



تعیین گستره خرابی بریک- اوت پیرامون گمانه به کمک معیار موهر- کولمب و هوک- براون

علی لکی روحانی^{۱*}، جبارالدین عباسی^۲

^۱دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۲کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۱۱
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۰-۰۲
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

کلمات کلیدی:

مدل ریاضی دوبعدی
خرابی بریک-اوت
معیار خرابی موهر-کولمب
معیار خرابی هوک- براون
رفتار الاستیک

خلاصه: با حفر گمانه در توده سنگ و در اعماق زیاد توزیع تنش پیرامون آن برهم خورده و در مجاورت آن تمرکز تنش ایجاد می‌شود. اگر تنش‌های برشی ایجاد شده ناشی از فشار تنش‌های برجا، در سنگ پیرامون گمانه از مقاومت آن بیش‌تر شوند، باعث رخداد نوعی از خرابی در پیرامون گمانه می‌گردد که به آن خرابی بریک-اوت گفته می‌شود. مشاهده شده که نواحی خرابی بریک-اوت در امتداد تنش اصلی کوچک‌تر ایجاد شده و توسعه پیدا می‌کنند. در این مقاله با فرض رفتار الاستیک توده سنگ، به حل تحلیلی خرابی بریک-اوت با استفاده از معیار خرابی موهر- کولمب و هوک- براون برای مدل‌های دوبعدی پرداخته می‌شود و گستره خرابی با استفاده از این دو معیار بدست می‌آید. مطابق با نتایج بدست آمده از مدل ریاضی، پارامترهای مؤثر در عمق و عرض بریک-اوت رخ داده در پیرامون گمانه، وابسته به مشخصات مکانیکی مصالح موجود در معیار خرابی انتخاب شده و همچنین مقدار و نسبت تنش‌های برجا می‌باشند. در صورتیکه نسبت تنش‌های برجا یک باشد، خرابی از نوع بریک-اوت رخ نخواهد داد. همچنین با افزایش کیفیت سنگ، گستره خرابی بریک-اوت کم‌تر می‌شود و با کاهش مشخصات مکانیکی سنگ و افزایش مقدار و نسبت تنش‌های برجا محدوده خرابی بزرگ‌تر می‌شود.

۱- مقدمه

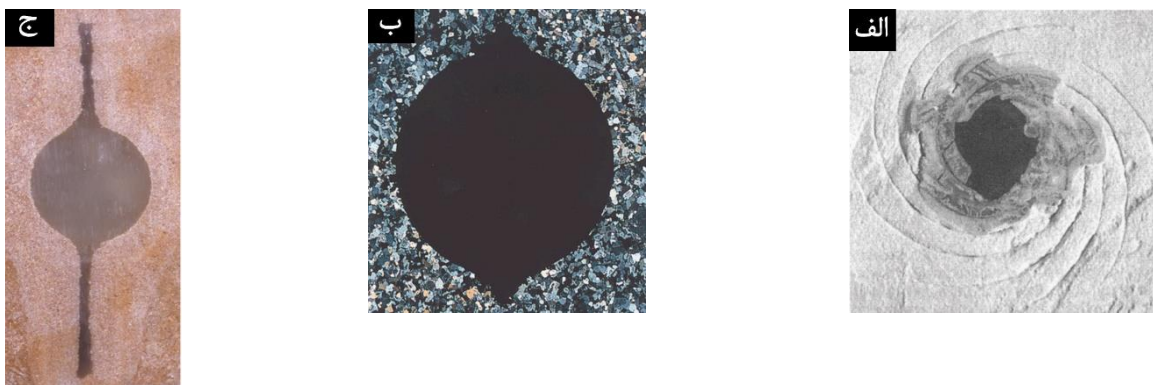
نقاطی از پیرامون گمانه که تمرکز تنش، از مقدار مقاومت سنگ بالاتر رود، در راستای تنش بر جای افقی کمینه اتفاق می‌افتد [۶-۲]. از لحاظ ساختاری، بریک-اوت یک پدیده گسیختگی است که در اغلب سنگ‌ها دیده شده است. کاوش‌های زیاد انجام شده در یک چاه یا مجموعه‌ای از چاه‌ها که در یک میدان تنش قرار دارند، نشان داده‌اند که بریک-اوت‌ها در یک راستای مشخص جهت‌گیری می‌کنند. امکان تعیین تنش‌های برجا برای هر چاه و بدست آوردن راستایی مشابه برای مجموعه‌ای از چاه‌ها که در آن‌ها شکستگی وجود دارد، اندازه و جهت گسیختگی را جزو داده‌های ارزشمند بریک-اوت قرار داده است [۳ و ۷].

محیط‌های سنگی که در اعماق زمین قرار دارند، همیشه تحت اثر تنش‌های برجای زیادی ناشی از وزن خود هستند. هنگامی که در این محیط‌ها حفاری انجام می‌شود، وضعیت تنش‌های برجای اطراف محل حفاری تا چندین برابر بزرگ‌ترین بعد حفاری دچار تغییر می‌شوند. وقتی این بازتوزیع تنش اتفاق می‌افتد اثر ناهمگنی یا حفره به صورت تنش‌های بسیار زیاد در مرز حفاری به شکل تمرکز تنش خود را نشان می‌دهند. اگر تنش‌های ایجاد شده در این نقاط بیش‌تر از مقاومت گسیختگی سنگ باشند خرابی‌های کششی یا برشی ایجاد می‌گردد [۱]. یکی از این انواع خرابی، پدیده بریک-اوت می‌باشد و در

محققان دریافتند که شکل بریک-اوت در چاه‌های عمودی وابسته به تنش‌های برجای افقی بیشینه و کمینه است، لذا از روی هندسه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rou001@znu.ac.ir





شکل ۱. مقاطع عرضی پدیده بریک-اوت گمانه الف- ماریچی شکل، در ماسه سنگ مصنوعی [۱۲]، ب- به شکل گوش سگ در گرانیت وسترلی^۱ [۱۸]، ج- شیاری شکل در ماسه سنگ آزتک^۲ [۱۹]

¹Westerly granite

²Aztec

Fig. 1. Cross-sections of borehole breakout. A) Spiral-Shaped in artificial sandstone [12]. B) Dog-Ear-Shaped in Westerly granite [18]. C) Slot-Shaped in Aztec sandstone [19]

آن می توان جهت و اندازه تنش های برجا را تخمین زد. اگرچه این روش باید با احتیاط استفاده شود، چون پدیده های مختلفی مانند کاهش مقاومت فشاری سنگ به دلیل نوسان های دما یا ترکیب شیمیایی سیالات حفاری، یا هوازدگی دیواره گمانه، به خصوص در توده سنگ های ضعیف یا ضعیف سیمانته شده، می توانند باعث توسعه یافتن بریک-اوت شوند. بریک-اوت ها همچنین می توانند به وسیله شدت حفاری (نیروی کم یا زیاد) و روش حفاری انتخاب شده تحت تأثیر قرار بگیرند [۸]. علاوه بر این، هنگامی که بریک-اوت ها برای تحلیل تنش ها بررسی می شوند، باید به وضوح از دیگر شکل های خرابی در چاه مانند آبستگی^۱ و گسیختگی کلیدی^۲ شکل، متمایز شوند. شکل ناحیه خرابی بریک اوت در سه دسته اصلی ماریچی شکل (به شکل پوسته پوسته شدگی پولکی^۳ یا یکنواخت)، شکل (به شکل گوش سگ^۴) و شیاری شکل^۵ (به شکل سوراخ کرم^۶) تقسیم می شوند (شکل ۱) [۵، ۱۷-۹].

اطلاعاتی کمی، درباره تغییر تنش سنگ در راستای طول گمانه دهد. همچنین او بیان کرد که شکستگی ها، عمود بر تنش اصلی بیشینه و در صفحه عمود بر محور چاه هستند [۲۰].

بل و گاف^۸ در سال ۱۹۷۹ بزرگ شدن شعاع چاه را از طریق شکستگی برشی توجیه کردند. تمرکز بریک-اوت ها در زاویه مشخص، نشان دهنده این بود که بریک-اوت نیازمند تنش های اصلی افقی نابرابر و مقاومت برشی اولیه محسوس در توده سنگ است [۲]. گاف و بل در سال ۱۹۸۲ برای تعیین وضعیت تنش در دیواره چاه، تئوری شکست ترد موهر-کولمب را بکار بردند [۲۱].

زوبک^۹ و همکاران در سال ۱۹۸۵ بر اساس مدلی که به وسیله گاف و بل در سال ۱۹۸۲ ارائه شده بود، روشی برای ارتباط بین تنش های برجا و بریک-اوت به دست آوردند. آن ها در این روش از راه حل کرش^{۱۰} برای تنش های اطراف یک حفره دایره ای شکل در محیط الاستیک خطی و پیوسته ایزوتروپ، تحت اثر میدان تنش دوبعدی استفاده کردند. سپس تنش های به دست آمده در معیار گسیختگی موهر-کولمب قرار داده شدند و در نهایت به روابطی برای ارتباط بین تنش های برجا و بریک-اوت دست یافتند [۳].

8 Bell and Gough
9 Zoback
10 Kirsch
11 Haimson and Edl

هیمنسن و ادل^{۱۱} در سال ۱۹۷۲ نمونه های خشک استوانه ای

لیمن^۲ در سال ۱۹۶۴ برای اولین بار بحث تنش عامل ایجاد بریک-اوت را مطرح کرد. او پوسته پوسته شدگی چاه را نتیجه تنش های زیاد فشاری دانست و بیان کرد که اندازه شکستگی در دیواره چاه می تواند

1 washout
2 key seat
3 flake-spalling
4 dog-ear-shaped
5 slot-shaped
6 wormhole
7 Leeman

گمانه ۱-EXP، پوهانگ کره پرداختند. برای ساختن بهترین مدل تنش تخمینی در این ناحیه از اندازه‌گیری‌های قبلی نقشه تنش جهانی و داده میدانی مدرن پنیسولای کره^۵ استفاده کردند. سپس داده‌های جدید حاصل‌شده از شکست هیدرولیکی و مشاهدات گمانه را برای تعیین اندازه و جهت تنش‌های افقی به مدل اضافه کردند. نتایج نشان داد که جهت تنش افقی بیشینه در مقایسه با جهت‌های گزارش‌شده به وسیله نقشه تنش جهانی در کره جنوبی، بیش‌تر از ۴۰ درجه در جهت عقربه‌های ساعت انحراف دارد [۲۴].

ژنگ^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۷ به‌وسیله مدل‌سازی المان محدود در شرایط پوروالاستیک، بریک-اوت را باهدف اندازه‌گیری تنش برجا بررسی کردند. آن‌ها دو گام را برای تعیین تنش برجا به‌وسیله تحلیل معکوس انجام دادند. اول، برای اندازه‌گیری بریک-اوت گمانه با استفاده از مدل‌سازی المان محدود داده‌هایی را به دست آوردند، سپس داده‌های به‌دست‌آمده را در شبکه عصبی مصنوعی وارد کردند تا ارتباط بین تنش برجا و بریک-اوت گمانه را پیدا کنند. دوم، یک اندازه خاص از بریک-اوت گمانه به شبکه عصبی مصنوعی داده شد تا تنش برجا به دست آید. نتایج نشان داد که تحلیل معکوس بر اساس مدل‌سازی المان محدود بریک-اوت گمانه و شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند در تعیین تنش‌های برجا مؤثر باشد [۲۵].

خطیبی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی معیار گسیختگی سهمی‌وار تک‌پارامتره در تحلیل پایداری چاه پرداختند. در این مطالعه، اول، معیار گسیختگی سهمی‌وار تک‌پارامتره به وسیله بازتولید داده‌های مقاومت فشاری تک‌محوری در آزمایشات سه‌محوری ارزیابی شدند و سپس نتایج با آزمایشات تک‌محوری مقایسه شدند. نتایج نشان می‌داد که معیار آن‌ها مقاومت سنگ در یک فشار محدود کننده خیلی کم را دست بالا محاسبه می‌کند. پس به کار بردن آن در فشار محدود کننده صفر یا خیلی کم مناسب نیست. در معیار آن‌ها محدوده بریک-اوت در نواحی نزدیک‌تر به سطح زمین به اشتباه دارای مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری خیلی زیاد هستند که حاصل طراحی چاه را دچار مشکل می‌کند [۲۶].

هدف این مقاله بدست آوردن محدوده خرابی برشی ناشی از فشار یا خرابی بریک-اوت، پیرامون یک گمانه بر اساس دو معیار خرابی معروف در سنگ یعنی معیار موهر-کولمب و معیار هوک و براون

سنگ‌های ماسه‌سنگ برنا^۱ را زیر بارگذاری افقی متقارن و مستقل از تنش عمودی در سلول سه‌محوری آزمایش کردند. مشاهده‌شده با افزایش فشار محصورشده، محدوده بریک-اوت افزایش می‌یابد [۲۲]. ماستین در سال ۱۹۸۴ نوعی سنگ مشابه را تحت بارگذاری تک‌محوری قرارداد و مهم‌ترین مکانیزم توسعه بریک-اوت گمانه، یعنی پوسته‌پوسته شدن را مشاهده کرد.

لی^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک سری آزمایش‌های حفاری را روی دو نوع ماسه‌سنگ آرکوزی تینینو و تبلراک^۳ تحت تنش سه‌محوره انجام دادند، سپس با کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی میکروپارامترهای موردنیاز برای مدل عددی المان مجزا را کالیبراسیون کردند. آن‌ها نشان دادند که مدل‌سازی المان مجزا قادر به شبیه‌سازی آسیب‌های میکروسکوپی و تکرار منطقه موضعی آسیب‌دیده در آزمایشگاه است [۱۷].

منصوری‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۶ به تحلیل پایداری چاه و پیش‌بینی فشار بریک-اوت در چاه‌های عمودی و مایل با استفاده از معیارهای گسیختگی در یک مطالعه موردی پرداختند. در این مقاله آن‌ها یک مدل ژئومکانیکی را با استفاده از چند داده پتروگرافی، میدانی و آزمایشگاهی بدست آوردند. این داده‌ها برای ایجاد ساختاری مفید در ارزیابی تنش‌های برجا و همچنین تنش‌های ناشی از تنش‌های برجا به کار برده شدند. سه معیار گسیختگی برشی موهر-کولمب، موگی-کولمب و هوک-براون در پیش‌بینی فشار بریک-اوت و نتایج به دست آمده از نمودار قطرسنج چهاربازوه چاه مورد استفاده قرار گرفتند. آن‌ها یافتند که معیار گسیختگی هوک-براون با ثابت‌های بهینه، بهترین پیش‌بینی از فشار بریک-اوت را برای این نمونه مورد مطالعه نتیجه می‌دهد. همچنین تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که اثر پارامتر m روی فشار بریک-اوت دارای اهمیت زیادی است. در نتیجه تعیین دقیق این ثابت در طول گمانه برای سنگ‌های مختلف مهم است [۲۳].

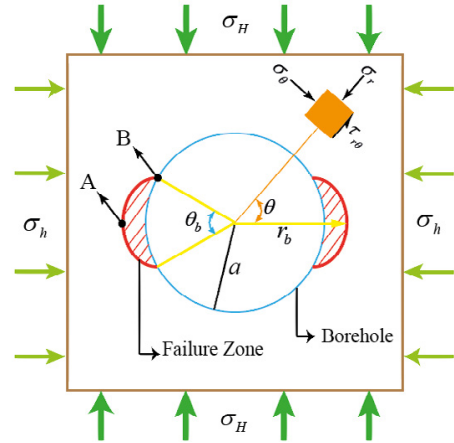
کیم^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۷ به تخمین یکپارچه تنش برجا به وسیله مطالعه شکست هیدرولیکی، مشاهدات بریک-اوت گمانه و گسیختگی‌های ناشی شده از آن و همچنین مدل‌سازی عددی در

- 1 Berea sandstone
- 2 Lee
- 3 Tenino and Tablerock
- 4 Kim

5 Korean Peninsula
6 Zhang

که در این رابطه r فاصله از مرکز حفره و θ زاویه نسبت به افق است.

محدوده خرابی بریک-اوت شامل نقاطی است که تنش برشی در آن نقاط کوچکتر یا مساوی مقاومت برشی سنگ مطابق با معیار خرابی انتخاب شده باشد، بنابراین با تلفیق روابط کرش با معیار خرابی انتخاب شده می‌توان نقاط روی مرز یا کمان گسیختگی را بدست آورد، کماتی که نقاط روی آن و داخل آن بیانگر محدوده خرابی است. برای هر حالت تنش و مشخصات مکانیکی مصالح یک جفت محدوده گسیختگی متقارن عرضی در راستای تنش اصلی کوچکتر بدست می‌آید. مطابق با شکل ۲ هر کمان گسیختگی دارای دو نقطه مشخصه می‌باشد، نقطه A با مختصات قطبی $(r_b, 0^\circ)$ بیانگر عمق خرابی بریک-اوت در امتداد افق و نقطه B با مختصات قطبی $(a, \frac{\theta_b}{2})$ بیانگر نقطه‌ای بر روی کمان گسیختگی که دارای بیشترین عرض می‌باشد.



شکل ۲. تصویر شماتیک محدوده خرابی بریک-اوت و عمق و عرض زاویه‌ای آن
Fig. 2. Schematic figure of the breakout zone and its depth and width

می‌باشد. تحلیل تئوری بر اساس معیار موهر-کولمب قبلا توسط زوبک و همکارانش انجام شده است [۳] و در این مقاله با جزئیات بیشتری به این مدل پرداخته می‌شود. سپس به تحلیل تئوری بر اساس معیار هوک-براون پرداخته شده و روابط مرتبط با ناحیه خرابی بدست آورده می‌شوند. برای هر دو مدل، نواحی خرابی بر اساس پارامترهای هر معیار ترسیم می‌گردد و در بخش آخر مقاله دو معیار مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۳- تحلیل بریک-اوت با استفاده از معیار موهر-کولمب

معیار موهر-کولمب از معیارهای تجربی-آزمایشگاهی، بر پایه مد دوم شکست (برش) می‌باشد. در این معیار رابطه‌ای خطی بین مقاومت برشی سنگ و تنش عمودی وارد بر آن در صفحه شکست حاکم است که به صورت زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$|\tau| = \tau_0 + \sigma \tan \phi \quad (4)$$

در اینجا، τ ، تنش برشی؛ σ ، تنش قائم؛ ϕ ، زاویه اصطکاک داخلی سنگ و τ_0 ، چسبندگی سنگ هستند.

برای بدست آوردن کمان گسیختگی بریک-اوت مطابق با توضیحات ارائه شده در قسمت قبل، دایره موهر تنشی را مماس بر خط گسیختگی موهر-کولمب قرار داده و در معادله حاصل τ_0 به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$\tau_0 = (1 + \mu^2)^{1/2} \left(\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right)^{1/2} - \mu \left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) \quad (5)$$

در اینجا $\mu = \tan(\phi)$ در نظر گرفته شده است.

با جایگذاری مختصات نقطه B $(a, \frac{\theta_b}{2})$ در روابط کرش (رابطه ۱ تا ۳) خواهیم داشت:

۲- مدل تئوری، فرضیات و روند تحلیل

با فرض رفتار الاستیک برای محیط سنگی دوبعدی، گمانه‌ای به شعاع a تحت اثر تنش‌های برجای افقی کوچکتر و بزرگتر σ_H و σ_h مطابق با شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود. در هر نقطه پیرامون گمانه سه تنش شعاعی σ_r ، مماسی σ_θ و برشی $\tau_{r\theta}$ مطابق با روابط کرش به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۷]:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (3)$$

$$d = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} (1 + \mu^2)^{1/2} (-1 + 3\rho^2 - 3\rho^4) \\ -\mu(1 - 2\rho^2) \end{array} \right] \quad (17)$$

با معادل هم گذاشتن رابطه ۹ و رابطه ۱۵ سه رابطه اصلی زیر برای تنش‌های برجا بر حسب مختصات نقاط A و B یعنی θ_b و نسبت $\rho = a/r_b$ و خصوصیات مکانیکی مصالح τ_0 و ϕ بدست می‌آید. (همانطور که پیش‌تر اشاره شد، این روابط به وسیله زویک و همکاران بدست آمده است):

$$\sigma_H = \frac{\tau_0 (d - b)}{ad - bc} \quad (18)$$

$$\sigma_h = \frac{\tau_0 (a - c)}{ad - bc} \quad (19)$$

$$k = \frac{\sigma_H}{\sigma_h} = \frac{d - b}{a - c} \quad (20)$$

همانطور که در رابطه ۲۰ مشاهده می‌شود نسبت تنش‌ها مستقل از پارامتر τ_0 می‌باشد.

اگر تنش‌های برجا مشخص باشند و هدف بدست آوردن عمق و عرض ناحیه گسیختگی بریک-اوت باشد با انجام قدری عملیات ریاضی دو رابطه زیر را می‌توان بدست آورد و مورد استفاده قرار داد که در این روابط r_b, θ_b تابع تنش‌های برجا، مشخصات مکانیکی مصالح و شعاع گمانه هستند:

$$\theta_b = \cos^{-1} \left(\frac{\left[2\tau_0 \left((1 + \mu^2)^{1/2} - \mu \right)^{-1} \right]}{\left[2(\sigma_H - \sigma_h) \right]} \right) \quad (21)$$

$$r_b = a \times \left[\begin{array}{l} \left(-y_0 + \left((y_0)^2 - 4 \times x_0 \times z_0 \right)^{1/2} \right)^{-1/2} \\ \times \left((2 \times x_0)^{-1} \right) \end{array} \right] \quad (22)$$

$$x_0 = \left[1.5(1 + \mu^2)^{1/2} \right] \times (\sigma_H) - \left[1.5(1 + \mu^2)^{1/2} \right] \times (\sigma_h) \quad (23)$$

$$\sigma_r = 0 \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h + 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos \theta_b \quad (7)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (8)$$

اکنون با جایگذاری این روابط در رابطه ۵، τ_0 بر حسب θ_b دست می‌آید:

$$\tau_0(a, \theta_b) = \sigma_H \times a + \sigma_h \times b \quad (9)$$

که در این رابطه:

$$a = \frac{1}{2} \left((1 + \mu^2)^{1/2} - \mu \right) (1 + 2 \cos \theta_b) \quad (10)$$

$$b = \frac{1}{2} \left((1 + \mu^2)^{1/2} - \mu \right) (1 - 2 \cos \theta_b) \quad (11)$$

همین مراحل برای نقطه A نیز تکرار می‌شود، ابتدا مختصات نقطه A ($r_b, 0^\circ$) با استفاده از روابط کرش (رابطه ۱ تا ۳) بدست آورده می‌شود: ($\rho = a/r_b$):

$$\sigma_r = \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_h) (1 - \rho^2) - \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) (1 - 4\rho^2 + 3\rho^4) \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_h) (1 + \rho^2) + \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) (1 + 3\rho^4) \quad (13)$$

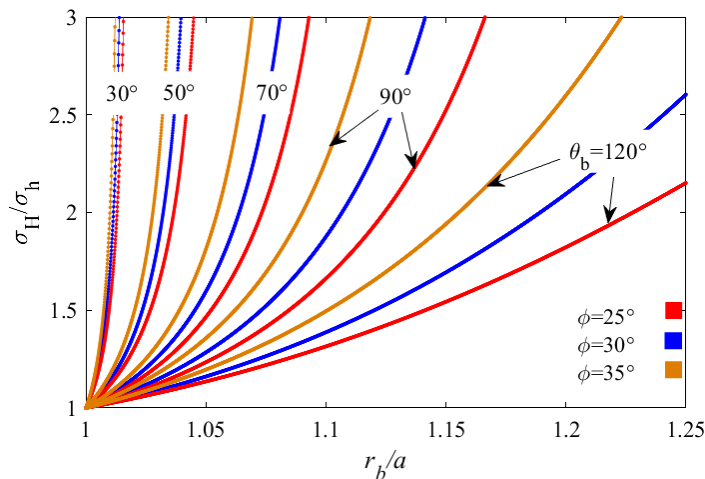
$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (14)$$

با جایگذاری این مختصات در رابطه ۵، τ_0 بر حسب r_b بدست می‌آید:

$$\tau_0(r_b, 0^\circ) = \sigma_H \times c + \sigma_h \times d \quad (15)$$

که در این رابطه:

$$c = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} (1 + \mu^2)^{1/2} (1 - \rho^2 + 3\rho^4) \\ -\mu(1 + 2\rho^2) \end{array} \right] \quad (16)$$



شکل ۳. تغییرات نسبت تنش‌های برجا با نسبت r_b/a و عرض θ_b برای سه زاویه اصطکاک مختلف (بر اساس معیار خرابی موهر-کولمب)

Fig. 3. The variation of the in-situ stresses ratio with r_b/a and θ_b for three different friction angles (based on Mohr-Coulomb Failure criterion)

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و تنش‌های برجا در سه حالت مختلف

Table 1. Mechanical and in-situ stresses ratio parameters for three different cases

حالت‌های مختلف	τ_0 (MPa)	φ (°)	σ_h (MPa)	σ_H/σ_h
۱	۴	۳۰°	۶ و ۵، ۴، ۳	۳ و ۲/۵، ۲، ۱/۵
۲	۴	۴۵° و ۳۵°، ۲۵°	۵	۳ و ۲/۵، ۲، ۱/۵
۳	۵ و ۴، ۳	۳۰°	۵	۳ و ۲/۵، ۲، ۱/۵

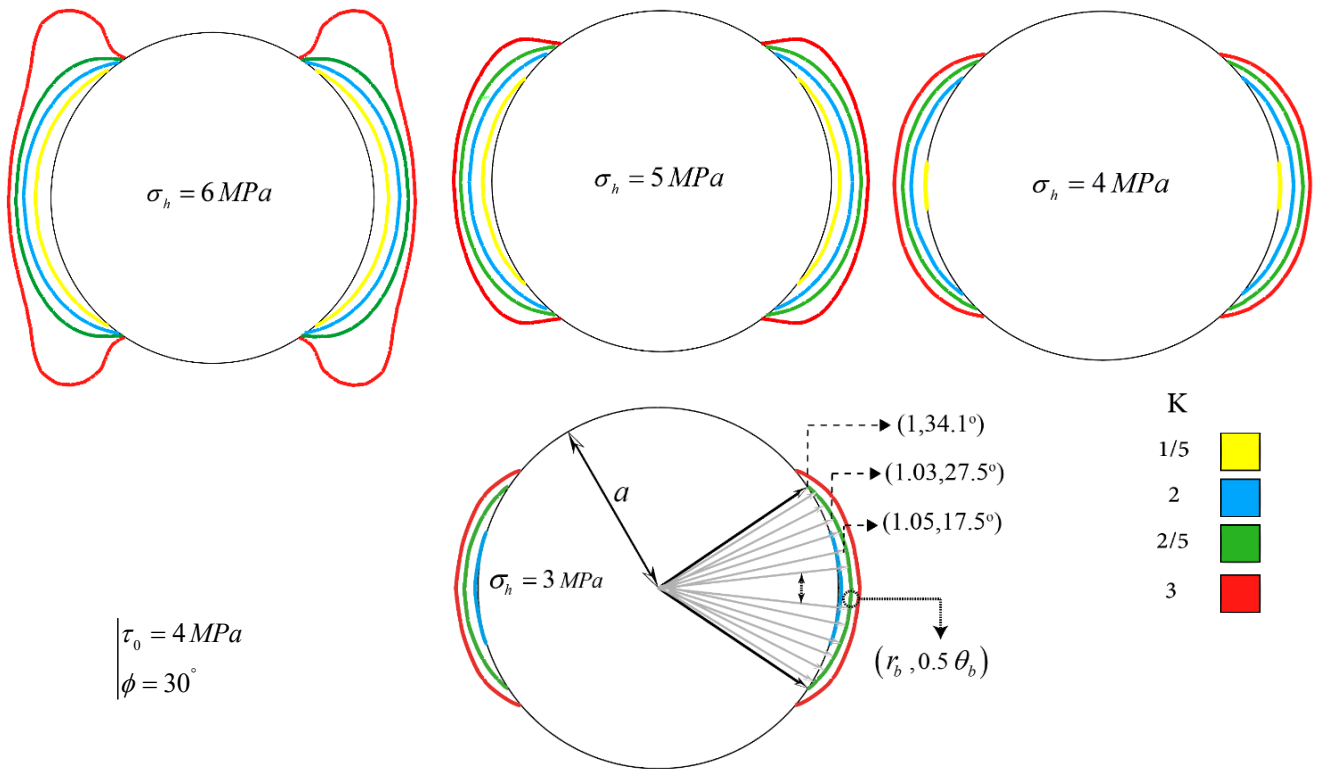
۳-۱- اثر تنش‌های برجا و مشخصات مکانیکی سنگ بر روی نواحی خرابی بریک-اوت بر اساس معیار موهر-کولمب

در این بخش شکل گرافیکی نواحی خرابی بریک-اوت رخ داده در پیرامون گمانه برای مشخصات مختلف تأثیرگذار در این پدیده نمایش داده می‌شود. مشخصات انتخابی برای مقادیر تنش‌های برجا، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ مطابق با جدول ۱ می‌باشد. تحلیل تئوری مطابق با مدل تئوری آورده شده در قسمت قبل می‌باشد. در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ که در ادامه آورده شده است، هر کمان مشخص‌کننده مرز خرابی رخ داده برای هر مدل می‌باشد. به منظور مقایسه، نواحی خرابی نشان داده شده با شعاع گمانه دارای یک مقیاس بوده و همچنین این مقیاس در همه شکل‌ها یکسان است. مطابق با نتایج نمایش داده شده در شکل ۵، برای مشخصات مکانیکی ثابت زمین، در هر یک از مدل‌ها با افزایش نسبت تنش‌های

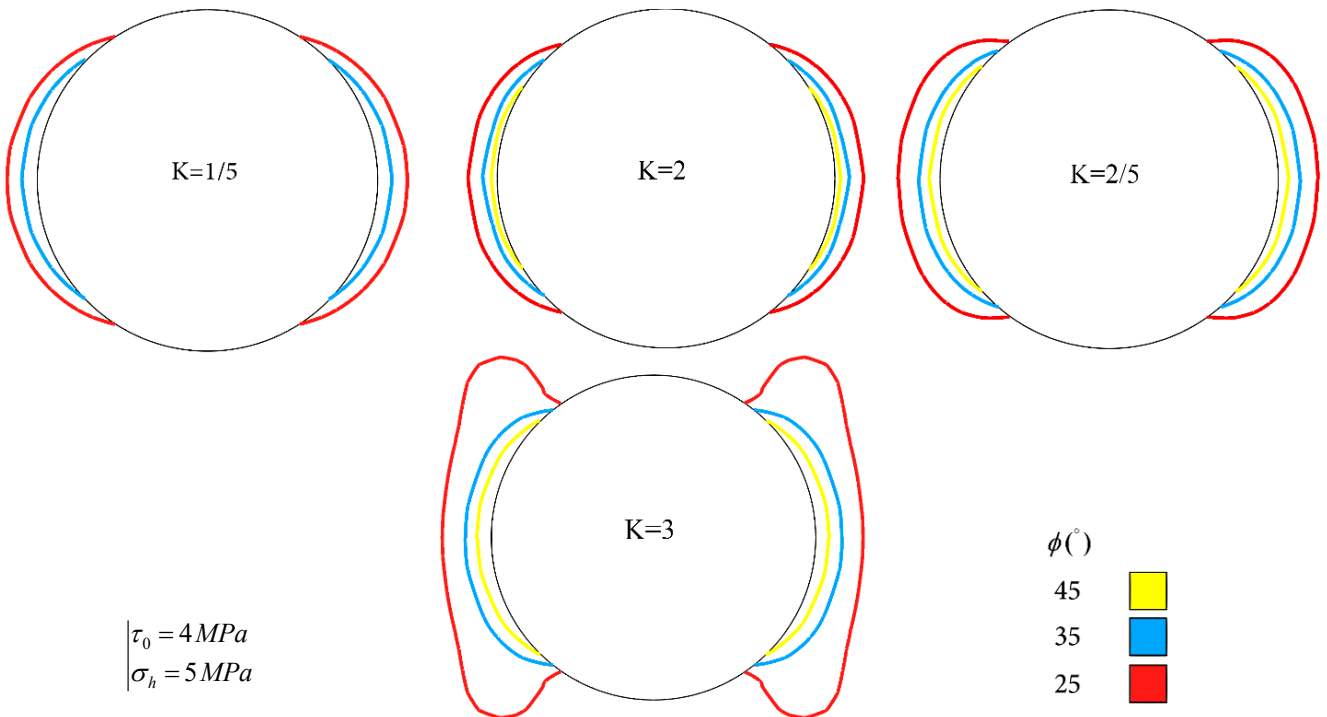
$$y_0 = \left[-0.5(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu \right] (\sigma_H) + \left[1.5(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu \right] (\sigma_h) \quad (24)$$

$$z_0 = \left[0.5(1 + \mu^2)^{1/2} - 0.5\mu \right] (\sigma_H) + \left[-0.5(1 + \mu^2)^{1/2} - 0.5\mu \right] (\sigma_h) - \tau_0 \quad (25)$$

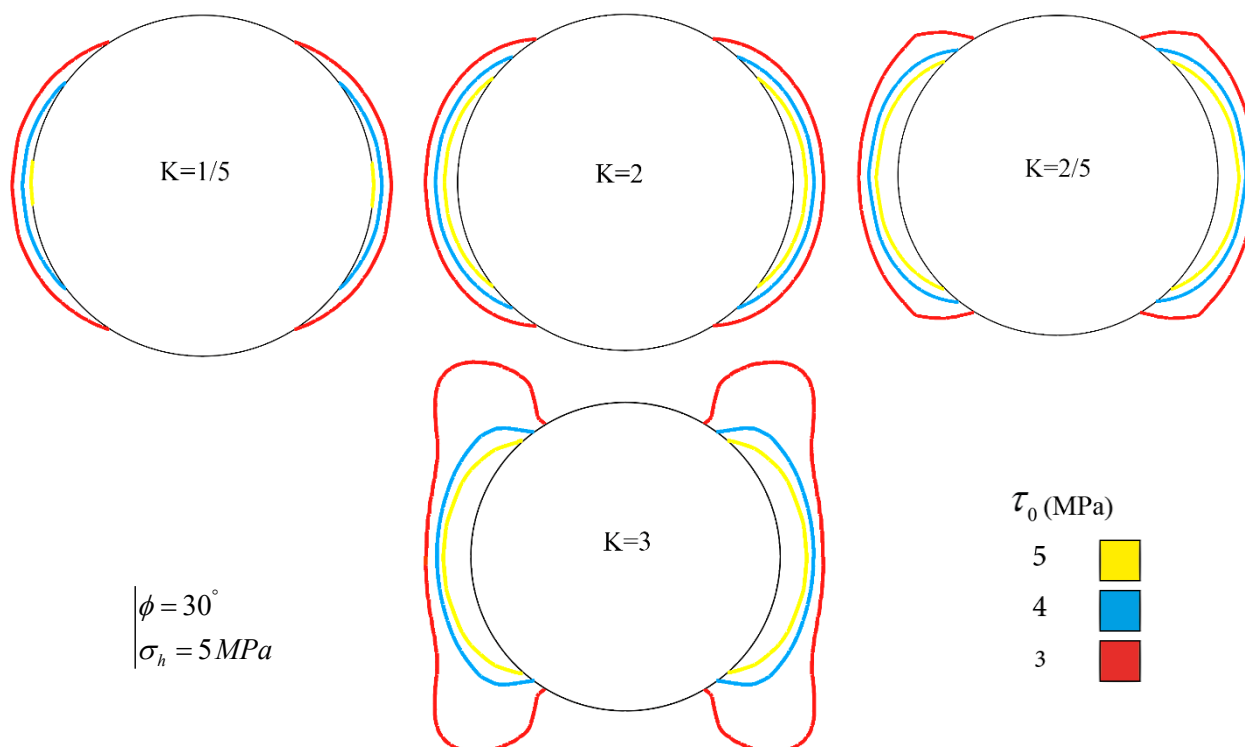
شکل ترسیم‌ی رابطه ۲۰ در ادامه آورده شده است. در شکل ۳ نمودارهای نسبت تنش‌های برجا، در مقابل r_b/a ، θ_b برای سه زاویه اصطکاک مختلف ترسیم شده است (رابطه ۲۰). همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود زمانیکه نسبت تنش‌های برجا نزدیک به یک باشد محدوده گسیختگی بریک-اوت کوچک و با افزایش این نسبت محدوده گسیختگی عمیق‌تر و عریض‌تر می‌شود.



شکل ۴. نمایش محدوده خرابی بریک-اوت برای مقادیر مختلف تنش‌های برجا و نسبت آن‌ها (مشخصات مکانیکی زمین ثابت است)
 Fig. 4. The breakout failure zone for the different values of the in-situ stress ratio (The mechanical properties of the ground are considered fixed)



شکل ۵. نمایش محدوده خرابی بریک-اوت برای مقادیر مختلف نسبت تنش‌های برجا و زاویه اصطکاک (چسبندگی و تنش افقی کوچک‌تر، ثابت هستند)
 Fig. 5. The breakout failure zone for the different values of the ratio of in-situ stress and friction angle (cohesion and minimum horizontal stress are considered fixed)



شکل ۶. نمایش محدوده خرابی بریک- اوت برای مقادیر مختلف نسبت تنش‌های برجا و چسبندگی (زاویه اصطکاک داخلی سنگ و تنش افقی کوچک‌تر، ثابت هستند)

Fig. 6. The breakout failure zone for the different values of the ratio of in-situ stress and cohesion (friction angles and minimum horizontal stress are considered fixed)

نیاز داشت و به تدریج باعث تکمیل‌تر شدن آن گردید، آخرین تغییری که در سال ۲۰۰۲ به وسیله هوک و همکاران ارائه شد به صورت زیر می باشد [۲۸]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (26)$$

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad (27)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (28)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{e^{\left(\frac{GSI}{15} \right)} - e^{\left(\frac{20}{3} \right)}}{6} \quad (29)$$

در اینجا، σ_1 ، تنش اصلی بیشینه؛ σ_3 ، تنش اصلی کمینه؛ σ_{ci} ، مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر؛ D ، فاکتور وابسته به درجه دست‌خوردگی؛ GSI ، شاخص مقاومت زمین‌شناختی؛ همچنین m_b ، m_i ، پارامتر سنگ بکر، s و a ؛ پارامترهای وابسته به میزان شکستگی توده سنگ هستند.

برجا محدوده خرابی بریک- اوت گسترده‌تر می‌شود. به غیر از نسبت، مقادیر تنش‌های برجا نیز بسیار مهم هستند به نحوی که در شکل ۴ (تنش برجای کمینه 6 MPa و نسبت ۳) مشاهده می‌شود که با افزایش تنش‌های برجا شکل گسیختگی از حالت کمان خارج می‌شود و محدوده خرابی به سمت بالا و پایین نیز گسترش می‌یابد که بیانگر تمرکز تنش‌های برشی در این نواحی است. در مدل‌های شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که اگرچه با افزایش نسبت تنش‌های برجا محدوده خرابی بزرگ‌تر شده اما این تأثیر در مدل‌هایی که دارای زاویه اصطکاک و چسبندگی کم‌تری هستند، بسیار بیش‌تر است.

۴- تحلیل بریک-اوت با استفاده از معیار هوک- براون

معیار غیرخطی هوک- براون از معیارهای تجربی- آزمایشگاهی است که در سال ۱۹۸۰ ارائه شد. این معیار در اصل برای تخمین مقاومت توده سنگ‌های سخت توسعه یافت و به دلیل عدم وجود جایگزین‌های مناسب، برای انواع توده سنگ‌ها از جمله سنگ‌های با کیفیت پایین نیز بکار برده شد. این کاربردها به تغییر معیار اصلی

$$\beta = \sigma_H + \sigma_h \times \alpha \quad (32)$$

که در این رابطه :

$$\alpha = (1 - 2 \cos \theta_b) / (1 + 2 \cos \theta_b) \quad (33)$$

$$\beta = \sigma_c / (1 + 2 \cos \theta_b) \quad (34)$$

اکنون با جایگذاری روابط ۱۲ تا ۱۴ مربوط به مختصات نقطه A در رابطه ۳۱، روابط زیر به دست می‌آید.

$$a_1^2 \times \sigma_H^2 + b_1^2 \times \sigma_h^2 + 2a_1 b_1 \sigma_H \sigma_h = m \sigma_c c_1 \sigma_H + m \sigma_c d_1 \sigma_h + \sigma_c^2 \quad (35)$$

که در این رابطه:

$$a_1 = 1 - \rho^2 + 3\rho^4 \quad (36)$$

$$b_1 = -1 + 3\rho^2 - 3\rho^4 \quad (37)$$

$$c_1 = 0.5 \times (3\rho^2 - 3\rho^4) \quad (38)$$

$$d_1 = 0.5 \times (2 - 5\rho^2 + 3\rho^4) \quad (39)$$

با تلفیق رابطه ۳۵ با رابطه ۳۲ و جایگذاری σ_H برحسب σ_h تعداد متغیر مجهول معادله کاهش می‌یابد و معادله درجه دوم زیر برحسب σ_h به دست می‌آید:

$$\sigma_h^2 e_1 + \sigma_h f_1 + g_1 = 0 \quad (40)$$

که در این رابطه ضرایب e_1 و f_1 و g_1 به ترتیب عبارتند از:

$$e_1 = a_1^2 \alpha^2 + b_1^2 - 2a_1 b_1 \alpha \quad (41)$$

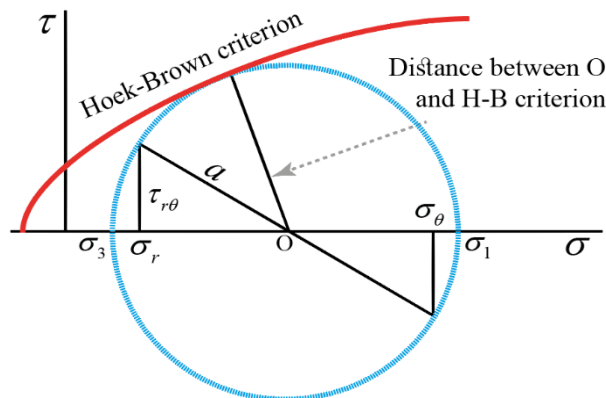
$$f_1 = -2a_1^2 \alpha \beta + 2a_1 b_1 \beta + m \sigma_c c_1 \alpha - m \sigma_c d_1 \quad (42)$$

$$g_1 = a_1^2 \beta^2 - \sigma_c^2 - m \sigma_c c_1 \beta \quad (43)$$

اگر نسبت مقادیر تنش‌های برجا مشخص باشند و هدف بدست آوردن عمق و عرض بریک-اوت باشد، این مقادیر را می‌توان از دو رابطه ۳۲ و ۴۰ به صورت زیر استخراج کرد:

$$\theta_b = \cos^{-1} \left(\left[\sigma_c - (\sigma_H + \sigma_h) \right] / 2(\sigma_H - \sigma_h) \right) \quad (44)$$

$$r_b = a \times X^{-0.5} \quad (45)$$



شکل ۷. شکل شماتیک معیار خرابی هوک- براون در فضای $\tau - \sigma$ و دایره تنش موهر مماس شده بر آن

Fig. 7. Schematic figure of the Hoek-Brown failure criterion in $\tau - \sigma$ space and Mohr circle tangent to the failure criterion

معیار خرابی هوک- براون برای سنگ بکر شکل ساده شده رابطه

۲۶ و به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_i \sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (30)$$

با استفاده از این معیار و مشابه روندی که برای مدل خرابی موهر- کولمب انجام شد محاسبات مربوط به بدست آوردن گستره خرابی بریک-اوت انجام می‌شود (شکل ۷). با توجه به اینکه معیار هوک- براون بر اساس تنش‌های اصلی می‌باشد ابتدا از روابط کرش تنش‌های اصلی بدست می‌آید و در رابطه هوک- براون جایگذاری می‌شود، به این ترتیب رابطه اصلی به صورت زیر بدست می‌آید (طریقه بدست آوردن رابطه زیر در ضمیمه آورده شده است):

$$\left[(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + 4 \times \tau_{r\theta}^2 \right] = m \times \sigma_c \times \left[\left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) - \left(\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right)^{1/2} \right] + \sigma_c^2 \quad (31)$$

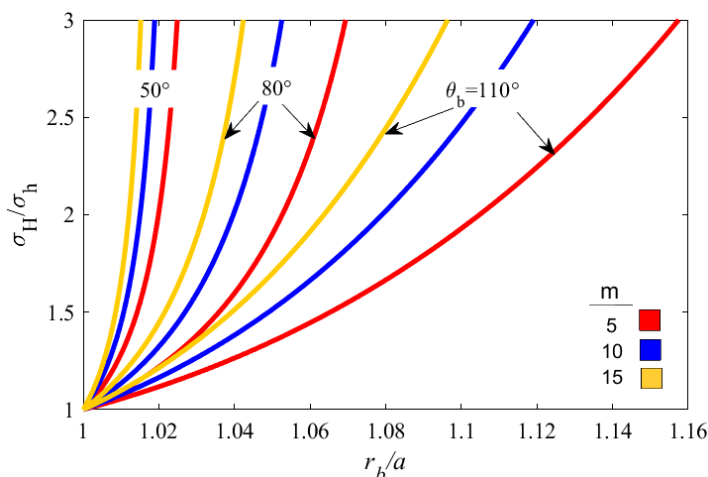
از این به بعد و به منظور سادگی $m_i = m$ و $\sigma_{ci} = \sigma_c$ در نظر

گرفته می‌شود.

حال باید مختصات دو نقطه A و B نشان داده شده در شکل ۳

بدست آورده شود، بر اساس توضیحات بیان شده در قسمت‌های قبلی برای نقطه B با جایگذاری مختصات این نقطه ارائه شده در روابط ۶

تا ۸ در رابطه ۳۱، روابط زیر به دست می‌آید.



شکل ۸. تغییرات نسبت تنش‌های برج با نسبت r_b/a و عرض θ_b برای سه زاویه اصطکاک مختلف (بر اساس معیار خرابی هوک- براون)

Fig. 8. The variation of the in-situ stresses ratio with r_b/a and θ_b for three different friction angles (based on Hoek-Brown Failure criterion)

جدول ۲. مشخصات مکانیکی و تنش‌های برجی مختلف در سه حالت مختلف

Table 2. Mechanical and in-situ stresses ratio parameters for three different cases

حالت‌های مختلف	σ_c (MPa)	m	σ_h (MPa)	σ_H / σ_h
۱	۹۰	۱۵	۴۵ و ۴۰، ۳۵، ۳۰	۳ و ۲/۵، ۲، ۱/۵
۲	۹۰	۲۵ و ۱۵، ۵	۳۵	۳ و ۲/۵، ۲، ۱/۵
۳	۱۲۰ و ۹۰، ۶۰	۱۵	۳۵	۳ و ۲/۵، ۲، ۱/۵

در رابطه ۴۵ عمق بریک-اوت گمانه حاصل می‌شود. شکل ۸ نمودار رابطه‌های ۳۲ و ۴۰ برای سنگ با پارامتر m متغیر (۵، ۱۰ و ۱۵) است، این نمودار تغییرات نسبت عمق بریک-اوت به شعاع گمانه در برابر نسبت تنش‌های برجی افقی در عرض‌های ثابت از بریک-اوت (50° ، 80° و 110°) را نشان می‌دهد. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که در حالت تنش‌های برجی همسان محدوده خرابی بریک-اوت تقریباً صفر است و با افزایش نسبت تنش‌های برجی محدوده خرابی عمیق‌تر و عریض‌تر می‌شود. این مجموعه نمودارها به علت استفاده از نسبت تنش‌های برجی، مستقل از مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ هستند.

۴-۱- اثر تنش‌های برجی و مشخصات مکانیکی سنگ بر روی نواحی خرابی بریک-اوت بر اساس معیار هوک- براون
در این قسمت نیز مطابق حالت قبل، شکل گرافیکی نواحی

$$a_r X^4 + b_r X^3 + c_r X^2 + d_r X + e_r X^0 = 0 \quad (46)$$

$$\{0 < \sqrt{X} \leq a\}$$

$$a_r = [3 \times (\sigma_H - \sigma_h)]^2 \quad (47)$$

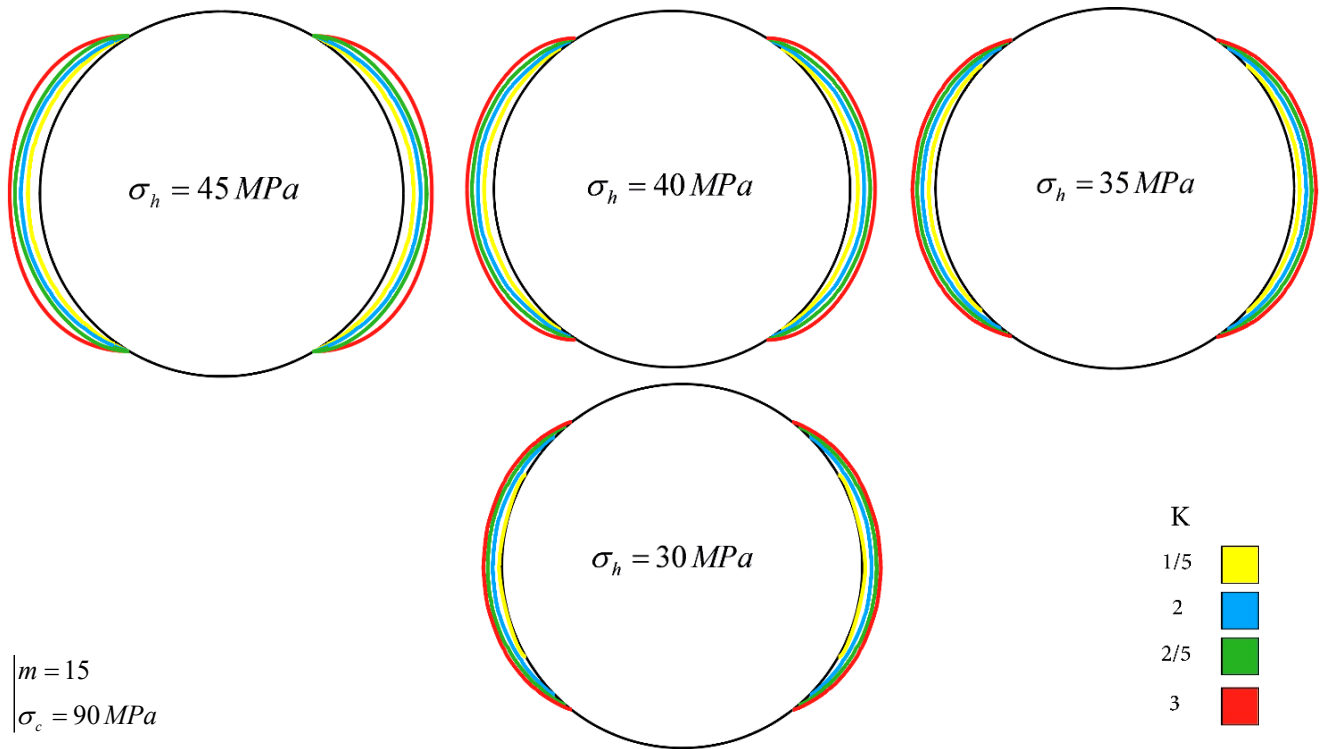
$$b_r = -6(\sigma_H - \sigma_h)(\sigma_H - 3\sigma_h) \quad (48)$$

$$c_r = (\sigma_H - 3\sigma_h)^2 + 6(\sigma_H - \sigma_h)^2 + 1.5 m \sigma_c (\sigma_H - \sigma_h) \quad (49)$$

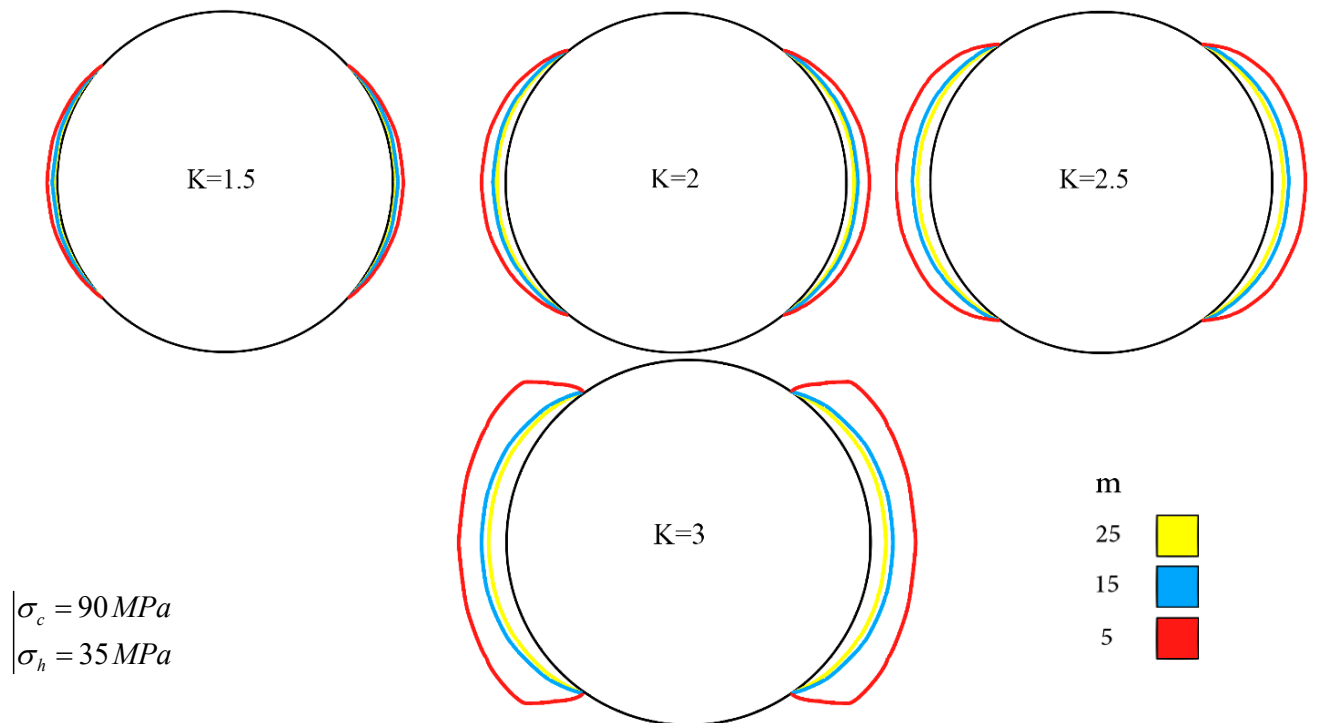
$$d_r = 2(3\sigma_h - \sigma_H)(\sigma_H - \sigma_h) - 0.5 m \sigma_c (3\sigma_H - 5\sigma_h) \quad (50)$$

$$e_r = (\sigma_H - \sigma_h)^2 - (m \sigma_c \sigma_h + \sigma_c^2) \quad (51)$$

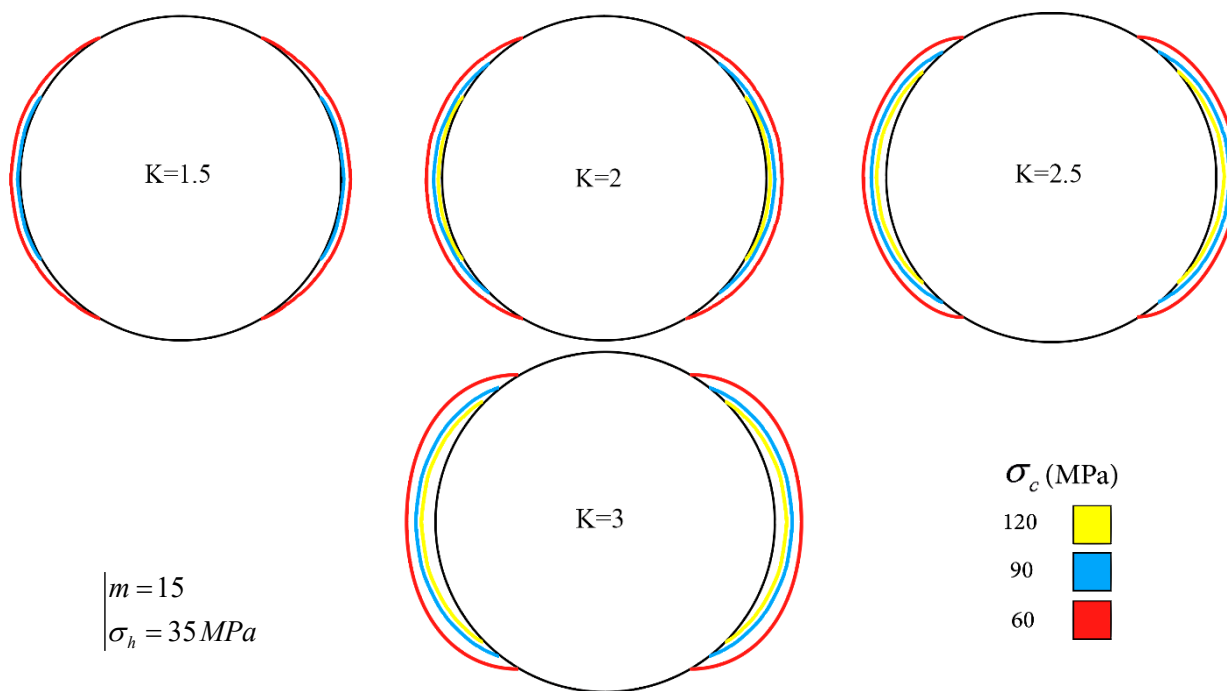
با حل معادله ۴۶ مقدار $X = \rho^2$ به دست می‌آید که با جایگذاری



شکل ۹. نمایش محدوده خرابی بریک-اوت برای مقادیر مختلف تنش‌های برجا و نسبت آن‌ها (مشخصات مکانیکی سنگ ثابت هستند)
 Fig. 9. The breakout failure zone for the different values of the in-situ stress ratios (mechanical properties are considered fixed)



شکل ۱۰. نمایش محدوده خرابی بریک-اوت برای مقادیر مختلف نسبت تنش‌های برجا و پارامتر m (مقاومت فشاری تک‌محوری و تنش افقی کوچک‌تر، ثابت هستند)
 Fig. 10. The breakout failure zone for the different values of the in-situ stress ratio and m parameter (uniaxial strength and minimum horizontal stress are considered fixed)



شکل ۱۱ نمایش محدوده خرابی بریک-اوت برای مقادیر مختلف نسبت تنش‌های برجا و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ (پارامتر m و تنش افقی کوچک‌تر، ثابت هستند)

Fig. 11. The breakout failure zone for the different values of the in-situ stress ratio and uniaxial strength (m parameter and minimum horizontal stress are considered fixed)

جدول ۳. مقایسه عمق بریک-اوت از لحاظ مشاهده و تئوری (موهر-کولمب و هوک-براون) در چاه ابرن نیویورک

Table 3. Comparison of observed and theoretical breakout maximum depth in Auburn, New York (Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criterion)

H (m)	مشاهده شده			تئوری			
	$\theta_b (^\circ)$	r_b / a	r_b (mm)	موهر-کولمب		هوک-براون	
				r_b / a	r_b (mm)	r_b / a	r_b (mm)
۱۴۷۱/۹	۱۹	۱/۰۲۷	۱۱۵/۰	۱/۰۱۹	۱۱۴/۱	۱/۰۱۹	۱۱۴/۱
۱۴۷۳/۱	۲۰	۱/۰۶۳	۱۱۹/۱	۱/۰۲۲	۱۱۴/۵	۱/۰۲۱	۱۱۴/۴
۱۴۷۴/۶	۲۲	۱/۰۷۱	۱۲۰/۰	۱/۰۲۷	۱۱۵/۰	۱/۰۲۶	۱۱۴/۹
۱۴۷۶/۳	۱۵	۱/۰۲۷	۱۱۵/۰	۱/۰۱۲	۱۱۳/۳	۱/۰۱۲	۱۱۳/۳
۱۴۷۶/۳	۲۲	۱/۰۴۵	۱۱۷/۰	۱/۰۲۷	۱۱۵/۰	۱/۰۲۶	۱۱۴/۹

مکانیکی ثابت سنگ، در هر یک از مدل‌ها با افزایش نسبت تنش‌های برجا محدوده خرابی بریک-اوت گسترده‌تر می‌شود، تغییرات در این حالت و با ثابت بودن مشخصات مکانیکی سنگ، نسبتاً کم است. در مدل‌های شکل ۱۰ و شکل ۱۱ اگرچه با افزایش نسبت تنش‌های برجا محدوده خرابی بزرگ‌تر شده، اما این تأثیر برای سنگ‌های با

خرابی بریک-اوت رخ داده در پیرامون گمانه برای مشخصات مختلف تأثیرگذار بر اساس معیار هوک-براون آورده شده است. مشخصات انتخابی برای مقادیر تنش‌های برجا، پارامتر m و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ σ_c ، مطابق با جدول ۲ می‌باشد. مطابق با نتایج نمایش داده شده در شکل ۹، برای مشخصات

جدول ۴. مشخصات مکانیکی سنگ در معیار هوک- براون برای سه سنگ A، B و C

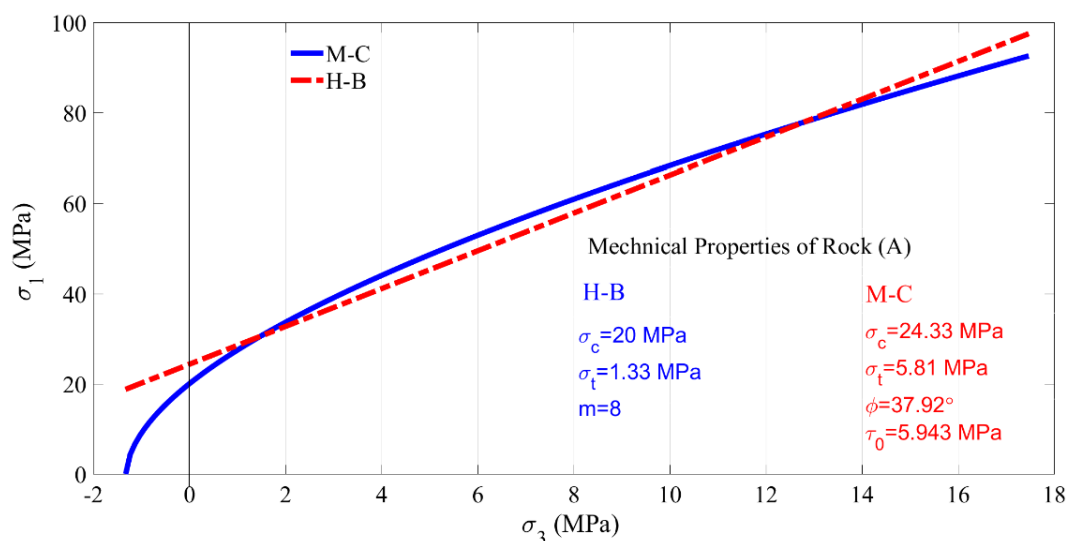
Table 4. Mechanical properties of rock in Hoek-Brown failure criterion for three types of rocks A, B, C

مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	پارامتر m در معیار هوک- براون	نوع سنگ
۲۰	۱۵	A
۱۵	۸	B
۲۵	۱۰	C

جدول ۵. مشخصات مکانیکی سنگ در معیار موهر-کولمب برای سه سنگ A، B و C

Table 5. Mechanical properties of rock in Mohr-Coulomb failure criterion for three types of rocks A, B, C

چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	نوع سنگ
۵/۴۹۳	۳۷/۹۲	A
۴/۷۶۷	۳۰/۰۴	B
۶/۶۶۲	۳۵/۷۵	C



شکل ۱۲. بدست آوردن مشخصات مکانیکی سنگ براساس معیار موهر-کولمب از معیار هوک- براون برای سنگ A

Fig. 12. Obtain the mechanical properties of the rock based on the Mohr-Coulomb failure criterion of the Hoek-Brown failure criterion for type A rock

۵- صحت سنجی

در جدول زیر عمق بریک اوت بدست آمده از دو روش تحلیلی فوق با عمق بریک اوت بدست آمده از داده‌های پنج مقطع از چاه ابرن^۱ نیویورک مقایسه شده است. قطر چاه 22.4 cm، عمق مورد

مشخصات مکانیکی ضعیف بسیار بیش تر است. نکته قابل توجه در شکل ۱۱ این است که عرض ناحیه خرابی بریک- اوت یعنی θ_b در هریک از مدل‌های این شکل ثابت است، چون مطابق با رابطه ۴۴، این عرض به پارامتر m وابسته نیست و آنچه که در هر یک از مدل‌های این شکل متغیر است پارامتر m می‌باشد.

نظر چاه بین ۱۴۷۱ الی ۱۴۷۷ متری با مشخصات میانگین محیطی زاویه اصطکاک داخلی 31° ، چسبندگی 10 MPa ، پارامتر معیار هوک- براون 4.5 و مقاومت فشاری تک محوری 36 MPa می باشد. نسبت تنش های برجا بدست آمده از روش شکست هیدرولیکی برابر با 2.24 می باشد [۳]. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می کنید، تطابق خوبی بین مشاهدات انجام شده با استفاده از داده های نمایشگر چاه ۱ و هر دو روش تئوری وجود دارد.

۶- مقایسه نواحی خرابی بریک- اوت، بدست آمده از دو

معیار موهر- کولمب و هوک- براون

در این بخش مقایسه نواحی خرابی بدست آمده از دو معیار فوق انجام می شود. البته انتظار می رود اگر در محدوده تنش های برجای مشخص دو معیار موهر- کولمب و هوک- براون نزدیک و معادل هم باشند، نواحی خرابی بدست آمده نیز باید یکسان باشند. بدین منظور سه نوع سنگ با مشخصات گوناگون مطابق با معیار هوک- براون مطابق با جدول ۳ انتخاب می شوند، برای این سه نوع سنگ چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به نحوی انتخاب می شود که معیار موهر- کولمب معادل با هوک- براون شود، این محاسبات توسط نرم افزار متلب انجام شده است، نتیجه آنچه است که در جدول ۴ آورده شده است. انطباق دو معیار برای نمونه سنگ A در شکل ۱۲ آورده شده است. حال با مشخصات جدول ۳ و ۴ نواحی گسیختگی بریک- اوت برای هر سه نوع سنگ ترسیم می گردد که نتیجه در شکل ۱۳ دیده می شود. نتیجه آنست که انتظارش می رفت، عمق بریک- اوت برای هر سه نوع سنگ تقریباً یکسان است اما اختلاف در عرض بریک اوت در دو معیار وجود دارد و این اختلاف برای سنگ نوع A که داری مشخصات مکانیکی بالاتری است، بیشتر است. دلیل این اختلاف اینست که اختلاف دو معیار موهر- کولمب و هوک- براون در محل برخورد با محور عرضی در شکل ۱۲، که بیانگر مقاومت فشاری تک محوری سنگ است در حالت سنگ A نسبت به دو نوع سنگ دیگر بیشتر است، که البته با انتخاب محدوده نسبت تنش های برجای مناسب برای معادل سازی دو معیار می توان این اختلاف را نیز کم کرد.

شکل ۱۳. مقایسه کمان های گسیختگی مطابق با دو معیار موهر- کولمب و

هوک- براون برای سه نوع سنگ A، B و C

Fig. 13. Comparison of breakout zone according to Mohr-Coulomb and Hoek-Brown failure criteria for three types of rocks A, B, C

۷- نتایج

نوعی از خرابی پیرامون حفرات، بالاخص گمانه‌های نفتی در اعماق زیاد، خرابی بریک-اوت می‌باشد. این خرابی در امتداد تنش برجای افقی کوچک‌تر ایجاد می‌شود و در اثر تنش‌های برشی ناشی از فشار پیرامون گمانه رخ می‌دهد. در این مقاله مطابق با دو معیار خرابی معروف در سنگ، معیار موهر-کولمب و هوک-براون به تحلیل ریاضی این پدیده پرداخته شد و گستره خرابی در پیرامون گمانه مطابق با این دو معیار بدست آمد. هم مقدار و هم نسبت تنش‌های برجا، دو عامل مؤثر در شکل‌گیری و توسعه نواحی خرابی بریک-اوت در پیرامون گمانه هستند. اگر نسبت تنش‌های برجا، یک باشد، هیچ ناحیه خرابی در پیرامون گمانه رخ نمی‌دهد و با افزایش نسبت تنش‌های برجا عمق خرابی افزایش می‌یابد. در کنار این دو عامل مشخصات مکانیکی سنگ، مطابق با معیار خرابی انتخاب شده، فاکتور مؤثر دیگر در عمق و عرض بریک-اوت می‌باشند. به نحوی که با ضعیف شدن مشخصات مکانیکی سنگ، ناحیه خرابی بریک-اوت بزرگ می‌شود.

مراجع

- project, (2003) 1-5.
- [7] M.D. Zoback, Reservoir geomechanics, Cambridge University Press, 2010.
- [8] H. Kutter, Influence of drilling method on borehole breakouts and core diskings, in: 7th ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 1991.
- [9] L. Mastin, The development of borehole breakouts in sandstone, Master's thesis, in, Stanford Univ., Stanford, Calif, 1984.
- [10] R. Ewy, N. Cook, Deformation and fracture around cylindrical openings in rock—II. Initiation, growth and interaction of fractures, in: International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, Elsevier, 1990, pp. 409-427.
- [11] E. Papamichos, Sand production and well productivity in conventional reservoirs, Amadei, Kranz, Scott and Smeallie (eds) Rock mechanics for industry, Balkema Rotterdam, (1999) 209-215.
- [12] P. Van den Hoek, Prediction of different types of cavity failure using bifurcation theory, in: DC Rocks 2001, The 38th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), American Rock Mechanics Association, 2001.
- [13] A. Klaetsch, B. Haimson, Porosity-dependent fracture-like breakouts in St. Peter sandstone, Mining and tunneling innovation and opportunity, (2002) 1365-1371.
- [14] R. Cuss, E. Rutter, R. Holloway, Experimental observations of the mechanics of borehole failure in porous sandstone, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(5) (2003) 747-761.
- [15] B. Haimson, Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(2) (2007) 157-173.
- [16] E. Papamichos, J. Tronvoll, A. Skjærstein, T.E. Unander, Hole stability of Red Wildmoor sandstone under anisotropic stresses and sand production criterion, Journal of Petroleum Science and Engineering, 72(1-2) (2010) 78-92.
- [1] A. Zang, O. Stephansson, Rock fracture criteria, in: Stress Field of the Earth's Crust, Springer, 2010, pp. 37-62.
- [2] J. Bell, D. Gough, Northeast-southwest compressive stress in Alberta evidence from oil wells, Earth and planetary science letters (1979).
- [3] M.D. Zoback, D. Moos, L. Mastin, R.N. Anderson, Well bore breakouts and in situ stress, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(B7) (1985) 5523-5530
- [4] R.A. Plumb, S.H. Hickman, Stress-induced borehole elongation: A comparison between the four-arm dipmeter and the borehole televiewer in the Auburn geothermal well, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(B7) (1985) 5513-5521.
- [5] H. Haimson, C. Herrick, Borehole breakouts-a new tool for estimating in situ stress?, in: ISRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 1986.
- [6] J. Reinecker, M. Tingay, B. Müller, Borehole breakout analysis from four-arm caliper logs, World stress map

of rock mechanics, John Wiley & Sons, 2009.

- [28] E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum, Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, Proceedings of NARMS-Tac, 1(1) (2002) 267-273.

ضمیمه

طریقه بدست آوردن رابطه ۳۱:

می توان معیار هوک- براون را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = (\sigma_c m \sigma_3 + \sigma_c^2) \quad (\text{ض} ۱)$$

با کمک روابط حاکم بر دایره مور، می توان تنش های σ_1 و σ_3 را بر حسب σ_r ، σ_θ و $\tau_{r\theta}$ به شکل زیر نوشت (این روابط یک دستگاه دو معادله و دو مجهول بر حسب دو متغیر σ_1 و σ_3 هستند):

$$\begin{cases} \sigma_1 - \sigma_3 = 2\sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2} \\ \sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_\theta + \sigma_r \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_1 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2} + \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \\ \sigma_3 = \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2} \end{cases} \quad (\text{ض} ۲)$$

با جایگذاری روابط (ض ۲) در رابطه (ض ۱) و ساده سازی آن رابطه ۳۱ حاصل می گردد:

$$\begin{aligned} & \left(2\sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2} \right)^2 = \\ & \left(\sigma_c m \left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2} \right) + \sigma_c^2 \right) \quad (\text{ض} ۱) \\ & \Rightarrow \left[(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + 4 \times \tau_{r\theta}^2 \right] = m \times \sigma_c \times \\ & \left[\left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) - \left(\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right)^{1/2} \right] + \sigma_c^2 \end{aligned}$$

- [17] H. Lee, T. Moon, B. Haimson, Borehole breakouts induced in Arkosic sandstones and a discrete element analysis, Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(4) (2016) 1369-1388.
- [18] I. Song, Borehole breakouts and core diskings in westerly granite: mechanisms of formation and relationship in situ stress, University of Wisconsin--Madison, 1998.
- [19] H. Lee, Borehole breakouts in arkosic sandstones and quartz-rich sandstones, The University of Wisconsin-Madison, 2005.
- [20] E. Leeman, The measurement of stress in rock: Part I: The principles of rock stress measurements, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 65(2) (1964) 45-81.
- [21] D. Gough, J. Bell, Stress orientations from borehole wall fractures with examples from Colorado, east Texas, and northern Canada, Canadian Journal of Earth Sciences, 19(7) (1982) 1358-1370.
- [22] B.C. Haimson, J.N. Edl Jr, Hydraulic fracturing of deep wells, in: Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Society of Petroleum Engineers, 1972.
- [23] M. Mansourizadeh, M. Jamshidian, P. Bazargan, O. Mohammadzadeh, Wellbore stability analysis and breakout pressure prediction in vertical and deviated boreholes using failure criteria-A case study, Journal of Petroleum Science and Engineering, 145 (2016) 482-492.
- [24] H. Kim, L. Xie, K.-B. Min, S. Bae, O. Stephansson, Integrated in situ stress estimation by hydraulic fracturing, borehole observations and numerical analysis at the EXP-1 borehole in Pohang, Korea, Rock Mechanics and Rock Engineering, 50(12) (2017) 3141-3155.
- [25] H. Zhang, S. Yin, B.S. Aadnoy, Poroelastic modeling of borehole breakouts for in-situ stress determination by finite element method, Journal of Petroleum Science and Engineering, 162 (2018) 674-684.
- [26] S. Khatibi, A. Aghajanzpour, M. Ostadhassan, O. Farzay, Evaluating Single-Parameter parabolic failure criterion in wellbore stability analysis, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 50 (2018) 166-180.
- [27] J.C. Jaeger, N.G. Cook, R. Zimmerman, Fundamentals

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Lakirouhani, J.A. Abbasi, *Determination of breakout failure zone around the borehole using the Mohr-Coulomb and Hoek-Brown failure criteria*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(5) (2020) 1109-1126.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15233.5856](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15233.5856)



