

بررسی کارایی معیار هوک و براون در پیش‌بینی تنش‌های روی صفحه شکست

مهدی محمدی^۱، حسین توکلی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار بخش مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت ۲۷ دی ۹۱، پذیرش اردیبهشت ۹۲)

چکیده

در علم مکانیک سنگ تعیین تنش‌های روی صفحه شکست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا ناپایداری در یک سازه مانند شیروانی‌های سنگی ناشی از ترکیب تنش‌های داخلی است. چنانچه از روش تعادل حدی برای ارزیابی پایداری استفاده شود لازم است تنش‌های نرمال در لحظه شکست تعیین تا بر اساس آن پارامترهای مقاومت برشی تخمین زده شود. یکی از مهم‌ترین معیارهای تجربی که برای تعیین تنش‌های روی صفحه شکست کاربرد دارد معیار هوک - براون است. در این مقاله به منظور ارزیابی کارایی معیار هوک - براون در پیش‌بینی تنش‌های روی صفحه شکست از دایره تنش مور که تنش‌های روی صفحه شکست را بر اساس صفحه شکست واقعی تخمین می‌زند استفاده شده است. نتایج بیانگر این است که بین تنش‌های روی صفحه شکست به دست آمده از معیار هوک - براون و دایره تنش مور مغایرت وجود دارد؛ در نتیجه پارامترهای مقاومت برشی به دست آمده نیز تابع پوش هوک - براون است. همچنین نتایج نشان داد که زاویه صفحه شکست به دست آمده بر اساس پوش هوک - براون با صفحه شکست واقعی در نمونه مغایرت دارد در نتیجه تابعی از صفحه شکست واقعی نیست بلکه تابعی از پوش معیار هوک - براون است.

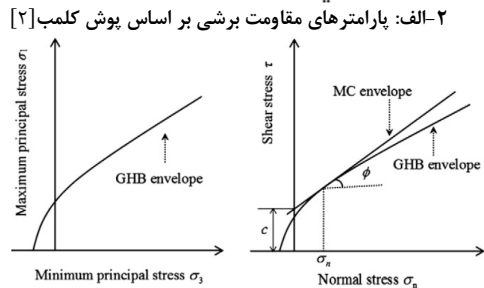
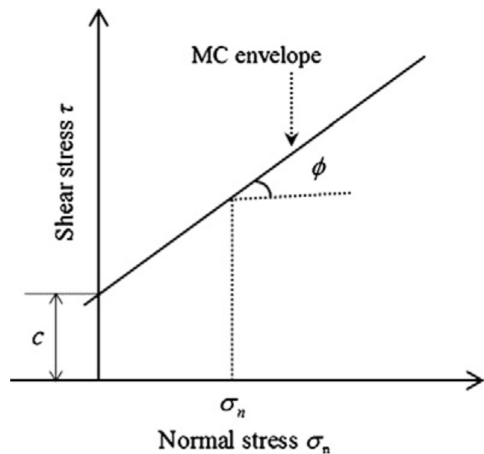
کلمات کلیدی

تنش‌های روی صفحه شکست، دایره تنش مور، زاویه صفحه شکست، معیار هوک - براون

تخمین زده می‌شود؛ استفاده شد. داده‌های مورد استفاده از مقالات گذشته گرفته شده است.

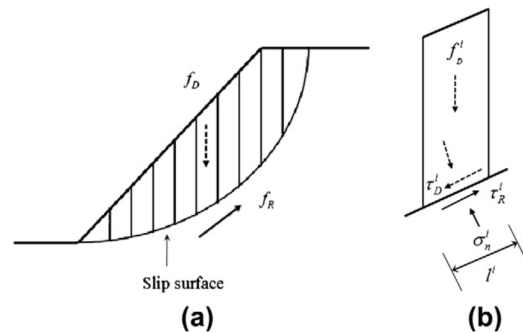
۱- مقدمه

در پروژه‌های مکانیک سنگی تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از روش‌های تحلیل پایداری، روش تعادل حدی است؛ که برآیند این روش فاکتور اطمینان است. فاکتور اطمینان از نسبت تنش‌های نرمال و تنش‌های برشی مماس بر صفحه شکست و یا از نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای مخرب تخمین زده می‌شود [۱]. شکل ۱ ترکیب تنش‌ها را بر روی یک شیروانی نمایش می‌دهد [۲].



۲-الف: پارامترهای مقاومت برشی بر اساس پوش کلمب [۲]
 ۲-ب: پارامترهای مقاومت برشی بر اساس پوش هوک، براون [۲]
 شکل ۲: نمایش پارامترهای مقاومت برشی

معیار مور - کلمب کاربردی‌ترین معیاری است که در روش تعادل حدی استفاده می‌شود. شکل ۲ الف پوش معیار مور - کلمب را نمایش می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌گردد در تنش‌های نرمال مختلف پارامترهای مقاومت برشی ثابت است. بنابراین در روش تعادل حدی سنتی با داشتن فقط یک پارامتر مقاومت برشی، فاکتور اطمینان محاسبه می‌شود [۲].



شکل ۳: a- اساس روش قطعه b- نیروهای اعمال شده به قطعه [۲]

۲- تعیین تنش‌های روی صفحه شکست با استفاده از نظریه دایره تنش مور

یکی از روش‌های نمایش تغییرات تنش، روش ترسیمی دایره مور است. اگر نمونه‌ای تحت تأثیر تنش سه محوره قرار گیرد به طوری که $\sigma_1 \sigma_2 = \sigma_3$ باشد پس از آنکه اختلاف تنش‌ها به حداکثر مقدار خود رسید، بر روی صفحه‌ای که ضعیف‌ترین پیوند مولکولی را شامل می‌شود شکست رخ می‌دهد. این صفحه شکست با تنش کمینه زاویه β می‌سازد. مطابق شکل ۳ اگر محورهای متعامد τ, σ در نظر گرفته شود و روی محور σ طول‌های σ_1, σ_3 جدا شود و دایره‌ای به قطر σ_1, σ_3 رسم گردد دایره مور به دست می‌آید.

مختصات نقطه‌ای روی این دایره مانند A به نحوی که زاویه σ_1, O, A در جهت خلاف حرکت عقربه‌های ساعت نسبت به σ_1, O برابر با 2β باشد، عبارت است از

معیار هوک- براون یکی از معیارهای مهم و اساسی در علم مکانیک سنگ است و برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی نیز می‌توان از این معیار استفاده کرد [۳]. بنابراین ابتدا بایستی تنش‌های نرمال بر صفحه شکست را با روش‌های موجود برای شیروانی مورد نظر تخمین زد [۴]- [۶] و سپس بر اساس پوش هوک، براون و تنش نرمال محاسبه‌شده پارامترهای مقاومت برشی تخمین زده شود (شکل ۲ب) [۲].

بنابراین طبیعی است که تنش نرمال به دست آمده بر اساس معیار هوک - براون معادل تنش نرمال بر صفحه شکست در حالت واقعی باشد تا تحلیل به واقعیت نزدیک تر باشد. در این مقاله به منظور ارزیابی کارایی معیار هوک - براون در پیش‌بینی تنش‌های روی صفحه شکست از دایره تنش مور که تنش‌های روی صفحه شکست بر اساس صفحه شکست واقعی

رابطه ۳ معیار هوک - براون را تحت تأثیر تنش اصلی بیشینه و حداقل نمایش می‌دهد. اما این معیار را می‌توان بر اساس تنش‌های روی صفحه شکست نیز بیان کرد.

بالمرب به ترتیب رابطه تنش نرمال بر صفحه شکست و تنش برشی مماس بر صفحه شکست را به صورت زیر پیشنهاد کرد [۸].

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} + 1} \quad (7)$$

$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3}} \quad (8)$$

با گرفتن مشتق از رابطه ۳ نسبت به σ_3 از طرفین، رابطه ۹ به دست می‌آید.

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} = 1 + am_b \left(\frac{m_b \sigma_3 + s}{\sigma_{ci}} \right)^{a-1} \quad (9)$$

با جایگزین کردن معادله ۹ در رابطه ۷ و ۸ معیار هوک - براون را می‌توان به صورت تنش‌های روی صفحه شکست بیان کرد.

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma_3 + s}{\sigma_{ci}} \right)^a}{2 + am_b \left(\frac{m_b \sigma_3 + s}{\sigma_{ci}} \right)^{a-1}} \quad (10)$$

$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{1 + am_b \left(\frac{m_b \sigma_3 + s}{\sigma_{ci}} \right)^{a-1}} \quad (11)$$

بنابراین چنانچه سنگ مورد نظر بکر در نظر گرفته شود به عبارت دیگر شاخص مقاومت زمین‌شناسی برابر با ۱۰۰ باشد روابط به صورت زیر بیان می‌شود.

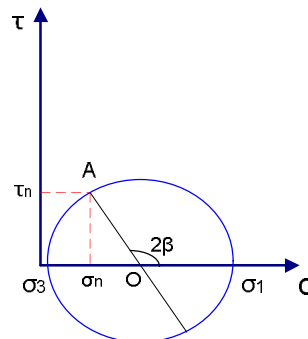
$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_{ci} \left(\frac{m_i \sigma_3 + 1}{\sigma_{ci}} \right)^{0.5}}{2 + am_i \left(\frac{m_i \sigma_3 + 1}{\sigma_{ci}} \right)^{-0.5}} \quad (12)$$

$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{1 + am_i \left(\frac{m_i \sigma_3 + 1}{\sigma_{ci}} \right)^{-0.5}} \quad (13)$$

بنابراین تنش‌های روی صفحه شکست بر اساس معیار هوک - براون برای توده سنگ از روابط ۱۰ و ۱۱ و سنگ بکر از روابط ۱۲ و ۱۳ تخمین زده می‌شود. از طرفی در حالتی که سنگ مورد نظر بکر باشد پوش

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \quad (2)$$



شکل ۳: نمایش دایره مور

بنابراین با داشتن تنش‌های اصلی و زاویه β می‌توان تنش‌های روی صفحه شکست را تخمین زد [۷].

۳- تعیین تنش‌های روی صفحه شکست با استفاده از

پوش عمومی هوک - براون

معیار غیرخطی هوک، براون در سال ۱۹۸۰ توسط هوک - براون پیشنهاد شد [۲] و به تدریج تکامل یافت تا آخرین نسخه آن در سال ۲۰۰۲ توسط هوک و همکاران انتشار یافت [۱]. معادله آن به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma_3 + s}{\sigma_{ci}} \right)^a \quad (3)$$

s ، m_b و a پارامترهای ورودی معیار که به درجه شکستگی توده سنگ وابسته هستند و از شاخص مقاومت زمین‌شناسی تخمین زده می‌شود، به‌طوریکه:

$$m_b = m_i \times e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad (4)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (5)$$

$$a = 0.5 + \frac{e^{\left(\frac{-GSI}{15} \right)} - e^{\left(\frac{-20}{3} \right)}}{6} \quad (6)$$

σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش اصلی تنش حداکثر و حداقل σ_{ci} مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر، m_i ثابت هوک، براون در سنگ بکر، D فاکتور اغتشاش است [۱].

تنش‌های اصلی زاویه صفحه شکست نسبت به تنش بیشینه افزایش و نسبت به تنش حداقل کاهش می‌یابد.

۵- تعیین تنش‌های روی صفحه شکست با استفاده از دایره تنش مور

بر اساس اطلاعات به دست آمده از نمونه‌های گرانیت و سترگاد و دولومیت دوهمن که در جدول ۱ و ۲ به ترتیب آمده است؛ مقادیر تنش‌های روی صفحه شکست بر اساس روابط ۱ و ۲ در جدول ۳ و ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۳: تعیین تنش‌های روی صفحه شکست بر اساس دایره تنش مور (نمونه سنگ گرانیت)

تنش برشی مماس بر صفحه شکست (MPa)	تنش نرمال بر صفحه شکست (MPa)	اختلاف تنش اصلی (MPa)
۷۴/۰۶	۲۵/۱۸	۲۳۸/۹
۱۱۷/۹۲	۵۱/۸۷	۳۶۸/۵
۱۵۰/۵۸	۷۵/۹۳	۴۴۹/۵
۱۸۲/۷	۱۲۶/۱۶	۵۰۷/۵
۲۴۷/۵۳	۱۶۱/۳۸	۶۶۹

جدول ۴: تعیین تنش‌های روی صفحه شکست بر اساس دایره تنش مور (نمونه سنگ دولومیت دوهمن)

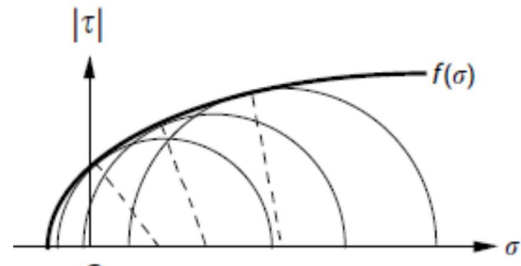
تنش برشی مماس بر صفحه شکست (MPa)	تنش نرمال بر صفحه شکست (MPa)	اختلاف تنش اصلی (MPa)
۶۶/۸۴	۲۴/۱۲	۲۰۸/۹
۹۵/۵۴	۴۷/۸۸	۲۸۵/۲
۱۱۵/۷۰	۶۶/۵۰	۳۵۴/۴
۱۴۵/۹۱	۱۰۱/۲۲	۳۷۹

همان طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش اختلاف تنش‌های اصلی، تنش‌های داخلی روی صفحه شکست نیز افزایش می‌یابد.

۶- تعیین تنش‌های روی صفحه شکست بر اساس پوش هوک-براون

برای تعیین تنش‌های روی صفحه شکست بر اساس معیار هوک-براون از داده‌های جدول ۱ و ۲ استفاده شد. پوش معیار هوک-براون برای نمونه‌های گرانیت و دولومیت مطابق با روابط ۱۲ و ۱۳ در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد پوش رسم شده مماس بر دایره تنش مور

شکست هوک - براون مماس بر دایره مور رسم می‌شود (شکل ۴) [۹]. اگر از مرکز دایره مور خطی مماس بر پوش مور رسم شود زاویه‌ای که از طرف تنش حداکثر در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌سازد دو برابر زاویه‌ای است که صفحه شکست نسبت به تنش حداکثر دارد [۹].



شکل ۴: پوش مماس بر صفحه شکست [۹]

۴- داده‌های استفاده‌شده در تحقیق

در این پژوهش از داده‌های مستند در مقالات معتبر ارائه شده در گذشته استفاده شده است. داده‌ها شامل تنش‌های اصلی کمینه، تنش اصلی بیشینه و زاویه صفحه شکست نسبت به تنش بیشینه است. داده‌ها شامل گرانیت و سترگاد و دولومیت دوهمن از آزمایش‌ها موگی [۱۰] است که در جدول ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱: داده‌های گرانیت و سترگاد [۱۰]

زاویه صفحه شکست نسبت به تنش بیشینه (درجه)	تنش بیشینه (MPa)	تنش کمینه (MPa)
۱۹	۲۳۹	۰/۱
۲۰	۳۷۸	۹/۵
۲۱	۴۶۷	۱۷/۵
۲۳	۵۵۵	۴۷/۵
۲۴	۷۲۰	۵۱

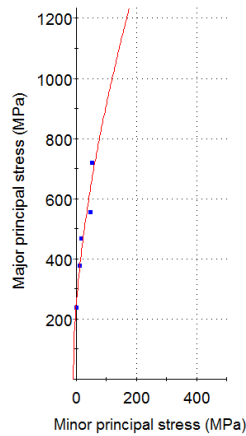
جدول ۲: داده‌های دولومیت دوهمن [۱۰]

زاویه صفحه شکست نسبت به تنش حداکثر (درجه)	تنش بیشینه (MPa)	تنش کمینه (MPa)
۲۰	۲۰۹	۰/۱
۲۱	۲۹۶	۱۰/۸
۲۲	۳۶۷	۲۱/۶
۲۵	۴۱۲	۳۳

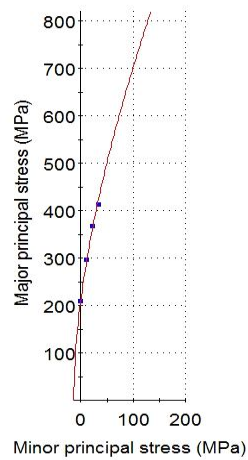
همان طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش اختلاف

جدول ۶: تعیین تنش‌های روی صفحه شکست بر اساس معیار هوک، براون (نمونه سنگ دولومیت دوهمن)

زاویه صفحه شکست نسبت به تنش بیشینه (درجه)	تنش نرمال بر صفحه شکست (MPa)	تنش برشی مماس بر صفحه شکست (MPa)
۲۰	۲۴	۶۷
۲۰	۴۶/۴	۹۳/۶
۲۴	۷۰/۷	۱۱۸/۹
۲۴/۵	۹۶/۴	۱۴۳/۲



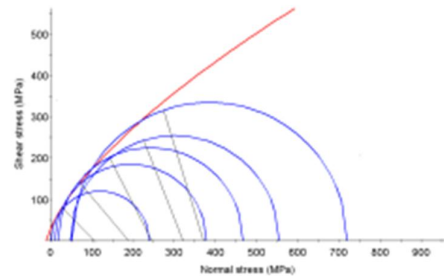
۶-الف: گرانیت وسترگاد



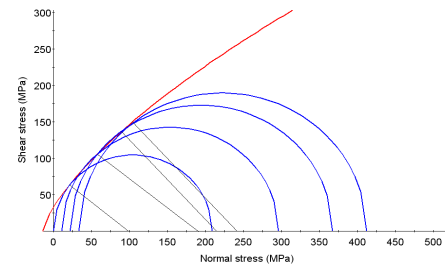
۶-ب: دولومیت دوهمن

شکل ۶: نمایش پوش هوک، براون بر اساس تنش‌های اصلی

است. شکل ۶ نیز پوش شکست هوک، براون را تحت تأثیر تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه برای دو نمونه نمایش می‌دهد. با توجه به پوش شکست هوک - براون تنش‌های روی صفحه شکست تعیین شد؛ به‌طوریکه جدول ۵ و ۶ نتایج را برای دو نمونه نمایش می‌دهد.



۵-الف: گرانیت وسترگاد



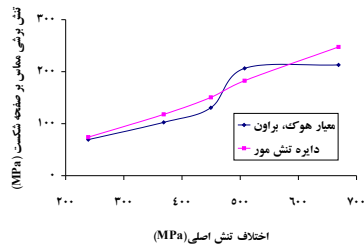
۵-ب: دولومیت دوهمن

شکل ۵: نمایش پوش هوک، براون بر اساس تنش‌های روی صفحه شکست برای نمونه‌های مختلف

جدول ۵: تعیین تنش‌های روی صفحه شکست بر اساس معیار هوک، براون (نمونه سنگ گرانیت)

زاویه صفحه شکست نسبت به تنش بیشینه (درجه)	تنش نرمال بر صفحه شکست (MPa)	تنش برشی مماس بر صفحه شکست (MPa)
۲۱	۲۰	۶۹/۴
۲۸/۵	۴۲/۴۵	۱۰۲/۶
۳۲	۶۳/۷۷	۱۳۰/۶
۳۵	۱۳۱/۲	۲۰۶/۴
۳۷	۱۳۷/۷	۲۱۳

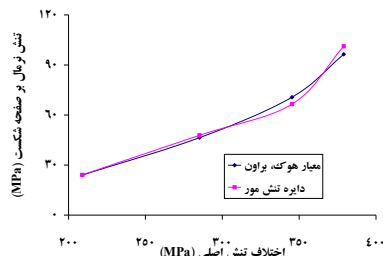
شکل ۵ زاویه صفحه شکست را برای هر نمونه طبق معیار مور، کلمب نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در شکل ۵ الف فقط صفحه شکست دو دایره تنش اول و دوم



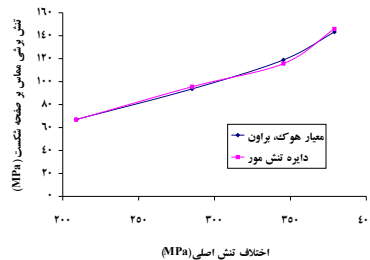
ب: تنش برشی

شکل ۷: تنش‌های روی صفحه شکست نسبت به اختلاف تنش‌های اصلی (گرانیت وسترگاد)

شکل ۸ الف و ب به ترتیب تنش‌های نرمال بر صفحه شکست و تنش‌های برشی مماس بر صفحه شکست نسبت به اختلاف تنش‌های اصلی بر اساس پوش هوک-براون و همچنین بر اساس دایره تنش مور برای نمونه سنگ دولومیت دوهمین نمایش می‌دهد؛ همان طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش اختلاف تنش‌های اصلی، اختلاف نتایج در دو روش برای تنش‌های نرمال بر صفحه شکست از ۰ تا ۳/۵ مگاپاسکال افزایش یافته و همچنین با افزایش اختلاف تنش اصلی، تنش‌های برشی از ۰ تا ۵ مگاپاسکال تغییر کرده است.



الف: تنش نرمال



ب: تنش برشی

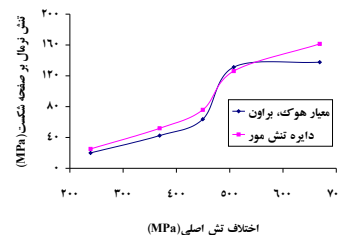
شکل ۸: تنش‌های روی صفحه شکست نسبت به اختلاف تنش‌های اصلی (دولومیت دوهمین)

بنابراین در هر دو نمونه اختلاف زیادی در نتایج به دست آمده است. به عبارت دیگر چنانچه در عمل پوش هوک - براون

مماس بر پوش هستند و سه صفحه شکست دیگر مماس بر پوش نیستند. به عبارت دیگر اگر صفحه شکست به نحوی رسم شود که مماس بر پوش دایره مور شود، زاویه صفحه شکست با نتایج عملی مطابقت نمی‌کند زیرا با افزایش اختلاف تنش‌های اصلی زاویه صفحه شکست نسبت به تنش بیشینه افزایش می‌یابد [۱۱]. اما برای بررسی و مقایسه، با در نظر گرفتن کمترین فاصله تا پوش مور برای هر دایره، صفحه شکست برای سه دایره دیگر رسم شده است. شکل ۵ ب صفحه شکست برای نمونه دیگر نمایش می‌دهد. جدول ۵ و ۶ زاویه صفحه شکست به دست آمده بر اساس پوش هوک، براون نمایش می‌دهد.

۷- بحث و بررسی

همان طور که ملاحظه گردید شکست در نمونه تحت تأثیر اختلاف تنش‌های اصلی رخ می‌دهد؛ بنابراین با توجه به این موضوع، بررسی تنش‌های نرمال و برشی مماس بر صفحه شکست نسبت به اختلاف تنش‌های اصلی انجام می‌شود. شکل ۷ الف و ب به ترتیب تغییرات تنش نرمال بر صفحه شکست و تنش برشی مماس بر صفحه شکست نسبت به اختلاف تنش‌های اصلی را برای سنگ گرانیت وسترگاد نمایش می‌دهد؛ همان طور که ملاحظه می‌گردد بین نتایج به دست آمده از پوش هوک-براون و نتایج به دست آمده از دایره تنش مور اختلاف وجود دارد به طوری که با افزایش اختلاف تنش‌های اصلی، اختلاف نتایج به دست آمده در تنش نرمال بر صفحه شکست از ۰ تا ۳/۵ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش اختلاف تنش‌های اصلی اختلاف تنش برشی مماس بر صفحه شکست حاصل از بررسی نیز در حال افزایش است به طوری که حداقل اختلاف نتایج ۵ و حداکثر اختلاف نتایج ۲۳ مگاپاسکال است.



الف: تنش نرمال

شود. معیار هوک-براون از معیارهای تجربی است که برای تعیین تنش‌های روی صفحه شکست کاربرد دارد. در این مقاله به منظور ارزیابی کارایی معیار هوک، براون در پیش‌بینی تنش‌های روی صفحه شکست از دایره تنش مور که تنش‌های روی صفحه شکست را بر اساس صفحه شکست واقعی تخمین می‌زند استفاده شده است. نتایج نشان داد که بین تنش‌های روی صفحه شکست به دست آمده از معیار هوک - براون و دایره تنش مور مغایرت دارد؛ به طوری که در سنگ گرانیت وسترگاد حداقل اختلاف در تنش نرمال بر صفحه شکست ۴ و حداکثر مقدار ۳۵ مگاپاسکال است. همچنین حداقل تنش برشی مماس بر صفحه شکست ۵ و حداکثر مقدار ۲۳ مگاپاسکال است. در سنگ دولومیت دوهمن حداقل اختلاف در تنش نرمال بر صفحه شکست صفر و حداکثر مقدار ۳/۵ مگاپاسکال است. همچنین حداقل تنش برشی مماس بر صفحه شکست ۰ مگاپاسکال و حداکثر مقدار ۵ مگاپاسکال است. در نتیجه پارامترهای مقاومت برشی به دست آمده نیز تابع پوش هوک - براون است و تابع تنش‌های نرمال روی صفحه شکست نیست.

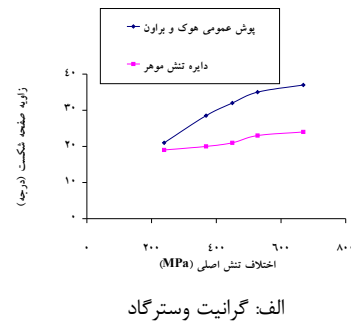
نتایج نشان داد که پوش هوک، براون در نمونه سنگ گرانیت بر تمامی دایره تنش مور مماس نیست؛ در نتیجه بر اساس پوش هوک، براون صفحه شکستی وجود ندارد و نمونه پایدار است در صورتی که در عمل نمونه تحت تأثیر اختلاف تنش اصلی شکسته شده است.

نتایج نشان داد که زاویه صفحه شکستی که بر اساس پوش هوک، براون به دست می‌آید با زاویه صفحه شکستی که از نتایج دایره تنش مور به دست آمده است مغایرت دارد. بنابراین نتایج دقیقاً تابع پوش هوک - براون است، و تابع صفحه شکست واقعی نیست.

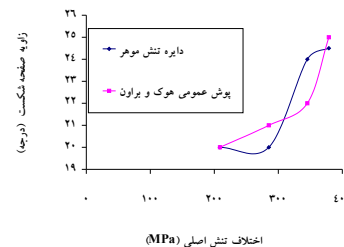
۹- مراجع

- [1]Hoek E. , Carranza-Torres C. and Corkum B.; 2002; "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition"; In: Proc Fifth North Am Rock Mech Symp.
- [2]Shen J. , Karakus M. and Xu C.; 2012; " Direct expressions for linearization of shear strength envelopes given by the Generalized Hoek-Brown criterion using genetic programming"; Computers and Geotechnics; 44, 139-146.
- [3]Carranza-Torres C. ; 2004; "Some comments on the application of the Hoek-Brown failure criterion for intact rock and rock masses to the solution of tunnel and slope problems"; In: Barla G, Barla M, editors, MIR - X Conference on rock and engineering mechanics, Torino, Italy, Pàtron Editore, Bologna; 24-

در نظر گرفته شود؛ تحلیل‌ها تابعی از پوش هوک - براون است و بر مبنای نتایج واقعی انجام نمی‌شود. به عبارت دیگر پارامترهای مقاومت برشی نیز تابع پوش عمومی هوک-براون است و بر مبنای تنش نرمال بر صفحه شکست تعیین نمی‌شود. چنانچه شکل ۵ الف در نظر گرفته شود پوش عمومی هوک، براون مماس بر دو دایره است و بر سه دایره دیگر مماس نیست به عبارت دیگر بر این اساس صفحه شکستی تحت تأثیر اختلاف تنش‌های اصلی وجود ندارد بنابراین از این دیدگاه نمونه پایدار است در صورتی که در واقعیت نتیجه عکس این را نشان می‌دهد. چنانچه زاویه صفحه شکست به دست آمده از پوش هوک-براون با صفحه شکست واقعی در نظر گرفته شود ملاحظه می‌گردد که اختلاف قابل توجهی وجود دارد؛ شکل ۹ زاویه صفحه شکست در اختلاف تنش‌های اصلی را نمایش می‌دهد؛ همان طور که ملاحظه می‌گردد در هر دو نمونه اختلاف بسیار زیادی بین نتایج دو روش وجود دارد.



الف: گرانیت وسترگاد



ب: دولومیت دوهمن

شکل ۹: زاویه صفحه شکست بر اساس نتایج پوش هوک، براون و دایره تنش مور

۸- نتیجه‌گیری

ناپایداری در یک سازه مانند شیروانی‌های سنگی ناشی از ترکیب تنش‌های داخلی است. اگر برای ارزیابی از روش تعادل حدی استفاده شود بایستی تنش‌های نرمال در لحظه شکست تعیین، تا بر اساس آن پارامترهای مقاومت برشی تخمین زده

- 25November. p. 285–326. [Chapter 10].
- [4]Yang XL. , Yin JH. ; 2010; “*Slope equivalent Mohr–Coulomb strength parameters for rock masses satisfying the Hoek–Brown criterion*” ; Rock Mech Rock Eng;43:505–11.
- [5]Fu W. , Liao Y. ; 2010; “*Non-linear shear strength reduction technique in slope stability calculation*”; Comput Geotech, 37:288–98.
- [6]Shen J. , Priest SD. and Karakus M. ; 2012; “*Determination of Mohr–Coulomb shear strength parameters form generalized Hoek–Brown criterion for slope stability analysis*”; Rock Mech Rock Eng ,45:123–9. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-011-0184-z>.
- [7]Parry RHG. ; 2005; “*Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics*” ; New york: Taylor & Fransis.
- [8]Balmer G. ; 1952; “*A general analytical solution for Mohr’s envelope*”; Am Soc Test Mater;52:1269–71.
- [9]Jaeger J. , Cook, NGW. and Zimmerman, RW. ; 2007; “*Fundamentals of rock mechanics*”; New York: John Wiley.
- [10]Mogi K. ; 1972; “*Experimental Rock Mechanics*” ; London: Balkema.
- [11]Liu HY. , Kou, SQ. , Lindqvist PA. and Tang, CA . ;2004 ; “*Numerical studies on the failure process and associated microseismicity in rock under triaxial compression*” Tectonophysics 384:149– 174.