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

چکیدہ

مقاومت توده های سنگی درزدار علاوه بر خصو صیات سنگ بکر تشکیل دهنده آن به قفل و بست این بلوک یعنی به خصو صیات ناپیو ستگی 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 پر کاربر دترین معیار گسیختگی و مقاومت مورد استفاده در توده های سنگی درز دار معیار گسیختگی هو ک وبراون است. در این معیار گسیختگی از سیستم طبقه بندی GSI (شاخص مقاومت زمین شناسی) استفاده می شود. معیار گسیختگی هو ک و براون است. در این معیار گسیختگی از سیستم طبقه بندی GSI (شاخص مقاومت زمین شناسی) استفاده می شود. معیار گسیختگی هو ک و براون در نسخه های متعددی ارائه شده است که به نسخه ارائه شده در سال 1980 معیار هو ک و براون اولیه و به نسخه ارائه شده در سال 2002 معیار هو ک و براون تعمیم یافته می گویند. تفاوت معیار هو ک و براون اولیه و تعمیم یافته در تعریف مقدار *A* و ضریب آ سیب دید گی *C* در معیار تعمیم یافته است. در معیار هو ک و براون تعمیم یافته پارامتر مقاومت *B* دیگر ثابت نیست و بین *گار* برای توده سنگ عالی با تا *0/*0 برای توده سنگ خیلی ضیعی 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 تعمیم یافته با خطا همره است.

واژههای کلیدی: تونل دایره ای؛ روشهای تحلیلی؛ کیفیت توده سنگ؛ معیار گسیختگی هوک و براون اولیه و اصلاح شده، تنش، تغییرمکان.

¹-نویسنده مسئول (محمدرضا زارعی فرد)

1- مقدمه:

تودههای سنگی درز دار مرکب از بلوکهایی از مواد سنگی شکنندهٔ سخت هستند که توسط صفحات ناپیوستگیها که خودشان ممکن است از مواد ضعیف تر 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 تآثیر این عوامل در مقاومت توده سنگ لحاظ شود. فهم کامل این مسئله مستلزم کاری عمیق و گستردهٔ نظری و عملی است.

علی رغم توسعه زیاد در زمینه مسائل مهندسی ژئوتکنیک و وجود کامپیوترها برای تحلیل و توزیع پیچیدهٔ 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 [[و2] دریافتند 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 با این و و ایتدا آنها معیار گسیختگی خود را بر مبنای سیستمها توده سنگ در سیستم RMR شرایط آب زیرزمینی و جهت

Q داری درز مساعد در نظر گرفته می شد و در سیستم Q پارامترهای تنش و آب زیرزمینی (ضریب کاهش آب درز، و SRF ضریب کاهش تنش) مساعد لحاظ می شدند در آن زمانها استفاده از طبقه بندی RMR تعدیل یافته (با اصلاحات گفته شده) به خوبی جواب می داد چون بیشتر مسائل پیش رو در سنگهای با کیفیت متوسط (70>RMR<08) بود. به هر حال به زودی روشن شد که استفاده از سیستم RMR در سنگهای نعیلی ضعیف با مشکل روبروست. رابطه بین RMR و ثوابت هو ک و بروان در سنگهای ضعیف و شدیداً شکسته با مشکل روبرو شد. بر این اساس هو ک وهمکاران 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 محت تا

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 هو ک و براون به صورت خلاصـه در جدول 1 ارائه شده است.

	$s \not c = s \not c + s_{ci} \sqrt{m_b s \not c} + s$	ســـــــــــــــــــــــــــــــــــــ	جدول (1). تغییرات ویرایش های مختلف معیار گسیختگی				
	$t = (\cot f \not c - \cos f \not c -)ms_{i}/8$	شديداً قفل و بست			هوک و براون		
	$f_{a} = \arctan\left(1/\sqrt{4h\cos^2 q - 1}\right)$	دار بدون ریزدانه با					
[5]	$q = (90 + \arctan(1/\sqrt{h^3 - 1}))/3$	بـحـث در مـورد		ارائـــــه	٦	معادلا	پوشش
هو ٿ [5]	$h = 1 + (16(ms_{f} + ss_{ci}))/(3m_{b}^{2}s_{ci}))$	گسیختگی ناهمسان		دهندگان			
		و اســتخراج رابطه		هـوک و	$s \not = s \not + s_{ci} \sqrt{m_b s_{ci} \not + s_{ci}}$		معیار اولیـه برای _
		پوش موركولمب		براون [1]	$\mathbf{s}_{t} = \frac{\mathbf{s}_{ci}}{2} \left(\mathbf{m} - \sqrt{\mathbf{m}^{2} + 4\mathbf{s}} \right)$		توده های ســـنگی
		به وسیله بری			$t = As_{ci}((s \not c - s_{ci})/s_{ci})^B$		درز دار ســخت با
هـوک و	توده سنگ به هم خورده:	ماذند معيار هوك				ö	قفل و بســـت ز یاد
براون [6]	$\frac{m_{b}}{m_{b}} = \exp \frac{aRMR - 100}{\dot{O}}$	(1983) با اضـــا فه			$s \not c = s \not c + \dot{c}^{(s \not c - s \not c)}_{c}$, <u>ö</u>	بدون ريزدانه.
	m _i e 14 ø	نمودن رابطه بين m _b			e e / ·	∥s ¢ _{øø}	معیار مور به صورت
	توده سنگ به هم نخورده با فقل و بست: : 100 BND-	و s و RMR که در		C	$\mathbf{t} = (\mathbf{s} \mathbf{f} - \mathbf{s} \mathbf{f}) \sqrt{\ \mathbf{s} \mathbf{f} - \mathbf{f}\ } $		مجموعه ای از زوج
	$\frac{m_b}{m_i} = \exp \frac{2\pi M R - 1000}{28} \div \frac{28}{0}$	آن اثـر آب			$ \int_{\mathbf{s}}^{\mathbf{g}} \mathbf{s} \mathbf{g} = \mathbf{m}_{\mathbf{b}} \mathbf{s}_{\mathrm{ci}} / 2 (\mathbf{s}_{\mathbf{f}} \mathbf{e} - \mathbf{s}_{\mathbf{f}}) $		∟ (s¢,t)
	aRMR - 100 ö	زیرزمینی و جهـت					انطباق آماری بـه
	$\dot{s} = exp \dot{c} - \frac{\dot{s}}{2}$	داری درز مســاعد					روش بالـمـر
	$E_{m} = 10^{\frac{\alpha}{c} \frac{MR-100}{9} \frac{\alpha}{\omega}}$	در نظر گرفته شــده					استخراج شد.
	m و m به ترتيب ثوابت سـنگ بکر	اســـت (يعنى براى)				\$,S ∯,S يتنشهای
	و توده سنگ اند.	شرايط آب					اصــلى مۇثر بزرگتر
		زيرزميني نمره 10					و کوچکتر در
		و برای جهت داری					شرايط گسيختگي
		درز نمره 0 لحاظ					_ن Sمقاومت
		شـــده اســــت).					فش_اری ت_ک
		همچنين پـارامترهـا					محوري سنگ بکر
		برای شـرایط توده					، Sميقياو ميت
		ســـنـگ بـه هـم					کششہ تو دہ سنگ
		نخورده و به هم					m _b و ټوابت سنگ
		خورده بدست آمده					اند.
		است.					ich this S & t
		بايد توجه داشــت					
		کـه نـمـره آب					متوتر مصودی و
		زیرزمینی در نسخه					برس الله
		نهایی RMR، 15 در					مارامل م
		نظر گرفتـه شـــده					معيار او بيه براي
		است.					

عمومی ترین شــکل این معیار که هم حالت اصــلی و هم حالت اصلاح شده را در برمی گیرد توسط رابطهٔ زیر بیان میشود [2]:

$$\mathbf{s}_{1} = \mathbf{s}_{3} + \mathbf{s}_{ci} \stackrel{\acute{e}}{\underset{e}{\overset{a}{e}}} \frac{\mathbf{s}_{3}}{\mathbf{s}_{ci}} + s \stackrel{\acute{u}^{a}}{\underset{\acute{u}}{\overset{a}{u}}}$$
(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]:

$$s_1 = s_3 + \sqrt{ms_3 s_c + s s_c^2}$$
 (2)

در روابط فوق S₁ و S₃ به ترتیب تنشهای اصلی بزرگتر و کوچکتر در شرایط گسیختگی اند، _c Sمقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر است، و M و S و B پارامترهای هوک و بروان توده سنگ اند و از روابط زیر بدست می آیند [2]:

$$m = m_i \exp \frac{aGSI - 100}{c} \ddot{c} \frac{\dot{c}}{28 - 14D} \dot{c} \dot{c}$$
(3)

$$s = \exp \frac{aGSI - 100}{c} \frac{\ddot{o}}{9 - 3D} \frac{\ddot{o}}{\dot{\sigma}}$$
(4)

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \underbrace{\overset{\text{GSI}}{e}}_{e} - e^{-\frac{20}{3}} \underbrace{\overset{\text{O}}{\circ}}_{\varphi}$$
(5)

در روابط فوق m_i ثابت مصالح برای سنگ بکر ؛ و GSI شاخص مقاومت زمین شناسی است و از مطالعات ژئو تکنیکی 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 5/0 برای توده سنگ عالی با GSI=10 تا 6/0 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 [25و 20و22و 10و [11و 12و01و 17و 13و 19و 19و 22و 24] و روشهای ارائه شده بر مبنای معیار هوک و براون تعمیم یافته [21و 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

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 B در دو معیار خواهد بود. همانطور که گفته شید B در

معیار هوک و براون اولیه 0/5 و در معیار هوک و براون تعمیم یافته به GSI سنگ بستگی دارد. در این را ستا در این مقاله برای مقایسه اثر این پارامتر از دو مدل تحلیلی یکی براساس هوک و براون اولیه (زارعی فرد و فهیمی فر [23و249 [17]) و دیگری بر اساس هوک و براون اصلاح شده (لی و پیتروژاک [22]) استفاده خواهد شد.

2- شرايط تونل

فرض می شود، که رفتار توده سنگ الاستوپلاستیک ترد باشد. این مدل رفتاری در حالت خاص به مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل کامل قابل ساده سازی و تبدیل است. این مدل رفتاری با یک معیار گسیختگی انتقالی F و یک تابع پتانسیل پلاستیک G مشخص می شود. یکی از مهمترین جنبه-های 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 می شوند.

شــكل 1 این مدل رفتاری را نشــان مید هد. اگر اختلاف پارامترهای پیک و ماندگار صفر با شد رفتار الا ستوپلا ستیک کامل خوهد بود.



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



شکل(2). شرایط هندسی مسأله مورد بررسی

شرايط مدل مورد بررسي در شكل 2 نشان داده شده است. یک تونل دایره ای با شعاع r_i در توده سنگ الاستوپلاستیک همگن و همسان حفاری شده است. رفتار توده سنگ الاستويلاستيك ترد (شكل 12) در نظر گرفته مي شود. بعد از گسیختگی مقاومت به صورت تدریجی و خطی به مقاومت ماندگار افت می کند. این رفتار نرم شونده در حالت خاص به رفتار الاستويلاستيك كامل و الاستويلاستيك ترد قابل تبديل است. توده سنگ در حالت اوليه الاستيك با مدول الاستيسيته E و ضریب پواسون n است. تونل عمیق است و تحت شرایط هیدروستاتیک با تنشهای اولیه یکنواخت p0 قرار دارد. بعد از حفاري پوشش در سطح داخلي توده سنگ نصب می شود. فشار یکنواخت داخلی p_i به سطح داخلی تونل در اثر نصب پوشش اعمال می شود. در این حالت، شرایط متقارن محوري بر رفتار مصالح، هند سه و بار گذاري حاكم است. بعد از حفاری و نصب پوشش در توده سنگ باز توزیع تنش رخ می دهد و در اثر آن توده سنگ دچار همگرایی می شود. اگر تنشهای توده سنگ به سطح گسیختگی آن بر سند یک ناحیه پلا ستیک پیرامون تونل شکل می گیرد. دو ناحیه شامل ناحیه

الاســـتیک خارجی و ناحیه پلاســتیک داخلی با شــعاع R_p پیرامون تونل شکل می گیرد.

3- حل مسأله

با در نظر گرفتن شرایط متقارن محوری نشان داده شده در شکل 2، تنش حاصله در فاصله شعاعی ۲ با تنش شعاعی (۲، و تنش مماسی (۲_۹ ۲ مشخص می شود. تنشهای (۲، ۶ و و تنش مماسی (۲) ۲ مشخص می شود. تنشهای (۲، ۶ و ر(۲) ۲ به ترتیب تنشهای اصلی کوچکتر (۲) ۶ و بزرگتر (۲) ۲ خواهند بود. تغییرمکان نقاط نیز با تغییر مکان شعاعی (۲) ۵ خواهند بود. تغییرمکان نقاط نیز با تغییر مکان شعاعی (۲) ۵ خواهند می شود. باید توجه داشت که در تونلهای بلند (۲) ۵ مشخص می شود. باید توجه داشت که در تونلهای بلند شرایط کرنش صفحه ای حاکم است و در این حالت تنش خارج از صفحه (۲) ۲ تنش اصلی میانی (۲) ۲ خواهد بود.

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

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

u_{r(r)} در شرایط متقارن محوری رابطه تغییر مکان شعاعی e_{q(r)} در در شعاع ۲ با کرنش های شعاعی e_{r(r)} و مماسی e_{q(r)} در این شعاع به صورت زیر است[26]:

$$\mathbf{e}_{\mathbf{q}} = \frac{\mathbf{u}_{\mathbf{r}}}{\mathbf{r}}, \quad \mathbf{e}_{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{d}\mathbf{u}_{\mathbf{r}}}{\mathbf{d}\mathbf{r}} \tag{7}$$

در هر دو ناحیه آسیب دیده و آسیب ندیده توده سنگ، رابطه بین کرنش القایی الاستیک °P_r و °P_q و تنشهای القایی

نهایی s _r و s _{و s} و تنش هیدروستاتیک اولیه p₀ را می توان به صورت زیر نوشت [26]:

$$\mathbf{e}_{r}^{e} = \frac{1+n}{E} [(1-n)(\mathbf{s}_{r} - \mathbf{p}_{0}) - n(\mathbf{s}_{q} - \mathbf{p}_{0})]$$
(8)

$$\mathbf{e}_{q}^{e} = \frac{1+n}{E} [(1-n)(\mathbf{s}_{q} - \mathbf{p}_{0}) + n(\mathbf{s}_{r} - \mathbf{p}_{0})]$$
(9)

مدول توده سنگ را می توان با استفاده از معادله ساده سازی شده یا معادله تعمیم یافته هو ک و دیدریکس [27] بر آورد نمود:

$$E_{0} = E_{i} \mathop{\mathbf{g}}\limits_{\mathbf{c}}^{\mathbf{c}} 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{(60 + 15D - GSI)/11}} \mathop{\ddot{o}}\limits_{\dot{\mathbf{c}}}^{\mathbf{c}}$$
(10)

$$E_{0} = 100000 \frac{a}{c} \frac{1 - D/2}{e^{(75 + 25D - GSI)/11}} \ddot{b}$$
(11)

$$n_0 = -0.002GS1 + n_i + 0.2$$
 (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 ₁ S و _S به ترتیب تنشهای مماسی _S و شعاعی _۲ S خواهند بود و در نتیجه روابط (1) و (2) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\mathbf{s}_{q} = \mathbf{s}_{r} + \mathbf{s}_{ci} \frac{\partial \mathbf{a} \mathbf{n} \mathbf{s}_{r}}{\mathbf{c} \mathbf{s}_{ci}} + \mathbf{s}_{\phi}^{\mathbf{o}^{*}}$$
(13)

$$\mathbf{s}_{q} = \mathbf{s}_{r} + \sqrt{\mathbf{m}\mathbf{s}_{r}\mathbf{s}_{c} + \mathbf{s}\mathbf{s}_{c}^{2}}$$
(14)

در ناحیه پلاستیک کرنشهای شعاعی و مماسی کل 🗧 و جرا مي توان به اجزاي الاستيك و پلاستيك تقسيم نمود: $\mathbf{e}_{r} = \mathbf{e}_{r}^{e} + \mathbf{e}_{r}^{p}, \quad \mathbf{e}_{a} = \mathbf{e}_{a}^{e} + \mathbf{e}_{a}^{p}$ (15)با فرض کوچک بودن کرنشهای الاستیک در قیاس با کرنشهای پلاستیک و با فرض اینکه قاون جریان غیر همبسته برقرار است رابطه بین کرنشهای شعاعی و مماسی به صورت زیر خواهد بود [17]: $d \mathbf{e}_{r}^{p} + K_{y} d \mathbf{e}_{q}^{p} = 0$ (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 استفاده می شود: $GSI_r = GSI e^{-0.0134GSI}$ (17)سرانجام با حل معادلات تعادل و سازگاري تغيير شكلها با در نظر گرفتن مدل رفتاری معرفی شده و شرایط مرزی در شعاع تونل و دوردست تونل تحلیل می شود. معادلات حاکم در ناحيه الاستيك به صورت تحليلي و در ناحيه پلاستيك به صورت عددی (تفاضل محدود) حل میشوند. در شعاع یلاستیک نیز باید شرایط مرزی تعادل و سازگاری تغییر شکل ها اعمال شود.

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 $p_i = 0$ MPa در عمق 600 متری (جایی که بدون پوشش $p_i = 0$ MPa وارد می شود) حفاری می شود.

پارامترهای سنگ بکر به صورت زیر است:

, $m_{\rm i}$ = 10 , $E_{\rm i}$ = 60 GPa , ${\rm S}_{\rm ci}$ = 100 MPa $v_{\rm i}$ = 0.2

زاویه اتساع توده سنگ نیز 10 درجه است.

در شکل 5 تأثیر مقدار GSI بر توضیع 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 الاستیکک می ماند در این حالت تحلیل تونل با استفاده از روابط لامه 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) رد نتایج اختلاف ایجاد می شود. اختلاف ایجاد شده در نتایج با کاهش GSI توده سنگ افزایش می یابد.



www.SID.ir

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



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 اثر گذاری است و تأثیر آن بر نتایج به خصوص با کاهش IGS افزوده می شود. می توان نتیجه گرفت که تا حد امکان باید از معیار گسیختگی هو ک 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.

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

5- **نتیجه گیری**

شدہ

معیار های گسیختگی هو ک و براون اولیه و تعمیم یافته از پر کاربردترین معیار گسیختگی مورد استفاده در تحلیل و طراحی تونلها هستند. در واقع معیار گسیختگی هو ک 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 هو ک 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

www.SID.ir

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 elastobrittle-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 elasticstrain 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. Underg. 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 elasticbrittle-plastic rock mass considering the damaged zone, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume .(5)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 .(5)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 اندر کنش پوشش - توده سنگ در تونلهای حفاری شده در توده سنگ هو ک و براون با در نظر گرفتن ناحیه آسیب دیده، نشریه مهندسی عمران امیر کبیر،

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