتر می‌شود.

۶- مقدار s با افزایش نسبت σ_{cj}/σ_{ci} افزایش می‌یابد. همچنین نسبت ضریب مقاومت فشاری سه‌محوری (m_b/m_i) به صورت تابع توانی ابتدا در مقادیر کم نسبت σ_{cj}/σ_{ci} به شدت افزایش یافته و برای نسبت σ_{cj}/σ_{ci} بزرگتر از حدود ۰/۱۵ تغییرات افزایش آن در مقایسه کم است (شکل ۱۰). مقدار نسبت σ_{cj}/σ_{ci} با استفاده از ضریب درزه‌داری (رابطه ۴) تعریف شده توسط رامامورتی و سپس با استفاده از رابطه ۹ حاصل از این تحقیق برای سنگ آهک قابل تعیین است. بنابراین پارامترهای معیار شکست هوک و براون با داشتن ضریب درزه‌داری قابل تعیین هستند.

۵- تشکر و قدردانی

از آقایان مهندس محمد رضا ساعی و مهندس حسام‌الدین مومیوند برای زحمات طاقت فرسا در همراهی با آماده‌سازی و آزمایش نمونه‌های سنگ به ویژه به شدت درزه‌دار تحت تنش-های سه‌محوری در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه ارومیه تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

- [20] Ramamurthy, T. 2008, "*Joint factor concept in solving rock engineering problem*", In: proceedings of the 5th Asian Rock Mechanics Symposium, November 24-26, Tehran, 147-148.
- [21] DataFit, 1992, "*Data fitting by linear and multiple non-linear regression*", P.O.Box 1743, Macquarie Centre, N. S. W. 2113, Australia.
- [22] Hoek, E. and Brown, E. T. 1980, "*Underground excavations in rock*" London: Instn. Min. Metall.Toronto, 31-38.
- [23] Hoek, E. and Brown, E. T. 1988, "*The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update*", In: proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, University of
- [24] Hoek E., Wood, D. and Shah, S., 1992, "*A modified Heok-Brown failure criterion for jointed rock masses*", Eurock 1992, London, Thomas Telford, pp. 209 - 214.
- [25] Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F., 1995, "*Support of underground excavation in hard rock*", Rotterdam, Balkema.
- [26] Hoek, E. and Brown, E. T., 1997, "*Practical estimates of rock mass strength*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34, No. 8, pp. 1165-1186.
- and number of sets of discontinuities on the rock strength under triaxial stresses", West Azarbaijan Regional Water Authority, Iran Water Resources Management Company, 285 pages.
- [15] Hoek, E., Carranza- Torres, C. and Corkum, B. 2002, "*Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*", In: Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: University of Toronto, 207-271.
- [16] Yudhbir, Lemanza, W. and Prinzl, F. 1983, "*An empirical failure criterion for rock masses*", In: proceedings of the 5th International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Balkema, Rotterdam, 1, B1-B8.
- [17] Sheorey, P. R., Biswas, A. K. and Choubey, V. D. 1989, "*An empirical failure criterion for rocks and jointed rock masses*", Engineering Geology, Vol. 26, pp. 141-159.
- [18] Ramamurthy, T. and Arora, V.K. 1994, "*Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states*", Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 31:1: 9 –22.
- [19] Ramamurthy ,T., Rao, G.V. and Singh, J. 1988, "*A strength criterion for anisotropic rocks*", Proc. 5th Australia-New Zealand Conf. on Geomechanics, Sydney, 1:253-257.