

مقایسه کیفی و کمی معیار گسیختگی هوک و براون اولیه و هوک-برون

تعمیم یافته در پایداری تونلها

محمدرضا زارعی فرد (نویسنده مسئول)¹

استادیار مرکز آموزش عالی استهبان

zareefard@aut.ac.ir

چکیده

مقاومت توده های سنگی در زردار علاوه بر خصوصیات سنگ بکر تشکیل دهنده آن به فقل و بست این بلوک یعنی به خصوصیات ناپیوستگی های تشکیل دهند توده سنگ بستگی دارد. بر این اساس برای بدست آوردن مقاومت توده سنگ معمولاً از مقاومت سنگ بکر و اصلاح آن با استفاده از سیستمهای طبقه بندی استفاده می شود. یکی از پرکاربردترین معیار گسیختگی و مقاومت مورد استفاده در توده های سنگی درز دار معیار گسیختگی هوک و براون است. در این معیار گسیختگی از سیستم طبقه بندی GSI (شاخص مقاومت زمین شناسی) استفاده می شود. معیار گسیختگی هوک و براون در نسخه های متعددی ارائه شده است که به نسخه ارائه شده در سال 1980 معیار هوک و براون اولیه و به نسخه ارائه شده در سال 2002 معیار هوک و براون تعمیم یافته می گویند. تفاوت معیار هوک و براون اولیه و تعمیم یافته در تعریف مقدار a و ضریب آسیب دیدگی D در معیار تعمیم یافته است. در معیار هوک و براون تعمیم یافته پارامتر مقاومت a دیگر ثابت نیست و بین 0/5 برای توده سنگ عالی با تا 0/6 برای توده سنگ خیلی ضعیف با تغییر می کند. در روشهای تحلیلی ارائه شده برای تحلیل تونلها از این دو معیار استفاده شده است. در این تحقیق اثر نوع معیار گسیختگی انتخابی بر نتایج تحلیل تونل به صورت نظری بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از معیار هوک و براون اولیه به جای هوک و براون تعمیم یافته با خطا همراه است.

واژه های کلیدی: تونل دایره ای؛ روشهای تحلیلی؛ کیفیت توده سنگ؛ معیار گسیختگی هوک و براون اولیه و اصلاح شده، تنش، تغییر مکان.

¹ -نویسنده مسئول (محمدرضا زارعی فرد)

1- مقدمه:

توده‌های سنگی درز دار مرکب از بلوک‌هایی از مواد سنگی شکننده سخت هستند که توسط صفحات ناپیوستگی‌ها که خودشان ممکن است از مواد ضعیف‌تر پوشیده شده باشند، جدا گردیده‌اند. مقاومت چنین توده‌های سنگی بستگی به مقاومت قطعات بکر سنگ از یک طرف و به آزادی حرکت آنها از طرف دیگر دارد، که این آزادی حرکت بلوک‌ها و دانه‌ها به ترتیب بستگی به تعداد، جهت، فاصله بندی و مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها دارد. برای بررسی پایداری تونل در چنین محیطی باید تأثیر این عوامل در مقاومت توده سنگ لحاظ شود. فهم کامل این مسئله مستلزم کاری عمیق و گسترده نظری و عملی است.

علی‌رغم توسعه زیاد در زمینه مسائل مهندسی ژئوتکنیک و وجود کامپیوترها برای تحلیل و توزیع پیچیده تنش‌ها، و درک اندرکنش‌ها چه در سازه‌های زیرزمینی و چه در اتصال پی با خاک و با بتن، هنوز مسائل حل نشده‌ای از قبیل پیش بینی صحیح و دقیق مقاومت توده‌های سنگی درز دار وجود دارد.

هوک و براون [1 و 2] دریافته‌اند که در استخراج معیار گسیختگی توده سنگ باید معیاری ارائه نمود که بتوان آن را به راحتی و سهولت و با توجه به شرایط زمین شناسی محل استخراج نمود. با این وجود ابتدا آنها معیار گسیختگی خود را بر مبنای سیستمها RMR [3] و Q [4] بنیان نهادند. البته برای استخراج پارامترهای توده سنگ در سیستم RMR شرایط آب زیرزمینی و جهت

داری درز مساعد در نظر گرفته می‌شد و در سیستم Q پارامترهای تنش و آب زیرزمینی (ضریب کاهش آب درز، و SRF ضریب کاهش تنش) مساعد لحاظ می‌شدند در آن زمانها استفاده از طبقه بندی RMR تعدیل یافته (با اصلاحات گفته شده) به خوبی جواب می‌داد چون بیشتر مسائل پیش رو در سنگهای با کیفیت متوسط ($30 < RMR < 70$) بود. به هر حال به زودی روشن شد که استفاده از سیستم RMR در سنگهای خیلی ضعیف با مشکل روبروست. رابطه بین RMR و ثوابت هوک و براون در سنگهای ضعیف و شدیداً شکسته با مشکل روبرو شد. بر این اساس هوک و همکاران سیستم طبقه بندی جدیدی را ارائه نمودند که در توده سنگ با کیفیت مختلف قابل استفاده است. این طبقه بندی امروزه GSI (شاخص مقاومت زمین شناسی) نام دارد. مقدار و کاربری GSI در نسخه های مختلفی ارائه شده است. اما در توده های سنگ سخت تا حدی با RMR برابر است.

معیار اولیه هوک - براون در سال 1980 منتشر شد که بر پایه آزمایش و تجربه روی تعدادی پروژه‌ها و نتایج آزمایشگاهی بود. نسخه جدید آن در سال 1988 منتشر و بالاخره معیار تعمیم یافته هوک و براون در سال 2002 منتشر گردید.

تاریخچه تغییرات معیار هوک و براون به صورت خلاصه در جدول 1 ارائه شده است.

جدول (1). تغییرات ویرایش های مختلف معیار گسیختگی

هوک و براون

پوشش	معادلات	ارائه دهندگان
معیار اولیه برای توده های سنگی درز دار سخت با قفل و بست زیاد بدون ریزدانه. معیار مور به صورت مجموعه ای از زوج (s, t) با انطباق آماری به روش بالمر استخراج شد.	$s = s_{ci} + s_{ci} \sqrt{\frac{m_b s_{ci}}{s_{ci}}} + s$ $s_i = \frac{s_{ci}}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s})$ $t = A s_{ci} ((s_{ci} - s_i) / s_{ci})^B$ $s = s_{ci} + C \frac{C (s_{ci} - s)}{C + (s_{ci} - s)}$ $t = (s_{ci} - s) \sqrt{\frac{1}{s_{ci}}}$ $\frac{1}{s_{ci}} = m_b s_{ci} / 2 (s_{ci} - s)$	هوک و براون [1]
معیار اولیه برای توده های سنگ		

هوک [5]	$s = s_{ci} + s_{ci} \sqrt{\frac{m_b s_{ci}}{s_{ci}}} + s$ $t = (\cot \phi - \cos \phi) m s_{ci} / 8$ $f_{ci} = \arctan(1 / \sqrt{4h \cos^2 \phi - 1})$ $q = (90 + \arctan(1 / \sqrt{h^3 - 1})) / 3$ $h = 1 + (16(m s_{ci} + s_{ci}) / (3m_b^2 s_{ci}))$	سخت درزدار شدیداً قفل و بست دار بدون ریزدانه با بحث در مورد گسیختگی ناهمسان و استخراج رابطه پوش مور کولمب به وسیله بری
هوک و براون [6]	<p>توده سنگ به هم خورده:</p> $\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right)$ <p>توده سنگ به هم نخورده با قفل و بست:</p> $\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right)$ $s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right)$ $E_m = 10^{\frac{RMR - 100}{9}}$ <p>m_b و m_i به ترتیب ثوابت سنگ بکر و توده سنگ اند.</p>	مانند معیار هوک (1983) با اضافه نمودن رابطه بین m_b و s و RMR که در آن اثر آب زیرزمینی و جهت داری درز مساعد در نظر گرفته شده است (یعنی برای شرایط آب زیرزمینی نمره 10 و برای جهت داری درز نمره 0 لحاظ شده است). همچنین پارامترها برای شرایط توده سنگ به هم نخورده و به هم خورده بدست آمده است. باید توجه داشت که نمره آب زیرزمینی در نسخه نهایی RMR، 15 در نظر گرفته شده است.

عمومی ترین شکل این معیار که هم حالت اصلی و هم حالت اصلاح شده را در برمی گیرد توسط رابطه زیر بیان می شود [2]:

$$s_1 = s_3 + s_{ci} \frac{\dot{e}}{\dot{e}} m_b \frac{s_3}{s_{ci}} + s_{ci} \frac{\dot{u}^a}{\dot{u}} \quad (1)$$

کلاً پارامتر a بزرگتر یا مساوی از $0/5$ است. البته a برای سنگ بکر برابر $0/5$ است. در معیار هوک و براون اولیه مقدار a برابر با $0/5$ در نظر گرفته شده بود [1]:

$$s_1 = s_3 + \sqrt{ms_3s_c + ss_c^2} \quad (2)$$

در روابط فوق s_1 و s_3 به ترتیب تنشهای اصلی بزرگتر و کوچکتر در شرایط گسیختگی اند، s_c مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر است، و m و s و a پارامترهای هوک و براون توده سنگ اند و از روابط زیر بدست می آیند [2]:

$$m = m_i \exp \frac{\alpha(GSI - 100)}{28 - 14D} \quad (3)$$

$$s = \exp \frac{\alpha(GSI - 100)}{9 - 3D} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \frac{\alpha \cdot GSI}{e} - \frac{20}{3} \frac{\alpha}{e} \quad (5)$$

در روابط فوق m_i ثابت مصالح برای سنگ بکر؛ و GSI شاخص مقاومت زمین شناسی است و از مطالعات ژئوتکنیکی بدست می آید. ضریب آسیب دیدگی D از صفر (برای حفاری با کیفیت عالی) تا یک (برای حفاری شدیداً بی کیفیت چال و انفجار) تغییر می کند.

مقادیر پارامترهای توده سنگ بر اساس روابط ارائه شده به وسیله هوک و براون قابل استخراج اند. در این ارتباط اگر برای توده سنگ درز دار RMR برابر با GSI فرض شود تفاوت معیار هوک و براون اولیه و تعمیم یافته در تعریف مقدار a و ضریب آسیب دیدگی D در معیار تعمیم یافته خواهد بود. در واقع در معیار گسیختگی اولیه و تعمیم یافته هوک و براون پارامترهای مقاومتی توده سنگ بر اساس

مقدار پارامترهای سنگ بکر و GSI (شاخص مقاومت زمین شناسی) توده سنگ تخمین زده می شوند. البته همانطور که گفته شد در معیار گسیختگی تعمیم یافته پارامتر جدید آسیب دیدگی توده سنگ D معرفی شده است. علاوه بر این در معیار هوک و براون تعمیم یافته پارامتر مقاومت a دیگر ثابت نیست و بین $0/5$ برای توده سنگ عالی با $GSI=100$ تا $0/6$ برای توده سنگ خیلی ضعیف با $GSI=10$ تغییر می کند.

روشهای نظری مربوط به تحلیل تونل دایره‌ای در توده سنگ الاستوپلاستیک تحت بارگذاری هیدروستاتیک با مدل‌های رفتاری مختلف ارائه شده اند، که با کمک آنها می توان تونل را تحلیل نمود، و در نهایت آنرا طراحی نمود [11-25]. این روشها را می توان به روشهای ارائه شده بر اساس معیار مور کولمب [25 و 20 و 22 و 10 و 18]، روشهای ارائه شده بر مبنای معیار هوک و براون اولیه [11 و 21 و 10 و 17 و 13 و 19 و 23 و 24] و روشهای ارائه شده بر مبنای معیار هوک و براون تعمیم یافته [12 و 22] طبقه بندی نمود. دلیل استفاده از معیار هوک و براون اولیه و چشم پوشی از پارامتر a در تحلیل اینست که بتوان معادلات حاکم را به صورت تحلیلی حل نمود و حل بسته را استخراج نمود چون در صورت لحاظ نمودن پارامتر a لازم است که معادلات به صورت عددی حل شوند. البته این انتخاب می تواند تا حدی باعث ایجاد خطا در تحلیل شود.

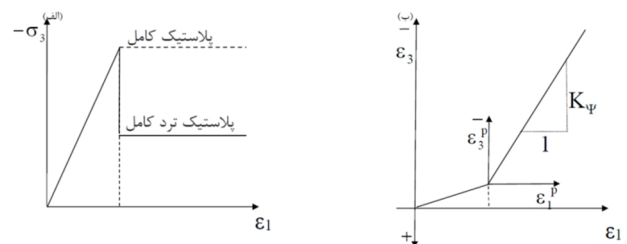
در این مقاله تأثیر نوع معیار گسیختگی انتخابی در تحلیل تونل در توده سنگ الاستوپلاستیک با کیفیت های مختلف ارزیابی می شود. توده سنگ سالم و بدون آسیب دیدگی در نظر گرفته می شود ($D=0$). این انتخاب معادل این است که پارامتر D در معیار هوک و براون تعمیم یافته برابر با صفر است و تنها تفاوت موجود در دو معیار در مقدار a در دو معیار خواهد بود. همانطور که گفته شد a در

معیار هوک و براون اولیه 0/5 و در معیار هوک و براون تعمیم یافته به GSI سنگ بستگی دارد. در این راستا در این مقاله برای مقایسه اثر این پارامتر از دو مدل تحلیلی یکی براساس هوک و براون اولیه (زارعی فرد و فهیمی فر [23 و 24 و 17]) و دیگری بر اساس هوک و براون اصلاح شده (لی و پیترزاک [22]) استفاده خواهد شد.

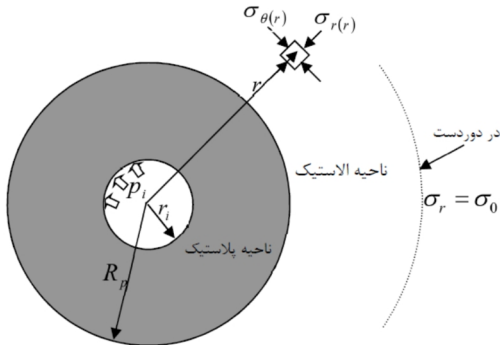
2- شرایط تونل

فرض می‌شود، که رفتار توده سنگ الاستوپلاستیک ترد باشد. این مدل رفتاری در حالت خاص به مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل قابل ساده‌سازی و تبدیل است. این مدل رفتاری با یک معیار گسیختگی انتقالی F و یک تابع پتانسیل پلاستیک G مشخص می‌شود. یکی از مهمترین جنبه‌های مدل رفتاری الاستوپلاستیک ترد این است، که پارامترهای تابع گسیختگی و پتانسیل پلاستیک بعد از گسیختگی به صورت ناگهانی از مقایر پیک به مقادیر ماندگار تبدیل می‌شوند.

شکل 1 این مدل رفتاری را نشان می‌دهد. اگر اختلاف پارامترهای پیک و ماندگار صفر باشد رفتار الاستوپلاستیک کامل خواهد بود.



شکل (1). مدل رفتاری (تنش- کرنش) مورد استفاده برای توده سنگ



شکل (2). شرایط هندسی مسأله مورد بررسی

شرایط مدل مورد بررسی در شکل 2 نشان داده شده است. یک تونل دایره‌ای با شعاع r_i در توده سنگ الاستوپلاستیک همگن و همسان‌حفری شده است. رفتار توده سنگ الاستوپلاستیک ترد (شکل 12) در نظر گرفته می‌شود. بعد از گسیختگی مقاومت به صورت تدریجی و خطی به مقاومت ماندگار افت می‌کند. این رفتار نرم شونده در حالت خاص به رفتار الاستوپلاستیک کامل و الاستوپلاستیک ترد قابل تبدیل است. توده سنگ در حالت اولیه الاستیک با مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون ν است. تونل عمیق است و تحت شرایط هیدروستاتیک با تنشهای اولیه یکنواخت p_0 قرار دارد. بعد از حفاری پوشش در سطح داخلی توده سنگ نصب می‌شود. فشار یکنواخت داخلی p_i به سطح داخلی تونل در اثر نصب پوشش اعمال می‌شود. در این حالت، شرایط متقارن محوری بر رفتار مصالح، هندسه و بارگذاری حاکم است. بعد از حفاری و نصب پوشش در توده سنگ باز توزیع تنش رخ می‌دهد و در اثر آن توده سنگ دچار همگرایی می‌شود. اگر تنشهای توده سنگ به سطح گسیختگی آن برسد یک ناحیه پلاستیک پیرامون تونل شکل می‌گیرد. دو ناحیه شامل ناحیه

الاستیک خارجی و ناحیه پلاستیک داخلی با شعاع R_p پیرامون تونل شکل می گیرد.

نهایی s_r و s_q و تنش هیدروستاتیک اولیه p_0 را می توان به صورت زیر نوشت [26]:

$$e_r^c = \frac{1+n}{E} [(1-n)(s_r - p_0) - n(s_q - p_0)] \quad (8)$$

$$e_q^c = \frac{1+n}{E} [(1-n)(s_q - p_0) + n(s_r - p_0)] \quad (9)$$

که در آن E و n به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون توده سنگ هستند.

مدول توده سنگ را می توان با استفاده از معادله ساده سازی شده یا معادله تعمیم یافته هوک و دیدریکس [27] برآورد نمود:

$$E_0 = E_i \frac{\alpha}{\epsilon} 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{(60+15D-GSI)/11}} \frac{\sigma}{\phi} \quad (10)$$

$$E_0 = 100000 \frac{\alpha}{\epsilon} \frac{1 - D/2}{1 + e^{(75+25D-GSI)/11}} \frac{\sigma}{\phi} \quad (11)$$

ضریب پواسون توده سنگ را نیز می توان از معادله واسارلی [28] تخمین زد:

$$n_0 = -0.002GSI + n_i + 0.2 \quad (12)$$

که در آن E_i و n_i مدول الاستیسیته و ضریب پواسون سنگ بکر اند.

در حالت پلاستیک نیز معیار گسیختگی اولیه (رابطه (2)) و تعمیم یافته هوک و براون (رابطه (1)) استفاده می شود. در این مسأله با شرایط متقارن محوری تنشهای اصلی s_1 و s_3 به ترتیب تنشهای مماسی s_q و شعاعی s_r خواهند بود و در نتیجه روابط (1) و (2) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$s_q = s_r + s_{ci} \frac{\alpha m s_r}{\epsilon s_{ci}} + s_{ci} \frac{\sigma}{\phi} \quad (13)$$

$$s_q = s_r + \sqrt{ms_r s_c + ss_c^2} \quad (14)$$

3- حل مسأله

با در نظر گرفتن شرایط متقارن محوری نشان داده شده در شکل 2، تنش حاصله در فاصله شعاعی r با تنش شعاعی $s_{r(r)}$ و تنش مماسی $s_{q(r)}$ مشخص می شود. تنشهای $s_{r(r)}$ و $s_{q(r)}$ به ترتیب تنشهای اصلی کوچکتر $s_{3(r)}$ و بزرگتر $s_{1(r)}$ خواهند بود. تغییر مکان نقاط نیز با تغییر مکان شعاعی $u_{r(r)}$ مشخص می شود. باید توجه داشت که در تونلهای بلند شرایط کرنش صفحه ای حاکم است و در این حالت تنش خارج از صفحه $s_{z(r)}$ تنش اصلی میانی $s_{2(r)}$ خواهد بود.

در شرایط متقارن محوری معادله تعادل بین تنش های شعاعی $s_{r(r)}$ و تنشهای مماسی $s_{q(r)}$ در شعاع r به صورت زیر است [26]:

$$\frac{ds_{r(r)}}{dr} - \frac{s_{q(r)} - s_{r(r)}}{r} = 0 \quad (6)$$

در شرایط متقارن محوری رابطه تغییر مکان شعاعی $u_{r(r)}$ در شعاع r با کرنش های شعاعی $e_{r(r)}$ و مماسی $e_{q(r)}$ در این شعاع به صورت زیر است [26]:

$$e_q = \frac{u_r}{r}, \quad e_r = \frac{du_r}{dr} \quad (7)$$

در هر دو ناحیه آسیب دیده و آسیب ندیده توده سنگ، رابطه بین کرنش القایی الاستیک e_r^c و e_q^c و تنشهای القایی

4- بررسی کمی تأثیر GSI

در این قسمت با ذکر یک مثال تأثیر مقدار GSI بر نتایج تحلیل یک تونل بررسی می شود. تونل مورد بررسی با شعاع 5 متر بدون پوشش $p_i = 0 \text{ MPa}$ در عمق 600 متری (جایی که تنش بر جای $p_0 = 17 \text{ MPa}$ وارد می شود) حفاری می شود.

پارامترهای سنگ بکر به صورت زیر است:

$$m_i = 10, \quad E_i = 60 \text{ GPa}, \quad s_{ci} = 100 \text{ MPa}, \\ v_i = 0.2$$

زاویه اتساع توده سنگ نیز 10 درجه است.

در شکل 5 تأثیر مقدار GSI بر توزیع تنش و تغییر شکل پیرامون تونل نمایش داده شده است. و در شکل‌های 6 و 7 تأثیر مقدار GSI بر همگرایی تونل و شعاع ناحیه پلاستیک نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند که برای GSI بزرگتر از 80/60 تونل الاستیک می ماند در این حالت تحلیل تونل با استفاده از روابط لانه انجام می شود. همانطور که مشاهده می شود در این حالتها توزیع تنش در پیرامون تونل یکسان اند (حالت‌های با GSI بزرگتر از 80/60) و ناحیه پلاستیک وجود نخواهد داشت. با کاهش GSI ناحیه پلاستیک رشد پیدا می کند و همگرایی افزایش می یابد. مشاهده می شود که با تشکیل ناحیه پلاستیک (حالت‌های با GSI کوچکتر از 80/60) در نتایج اختلاف ایجاد می شود. اختلاف ایجاد شده در نتایج با کاهش GSI توده سنگ افزایش می یابد.

در ناحیه پلاستیک کرنشهای شعاعی و مماسی کل e_r و e_q را می توان به اجزای الاستیک و پلاستیک تقسیم نمود:

$$e_r = e_r^e + e_r^p, \quad e_q = e_q^e + e_q^p \quad (15)$$

با فرض کوچک بودن کرنشهای الاستیک در قیاس با کرنشهای پلاستیک و با فرض اینکه قانون جریان غیر همبسته برقرار است رابطه بین کرنشهای شعاعی و مماسی به صورت زیر خواهد بود [17]:

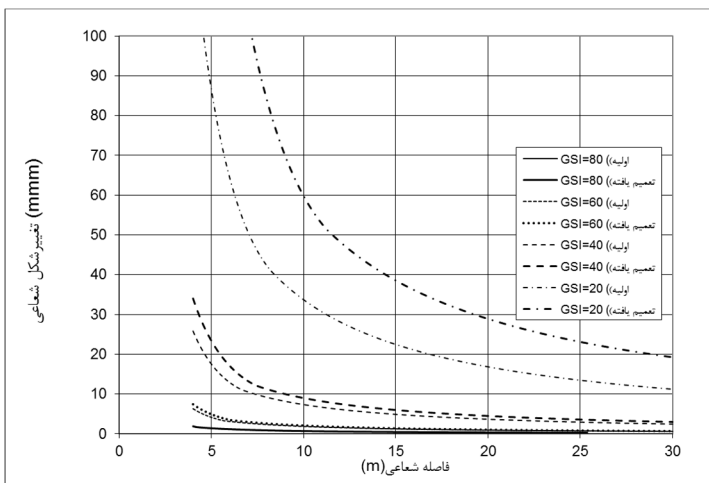
$$d e_r^p + K_Y d e_q^p = 0 \quad (16)$$

که در آن $K_Y = (1 + \sin Y) / (1 - \sin Y)$ است و Y زاویه اتساع توده سنگ است.

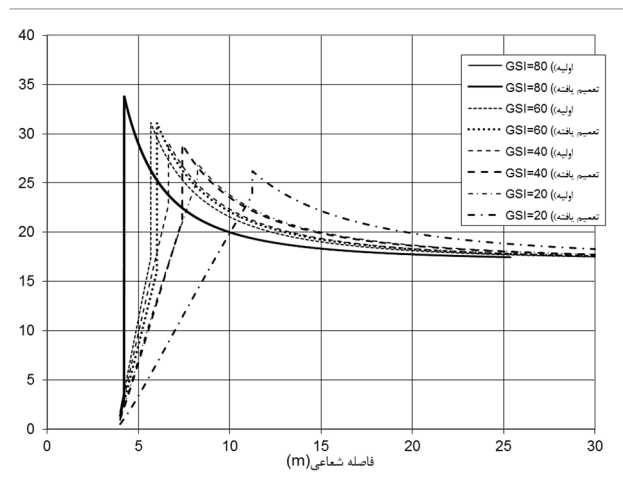
در این تحقیق برای محاسبه پارامترهای ماندگار توده سنگ از رابطه کای و همکاران [29] و GSI_r استفاده می شود:

$$GSI_r = GSI e^{-0.0134 GSI} \quad (17)$$

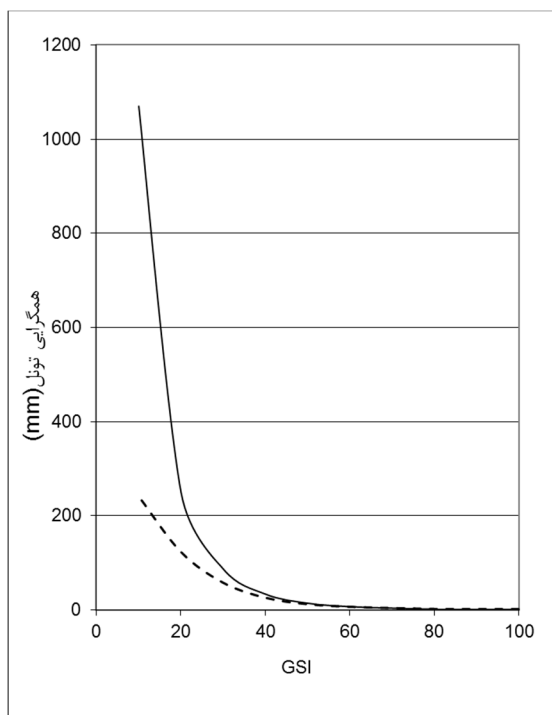
سرانجام با حل معادلات تعادل و سازگاری تغییر شکلها با در نظر گرفتن مدل رفتاری معرفی شده و شرایط مرزی در شعاع تونل و دور دست تونل تحلیل می شود. معادلات حاکم در ناحیه الاستیک به صورت تحلیلی و در ناحیه پلاستیک به صورت عددی (تفاضل محدود) حل میشوند. در شعاع پلاستیک نیز باید شرایط مرزی تعادل و سازگاری تغییر شکلها اعمال شود.



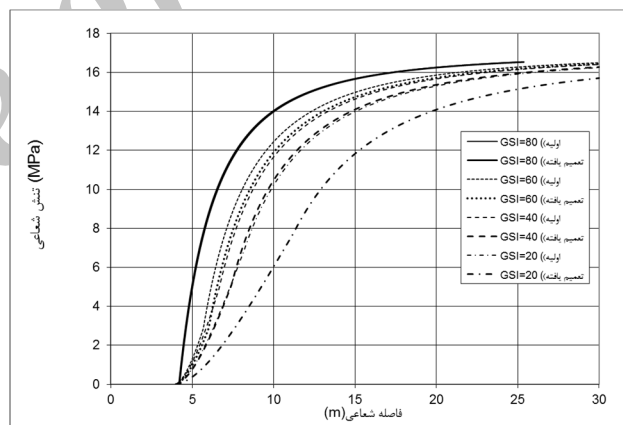
شکل (5). توزیع تغییر مکان شعاعی بدست آمده از دو معیار برای مختلف GSI



شکل (3). توزیع تنشهای مماسی بدست آمده از دو معیار برای مختلف GSI



شکل (6). تأثیر نوع معیار گسیختگی در همگرایی محاسبه شده



شکل (4). توزیع تنشهای شعاعی بدست آمده از دو معیار برای مختلف GSI

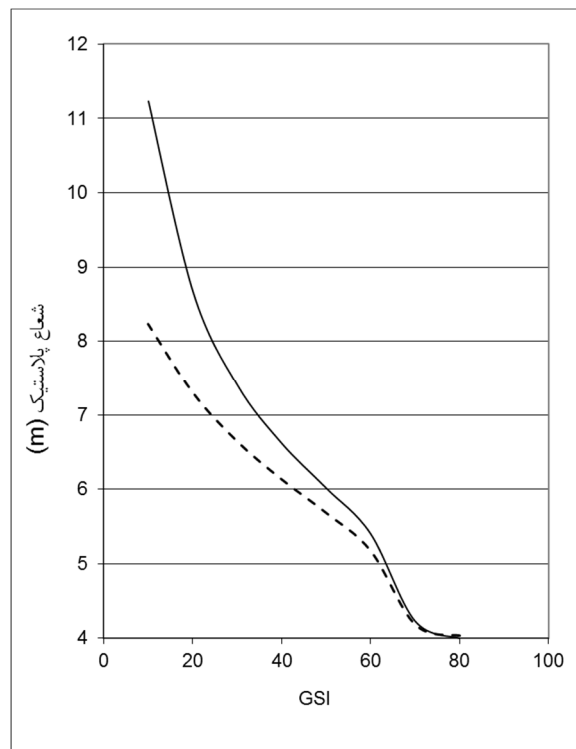
گسیختگی انتخابی در تحلیل تونل در توده سنگ الاستوپلاستیک با کیفیت های مختلف ارزیابی شد. نتایج نشان می داد که نوع معیار گسیختگی به شدت بر نتایج اثرگذاری است و تأثیر آن بر نتایج به خصوص با کاهش GSI افزوده می شود. می توان نتیجه گرفت که تا حد امکان باید از معیار گسیختگی هوک و براون تعمیم یافته استفاده شود. به خصوص در توده های سنگی با کیفیت متوسط تا کم که نتایج بدست آمده از GSI اولیه با خطای زیادی همراه است.

منابع

Hoek, E., Brown, E.T., 1980. [1] *Underground Excavation in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London.

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, [2] B., 2002. *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*. In: *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada Conference, Toronto*, ..pp. 267–273

Bieniawski ZT. *Rock mass classification* [3] *in rock engineering*. In: *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, vol.1, 1976*.p.97–106



شکل (7). تأثیر نوع معیار گسیختگی در شعاع پلاستیک محاسبه شده

5- نتیجه گیری

معیارهای گسیختگی هوک و براون اولیه و تعمیم یافته از پرکاربردترین معیار گسیختگی مورد استفاده در تحلیل و طراحی تونلها هستند. در واقع معیار گسیختگی هوک و براون تعمیم یافته در انواع توده های سنگ دقت بیشتری دارد و در آن چارامتر جدید a در نظر گرفته می شود. از سوی دیگر در معیار هوک و براون اولیه این پارامتر برابر با نیم در نظر گرفته می شود. به هر حال به دلیل سادگی در بسیاری از تحلیلها از این معیار استفاده می شود. در این مقاله تأثیر نوع معیار

- Hoek E, Diederichs MS (2006), [10]
 “Empirical estimation of rock mass modulus”. *Int J Rock Mech Min Sci* 43(2), pp
 .203–215
- Alonso, E., Alejano, L.R., Varas, F., Fdez- [11]
 Manin, G., Carranza-Torres, C., 2003.
 Ground response curves for rock masses
 exhibiting strainsoftening behavior. *Int. J.*
Numer. Anal. Meth. Geomech. 27, 1153–
 .1185
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 1999. [12]
 The elasto-plastic response of underground
 excavations in rock masses that satisfy the
 Hoek–Brown failure criterion. *Int. J. Rock*
Mech. Min. Sci. 36, 777–809
- Sharan, S.K., 2003. Elasto-brittle-plastic [13]
 analysis of circular opening in Hoek–Brown
 media. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40, 817–
 ..824
- Park, K.-H., Kim, Y.-J., 2006. Analytical [14]
 solution for a circular opening in an elasto-
 brittle-plastic rock. *Int. J. Rock Mech. Min.*
Sci. 43, 616–622
- Carranza-Torres, C., 2004. Elasto- [15]
 plastic solution of tunnel problems using
 the generalized form of the Hoek–Brown
 failure criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*
 ..41, 480–481
- Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J., 1974. [4]
 Engineering classification of rock masses for
 the design of tunnel lining. *Rock Mechanics*
 .(4) 6
- Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock [5]
 masses, 23rd. Rankine
 ..Lecture. *Géotechnique* 33(3), 187-223
- Hoek E and Brown E.T. (1988). “The [6]
 Hoek-Brown failure criterion - a 1988
 update”. *Proc. 15th Canadian Rock Mech.*
Symp. (ed. J.H. Curran), pp. 31-38. Toronto:
 Civil Engineering Dept., University of
 Toronto
- Hoek E, Wood D, Shah S (1992), “A [7]
 modified Hoek–Brown criterion for jointed
 rock masses”. Hudson JA (ed) *Proceedings*
of the rock mechanic symposium.
International Society of Rock Mechanics
Eurock” 92, British Geotechnical Society,
 .London, pp 209–214
- Hoek E, Brown ET (1997), “Practical [8]
 estimates of rock mass strength”. *Int J Rock*
Mech Min Sci Geomech Abstr 34:1165–
 ..1186
- Hoek E, Kaiser PK, Bawden WF (1995), [9]
 “Support of underground excavations in
 ..hard rock”. AA Balkema

response curve of circular tunnel in elastic-strain softening rock masses. *Tunnel. Undergr. Space Technol.* 23, 151–159

Lee, Y.,K., Pietruszczak, S., 2008. A new [22] numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass. *Tunnel Tunneling and underground space technology.* 23(5), 588-599

Fahimifar, A., Zareifard, M.R., 2009. A [23] theoretical solution for analysis of tunnels below groundwater considering the hydraulic– mechanical coupling. *Tunnel. Undergr. Space Technol.*, 24(26), 634-646

Fahimifar, A. and Zareifard, M. R. A [24] new elasto-plastic solution for analysis of underwater tunnels considering strain dependent permeability. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 10(11), 2014

Guan, Z., Jiang, Y., Tanabasi, Y., 2007. [25] Ground reaction analyses in conventional tunneling excavation. *Tunnel. Undergr. Space Technol.* 22, 230–237

Timoshenko S. P., Goodier J.N., 1982. [26] *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York

Zareifard, M.R., Fahimifar, A. 2016. [16] Analytical solutions for the stresses and deformations of deep tunnels in an elastic-brittle-plastic rock mass considering the damaged zone, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 58, September 2016, Pages 186-196. 18

Zareifard, M.R., Fahimifar, A. 2014. [17] Effect of seepage forces on circular openings excavated in Hoek–Brown rock mass based on a generalised effective stress principle, *European Journal of Environmental and Civil Engineering.* 18

Zareifard, M.R., Fahimifar, A. 2015. [18] Elastic–Brittle–Plastic Analysis of Circular Deep Underwater Cavities in a Mohr-Coulomb Rock Mass Considering Seepage Forces, *International Journal of Geomechanics.* 15

[19] زارعی فرد، محمدرضا؛ فهیمی فر، احمد، 1397. تحلیل اندرکنش پوشش - توده سنگ در تونلهای حفاری شده در توده سنگ هوک و براون با در نظر گرفتن ناحیه آسیب دیده، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر،

Alonso, E., Alejano, L.R., Varas, F., Fdez- [20] Manin, G., Carranza-Torres, C., 2003. Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behavior. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 27, 1153–1185

Park, K.H., Tontavanich, B., Lee, J.G., [21] 2008. A simple procedure for ground