



تحلیل اندرکنش پوشش-توده سنگ در تونل‌های حفاری شده در توده سنگ هوک و براون با در نظر گرفتن ناحیه آسیب‌دیده

محمد رضا زارعی فرد^{۱*}، احمد فهیمی فر^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی استهبان، استهبان، ایران.

۲- دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴-۰۱-۱۳۹۷

بازنگری: ۲۸-۰۳-۱۳۹۷

پذیرش: ۲۸-۰۳-۱۳۹۷

ارائه آنلاین: ۲۹-۰۳-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

تونل

اندرکنش پوشش-توده سنگ

توده سنگ آسیب‌دیده

تنش‌ها و تغییر شکل‌ها

خلاصه: در حال حاضر تونل‌ها با دو روش مکانیزه و سنتی حفاری می‌شوند. در روش حفاری سنتی به دلیل عملیات انفجار کنترل نشده توده سنگ ممکن است دچار آسیب شود. بنابراین یک ناحیه آسیب‌دیده یا به هم خورده در توده سنگ اطراف تونل شکل می‌گیرد. گسترش ناحیه آسیب‌دیده محدود است و تمام توده سنگ آسیب نمی‌بیند. در این مقاله یک مدل تحلیلی بسته برای تحلیل تونل‌های دایره‌ای حفاری شده در توده سنگ الاستوپلاستیک ترد با معیار گسیختگی هوک و براون ارائه شده است. در مدل ارائه شده شرایط متقارن محوری فرض شده است و بنابراین ناحیه آسیب‌دیده استوانه‌ای شکل خواهد بود. در این حالت ضریب به هم خوردگی تنها برای ناحیه آسیب‌دیده اعمال می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شدت آسیب‌دیدگی (کاهش کیفیت حفاری) بار وارده به پوشش و همگرایی توده سنگ افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده با روش مرسوم تحلیل تونل‌ها که آسیب‌دیدگی به کل توده سنگ اعمال می‌شود، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که در حالات خاص بدون آسیب‌دیدگی و آسیب‌دیدگی با شعاع بی‌نهایت نتایج دو روش مرسوم و ارائه شده هم‌خوانی داشتند. با توجه به نتایج به دست آمده توصیه می‌شود که کیفیت حفاری بهبود یابد تا بتوان از مقاومت توده سنگ به بهترین شکل ممکن استفاده نمود. به هر حال در صورت رخ دادن آسیب‌دیدگی باید از روش تحلیل صحیح با انتخاب مقادیر مناسب برای شدت آسیب‌دیدگی (شعاع آسیب‌دیدگی و مقدار آسیب‌دیدگی در هر شعاع) استفاده نمود.

شده است [۸-۱].

۱- مقدمه

اگر حفاری بدون کیفیت انجام شود و ناحیه آسیب‌دیده ایجاد شود، باعث افزایش هزینه پوشش می‌شود، و حفاری و ساخت تونل را دچار مشکل می‌کند. باید توجه داشت که بعد از حفاری در اثر باز توزیع تنش یک ناحیه پلاستیک پیرامون تونل شکل می‌گیرد که با ناحیه آسیب‌دیده متفاوت است. خارج از ناحیه پلاستیک توده سنگ رفتار الاستیک دارد. در واقع هر دو نواحی آسیب‌دیده و آسیب ندیده می‌توانند رفتار الاستوپلاستیک داشته باشند (توده‌های سنگ آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده هر کدام می‌توانند در اثر باز توزیع تنش گسیخته (پلاستیک) شوند یا نشوند). در ناحیه آسیب‌دیده خصوصیات مقاومتی و سختی توده سنگ کاهش می‌یابد. بنابراین میزان آسیب‌دیدگی توده سنگ به شدت بر عملکرد تونل اثر می‌گذارد.

در حال حاضر تونل در سنگ با دو روش سنتی (با استفاده از روش چال‌وانفجار و ماشین‌آلات سنتی حفاری) و مکانیزه (با استفاده از ماشین‌آلات پیشرفته حفاری مثل TBM و کله‌گاوی) حفاری می‌شوند. در هر یک از روش‌ها، در اثر حفاری، توده سنگ تا حدی آسیب می‌بیند. به هر حال، کیفیت حفاری در روش مکانیزه بالاتر است. و در روش سنتی، در اثر انفجار بدون کیفیت، به توده سنگ آسیب وارد می‌شود. ناحیه آسیب‌دیده ناحیه‌ای است پیرامون تونل که در اثر حفاری نامناسب کیفیت توده سنگ شامل خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری در آن کاهش یافته است. اهمیت این آسیب‌دیدگی بر عملکرد تونل به وسیله محققین مختلف گزارش

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zareefard@aut.ac.ir



پیچیدگی های مسأله تحلیل نمود. تاکنون روش های عددی پیوسته و ناپیوسته برای تحلیل تونل ها با در نظر گرفتن ناحیه آسیب دیده ارائه شده است [۱۱-۱۵]. به هر حال روش های عددی نمی توانند به روشنی تاثیر پارامترهای اصلی هندسی، رفتاری و بارگذاری دخیل در مسأله را نشان دهند. بنابراین روش های نظری به شناخت جنبه های اصلی تحلیل کمک می کنند. به علاوه روش های تحلیلی دقیق و بسته برای صحت سنجی روش های عددی و نرم افزارهای کامپیوتری قابل استفاده هستند. از سوی دیگر برای طرح اولیه تونل ها همیشه استفاده از روش های ساده نظری ترجیح داده می شود. به هر حال روش های نظری با این محدودیت روبرو هستند که نیاز به فرضیات ساده کننده زیادی دارند. با این وجود مزایای روش های نظری و به خصوص روش های تحلیل بسته و دقیق بسیار بالا است. روش های نظری مربوط به تحلیل تونل دایره ای در توده سنگ الاستوپلاستیک تحت بارگذاری هیدروستاتیک با مدل های رفتاری مختلف ارائه شده اند، که با کمک آن ها می توان تونل را تحلیل نمود، منحنی های روش کنترل همگرایی آنرا را ترسیم نمود و در نهایت آنرا طراحی نمود [۲۷-۱۶]. روش های نظری را می توان به دو گروه روش های تحلیلی بسته (دقیق) و روش های نیمه تحلیلی غیربسته طبقه بندی نمود. در روش های تحلیلی فرضیات ساده کننده بیشتری استفاده می شوند. مثلاً از مدل های رفتاری ساده تر استفاده می شود [۲۳-۲۰]. از سوی دیگر در روش های نیمه تحلیلی از مدل های رفتاری پیچیده تری معمولاً استفاده می شود [۲۶-۲۴ و ۱۶ و ۲۱].

برای یک تحلیل دقیق تونل، باید باید شرایط واقعی توده سنگ لحاظ شود. یعنی این ناحیه آسیب دیده با ابعاد مشخص نیز در نظر گرفته شود. تاکنون اثر ناحیه آسیب دیده ناشی از حفاری بدون کیفیت در سازه های مختلف سنگی شامل پی سدها، تونل ها و مدفن زباله های اتمی بررسی شده است. در این ارتباط روش های تحلیل محدودی برای تحلیل الاستوپلاستیک تونل ها با در نظر گرفتن ناحیه آسیب دیده ارائه شده است. عموماً اثر ناحیه آسیب دیده در توده سنگ با یک ضریب به هم خوردگی D لحاظ می شود. خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل پذیری توده سنگ به این پارامتر بستگی دارند. این ضریب اولین بار به وسیله هوک و همکاران [۲۸] معرفی شد و به طور مرسوم در روش های نظری به سراسر توده سنگ پیرامونی اعمال می شود. بر این اساس مقاومت توده سنگ و پایداری تونل دست پایین در نظر گرفته

گسترده ناحیه آسیب دیده و میزان آسیب دیدگی در این ناحیه به روش حفاری بستگی دارد. محققین مختلفی میزان گستردگی ناحیه آسیب دیده و میزان کاهش خصوصیات مذکور را بررسی کرده اند [۹ و ۱۰].

یکی از مهم ترین دلایل بررسی ناحیه آسیب دیده در پیرامون تونل ها مسأله پایداری است که بر عملکرد تونل و طراحی آن اثر می گذارد. گستردگی ناحیه آسیب دیده و مقاومت و سختی آن پارامترهای کلیدی در این قضیه هستند. بنابراین تا حد امکان باید با بهبود کیفیت حفاری از آثار آن کاست. به هر حال در صورت رخ دادن آسیب دیدگی باید اثر آن را در تحلیل پایداری تونل در نظر گرفت. در حال حاضر یکی از مهم ترین روش های تحلیل پایداری تونل ها روش کنترل همگرایی (convergence-confinement Method) است. مبنای این روش این است، که پایداری تونل از طریق کنترل تغییر مکان توده سنگ با نصب سیستم نگهدار در مجاورت جبهه کار تونل تأمین شود. روش کنترل همگرایی از سه مؤلفه اصلی تشکیل شده است: نیم رخ تغییر شکل طولی، منحنی پاسخ زمین و منحنی مشخصه پوشش. نیم رخ تغییر شکل طولی، تغییر مکان شعاعی توده سنگ بدون پوشش را در امتداد طولی نسبت به جبهه کار نشان می دهد. منحنی مشخصه پوشش، افزایش فشار پوشش را با افزایش تغییر مکان شعاعی آن نشان می دهد. و در نهایت منحنی پاسخ زمین، روند افزایش تغییر مکان شعاعی توده سنگ را با کاهش فشار داخلی تونل نشان می دهد. منحنی پاسخ زمین نقش اصلی را در تعیین موقعیت نصب پوشش و درجه سختی آن دارا است. در منحنی پاسخ زمین، یک فشار داخلی ظاهری برای در نظر گرفتن محصورشدگی حاصل از جبهه کار اعمال می شود. با استفاده هم زمان این سه منحنی می توان شرایط سه بعدی اندرکنش پوشش - توده سنگ را به شیوه ای کاربردی و مؤثر به یک مسأله دوبعدی تبدیل نمود. از بین سه منحنی تعریف شده در روش کنترل همگرایی، منحنی پاسخ زمین از اهمیت بیشتری برخوردار است. در استخراج این منحنی می توان از روش های تحلیلی و عددی استفاده نمود [۲۷-۱۱].

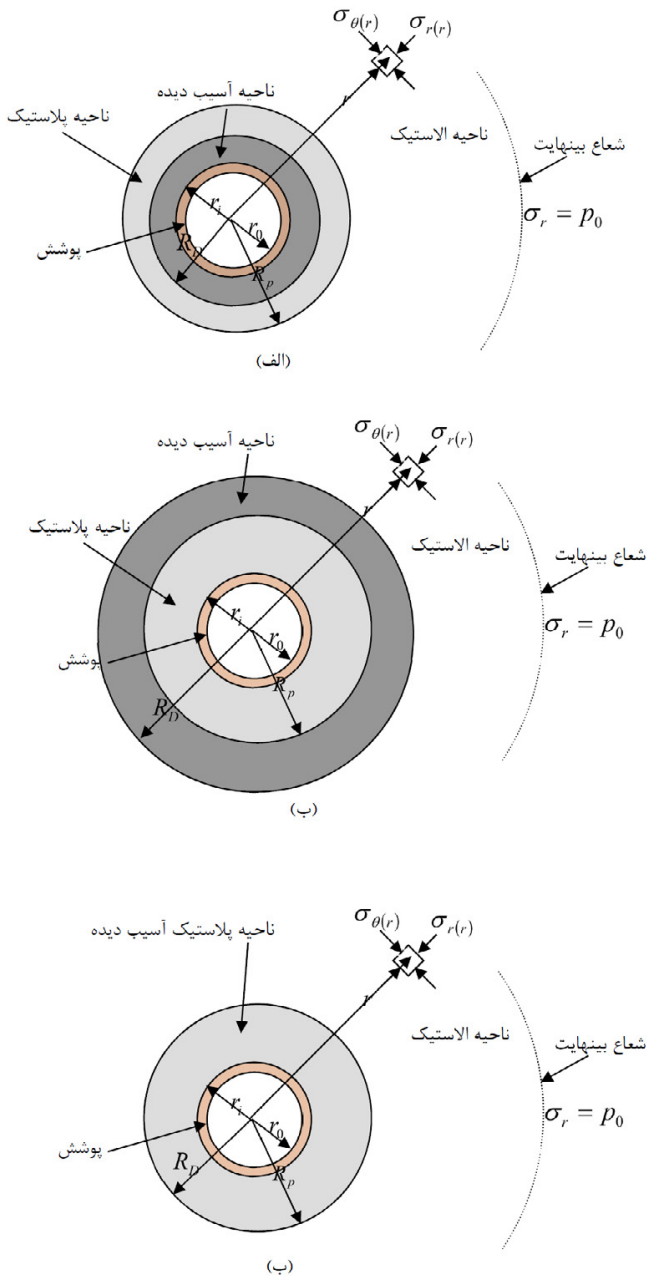
برای در نظر گرفتن کلیه شرایط دخیل در مسأله اندرکنش پوشش - توده سنگ باید از روش های عددی استفاده نمود و هیچ روش تحلیلی و نظری وجود ندارد که بتواند تمام پیچیدگی های مسأله را در نظر بگیرد. با پیشرفت برنامه های کامپیوتری می توان تونل ها را با تمام

می‌شود و این تحلیل اقتصادی نیست و بهتر است که ضریب به هم خوردگی D به ناحیه آسیب‌دیده با ابعاد موجود اعمال شود. از بین روش‌های نظری موجود [۲۷-۱۶]، در مقاله ارائه‌شده توسط زارعی فرد و فهیمی فر [۱۹]، اثر ناحیه آسیب‌دیده با ابعاد محدود در نظر گرفته شده‌است. البته در روش آن‌ها اندرکنش پوشش-توده‌سنگ لحاظ نشده‌است و اثر پوشش تونل به صورت یک فشار داخلی یکنواخت در سطح داخلی تونل اعمال شده‌است. برای این منظور نیاز به یک روش تحلیلی با در نظر گرفتن اندرکنش پوشش-توده‌سنگ (آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده) احساس می‌شود.

در این مقاله رفتار تونل‌ها در شرایط آسیب‌دیدگی مختلف بررسی خواهد شد. در این ارتباط یک روش تحلیلی دقیق (exact analytical method) اندرکنش پوشش-توده‌سنگ برای تونل‌های دایره‌ای عمیق با ناحیه آسیب‌دیده استوانه‌ای ارائه می‌شود. تونل دایره و تحت شرایط هیدروستاتیک قرار دارد و بنابراین شرایط متقارن محوری برقرار است. در روش تحلیل ارائه شده، ناحیه آسیب‌دیده با ابعاد محدود در نظر گرفته شده‌است. رفتار توده‌سنگ (چه آسیب‌دیده و چه آسیب‌ندیده) الاستوپلاستیک ترد با معیار گسیختگی هوک و براون در نظر گرفته می‌شود. نسبت به روش زارعی فرد و فهیمی فر [۱۹]، پوشش الاستیک نیز در تحلیل در نظر گرفته شده‌است. بنابراین با این روش می‌توان اندرکنش پوشش-توده‌سنگ را در تحلیل اعمال نمود، علاوه بر منحنی پاسخ زمین منحنی مشخصه پوشش را نیز ترسیم نمود و تونل را طراحی نمود.

۲- روش تحلیل

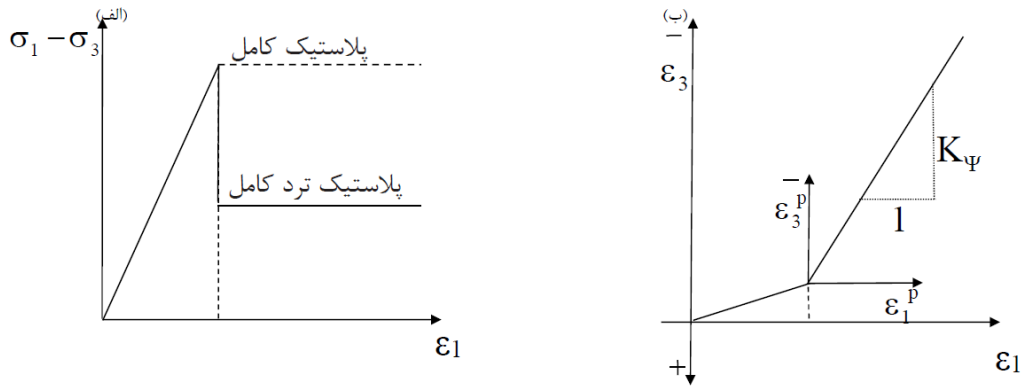
شرایط مدل مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده‌است. یک تونل دایره‌ای با شعاع r_i در توده‌سنگ الاستوپلاستیک همگن و هم‌سان حفاری شده‌است. رفتار توده‌سنگ (چه آسیب‌دیده و چه آسیب‌ندیده) الاستوپلاستیک ترد در نظر گرفته می‌شود. بعد از گسیختگی مقاومت به صورت ناگهانی به مقاومت ماندگار افت می‌کند. این رفتار نرم‌شونده در حالت خاص به رفتار الاستوپلاستیک کامل قابل تبدیل است (اگر خصوصیات مقاومتی ماندگار و پیک برابر باشند (شکل ۲)). یعنی چه ناحیه آسیب‌دیده و چه ناحیه آسیب‌ندیده توده‌سنگ می‌توانند الاستیک یا پلاستیک باشند. در ناحیه آسیب‌دیده، با توجه به مقدار D در این ناحیه، پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری کاهش



شکل ۱. حالت‌های مختلف تحلیل تونل (الف) حالت ۱: $R_p = R_D$. حالت ۲: $R_p > R_D$ (ب) حالت ۳: $R_p < R_D$ (الف)

Fig. 1. Different cases of tunnel analysis: a. case 1. b. case 2. c. case 3

می‌یابند. توده‌سنگ آسیب‌ندیده در حالت اولیه الاستیک با مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون است. در اثر حفاری نامطلوب یک ناحیه آسیب‌دیده استوانه‌ای با شعاع داخلی r_i و خارجی R_D



شکل ۲. مدل رفتاری مورد استفاده برای توده سنگ آسیب دیده و آسیب ندیده (الف) رفتار تنش- کرنش (ب) قانون جریان
Fig. 2. Behavior model used in this study for both the damaged and undamaged rock masses: (a) Stress-strain relationship. (b) Flow rule

می شود و رفتار پلاستیک دارد).

حالت ۳ (آسیب دیدگی متوسط): شعاع ناحیه آسیب دیده برابر با شعاع ناحیه پلاستیک است (تمام ناحیه آسیب دیده و بخشی از ناحیه بدون آسیب گسیخته می شوند و رفتار پلاستیک دارند).

شرایط حاکم بر مسأله در حالت های سه گانه متفاوت است و بنابراین در هر یک از حالات روش تحلیل متفاوت خواهد بود. از ابتدا مشخص نیست که آیا تنها بخشی از ناحیه آسیب دیده گسیخته می شود (رفتار پلاستیک دارد) یا تمام آن و یا اینکه بخشی از ناحیه بدون آسیب هم گسیخته می شود. یعنی شعاع پلاستیک R_p از ابتدا مشخص نیست (حالت مورد نظر در مسأله مشخص نیست). بنابراین برای انتخاب روش تحلیل مناسب از روش سعی و خطا استفاده می شود (الگوریتم نشان داده شده در شکل ۳).

با در نظر گرفتن شرایط مقارن محوری نشان داده شده در شکل ۱ (سه حالت مختلف)، تنش حاصل در فاصله شعاعی r با تنش شعاعی $\sigma_{r(r)}$ و تنش مماسی $\sigma_{\theta(r)}$ مشخص می شود. تنش های $\sigma_{r(r)}$ و $\sigma_{\theta(r)}$ به ترتیب تنش های اصلی کوچک تر $\sigma_{3(r)}$ و بزرگ تر $\sigma_{1(r)}$ خواهند بود. تغییر مکان نقاط نیز با تغییر مکان شعاعی $u_{r(r)}$ مشخص می شود. باید توجه داشت که در تونل های بلند شرایط کرنش صفحه ای حاکم است و در این حالت تنش خارج از صفحه $\sigma_{z(r)}$ تنش اصلی میانی $\sigma_{2(r)}$ خواهد بود.

در شرایط مقارن محوری معادله تعادل بین تنش های شعاعی $\sigma_{r(r)}$ و تنش های مماسی $\sigma_{\theta(r)}$ در شعاع r به صورت زیر است [۳۱]:

پیرامون تونل شکل می گیرد. پارامترهای الاستیک این ناحیه E_D و ν اند. تونل عمیق است و تحت شرایط هیدروستاتیک با تنش های اولیه یکنواخت p_0 قرار دارد. بعد از حفاری و همگرایی اولیه u_0 پوشش بتنی الاستیک با شعاع داخلی r_0 در سطح داخلی توده سنگ نصب می شود. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون پوشش به ترتیب E_c و ν_c است. فشار یکنواخت داخلی $\sigma_i = \sigma_{r(r)}$ به سطح داخلی تونل در اثر نصب پوشش اعمال می شود. از تأثیر وزن توده سنگ پلاستیک پیرامون تونل صرف نظر می شود [۳۰]. در این حالت، شرایط مقارن محوری بر رفتار مصالح، هندسه و بارگذاری حاکم 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 تنش های نواحی آسیب دیده یا آسیب ندیده توده سنگ به سطح گسیختگی آن برسند یک ناحیه پلاستیک پیرامون تونل شکل می گیرد. دو ناحیه شامل ناحیه الاستیک خارجی و ناحیه پلاستیک داخلی با شعاع R_p پیرامون تونل شکل می گیرد. بر این اساس با توجه به شعاع نواحی آسیب دیده و پلاستیک سه حالت مختلف ممکن است رخ دهد (شکل ۱).

حالت ۱ (آسیب دیدگی محدود): شعاع ناحیه آسیب دیده کوچک تر از شعاع ناحیه پلاستیک است (تنها بخشی از ناحیه آسیب دیده گسیخته می شود و رفتار پلاستیک دارد).

حالت ۲ (آسیب دیدگی گسترده): شعاع ناحیه آسیب دیده بزرگ تر از شعاع ناحیه پلاستیک است (تنها تمام ناحیه آسیب دیده گسیخته

$$\varepsilon_{\theta}^e = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)(\sigma_{\theta} - p_0) + \nu(\sigma_r - p_0)] \quad (4)$$

که در آن E و ν به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون توده سنگ هستند. در این ارتباط پارامترهای توده سنگ آسیب دیده با پیشوند D بیان می شوند. یعنی پارامترهای الاستیک توده سنگ آسیب دیده E_D و ν_D خواهد بود. در حالت پلاستیک نیز معیار گسیختگی غیر خطی هوک و براون استفاده می شود [۲۸]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{m\sigma_3\sigma_c + s\sigma_c^2} \quad (5)$$

که در آن σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش های اصلی بزرگ تر و کوچک تر در شرایط گسیختگی اند، σ_c مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر است، و m و s پارامترهای هوک و براون توده سنگ هستند. در شرایط متقارن محوری تنش های اصلی σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش های مماسی σ_{θ} و شعاعی σ_r خواهند بود و در نتیجه رابطه ۵ به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \sqrt{m\sigma_r\sigma_c + s\sigma_c^2} \quad (6)$$

برای توده سنگ اولیه بدون آسیب رابطه ۶ را می توان به صورت زیر نوشت (معیار گسیختگی پیک):

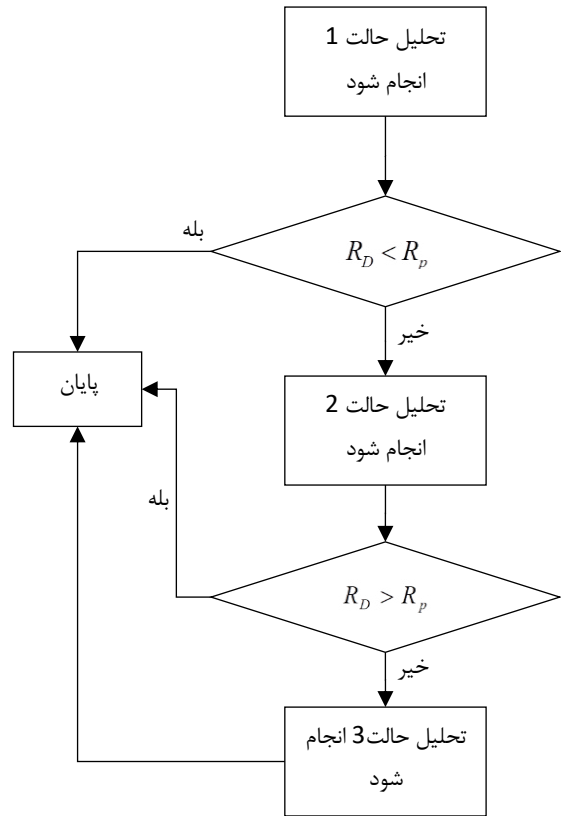
$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \sqrt{m_i\sigma_r\sigma_c + s_i\sigma_c^2} \quad (7)$$

که در آن m_i و s_i ثوابت هوک و براون برای توده سنگ بدون آسیب اولیه اند. و در ناحیه پلاستیک $r_i \leq r \leq R_p$ (شکل ۱) رابطه ۶ به صورت زیر ساده می شود.

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \sqrt{m_r\sigma_r\sigma_c + s_r\sigma_c^2} \quad (8)$$

که در آن m_r و s_r ثوابت هوک و براون برای توده سنگ پلاستیک اند.

باید توجه داشت که پارامترهای توده سنگ آسیب دیده متفاوت از سنگ بدون آسیب است و پارامترهای این ناحیه با پیشوند D نمایش داده می شوند. یعنی توده سنگ آسیب دیده دارای مقاومت فشاری



شکل ۳. نمایش شماتیکی روش تحلیل
Fig. 3. schematic representation of the proposed method

$$\frac{d\sigma_{r(r)}}{dr} - \frac{\sigma_{\theta(r)} - \sigma_{r(r)}}{r} = 0 \quad (1)$$

در شرایط متقارن محوری رابطه تغییرمکان شعاعی $u_{r(r)}$ در شعاع r با کرنش های شعاعی $\varepsilon_{r(r)}$ و مماسی $\varepsilon_{\theta(r)}$ در این شعاع به صورت زیر است [۳۱]:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} \quad (2)$$

در هر دو ناحیه آسیب دیده و آسیب نندیده توده سنگ، رابطه بین کرنش القایی الاستیک ε_r^e و ε_{θ}^e و تنش های القایی نهایی σ_r و σ_{θ} و تنش هیدروستاتیک اولیه p_0 را می توان به صورت زیر نوشت [۳۱]:

$$\varepsilon_r^e = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)(\sigma_r - p_0) - \nu(\sigma_{\theta} - p_0)] \quad (3)$$

۳- تحلیل ناحیه الاستیک

در خارج از ناحیه پلاستیک توده سنگ الاستیک می ماند (شکل ۱). روش تحلیل برای حالت های ۱ و ۳ و حالت ۲ یکسان نیست.

۳-۱- حالت های ۱ و ۳

یک ناحیه الاستیک با شعاع داخلی R_p با پارامترهای بدون تغییر (بدون آسیب) در خارج از ناحیه پلاستیک قرار دارد (شکل ۱-الف و ب). تنش ها و تغییر مکان ها در این ناحیه را می توان بر اساس قانون استوانه های جدار ضخیم در الاستیسیته به دست آورد [۳۱]:

$$\sigma_{r(r)} = p_0 - \left(p_0 - \sigma_{r(R_p)} \right) \frac{R_p^2}{r^2} \quad (13)$$

$$\sigma_{\theta(r)} = p_0 + \left(p_0 - \sigma_{r(R_p)} \right) \frac{R_p^2}{r^2} \quad (14)$$

$$u_{r(r)} = \frac{1+\nu}{E} \left(p_0 - \sigma_{r(R_p)} \right) \frac{R_p^2}{r} \quad (15)$$

۳-۲- حالت ۲

ناحیه الاستیک از یک ناحیه آسیب ندیده خارجی با پارامترهای بدون تغییر و یک ناحیه آسیب دیده تشکیل شده است. همانطور که در شکل ۱-ب نشان داده شده است، نواحی الاستیک آسیب ندیده و آسیب دیده در شعاع R_D در تماس اند و با تنش شعاعی $\sigma_{r(R_D)}$ با هم اندرکنش دارند. تنش ها و تغییر مکان ها در نواحی بدون آسیب و آسیب دیده را می توان با کمک قانون استوانه های جدار ضخیم در الاستیسیته به دست آورد [۳۱]: در ناحیه بدون آسیب:

$$\sigma_{r(r)} = p_0 - \left(p_0 - \sigma_{r(R_D)} \right) \frac{R_D^2}{r^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{\theta(r)} = p_0 + \left(p_0 - \sigma_{r(R_D)} \right) \frac{R_D^2}{r^2} \quad (17)$$

$$u_{r(r)} = \frac{1+\nu}{E} \left(p_0 - \sigma_{r(R_D)} \right) \frac{R_D^2}{r} \quad (18)$$

در ناحیه آسیب دیده:

تک محوری σ_{rD} و پارامترهای معیار گسیختگی m_{rD} و s_{rD} و پارامترهای معیار گسیختگی ماندگار m_{rD} و s_{rD} است.

در ناحیه پلاستیک کرنش های شعاعی و مماسی کل ϵ_r و ϵ_θ را می توان به اجزای الاستیک و پلاستیک تقسیم نمود:

$$\epsilon_r = \epsilon_r^e + \epsilon_r^p, \quad \epsilon_\theta = \epsilon_\theta^e + \epsilon_\theta^p \quad (9)$$

با فرض کوچک بودن کرنش های الاستیک در قیاس با کرنش های پلاستیک و با فرض اینکه قاون جریان غیر همبسته برقرار است رابطه بین کرنش های شعاعی و مماسی به صورت زیر خواهد بود [۲۳]:

$$\epsilon_r^p + K_\psi \epsilon_\theta^p = 0 \quad (10)$$

که در آن $K_\psi = (1 + \sin \Psi) / (1 - \sin \Psi)$ است و Ψ زاویه اتساع توده سنگ است (در ناحیه آسیب دیده با Ψ_D نمایش داده می شود).

با ترکیب روابط ۲ و ۱۰ معادله سازگاری تغییر مکان ها به صورت زیر استخراج می شود [۲۳]:

$$\frac{du_r}{dr} + K_\psi \frac{u_r}{r} = f(r) \quad (11)$$

که در آن:

$$f(r) = B_1 + B_2 \sigma_{r(r)} + B_3 \sigma_{\theta(r)} \quad (12)$$

$$B_1 = - \frac{(1+\nu)(1-2\nu)(1+K_\psi)}{E} p_0$$

$$B_2 = \frac{(1+\nu)(1-\nu-K_\psi\nu)}{E}$$

$$B_3 = \frac{(1+\nu)(K_\psi - \nu - K_\psi\nu)}{E}$$

باید توجه داشت که پارامترهای توده سنگ آسیب دیده متفاوت هستند. و بنابراین در توده سنگ آسیب دیده از ضرایب زیر استفاده می شود:

$$B_{1D} = - \frac{(1+\nu_D)(1-2\nu_D)(1+K_{\psi D})}{E_D} p_0$$

$$B_{2D} = \frac{(1+\nu_D)(1-\nu_D-K_{\psi D}\nu_D)}{E_D}$$

$$B_{3D} = \frac{(1+\nu_D)(K_{\psi D} - \nu_D - K_{\psi D}\nu_D)}{E_D}$$

اندرکنش دارند. با استفاده از رابطه ۲۴ تنش مماسی $\sigma_{\theta(R_p)}$ در شعاع R_p به دست می‌آید:

$$\sigma_{\theta(R_p)} = 2p_0 - \sigma_{r(R_p)} \quad (24)$$

در شعاع R_p ، تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر باید در معیار گسیختگی توده سنگ آسیب‌نندیده صدق کنند. بنابراین با جایگزینی تنش‌های $\sigma_{\theta(R_p)}$ و $\sigma_{r(R_p)}$ در رابطه ۷ و حل معادله حاصل تنش شعاعی مرزی $\sigma_{r(R_p)}$ به دست می‌آید:

$$\sigma_{r(R_p)} = p_0 + \frac{1}{8} \sigma_c \left(m_i - \sqrt{\frac{16m_i p_0}{\sigma_c} + m_i^2 + 16s_i} \right) \quad (25)$$

بعد از محاسبه مقدار $\sigma_{r(R_p)}$ از رابطه ۲۵ مقدار متناظر $\sigma_{\theta(R_p)}$ از روابط ۲۴ یا ۷ به دست می‌آید. سپس تغییر مکان شعاعی $u_{r(R_p)}$ از رابطه (۱۵) به دست می‌آید. با جایگزینی رابطه ۸ در معادله ۱ و حل معادله دیفرانسیل حاصل با در نظر گرفتن شرایط مرزی $\sigma_{r(r)} = \sigma_i$ در $r = r_i$ ، رابطه بسته ذیل برای تنش شعاعی $\sigma_{r(r)}$ در محدوده آسیب‌دیده ناحیه پلاستیک به دست می‌آید ($r \leq R_D$) :

$$\sigma_{r(r)} = \sigma_i + M_D \log \left(\frac{r}{r_i} \right) + N_D \log^2 \left(\frac{r}{r_i} \right) \quad (26)$$

که در آن:

$$\left(\begin{aligned} M_D &= \sqrt{m_{rD} \sigma_i \sigma_{cD} + s_r \sigma_{cD}^2} \\ N_D &= \frac{m_{rD} \sigma_{cD}}{4} \end{aligned} \right)$$

به طور مشابه، در ناحیه آسیب‌دیده رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{r(r)} = \sigma_{r(R_D)} + M \log \left(\frac{r}{R_D} \right) + N \log^2 \left(\frac{r}{R_D} \right) \quad (27)$$

$$\sigma_{r(r)} = \left(\sigma_{r(R_D)} - \sigma_{r(R_p)} \right) \frac{R_p^2}{R_D^2 - R_p^2} \left(1 - \frac{R_D^2}{r^2} \right) + \sigma_{r(R_D)} \quad (19)$$

$$\sigma_{\theta(r)} = \left(\sigma_{r(R_D)} - \sigma_{r(R_p)} \right) \frac{R_p^2}{R_D^2 - R_p^2} \left(1 + \frac{R_D^2}{r^2} \right) + \sigma_{r(R_D)} \quad (20)$$

$$u_{r(r)} = \frac{1 + \nu_D}{E_D} \left(\sigma_{r(R_D)} - \sigma_{r(R_p)} \right) \frac{R_p^2}{R_D^2 - R_p^2} \left((1 - 2\nu_D) + \frac{R_D^2}{r} \right) + \frac{1 + \nu_D}{E_D} \left(\sigma_{r(R_D)} - p_0 \right) (1 - 2\nu_D) r \quad (21)$$

تنش شعاعی مرزی $\sigma_{r(R_D)}$ بین این نواحی الاستیک با استفاده از معادلات تعادل $\sigma_{r(R_D)}^{undamaged} = \sigma_{r(R_D)}^{damaged}$ و سازگاری $u_{r(R_D)}^{damaged} = u_{r(R_D)}^{undamaged}$ در مرز بین آن‌ها (شعاع R_D) به دست می‌آید.

$$\sigma_{r(R_D)} = \alpha_1 \left(\sigma_{r(R_D)} - p_0 \right) + p_0 \quad (22)$$

$$\alpha_1 = \frac{2R_p^2 E (1 - \nu_D^2)}{\left(\begin{aligned} &E_D (1 + \nu) (R_D^2 - R_p^2) - \\ &E (1 + \nu_D) \\ &((2\nu_D - 1) R_D^2 - R_p^2) \end{aligned} \right)} \quad (23)$$

۴- تحلیل ناحیه پلاستیک

۴-۱- تنش‌ها

۴-۱-۱- حالت ۱

ناحیه پلاستیک از یک ناحیه خارجی بدون آسیب و یک ناحیه آسیب‌دیده تشکیل یافته است (شکل ۱-الف). در این حالت نواحی آسیب‌دیده و آسیب‌نندیده در شعاع R_D با یکدیگر تماس دارند. در این شعاع، این دو ناحیه با تنش شعاعی مرزی $\sigma_{r(R_D)}$ با یکدیگر

که در آن:

$$\sigma_{r(R_p)} = p_0 + \frac{1}{2(\alpha+1)^2} \sigma_{cD}$$

$$\left(m_i - \sqrt{\frac{4(\alpha+1)^2 m_{iD} p_0}{\sigma_{cD}} + m_{iD}^2 + 4(\alpha+1)^2 s_{iD}} \right) \quad (30)$$

$$\left(\begin{array}{l} M = \sqrt{m_r \sigma_{r(R_D)} \sigma_c + s_r \sigma_c^2} \\ N = \frac{m_r \sigma_c}{4} \end{array} \right)$$

در رابطه ۲۷ تنش شعاعی $\sigma_{r(R_D)}$ از رابطه ۲۶ به دست می آید. مقدار تنش مماسی σ_θ متناظر نیز از معیار گسیختگی یعنی رابطه ۸ به دست می آید. شعاع ناحیه پلاستیک R_p از پیوستگی تنش شعاعی در محل تماس نواحی الاستیک و پلاستیک به دست می آید. تنش شعاعی در شعاع پلاستیک (که از رابطه ۲۷ به دست می آید) باید با مقدار متناظر آن در رابطه ۲۷ برابر باشد. دلیل آن این است که تنش شعاعی در کل نواحی باید پیوسته باشد (شرط تعادل). بنابراین رابطه زیر برای شعاع ناحیه پلاستیک R_p به دست می آید:

$$R_p = R_D \exp \left(\frac{-M + \sqrt{\left(\sigma_{r(R_D)} - \sigma_{r(R_p)} \right)^2}}{2N} \right) \quad (28)$$

۲-۱-۴-۲ حالت ۲

نواحی الاستیک و پلاستیک آسیب دیده در شعاع R_p با تنش شعاعی $\sigma_{r(R_p)}$ با هم اندرکنش دارند. با جایگذاری رابطه (۲۲) از رابطه ۲۰ تنش مماسی $\sigma_{\theta(R_p)}$ در شعاع R_p به دست می آید:

$$\sigma_{\theta(R_p)} = (1 + \alpha) p_0 - \alpha \sigma_{r(R_p)} \quad (29)$$

$$\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 - \alpha_1 \alpha_2$$

که در آن α_1 از رابطه ۲۳ و α_2 از رابطه زیر به دست می آید:

$$\alpha_2 = \frac{R_D^2 + R_p^2}{R_D^2 - R_p^2}$$

تنش های $\sigma_{r(R_p)}$ و $\sigma_{\theta(R_p)}$ باید در معیار گسیختگی سنگ آسیب دیده صدق کنند. بنابراین با جایگزینی این تنش ها در رابطه ۷ و حل معادله حاصل، تنش شعاعی مرزی $\sigma_{r(R_p)}$ به دست می آید:

بعد از محاسبه مقدار $\sigma_{r(R_p)}$ از رابطه ۳۰، مقدار $\sigma_{\theta(R_p)}$ متناظر از روابط ۲۹ یا ۷ به دست می آید. سپس تغییر مکان شعاعی $u_{r(R_p)}$ از رابطه ۲۱ به دست می آید.

با جایگذاری رابطه ۸ در معادله ۱ برای توده سنگ پلاستیک و اعمال شرایط مرزی $\sigma_{r(r_i)} = \sigma_i$ در $r = r_i$ ، تنش شعاعی $\sigma_{r(r)}$ در ناحیه پلاستیک آسیب دیده از رابطه ۲۶ به دست می آید. مقدار متناظر تنش مماسی $\sigma_{\theta(r)}$ نیز از رابطه معیار گسیختگی ۸ به دست می آید.

تنش شعاعی در شعاع پلاستیک (به دست آمده از رابطه ۲۶) باید با مقدار متناظر آن از رابطه ۳۰ برابر باشد. دلیل آن این است که تنش شعاعی باید در کل مدل پیوسته باشد (شرط تعادل). بنابراین معادله زیر برای شعاع ناحیه پلاستیک R_p به دست می آید:

$$R_p = r_i \exp \left(\frac{-M_D + \sqrt{\left(\sigma_i - \sigma_{r(R_p)} \right)^2}}{2N_D} \right) \quad (31)$$

چون در حالت ۲ تنش شعاعی در شعاع پلاستیک (به دست آمده از رابطه ۳۰) تابعی از شعاع پلاستیک R_p است، باید مسأله را با تکرار حل نمود. ابتدا یک مقدار اولیه برای R_p فرض می شود، سپس مقادیر تنش شعاعی و شعاع پلاستیک متناوباً از روابط ۳۰ و ۳۱ محاسبه می شود تا نتایج به همگرایی لازم برسند.

۲-۱-۴-۳ حالت ۳

در این حالت، شعاع پلاستیک از ابتدا معین است و برابر است با شعاع ناحیه آسیب دیده (یعنی $R_D = R_p$). نواحی الاستیک و پلاستیک آسیب دیده در شعاع $R_D = R_p$ با هم اندرکنش دارند. در

۴-۲-۲- حالت‌های ۲ و ۳

با حل معادله دیفرانسیل ۱۱ برای ناحیه پلاستیک ($r \leq R_p$)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$u_r = \frac{1}{r^{K_{\psi_D}}} (H(r) - H(R_p)) + u_{r(R_p)} \left(\frac{R_p}{r} \right)^{K_{\psi_D}} \quad (35)$$

$$H(r) = r^{(K_{\psi_D}+1)} \frac{\left((K_{\psi_D}+1)^2 \left(B_{4D} + B_{5D} \log \left(\frac{r}{r_i} \right) + B_{6D} \log^2 \left(\frac{r}{r_i} \right) \right) - (K_{\psi_D}+1) \left(2B_{6D} \log \left(\frac{r}{r_i} \right) + B_{5D} \right) + 2B_{6D} \right)}{(K_{\psi_D}+1)^3} \quad (36)$$

$$B_{4D} = B_{1D} + B_{2D}\sigma_i + B_{3D}(\sigma_i + M_D)$$

$$B_{5D} = B_{2D}M_D + B_{3D}(2N_D + M_D)$$

$$B_{6D} = (B_{2D} + B_{3D})N_D$$

۵- تحلیل پوشش

معادله دیفرانسیل تعادل ۱ و معادلات کرنش-تغییر مکان ۲ در پوشش نیز برقرار هستند. رابطه هوک بین کرنش‌های ε_r و ε_θ تنش‌های القایی σ_r و σ_θ در پوشش در شرایط کرنش صفحه‌ای به صورت زیر است [۳۱]:

$$\sigma_r = \frac{E_c}{(1+\nu_c)(1-2\nu_c)} \left[(1-\nu_c)\varepsilon_r + \nu_c\varepsilon_\theta \right] \quad (37)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E_c}{(1+\nu_c)(1-2\nu_c)} \left[(1-\nu_c)\varepsilon_\theta + \nu_c\varepsilon_r \right]$$

که در آن E_c و ν_c به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون پوشش هستند.

با جایگذاری روابط هوک ۳۷ در معادل تعادل ۱ و اعمال روابط کرنش-تغییر مکان ۲، معادله دیفرانسیل زیر برای تغییر مکان شعاعی در شعاع r از پوشش به دست می‌آید:

$$-\frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} + \frac{d^2 u_r}{dr^2} = 0 \quad (38)$$

که در آن u_r تغییر مکان شعاعی در فاصله شعاعی r است.

با حل معادله دیفرانسیل ۳۸ رابطه زیر برای تغییر مکان شعاعی به دست می‌آید:

$$u_{r(r)} = C_1 r + \frac{1}{r} C_2 \quad (39)$$

این شعاع تنش شعاعی مرزی $\sigma_{r(R_p)}$ اعمال می‌شود. با جایگزینی رابطه ۸ در معادله ۱ برای توده سنگ پلاستیک و اعمال شرایط مرزی $\sigma_{r(r_i)} = \sigma_i$ در $r = r_i$ ، تنش شعاعی ناحیه پلاستیک $\sigma_{r(r)}$ آسیب‌دیده از رابطه ۲۶ به دست می‌آید. مقدار متناظر تنش مماسی $\sigma_{\theta(r_i)}$ نیز از معیار گسیختگی (رابطه ۸) به دست می‌آید. در شعاع پلاستیک با به دست آوردن مقدار $\sigma_{r(R_p)}$ از رابطه ۲۶، مقدار متناظر $u_{r(R_p)}$ از رابطه ۸ به دست می‌آید. سپس تغییر مکان شعاعی $u_{r(R_p)}$ از رابطه ۱۵ به دست می‌آید.

۴-۲- تغییر مکان‌ها

۴-۲-۱- حالت ۱

با حل معادله دیفرانسیل ۱۱ با اعمال شرایط مرزی در شعاع پلاستیک ($u_r = u_{r(R_p)}$)، رابطه بسته زیر برای تغییر مکان شعاعی $u_{r(r)}$ در ناحیه آسیب‌دیده پلاستیک ($R_D \leq r \leq R_p$) به دست می‌آید:

$$u_r = \frac{1}{r^{K_{\psi}}} (G(r) - G(R_p)) + u_{r(R_p)} \left(\frac{R_p}{r} \right)^{K_{\psi}} \quad (32)$$

که در آن:

$$G(r) = r^{(K_{\psi}+1)} \frac{\left((K_{\psi}+1)^2 \left(B_4 + B_5 \log \left(\frac{r}{R_D} \right) + B_6 \log^2 \left(\frac{r}{R_D} \right) \right) - (K_{\psi}+1) \left(2B_6 \log \left(\frac{r}{R_D} \right) + B_5 \right) + 2B_6 \right)}{(K_{\psi}+1)^3}$$

$$B_4 = B_1 + B_2\sigma_{r(R_D)} + B_3(\sigma_{r(R_D)} + M)$$

$$B_5 = B_2M + B_3(2N + M)$$

$$B_6 = (B_2 + B_3)N$$

از سوی دیگر با حل معادله دیفرانسیل ۱۱ برای قسمت آسیب‌دیده $r \leq R_D$ رابطه زیر به دست می‌آید:

$$u_r = \frac{1}{r^{K_{\psi_D}}} (F(r) - F(R_D)) + u_{r(R_D)} \left(\frac{R_D}{r} \right)^{K_{\psi_D}} \quad (33)$$

$$F(r) = r^{(K_{\psi_D}+1)} \frac{\left((K_{\psi_D}+1)^2 \left(B_{4D} + B_{5D} \log \left(\frac{r}{r_i} \right) + B_{6D} \log^2 \left(\frac{r}{r_i} \right) \right) - (K_{\psi_D}+1) \left(2B_{6D} \log \left(\frac{r}{r_i} \right) + B_{5D} \right) + 2B_{6D} \right)}{(K_{\psi_D}+1)^3} \quad (34)$$

$$B_{4D} = B_{1D} + B_{2D}\sigma_i + B_{3D}(\sigma_i + M_D)$$

$$B_{5D} = B_{2D}M_D + B_{3D}(2N_D + M_D)$$

$$B_{6D} = (B_{2D} + B_{3D})N_D$$

$$\sigma_i^{rock\ mass} = \sigma_i^{lining}$$

پوشش بعد از یک تغییر مکان شعاعی اولیه δu_0 نصب می شود. تنش شعاعی در شعاع تونل از شرط سازگاری تغییر مکان ها در این شعاع به دست می آید:

$$u_r^{lining} + \delta u_0 = u_r^{rock} \quad (40)$$

در واقع مقدار δu_0 باید طوری محدود شود، که تنش مماسی در سطح داخلی پوشش $\sigma_{\theta(r)}$ از حد مجاز تجاوز نکند. مقدار δu_0 با انتخاب مقدار مناسب برای فاصله پوشش از سینه کار محدود می شود.

۷- مثال های کاربردی

۷-۱- مثال ۱: بررسی اثر ناحیه آسیب دیده

پارامترهای معیار گسیختگی برای توده سنگ اولیه را می توان با تعیین مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر $\sigma_{cintact}$ ، پارامتر سنگ بکر m_{intact} ، شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) و پارامتر به هم خوردگی (D) به دست آورد [۲۸].

با استفاده از برنامه کامپیوتری RocLab (ارائه شده به وسیله Rocscience [۳۲]) می توان $\sigma_{cintact}$ و m_{intact} را تخمین زد. اینکار با استفاده از داده های آزمایشگاهی یا نمودارهای تجربی انجام می شود. GSI پارامتری است که برای اعمال شرایط برجای توده سنگ استفاده می شود. ضریب به هم خوردگی D نیز برای اعمال آسیب دیدگی ناشی از عملیات حفاری استفاده می شود. این ضریب بین صفر (برای حفاری با کیفیت عالی و کنترل شده) تا یک (برای حفاری بسیار بی کیفیت) تغییر می کند.

در اینجا از روش تحلیل ارائه شده برای بررسی اثر توده سنگ آسیب دیده بر پاسخ تونل استفاده می شود. به علاوه نتایج حاصل از روش ارائه شده با نتایج روش های تحلیلی دیگر و نتایج نرم افزار عددی مقایسه می شود. یک تونل با خصوصیات رفتاری، هندسی و بارگذاری نمادین در نظر گرفته می شود و برای آن تحلیل پارامتری انجام می شود. یک تونل بدون پوشش با شعاع ۱۰ متر در عمق ۱۰۰۰ متری توده سنگ در تنش برجای هیدروستاتیک ۳۰ مگاپاسکال حفاری می شود. نمونه های سنگ بکر این توده سنگ تحت آزمون سه محوری قرار داده می شود و نتایج زیر به دست می آید:

$$\sigma_c = 100 \text{ MPa}, m_{intact} = 20, \nu = 0.2$$

که در آن C_1 و C_2 ثوابت انتگرال گیری اند. این ثوابت از شرایط مرزی به دست می آیند (r_0 و r_i به ترتیب شعاع داخلی و خارجی پوشش اند).

با جایگذاری رابطه ۳۹ در روابط کرنش تغییر مکان ۲، کرنشهای شعاعی $\epsilon_{r(r)}$ و مماسی $\epsilon_{\theta(r)}$ بر حسب ثوابت C_1 و C_2 به دست می آیند. با جایگذاری این کرنش ها در روابط هوک ۳۷، تنش های شعاعی $\sigma_{r(r)}$ و مماسی $\sigma_{\theta(r)}$ بر حسب ثوابت C_1 و C_2 به دست می آیند. با در نظر گرفتن شرط تعادل در مرز خارجی و داخلی پوشش، تنش های شعاعی باید در این مرزها پیوسته باشند. بنابراین شرایط مرزی $\sigma_{r(r_0)} = 0$ و $\sigma_{r(r_i)} = \sigma_i$ باید برقرار باشند. با استفاده از این شرایط مرزی، ثوابت C_1 و C_2 به دست می آیند. در نهایت با جایگزینی ثوابت انتگرال گیری و در رابطه ۳۹ تغییر مکان شعاعی در پوشش به صورت زیر به دست می آید:

$$u_{r(r)} = \frac{1+\nu_c}{E_c}(\sigma_i) \frac{rr_0^2}{r_i^2 - r_0^2} \left((1-2\nu_c) + \frac{r_i^2}{r^2} \right) + \frac{1+\nu_c}{E_c} \sigma_i r (1-2\nu_c) \quad (40)$$

حال با جایگزینی تغییر مکان شعاعی فوق (رابطه ۴۰) در رابطه کرنش-تغییر مکان ۲، کرنش های شعاعی و مماسی به دست می آیند و در نهایت، با جایگزینی کرنش های به دست آمده در رابطه هوک ۳۷ تنش های شعاعی و مماسی در پوشش به دست می آیند:

$$\sigma_{r(r)} = \sigma_i \frac{r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) + \sigma_i \quad (41)$$

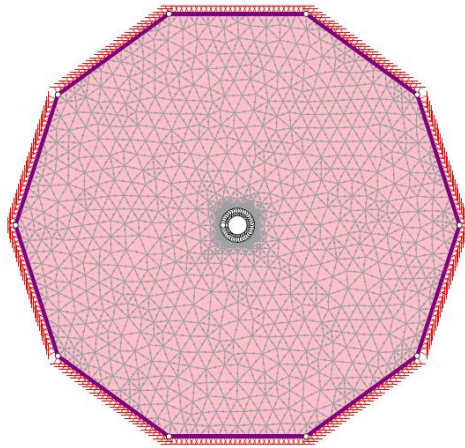
و:

$$\sigma_{\theta(r)} = \sigma_i \frac{r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) + \sigma_i \quad (42)$$

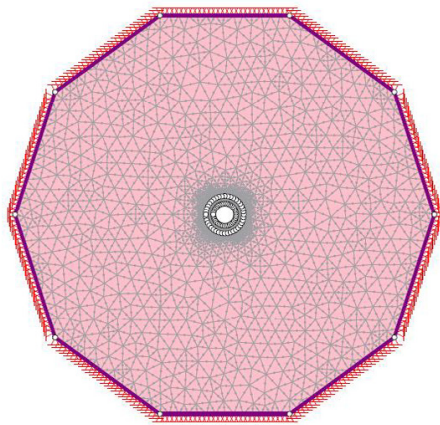
با توجه به رابطه (۴۲)، ماکزیمم تنش مماسی در سطح داخلی پوشش ایجاد می شود.

۶- شرایط مرزی در محل تماس پوشش و توده سنگ

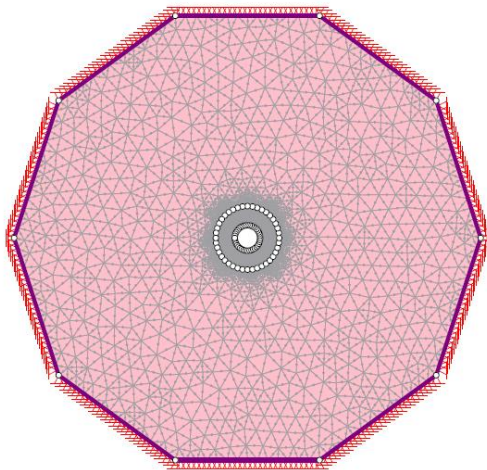
در محل تماس پوشش و توده سنگ باید معادلات تعادل و سازگاری تغییر شکل ها برقرار باشند. بر این اساس با در نظر گرفتن شرط تعادل، تنش های شعاعی باید در شعاع r_i پیوسته باشند یعنی



(الف) $R_D = 12 m$: 4416 المان



(ب) $R_D = 16.63 m$: 5104 المان



(پ) $R_D = 25 m$: 5400 المان

شکل ۴. شرایط هندسی، شرایط مرزی و المان‌بندی مدل مورد بررسی در نرم‌افزار Phase2.

Fig. 4. Geometric, boundary and discretization conditions of the considering model in Phase2 program: a. $R_D = 12 m$ 4416 elements b. $R_D = 16.63 m$ 5104 elements c. $R_D = 25 m$ 5400 elements.

مشاهدات صحرایی مقدار GSI را برابر با ۷۰ می‌دهد. از این پارامترها برای به‌دست آوردن پارامترهای اولیه توده‌سنگ آسیب‌دیده شامل E ، m_i و s_i استفاده می‌شود. برای این منظور $D=0$ در نظر گرفته می‌شود:

$$m_i = 6.85, s_i = 0.036, E = 31.5 \text{ GPa}$$

با فرض اینکه کیفیت حفاری بسیار نامطلوب باشد. برای تخمین این پارامترها در ناحیه آسیب‌دیده، $D=1$ در نظر گرفته می‌شود.

$$m_{iD} = 2.35, s_{iD} = 0.0067, E_D = 15.85 \text{ GPa}$$

فرض می‌شود که در ناحیه آسیب‌دیده پارامترهای σ_c و ν بدون

تغییر و مشابه توده‌سنگ بدون آسیب باقی بمانند.

فرض می‌شود که GSI برای توده‌سنگ پلاستیک ماندگار ۴۰ باشد. بر این اساس پارامترهای مقاومت ماندگار توده‌سنگ به‌دست می‌آید:

$$m_r = 2.35, m_{rD} = 0.5, s_r = 0.0003, s_{rD} = 0.00004$$

توده‌های سنگ آسیب‌دیده و آسیب‌دیده از قانون جریان غیر هم

بسته پیروی می‌کنند و زاویه اتساع آن‌ها برابر است با:

$$\Psi = \Psi_D = 15^\circ$$

تحلیل برای شعاع آسیب‌دیدگی R_D مختلف شامل بدون آسیب،

$R_D = 10.0001 m$ (متناظر با حالتی که شعاع آسیب‌دیدگی به

شعاع تونل میل کند یعنی شرایط بدون آسیب)، $R_D = 12 m$ ،

$R_D = 25 m$ ، $R_D = 16.63 m$ ، و $R_D = 10000 m$ (متناظر با

حالتی که شعاع آسیب‌دیدگی به بی‌نهایت میل کند یعنی اعمال

آسیب‌دیدگی به کل توده‌سنگ) انجام می‌شود.

در اینجا به منظور انجام تحلیل عددی از نرم‌افزار Phase2 V8

[۳۳] استفاده می‌شود. روش حل عددی در این برنامه، روش اجزای

محدود است.

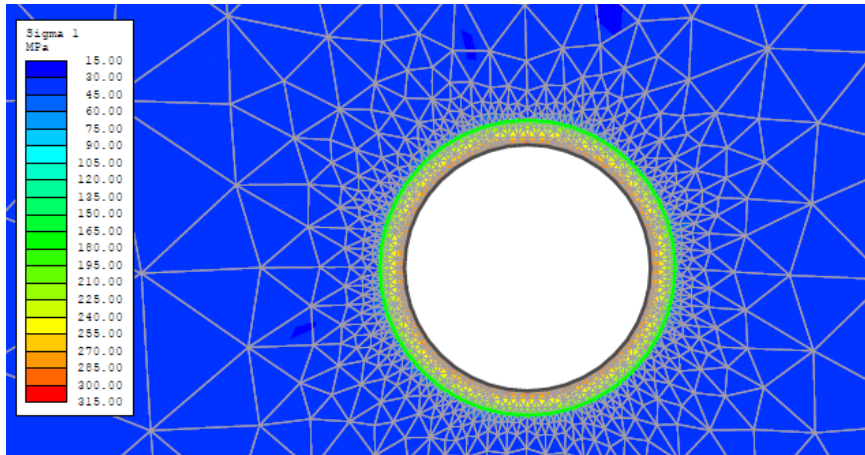
مدل‌سازی به صورت دوبعدی، در حالت کرنش صفحه‌ای در

نرم‌افزار Phase2 انجام می‌شود. برای این مدل‌سازی از المان‌های

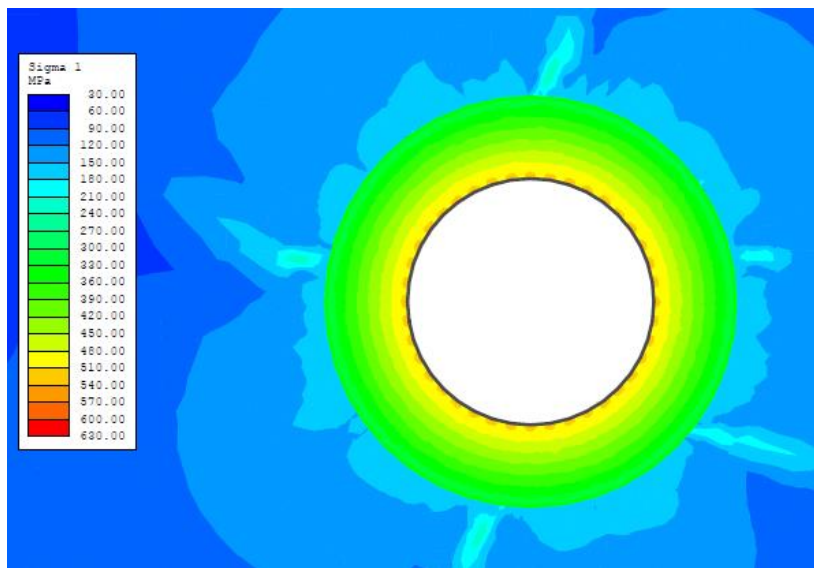
مثلث ۶ گرهی (LST) برای محیط سنگ استفاده شود. برای کاهش

اثر مرزها بر مدل ابعاد مدل ۶ برابر شعاع تونل در نظر گرفته می‌شود

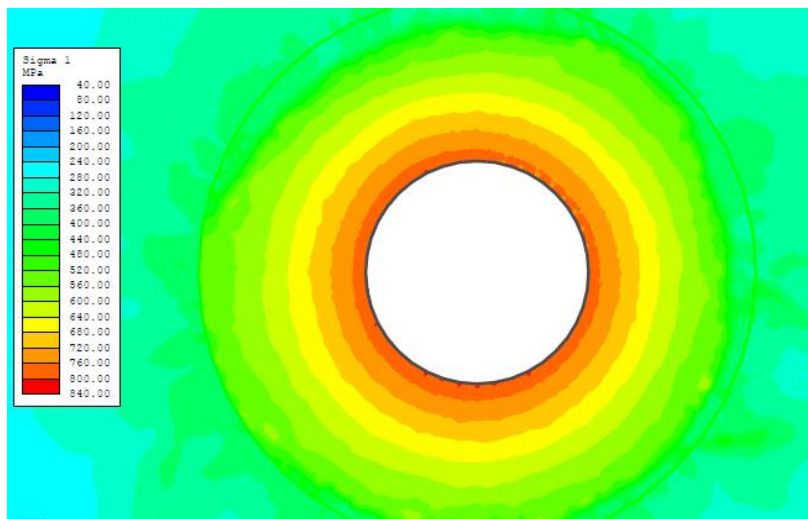
و برای افزایش دقت تحلیل در مجاورت تونل از مش ریزتر استفاده



$R_D = 12 \text{ m}$ (الف)



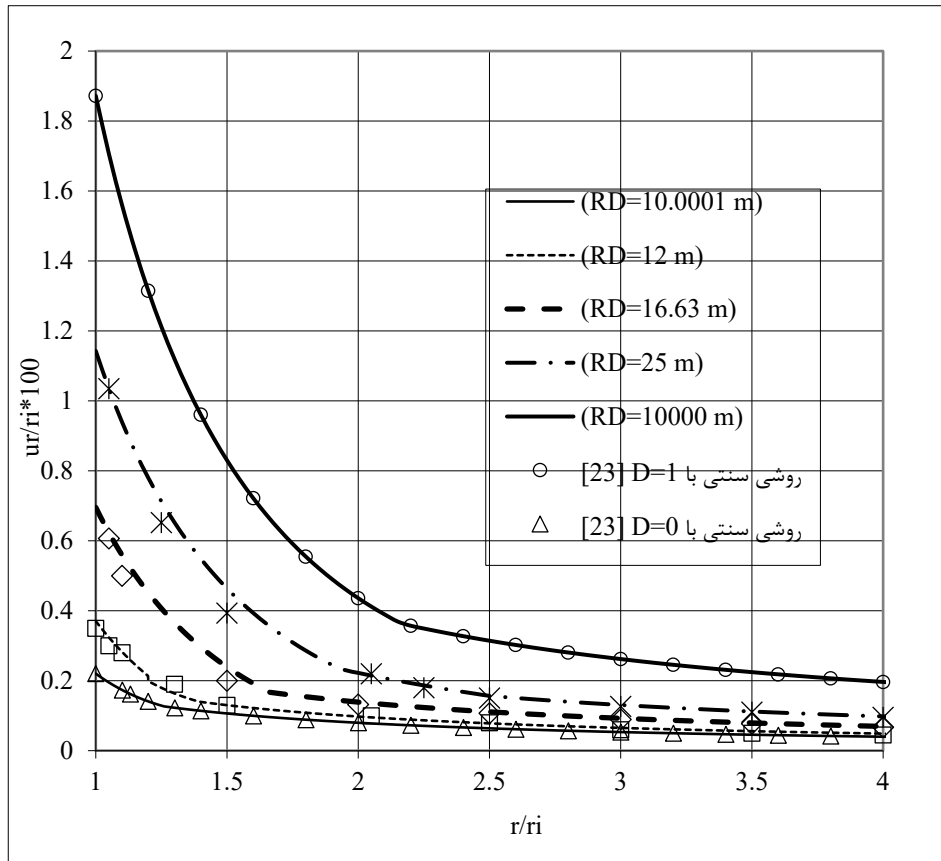
$R_D = 16.63 \text{ m}$ (ب)



$R_D = 25 \text{ m}$ (پ)

شکل ۵. کانتور تنش‌های اصلی بزرگ‌تر پیرامون تونل در مدل نرم‌افزار Phase2.

Fig. 5. Contour of maximum principal stresses around the tunnel in phase2 program: a. $R_D = 12 \text{ m}$ b. $R_D = 16.63 \text{ m}$ c. $R_D = 25 \text{ m}$.



شکل ۶. تغییر مکان بی‌بعد شعاعی در توده‌سنگ پیرامون تونل در مثال ۱

Fig. 6. Dimensionless radial displacement $\frac{u_r}{r_i} [\%]$ in the rock masses around the tunnel of example 1.

هست که به صورت گسترده در تحلیل پایداری تونل‌ها استفاده می‌شود (شکل ۸). در نرم‌افزار Phase2 نیز برای استخراج این منحنی از روش جایگزینی هسته (Core Replacement) [۳۳] استفاده می‌شود. مشاهده می‌شود که انطباق خوبی بین نتایج روش ارائه شده و روش عددی وجود دارد. و بنابراین می‌توان از روش ارائه شده در صحت‌سنجی روش‌های عددی استفاده نمود.

علاوه بر تحلیل‌های فوق، نتایج تحلیل سنتی (روش پارک و کیم [۲۳]) نیز برای دو حالت $D=0$ (شرایط بدون آسیب‌دیدگی) و $D=1$ (اعمال آسیب‌دیدگی به کل توده‌سنگ) برای مقایسه، در این شکل‌ها نمایش داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در $R_D = 10.0001 m$ و $R_D = 12 m$ باید از حالت تحلیل ۱ و در $R_D = 16.63 m$ باید از تحلیل ۳ و در $R_D = 25 m$ و $R_D = 10000 m$ باید از حالت تحلیل ۲ استفاده شود. مشاهده می‌شود، که در محل مرز ناحیه

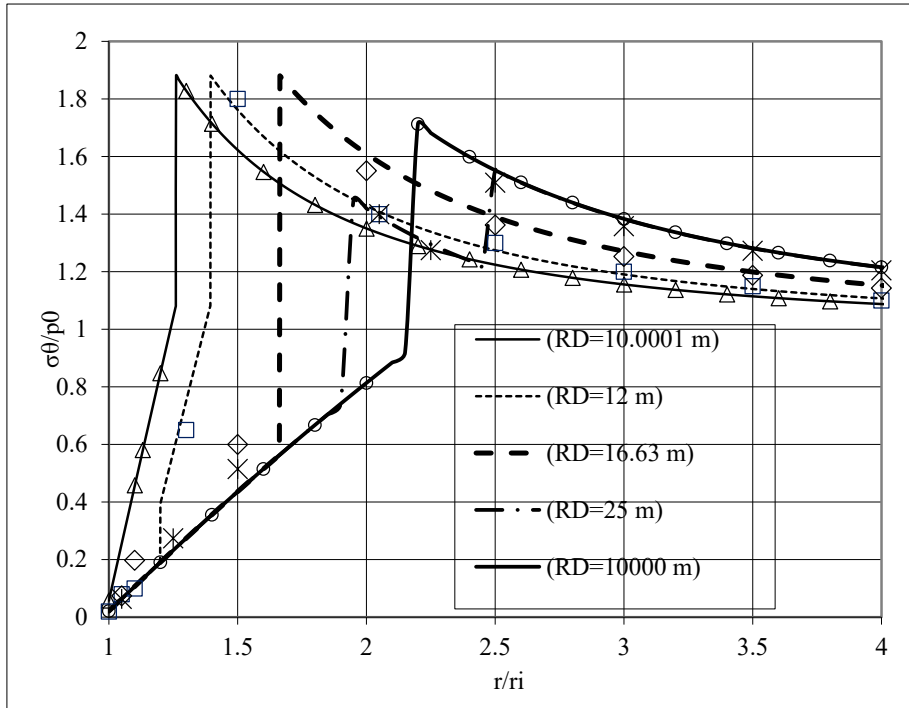
می‌شود. این تحلیل از دو مرحله (stage) تشکیل شده‌است:

الف) شرایط اولیه برجا

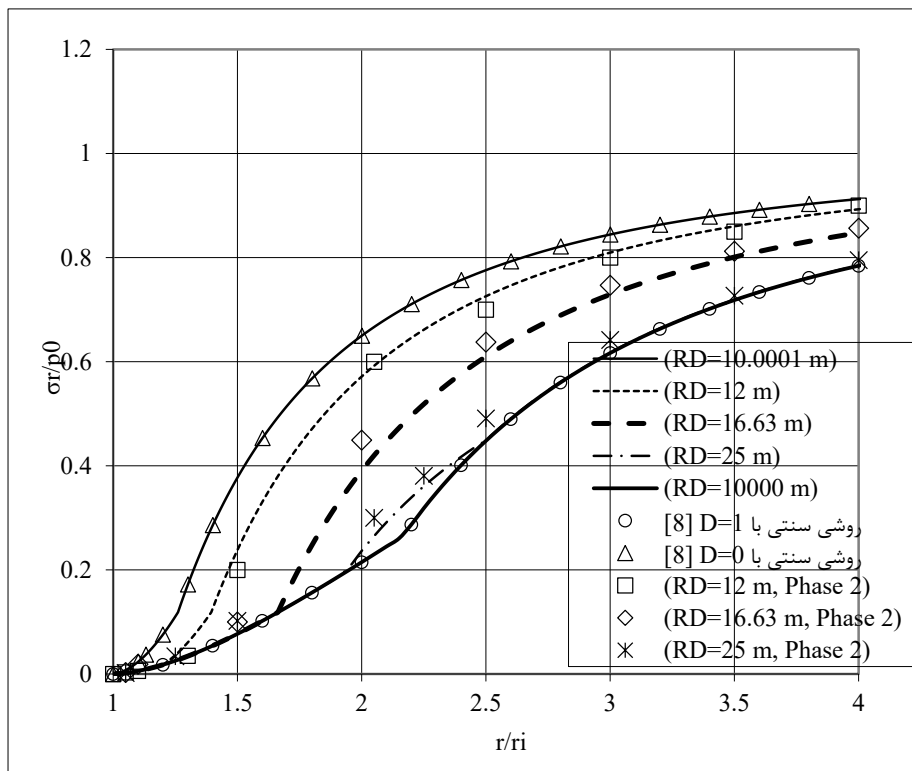
ب) حفاری، اعمال آسیب‌دیدگی و همگرایی تونل

مدل مورد بررسی و کانتور تنش‌های اصلی بزرگ‌تر در پیرامون تونل در سه حالت ذکر شده در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده‌است. برای بررسی اثر گستردگی آسیب‌دیدگی بر تنش‌ها و همگرایی توده‌سنگ، نتایج تحلیل برای شعاع ناحیه آسیب‌دیده مختلف R_D مقایسه می‌شود. تغییر مکان شعاعی بی‌بعد $\frac{u_r}{r_i} [\%]$ و تنش مماسی بی‌بعد $\frac{\sigma_\theta}{\sigma_i}$ و تنش شعاعی بی‌بعد $\frac{\sigma_r}{\sigma_i}$ در توده‌سنگ در اشکال ۶ تا ۷ نمایش داده شده‌است. و منحنی‌های همگرایی زمین در شکل ۸ نشان داده شده‌است

از روش تحلیل ارائه شده می‌توان در استخراج منحنی پاسخ زمین استفاده نمود. این منحنی از مهم‌ترین اجزای روش کنترل همگرایی



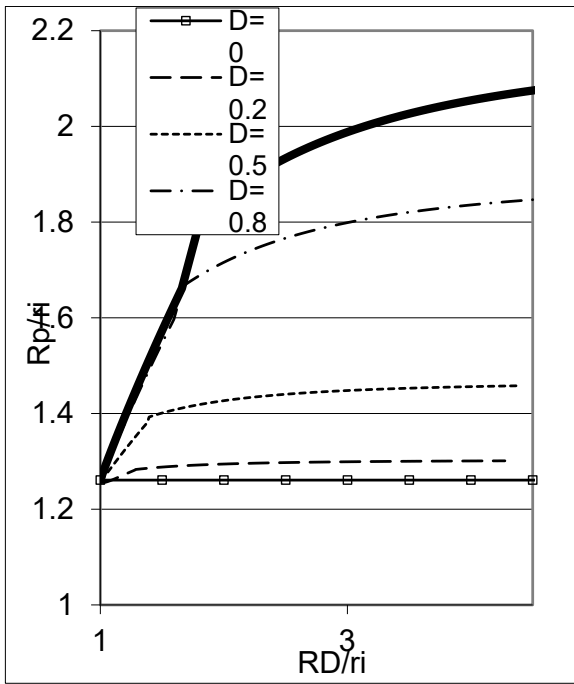
(الف)



(ب)

شکل ۷. تنش‌های بی‌بعد در توده‌سنگ پیرامون تونل مثال ۱. (الف) تنش‌های مماسی $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_i}$ (ب) تنش‌های شعاعی $\frac{\sigma_r}{\sigma_i}$ مثال ۱.

Fig. 7. Dimensionless stresses in the rock masses around the tunnel of example 1: a. tangential stresses $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_i}$ b. radial stresses $\frac{\sigma_r}{\sigma_i}$



شکل ۱۰. تأثیر ضریب به هم خوردگی D و شعاع ناحیه آسیب دیده (R_D) بر شعاع ناحیه پلاستیک (R_p) مثال ۱.

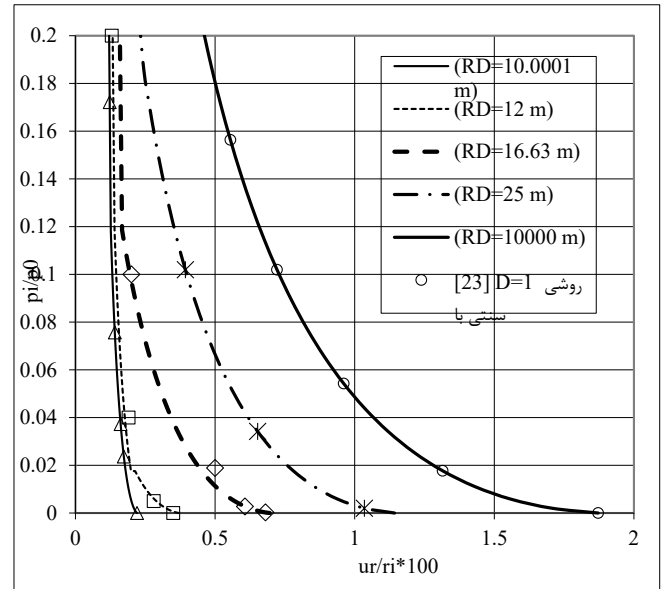
Fig. 10. Influence of disturbance factor (D) and the radius of the damaged zone (R_D) on plastic radius R_p

وجود دارد. یعنی نتایج تحلیل برای حالت $R_D = 10.0001 m$ به روش سنتی برای حالت $D=0$ و برای حالت $R_D = 10000 m$ به روش سنتی برای حالت $D=1$ میل می کنند. نتایج تحلیل در کلیه حالات ($r_i \leq R_D \leq \infty$) بین این دو حالت قرار می گیرند.

در شکل های ۹ تا ۱۱ اثر ضریب دست خوردگی D و شعاع ناحیه آسیب دیده R_D بر شعاع ناحیه پلاستیک R_p ، همگرایی تونل و تنش مماسی در شعاع پلاستیک بررسی شده است. همان طور که مشاهده می شود، که با افزایش ضریب به هم خوردگی و شعاع ناحیه پلاستیک اثر آسیب دیدگی بر تحلیل بیشتر می شود.

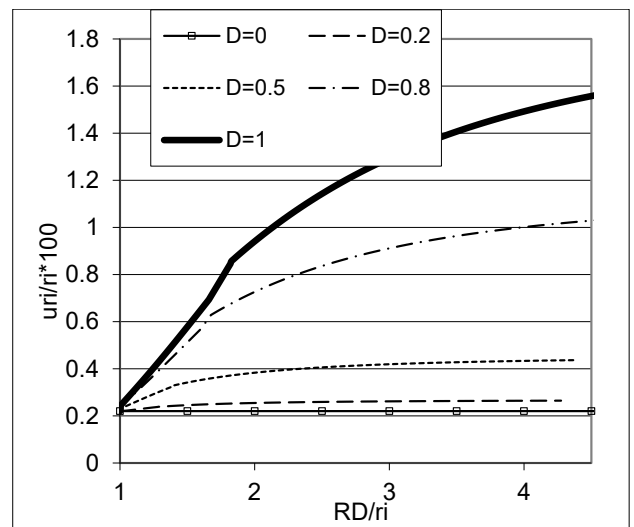
سه حالت تحلیل مختلف در این شکل ها مشاهده می شوند. نتایج نشان می دهد که با افزایش شعاع آسیب دیدگی شعاع ناحیه پلاستیک و میزان تغییر شکل ها افزایش می یابد.

در شکل ۱۰ مشاهده می شود که با رسیدن ناحیه آسیب دیده به شعاع پلاستیک، ناحیه آسیب دیده شعاع پلاستیک را تا یک شعاع مشخص با خود همراه می کند. شکل ۱۱ نشان می دهد که در حالت های تحلیل ۱، تنش های مماسی در شعاع پلاستیک مستقل از



شکل ۸. منحنی های پاسخ تونل مثال ۱

Fig. 8. Ground response curves for tunnel of example 1



شکل ۹. تأثیر ضریب به هم خوردگی D و شعاع ناحیه آسیب دیده (R_D) بر همگرایی تونل $u_{r(r)}$ مثال ۱.

Fig. 9. Influence of disturbance factor (D) and the radius of the damaged zone (R_D) on tunnel convergence $u_{r(r)}$

آسیب دیده منحنی ها دچار شکستگی می شوند. با توجه به شکل های ۶ تا ۸ بین روش ارائه شده و روش سنتی [۲۳] برای حالات خاص شرایط بدون آسیب و اعمال آسیب دیدگی به کل توده سنگ هم خوانی

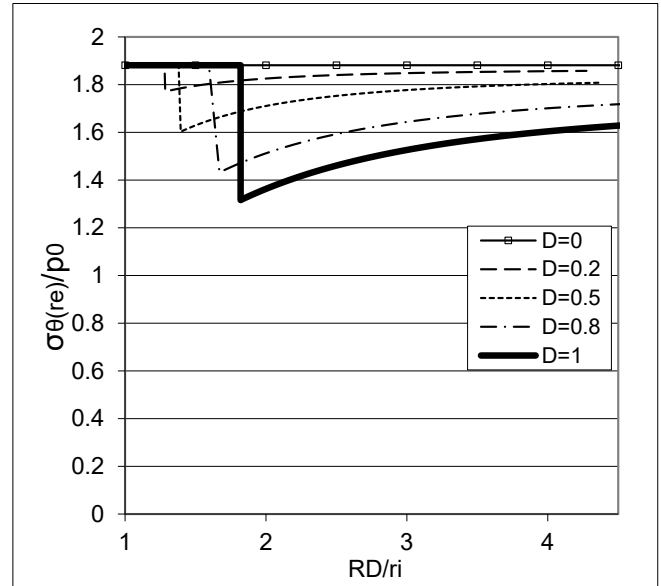
ناحیه آسیب دیده است.

۷-۲- مثال ۲: تحلیل اندرکنش پوشش - توده سنگ

در اینجا نیز کلیه پارامترها شبیه مثال قبل است، ولی به جای در نظر یک فشار داخلی مشخص در سطح داخلی پوشش از پوشش استوانه‌ای استفاده می‌شود. پوشش بتنی با شعاع داخلی $r_0 = 9.5$ و شعاع خارجی $r_i = 10$ و مقاومت فشاری تک محوری $f_c = 30 \text{ MPa}$ و ثوابت الاستیک $E_c = 25 \text{ GPa}$ و $\nu_c = 0.25$ بعد از یک همگرایی اولیه $\delta u_0 = 10 \text{ mm}$ در سطح داخلی توده سنگ نصب می‌شود. حفاری بسیار نامطلوب و بنابراین میزان آسیب دیدگی توده سنگ شدید ($D=1$) در نظر گرفته می‌شود. تحلیل برای دو مقدار شعاع آسیب دیدگی $R_D = 10.0001 \text{ m}$ (بدون آسیب دیدگی)، روش سنتی تحلیل (اعمال آسیب دیدگی به کل توده سنگ)، $R_D = 12 \text{ m}$ (حالت ۱)، $R_D = 25 \text{ m}$ (حالت ۲) و $R_D = 14 \text{ m}$ (حالت ۳) انجام می‌شود. در جدول ۱ نتایج حاصل از تحلیل به صورت خلاصه نشان داده شده است.

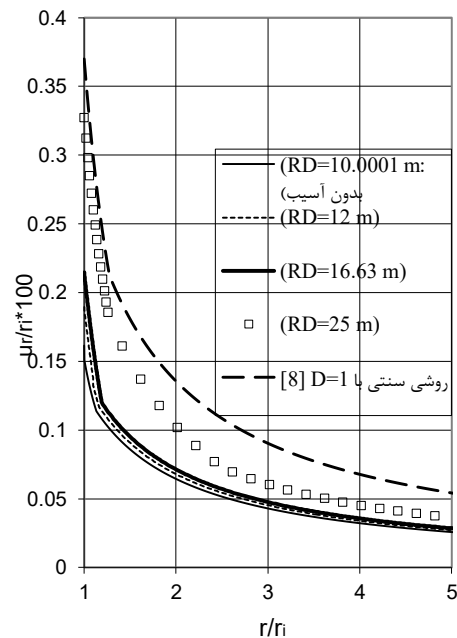
برای شرایط گفته شده، تغییرمکان شعاعی بی بعد $\frac{u_r}{r_i} [\%]$ و تنش مماسی بی بعد $\frac{\sigma_\theta}{\sigma_i}$ و تنش شعاعی بی بعد $\frac{\sigma_r}{\sigma_i}$ در توده سنگ و منحنی‌های همگرایی زمین در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۳ و جدول ۱، توزیع تنش در توده سنگ و شعاع ناحیه پلاستیک با تغییر شعاع آسیب دیدگی تغییرات محدودی خواهد داشت. و بیشتر نمودارها به هم نزدیک‌اند. دلیل آن این است که با افزایش شعاع آسیب دیدگی سهم بار توده سنگ کاهش می‌یابد و سهم بار پوشش افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۱، مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری پوشش تنها برای حالت بدون آسیب دیدگی جوابگو است و در بقیه حالات باید همگرایی اولیه اصلاح شود تا سهم بار پوشش کاهش یابد. گزینه دیگر افزایش کیفیت حفاری است. تا بتوان از مقاومت توده سنگ بدون آسیب حداکثر استفاده را برد. این وضعیت را می‌توان در ستون‌های مربوط به تنش شعاعی بین پوشش و توده سنگ و تنش مماسی در سطح داخلی پوشش جدول ۱ نیز مشاهده نمود. همگرایی توده سنگ نیز در تحلیل‌های مختلف کاملاً متفاوت به دست می‌آید و تعادل نهایی بین پوشش و توده سنگ با افزایش شعاع آسیب دیدگی در میزان همگرایی و فشار داخلی بالاتری



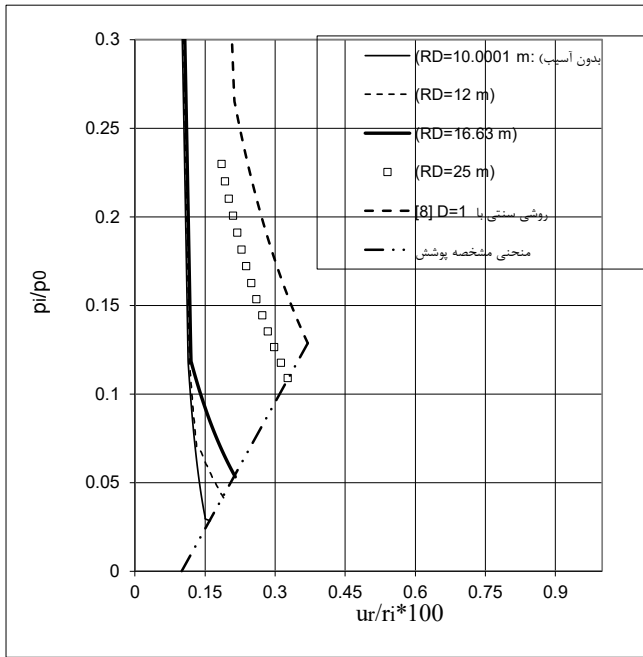
شکل ۱۱. تأثیر ضریب به هم خوردگی (D) و شعاع ناحیه آسیب دیده (R_D) بر تنش‌های مماسی در شعاع پلاستیک مثال ۱.

Fig. 11. Influence of disturbance factor (D) and the radius of the damaged zone (R_D) on tangential stress at the plastic radius



شکل ۱۲. تغییرمکان بی بعد شعاعی در توده سنگ پیرامون تونل مثال ۲.

Fig. 12. Dimensionless radial displacement $\frac{u_r}{r_i} [\%]$ in the rock masses around the tunnel of example 2.



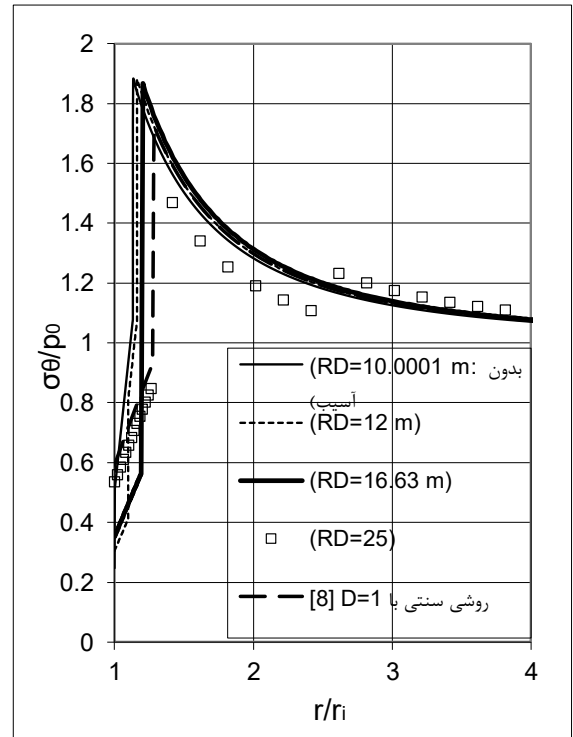
شکل ۱۴. منحنی های پاسخ زمین و منحنی مشخص پوشش تونل مثال ۲.

Fig. 14. Ground response curves and lining's characteristic curves for tunnel of example 1

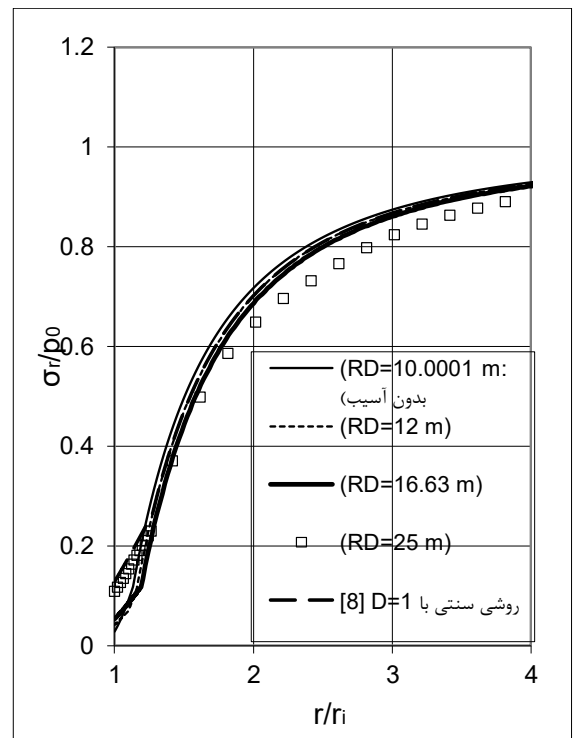
ایجاد می‌شود. البته همان‌طور که در شکل‌ها و جدول مشخص است، روش سنتی چه در تخمین میزان همگرایی نهایی و چه در تخمین فشار پوشش (و تنش‌های ایجاد شده در آن) محافظه‌کارانه است. می‌توان نتیجه گرفت که باید در انتخاب روش تحلیل با دقت عمل نمود و نباید شعاع ناحیه آسیب‌دیده را بدون لزوم به کل توده‌سنگ اعمال نمود زیرا تحلیل غیر اقتصادی خواهد شد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله آثار ناحیه آسیب‌دیده در اثر حفاری نامطلوب (معمولاً در روش چال‌وانفجار) بر تونل‌های حفاری شده در توده‌سنگ الاستوپلاستیک با معیار هوک و براون بررسی شد. برای این منظور یک روش تحلیل اندرکنش-پوشش توده‌سنگ ارائه گردید. چون شعاع ناحیه پلاستیک نسبت به شعاع آسیب‌دیدگی از ابتدا مشخص نیست سه حالت مختلف تحلیل در نظر گرفته شد. روابط تحلیل برای این سه حالت استخراج شدند. از روش تحلیل می‌توان در تحلیل تونل‌ها، ترسیم منحنی همگرایی توده‌سنگ و منحنی مشخصه پوشش و در طرح اولیه تونل‌ها، انجام تحلیل‌های پارامتری، و صحت‌سنجی



(الف)



(ب)

شکل ۱۳. تنش‌های بی‌بعد در توده‌سنگ پیرامون تونل الف) تنش‌های مماسی $\frac{\sigma_r}{\sigma_i}$ ب) تنش‌های شعاعی $\frac{\sigma_\theta}{\sigma_i}$ مثال ۲.

Fig. 13. Dimensionless stresses in the rock masses around the tunnel of example 2: a. tangential stresses $\frac{\sigma_\theta}{\sigma_i}$ b. radial stresses $\frac{\sigma_r}{\sigma_i}$

جدول ۱. خلاصه نتایج برای مثال ۲

Table 1. Summary of results for example 2

تنش مماسی در سطح داخلی پوشش (Mpa)	تنش شعاعی بین پوشش و توده سنگ (Mpa)	همگرایی نهایی (mm)	شعاع پلاستیک (m)	نوع تحلیلی	R_D
17/5	0/85	16/1	11/33	بدون آسیب	10
25/5	1/25	18/95	1/63	حالت 1	11
32/7	1/60	21/48	11/93	حالت 3	11/93
67/07	3/27	32/8	12/64	حالت 2	25
79/2	3/86	36/9	12/75	روش سنتی	∞

علائم یونانی

- ε_1 : کرنش اصلی بزرگ تر
- ε_3 : کرنش اصلی کوچک تر
- ε_θ : کرنش مماسی
- ε_r : کرنش شعاعی
- ν : ضریب پواسون توده سنگ
- σ_c : مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ
- σ_1 : تنش اصلی بزرگ تر
- σ_3 : تنش اصلی کوچک تر
- σ_r : تنش شعاعی
- σ_θ : تنش مماسی
- ψ : زاویه اتساع

زیرنویس

- D: ناحیه آسیب دیده
- c: توده سنگ الاستیک
- f: توده سنگ ناحیه پلاستیک

مراجع

- [1] Oriad, L.L., 1982. Blasting effect and their control. In: W. Hustrulid (Editor), Underground Mining Methods Handbook. Soc. Mining Eng., AIME, New York, pp. 1590-1603.
- [2] MacKown, A.F., 1986. Perimeter controlled blasting for

روش های عددی استفاده نمود. از روش تحلیل ارائه شده برای تحلیل نمونه های تونل استفاده شد. نتایج نشان می دهند که روش سنتی تحلیل تونل ها با اعمال آسیب دیدگی به کل توده سنگ در تخمین تنش ها و تغییر شکل ها محافظه کارانه است. با کاهش کیفیت حفاری (یعنی با افزایش شدت آسیب دیدگی در هر شعاع و افزایش شعاع ناحیه آسیب دیده) میزان همگرایی نهایی و بار وارده بر پوشش افزایش و تنش های ایجاد شده در آن افزایش می یابد. بنابراین باید تا حد امکان در عملیات حفاری باید میزان آسیب وارده به توده سنگ را کاهش داد تا بتوان از مقاومت توده سنگ به بهترین نحو ممکن استفاده نمود. به هر حال در صورت رخ دادن آسیب دیدگی باید اثر آسیب دیدگی در تحلیل با دقت وارد شود.

۹- فهرست علائم

علائم انگلیسی

- D: ضریب به هم خوردگی
- GSI: شاخص مقاومت زمین شناسی
- m, s : پارامترهای هوک و براون توده سنگ
- p_0 : تنش برجا
- r : فاصله شعاعی تا مرکز تونل
- R_p : شعاع ناحیه پلاستیک
- r_i : شعاع تونل
- u_i : تغییر مکان شعاعی

- Blast damage study by measurement of blast vibration and damage in the area adjacent to blast hole. In: Rossmanith HP (ed) Rock fragmentation by blasting. Balkema, Rotterdam
- [13] Feng X-T, Zhang Z, Sheng Q (2000) Estimating mechanical rock mass parameters relating to the Three Gorges Project permanent shiplock using an intelligent displacement back analysis method. *Int J Rock Mech Min Sci* 37(7):1039-1054
- [14] Sheng Q, Yue ZQ, Lee CF, Tham LG, Zhou H (2002) Estimating the excavation disturbed zone in the permanent shiplock slopes of the Three Gorges Project, China. *Int J Rock Mech Min Sci* 39(2):165-184
- [15] Sato T, Kikuchi T, Sugihara K (2000) In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan. *Eng Geol* 56(1-2):97-108
- [16] Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B., Hoek, E., 1983. Ground response curves for rock tunnels. *Journal of geotechnical Engineering* 109 (1), 15-39.
- [17] Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 1999. 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.
- [18] Sharan, S.K., 2003. Elastic-brittle-plastic analysis of circular openings in Hoek-Brown media. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40, 817-824.
- [19] Zareifard, M.R., Fahimifar, A. 2016. 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(5).
- [20] Zareifard, M.R., Fahimifar, A. 2014. 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(5).
- [21] Alonso, E., Alejano, L.R., Varas, F., Fdez-Manin, G., Carranza-Torres, C., 2003. Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behavior. *Int. J. underground excavations in fractured and weathered rocks. Bull. Assoc. Eng. Geol.* , XXIII(4): 461-478.
- [3] Ricketts, T.E., 1988. Estimating underground mine damage produced by blasting, 4th Mini Symp. On Explosive and Blasting Res., Soc. Explosive Eng., Anaheim, California, pp. 1-15.
- 4] Andersson, P., 1992. Excavation disturbed zone in tunneling. SveBeFo Report No. 8 Swedish Rock Engineering Research, Stockholm.
- [5] Persson, P.-A., Holmberg, R. and Lee, J., 1996. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC, Tokyo, 265-285 pp.
- [6] Raina, A.K., Chakraborty, A.K., Ramulu, M. and Jethwa, J.L., 2000. Rock mass damage from underground blasting, a literature review, and lab- and full scale tests to estimate crack depth by ultrasonic method. *FRAGBLAST-International Journal for Blasting and Fragmentation*, 4: 103-125.
- [7] Warneke, J., Dwyer, J.G. and Orr, T., 2007. Use of a 3-D scanning laser to quantify dift geometry and overbreak due to blast damage in underground manned entries. In: E. Eberhardt, D. Stead and T. Morrison (Editors), *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*. Taylor & Francis Group, London, Vancouver, Canada, pp. 93-100.
- [8] Saiang D, , 2004, Damaged rock zone around excavation boundaries and its interaction with shotcrete, Licentiate Thesis, Lulea° University of Technology, p 121
- [9] Holmberg, R. and Persson, P.-A., 1980. Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage. *Transc. Inst. Min. Metall.*: A37-A40.
- [10] Malmgren, L., Saiang, D., Töyrä, J. and Bodare, A., 2007, The excavation damaged zone at Kiirunavaara mine, Sweden - by seismic measurements, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 61 1-15.11-15
- [11] Saiang, D. and Nordlund, E., 2009. Numerical Analyses of the Influence of Blast-Induced Damaged Rock Around Shallow Tunnels in Brittle Rock. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 42:421.
- [12] Yang RL, Rocque P, Katsabanis P, Bawden WF (1993)

- of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), pp. 187-213.
- [28] Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B., Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. In: *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada Conference*, Toronto, 267–273, ., 2002.
- [29] Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C.. On the stability of tunnels under gravity loading, with post-peak softening of the ground. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34: 3-4, 1997.
- [30] Zareifard, M.R., Fahimifar, A. a new solution for shallow and deep tunnels by considering the gravitational loads. *ACTA geotechnica Slovenica*, 2(4), 37-49. 2012.
- [31] Timoshenko S. P., Goodier J.N., 1982. *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York.
- [32] RocScience, RocLab. Rocscience Inc., Toronto, Canada, 2002.
- [33] Phase2 v5.0, Two-dimensional finite element analysis program, Rocscience Inc. 2002.
- Numer. Anal. Meth. Geomech. 27, 1153– 1185.
- [22] Carranza-Torres, C., 2004. Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 480–481.
- [23] Park, K.-H., Kim, Y.-J., 2006. Analytical solution for a circular opening in, an elasto-brittle-plastic rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43, 616–622.
- [24] Guan, Z., Jiang, Y., Tanabasi, Y., 2007. Ground reaction analyses in conventional tunneling excavation. *Tunnel. Undergr. Space Technol.* 22, 230–237.
- [25] Lee, Y.K., Pietruszczak, S., 2008. A new 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.
- [26] Fahimifar, A., Zareifard, M.R., 2009. A theoretical solution for analysis of tunnels below groundwater considering the hydraulic– mechanical coupling. *Tunnel. Undergr. Space Technol.*, 24(26), 634-646.
- [27] Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C., 2000. “Application

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.R. Zareifard, A.Fahimifar, *Rock-lining interaction calculations for tunnels excavated in Hoek-Brown rock mass considering excavation damaged zone*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(5) (2019) 865-884.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14058.5608](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14058.5608)

