نکات اساسی در انتخاب داده‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی معیارهای شکست سنگ

محمد فاروق حسینی
استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران
(تاریخ دریافت ۷۶/۱۰/۱، تاریخ تصویب ۷۷/۴/۳۰)

چکیده

در این مقاله روش صحیح ارزیابی میزان کارآیی معیارهای شکست سنگ که معمولاً بااستفاده از نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری یک محوره و سه محوره انجام می‌پذیرد ارائه شده است . شرایط و ویژگیهایی که باید مورد توجه قرار گیرند جداگانه مورد بحث واقع شده و میزان اهمیت هرکدام باتوجه به نتایج آزمایشهایی که نگارنده به این منظور انجام داده است نشان داده شده است .

عوامل موثر و اساسی در انتخاب داده‌های مناسب عبارتند از : مرز شکنندگی و شکل پذیری در رفتار سنگ ، حداقل تعداد داده‌هایی که در هر گروه باید موجود باشد، طیفی از فشار جانبی که تحت آن آزمایشهای سه محوره انجام گرفته است و بالاخره شکل و اندازه نمونه هایی که آزمایش شده‌اند.

این نوشتار حاصل مروری انتقادی بر روشهای پژوهشی دیگران، یافتن نقاط ضعف آنها و در نتیجه ارائه راه‌حل برای رفع معایب کارهای پیشین است.

بااستفاده از نتایج تحلیل ها و بررسیهای وسیعی که در این مورد صورت گرفت، ثابت شده است که کم توجهی به عوامل مورد اشاره موجب گمراهی و نتیجه گیریهای غلط خواهد گردید.

این مقاله برای کسانی که علاقمند و یا دست اندرکار پژوهشهای مربوط به ویژگیهای مکانیکی سنگ می‌باشند شیوه صحیح ایجاد یا انتخاب داده‌های آزمایشگاهی را روشن می نماید.

کلید واژه‌ها: معیار شکست ، مکانیک سنگ ، آزمایش های فشاری ، مقاومت سنگ ، داده‌های آزمایشگاهی

مقدمه

در مهندسی مکانیک سنگ انتخاب یک معیار شکست مناسب که توانایی برآورد مقاومت سنگ موردنظر را داشته باشد از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. در پروژه‌های معدنی و عمرانی پس از اینکه با تحلیل تنشهای موجود وضعیت توزیع تنش در نواحی مختلف اطراف فضای زیرزمینی یا سازه موردنظر بدست آمد، فقط بااستفاده از یک معیار شکست کارآمد می توان نحوه رفتار سنگ و توده‌های سنگی را در واکنش به این تنشها برآورد کرد.

معیارهای شکست نظری که بر مبنای مکانیزم شکست بنانهاده شده‌اند با داده‌های آزمایشگاهی تطبیق نمی‌کنند. برای رفع این مشکل محققین فرمولهای تجربی متعددی را پیشنهاد کرده‌اند.

داده‌های آزمایشگاهی محک خوبی برای ارزیابی مقاومت سنگ و توده‌های سنگی است. در مقالات و منابع مختلف داده‌های آزمایشگاهی فراوانی یافت می‌شود که می‌تواند برای بررسی کارآیی هر معیار شکستی مورد استفاده قرار گیرد. چنانچه یک فرمول مقاومت با چنین داده‌هایی هماهنگ نباشد قطعاً کارآیی آن در پیش بینی موارد واقعی و بزرگ مقیاس نیز زیر سئوال خواهد بود.سوابق امر نشان داده است که هیچ یک از روابط متعددی که تاکنون ارائه شده‌اند به عنوان یک فرمول جامع

که توصیف کننده مقاومت مواد ژئومکانیکی است مورد قبول واقع نشده‌اند.

بنابر آنچه گفته شد تا ارائه یک فرمول مناسب و جامع هنوز کار بسیاری باید انجام پذیرد. یکی از ابزارهای اجتناب ناپذیر در چنین تحقیقاتی آزمودن فرمولهای موجود و یا فرمول های احتمالی جدید با داده‌های حاصل از نتایج آزمایش‌های مقاومت سه محوره انواع سنگهاست. در بررسی‌های گسترده‌ای که نگارنده در این موضوع انجام داده اشکالات و ضعفهایی در روش کار بسیاری از پژوهشگرانی که پا در این وادی گذاشته‌اند مشخص شد. پاره‌ای از عواملی که در این پژوهشها مورد بی توجهی قرار گرفته‌اند آنچنان نقش عمده‌ای در نتیجه کار دارند که عدم رعایت آنها حاصل کار را بی اعتبار می نماید.

نگارنده بر آن است که روش صحیح تحقیق در این موضوع را که حاصل بررسی های همه جانبه در این باره است در سلسله‌ای از مقالات ارائه نماید تا پژوهشگرانی را که علاقمند به این شاخه از مباحث مربوط به علم مکانیک سنگ هستند در انتخاب روش صحیح یاری رساند.

در مقاله حاضر پس از اشاره مختصری به شکل معیارهای شکست موردنظر، نکات اساسی در انتخاب داده های آزمایشگاهی به تفکیک مورد بحث قرار می گیرند.

معیار شکست

شکل عمومی یک معیار شکست بصورت زیر است :

$$\sigma_1 = f(\sigma_2 \text{ و } \sigma_3)$$

که در آن σ_1، σ_2 و σ_3 تنشهای اصلی هستند.

بدیهی است که با استفاده از روابط تبدیل تنشها، رابطه فوق را می توان در مورد یک صفحه معین در سنگ برحسب تنش‌های برشی (τ) و قائم (σ_n) بصورت $\tau = f(\sigma_n)$ نیز عنوان کرد.

از آنجاکه بررسی های انجام شده نشان از آن دارد که تنش اصلی میانی (σ_2) نسبت به تنش اصلی حداقل (σ_3) تاثیر بسیار ناچیزی در مقاومت دارد، در عمل تمام معیارهای شکست مربوطه به شکل ساده‌تر $\sigma_1 = f(\sigma_3)$ در آمده‌اند. چنانچه این رابطه را بصورت نرمال شده آن (برحسب مقاومت یک محوره فشاری، σ_c) در نظر بگیریم، فرمول به شکل زیر درخواهد آمد:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = f(\frac{\sigma_3}{\sigma_c})$$

پژوهشگران مختلف باتوجه به مورد خاصی که مدنظرشان بوده است و یا داده‌هایی که در اختیار داشته‌اند تاکنون ده‌ها معیار شکست تجربی را برای سنگ ارائه کرده‌اند. بمنظور یادآوری فقط دومورد از فرمولهای مشهور آورده میشود.

معیار شکست بینیاوسکی [۱]

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = 1 + B(\frac{\sigma_3}{\sigma_c})^{\alpha}$$

که در آن B و α ضرائب ثابت‌اند. B برای هرنوع سنگ عددی ثابت و α برابر ۰/۷۵ درنظر گرفته شده است.

معیارشکست هوک وبراون [۲]

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = (\frac{\sigma_3}{\sigma_c}) + (s + m\frac{\sigma_3}{\sigma_c})^{0.5}$$

که در آن m و s ضرائب ثابت اند. m برای هرنوع سنگ یک عدد ثابت است و s برای سنگ سالم برابر واحد و برای توده سنگ کوچکتر از واحد است که به صورت تابعی از امتیاز توده سنگ که از روی طبقه بندی مشهور به RMR [۳] بدست می آید، عنوان شده است .

شرایط انتخاب داده ها

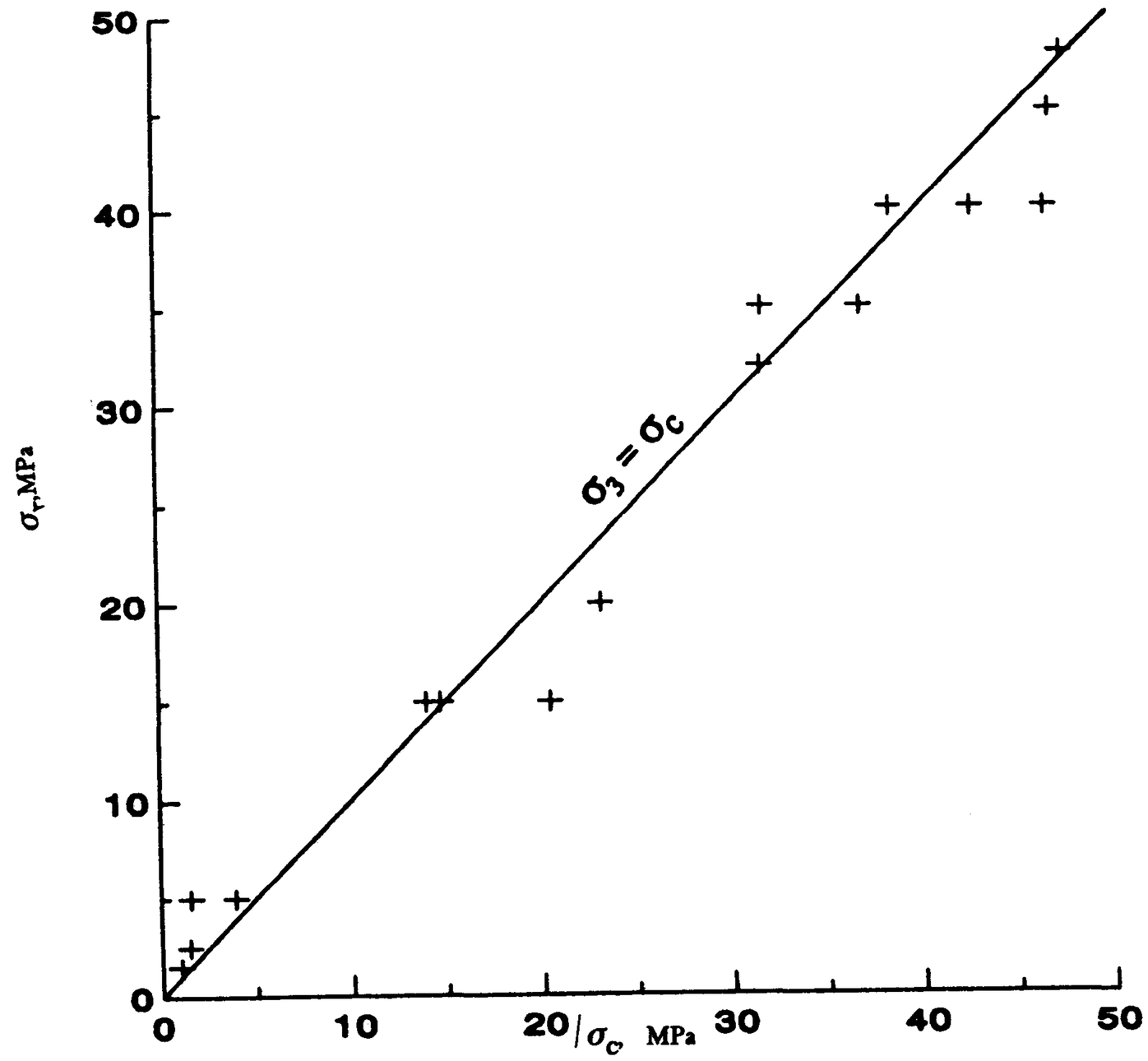
به منظور حذف آن دسته از داده‌های موجود در منابع مختلف که مناسب و قابل اعتماد نیستند شرایطی برای انتخاب هر دسته از داده‌ها به شرح زیر ضرورت دارد:

رعایت مرز شکنندگی

از آنجاکه بیشتر معیارهای شکست برای وضعیت شکست ترد[1] پیشنهاد شده‌اند، باید در ارزیابی چنین فرمولهایی فقط آن بخش از داده‌ها که در محدوده وضعیت ترد (شکننده) هستند دخالت داده شوند.

گرچه مرز دقیق گذر از شکنندگی به شکل پذیری[2] برای سنگ هنوز یک موضوع بحث‌انگیز است اما می‌توان

1 - Brittle fracture 2 - Brittle-ductile transition



شکل ۱ : رابطه بین فشار جانبی (σ_3) متناظر با گذر از شکنندگی به شکل پذیری و مقاومت فشاری یک محوره (σ_c) برای نمونه‌هایی از ماسه سنگ که سالم ، دارای درزه‌های صاف و یا درزه‌های ناصاف هستند.

از یکی از راه‌حلهای موجود در این زمینه استفاده کرد. موگی [۴] در یک بررسی وسیع مرز وقوع این تبدیل را برای بیشتر سنگها وضعیت $\sigma_1 = ۳/۴\sigma_3$ اعلام کرده است. هوک [۵] نقطه تبدیل شکنندگی به شکل پذیری را برای سنگ آهک $\sigma_1 = ۳/۴\sigma_3$ یافته است . او همچنین اعلام کرد که در محدوده‌ای که $\sigma_3<\sigma_c$ است رفتار سنگ بصورت ترد (شکننده) باقی خواهد ماند. تحقیقات هوک [۵] و رامامورثی [۶] محدوده وسیع ۱/۵ تا ۲/۸ را برای نسبت $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ پیشنهاد می‌کند.

نگارنده در بررسی این موضوع و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که خود تولید کرده است مرز گذر از شکنندگی به شکل پذیری برای ماسه سنگ را تعیین کرده است. در این بررسی نتایج آزمایش هایی که در آنها نسبت ارتفاع به قطر نمونه ($\frac{H}{D}$) متفاوت بوده است نیز دخالت داده شده است. نتیجه کار عدم دخالت نقش نسبت ارتفاع به قطر نمونه را وقتی که $\frac{H}{D} > ۲$ است در این موضوع نشان می‌دهد. حاصل این تحقیق برای نمونه‌هایی از سنگ سالم، نمونه‌های دارای درزه‌های صاف و نمونه‌های دارای درزه‌های ناصاف در شکل ۱ نشان داده شده است.

چنانچه از این شکل مشهود است برای ماسه سنگ معیار $\sigma_3 = \sigma_c$ تعیین کننده مرز شکنندگی و شکل پذیری است در سایر موارد یا می‌توان همین رابطه را معیار قرار داد و یا از رابطه‌های فوق‌الاشاره حسب مورد استفاده کرد.

لازم به یادآوری است که در مورد نمونه‌های زغال سنگ اعمال این شرط ضرورتی ندارد زیرا براساس بررسی‌های انجام شده توسط داس و شئوری [۷] رفتار نمونه‌های زغال سنگ پس از محدوده شکنندگی بصورت محسوسی تبدیل به شکل‌پذیر نمی شود.

تعداد داده‌های هر گروه

هردسته از داده‌ها باید علاوه بر مقاومت یک محورهٔ فشاری (σ_c) حداقل دارای سه جفت عدد حاصل از آزمایشهای سه محوره فشاری (σ_1 و σ_3) باشد. واضح است که تعداد بیشتر اعداد کمک بیشتری به کیفیت قضیه

خواهد کرد.

محدودهٔ مقدار فشارجانبی (σ_3)

نتایج آزمایشهایی که برای این منظور مورداستفاده قرار می گیرد باید دربرگیرنده طیف مناسبی از فشار جانبی (σ_3) از مقادیر کم تا مقادیر نسبتاً زیاد باشد تا بتوان دامنه نسبتاً وسیعی از نقاط را برای تعیین یک منحنی در اختیار داشت. در این مورد توصیه می شود که در بین هر گروه از داده‌ها حداقل نتیجه یک آزمایش که در فشارجانبی بزرگتر از نصف مقاومت فشاری یک محوره نمونه موردنظر ($\sigma_3 > \frac{\sigma_c}{2}$) انجام گرفته است موجود باشد.

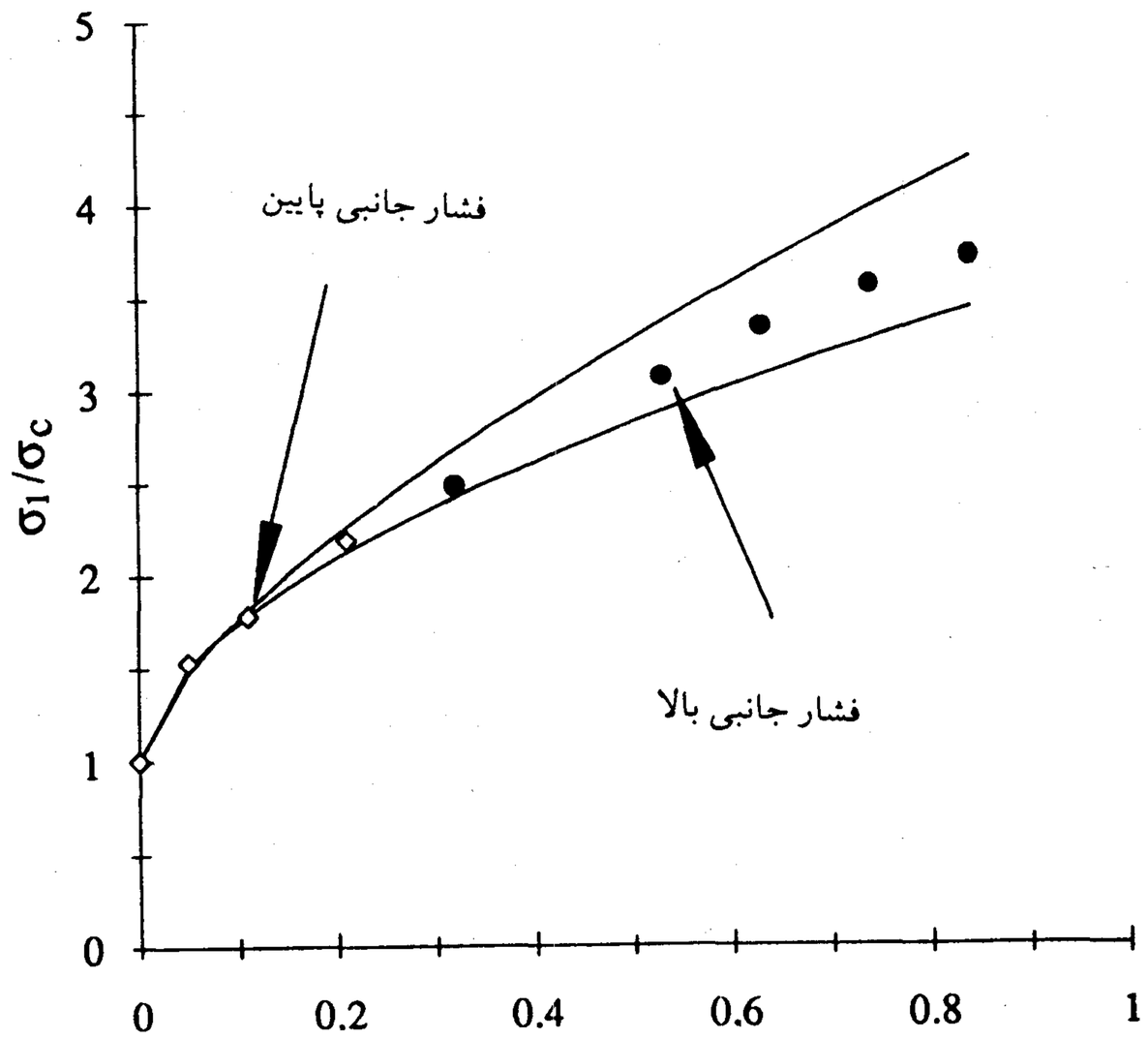
اهمیت این موضوع را می توان از شکل ۲ استنباط نمود. این شکل بااستفاده از نتایج آزمایش‌های فشاری یک محوره و سه محوره که توسط نگارنده برروی نمونه‌های ماسه سنگ انجام گرفته ترسیم شده است. مقاومت فشاری یک محوره این ماسه سنگ ۴۸ MPa است. نقاطی که متناظر با فشارجانبی تا ۱۰MPa هستند به عنوان فشار جانبی پایین مشخص شده‌اند و حداکثر فشار جانبی اعمال شده ۴۰MPa بوده است.

چنانچه از این شکل معلوم است اگر ملاک پردازش منحنی فقط نقاطی باشد که مربوط به فشار جانبی پایین هستند به دلیل نبود نقاط در منطقه فشار جانبی بالا، منحنی مربوطه می‌تواند حالت های مختلفی به خود بگیرد که در هر حالت گرچه هم خوانی آن با نقاط مربوط به فشار جانبی پایین مناسب است اما در هیچ حالتی نقاط مربوط به فشار جانبی بالا را نپوشاند. همین ناهماهنگی در زمانی که ملاک کار فقط داده های مربوط به فشارجانبی بالا باشد، در مورد منطقه فشارجانبی پایین پیش خواهد آمد.

بنابرآنچه گفته شد، اگر داده های انتخاب شده در محدوده مناسبی از فشارهای جانبی قرار نگیرد، در هنگام تعیین پارامترهای هر معیار شکستی که مدنظر باشد (مثلاً پارامتر m در معیار هوک و براون) این اشکال پیش خواهد آمد که برای یک گروه معین از داده‌ها مقادیر مختلفی برای پارامتر مربوطه بدست خواهد آمد که ممکن است هیچکدام مناسب نباشند. این مشکل با داشتن نقاطی که طیف مناسبی از فشار جانبی را در بر می گیرند برطرف خواهد شد.

شکل نمونه

شکل نمونه های آزمایش شده که داده‌های مربوط به آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد باید حتی‌الامکان یکی باشد تا از تاثیر شکل [1] بر نتیجه کار اجتناب شود. لازم به

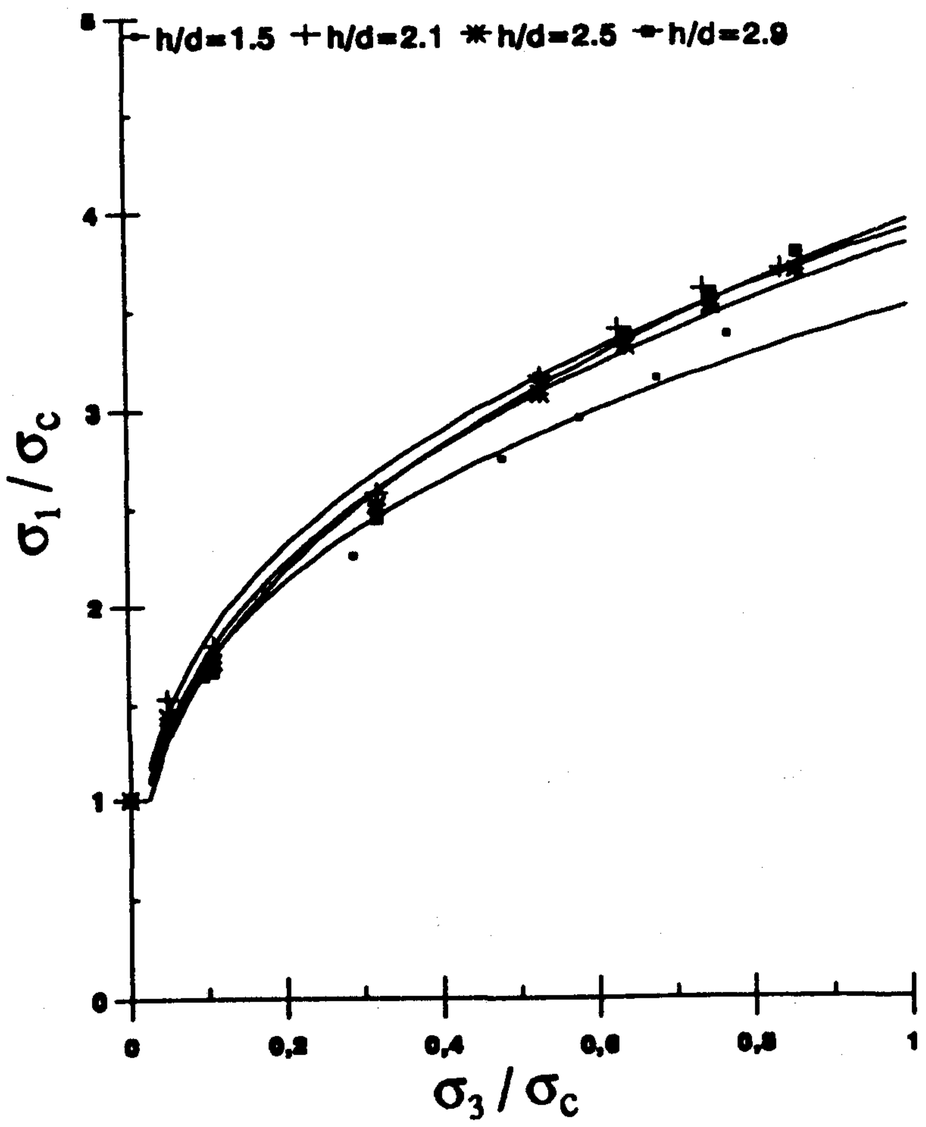


شکل ۲ – تاثیر محدوده مقادیر σ_3 در تعیین منحنی معیارشکست .

1 - Shape effect

یادآوری است که اصطلاحاً نسبت طول نمونه به قطر آن ($\frac{H}{D}$) شکل نمونه نامیده می شود. البته گاه اعمال این شرط به دلیل اینکه در بعضی از منابع ذکری از اندازه قطر و ارتفاع نمونه‌های آزمایش شده به میان نمی‌آید مشکل خواهد بود. نیازی به توضیح نیست که امروزه نمونه‌های مورد آزمایش عموماً استوانه‌ای شکل هستند.

به منظور تبیین تاثیر این عامل نتایج آزمایشهای انجام شده توسط نگارنده برروی نمونه‌های ماسه سنگ با نسبتهای ارتفاع به قطر متفاوت در شکل ۳ آورده شده است. چنانچه از این شکل پیداست ، منحنی‌های هماهنگ با هردسته از نتایج که مربوط به نمونه‌های با نسبت $\frac{H}{D}$ معین هستند با منحنی مربوط به دسته دیگر متفاوت است. همچنین برای گروه هایی که نسبت ارتفاع به قطر در آنها ۲/۱ و بیشتر است این منحنی‌ها از هم خوانی بیشتری برخوردارند.



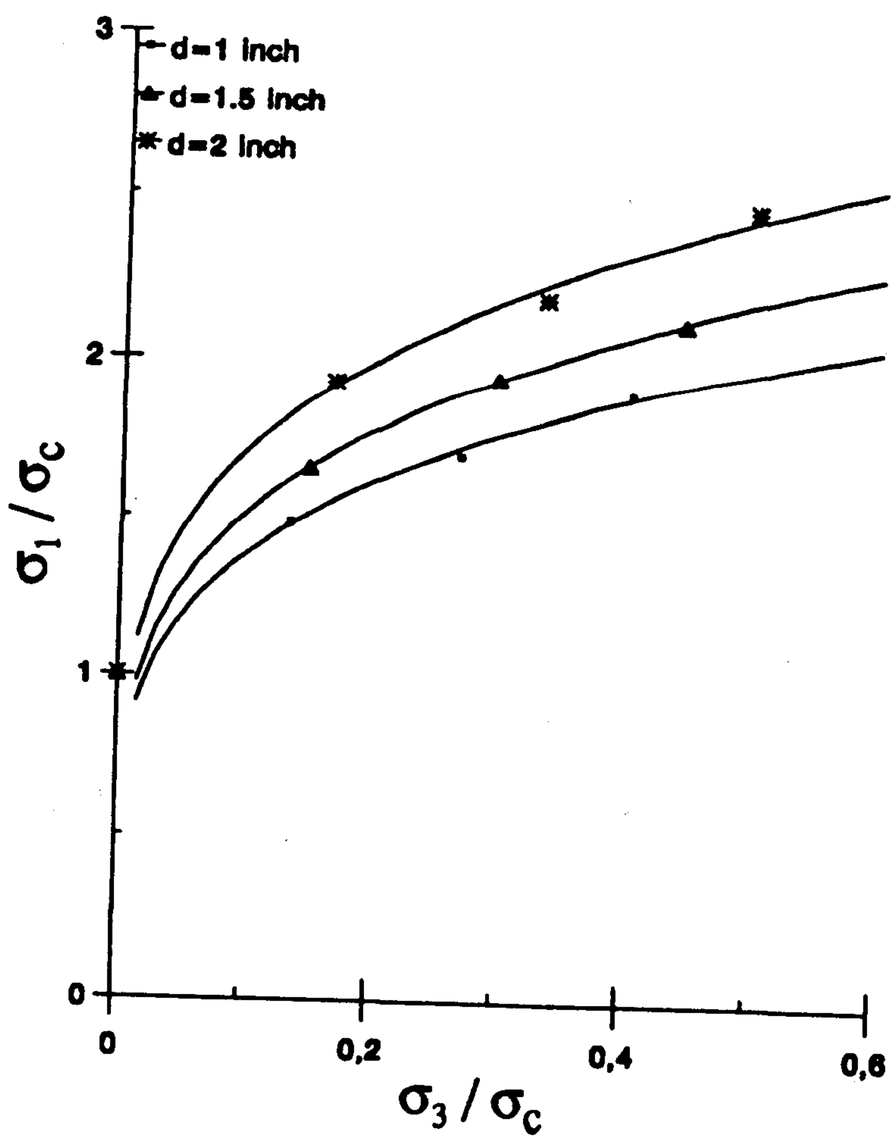
شکل ۳ - تاثیر شکل (نسبت $\frac{H}{D}$) در شکل منحنی معیار شکست مربوط به ماسه سنگ آزمایش شده در این پژوهش.

این تفاوتها در حالی است که نمونه‌های موردنظر از یک بلوک سنگ بوده و با تکنیک واحد، امکانات آزمایشگاهی واحد و توسط فرد واحدی آزمایش شده‌اند. طبیعی است که ناهماهنگیها برای گروه‌هایی از داده‌ها که از منابع متفاوت می‌آیند بیشتر خواهد بود.

برای اجتناب از تاثیر $\frac{H}{D}$ باید داده‌هایی را انتخاب کرد که نسبت ارتفاع به قطر در آنها بالاتر از مقدار بحرانی باشد. مقدار بحرانی طبق استانداردهای موجود ۲ و در بعضی از موارد ۲/۵ عنوان شده است. باید اذعان کرد که یافتن داده‌هایی با این ویژگی در منابع موجود کار ساده‌ای نمی‌باشد.

اندازه (قطر نمونه)

در بررسی هایی که در این باره انجام شد معلوم گردید که گرچه نمونه‌ها دارای شکل ($\frac{H}{D}$) یک نواختی باشند، چنانچه قطر نمونه‌ها متفاوت باشد منحنی‌های $\frac{\sigma_1}{\sigma_c}$ برحسب $\frac{\sigma_3}{\sigma_c}$ متفاوت بوده و هرگروه از داده‌ها منحنی ویژه‌ای را می‌طلبد. شکل ۴ این واقعیت را به وضوح نشان می دهد. در این شکل از داده‌های تولید شده توسط هانت [۸] که حاصل آزمایشهای او برروی نمونه‌های پلاستر است استفاده شده است. نمونه های مورد آزمایش دارای قطرهای ۱، ۱/۵ و ۲ اینچ و نسبت $\frac{H}{D}$ یکسان هستند.



شکل ۴ - تاثیر اندازه (قطر) در شکل منحنی معیارشکست برای نمونه‌های پلاستر.

نتیجه گیری

۱ - باتوجه به اهمیتی که معیارهای شکست در پیش بینی رفتار سنگ و توده‌های سنگی دارند، انتخاب معیار شکست مناسب نیازمند اطمینان از کارآیی آن معیار است. چون معیارهای شکست موجود دارای کاستی‌ها و نقاط ضعفند پژوهش در اینمورد از ضروریات اجتناب ناپذیر است.

۲ - داده‌های آزمایشگاهی وسیله مفیدی برای ارزیابی معیارهای شکست است. به دلیل تنوع در تکنیک های استفاده شده در آزمایش ها و تنوع اندازه و شکل نمونه‌ها، کیفیت و میزان اعتماد به نتایج آزمایش‌هایی که در منابع مختلف وجود دارند متفاوت و گاه غیرواضح است.
چنانچه تمام داده‌های انتخاب شده دارای ویژگیهای اعلام شده نباشند نباید انتظار داشت که در پردازش منحنی بر داده‌ها نتیجه صحیحی عاید گردد.

۳ - چنانچه به منظور بررسی و ارزیابی معیارهای شکست آزمایش هایی برروی نمونه‌های سنگ انجام می‌شود باید در تهیه نمونه‌ها و در انجام آزمایشها نکات مربوط به شکل و اندازه نمونه، طیف فشار جانبی اعمال شده، تعداد آزمایش های مورد لزوم برای تولید یک گروه از داده‌ها و توجه به مرز گذر از شکنندگی به شکل پذیری بدقت موردتوجه قرار گیرد. چنانچه از داده‌های تولید شده توسط دیگران استفاده میشود نکات مورد اشاره باید ملاک غربال و انتخاب داده‌های مناسب قرار گیرد.

۴ - ممکن است به ندرت گروهی از داده‌ها یافت شوند که علیرغم داشتن شرایط مورد اشاره به ناچار باید حذف گردند. چنین داده‌هایی ممکن است با یک سری از اصول مسلم و پذیرفته شده در مکانیک سنگ در تضاد باشند که نشان از وجود اشکالات عملی در تهیه نمونه‌ها یا نحوه آزمایش دارد. مثلاً چنانچه تقعر منحنی تشکیل شده بوسیله یک سری از نتایج آزمایش ها رو به بالا بوده و یا در بین مقاومتهای سه محوره بدست آمده (σ_1) مواردی باشد که مقدار آن کمتر از مقاومت یک محوره فشاری است، چنین گروهی از داده‌ها پذیرفتنی نبوده و نباید مورد استفاده واقع شود.

مراجع

1 - Bieniawski, Z. T. (1974)a. "Estimating the strength of rock materials." *J. S. African Institute of Mining and Metallurgy,* 74(8), 312-320.

2 - Hoek, E. and Brown, E. T. (1980). "Empirical strength criterion for rock masses." *J. Geotech. Engng. Div.,* ASCE, 106(GT9), 15715, Sep., 1013-1035.

3 - Bieniawski, Z. T. (1974)b. "Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling." *3rd Cong. Int. Soc. Rock Mech.,* 2(partA), 27-32.

4 - Mogi, K. (1966). "Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow." *Bull. Earthquake Res. Inst.,* Tokyo Univ., 44, 215-232.

5 - Hoek, E. (1983). "Strength of jointed rock masses." *Geotechniques,* 33(3), Sep., 187-223.

6 - Ramamurthy, T. (1986). "Stability of rock mass." *Indian Geotechnical Journal,* 16(1), 1-74.

7 - Das, M. N., and Sheorey, P. R. (1986). "Triaxial strength behaviour of some Indian coals." *Journal of Mines, Metals & Fuels,* March, 118-122.

8 - Hunt, D. D. (1973). "The influence of confining pressure on size effect." *M. S. Thesis, MIT.*