

تأثیر میزان آسیب‌دیدگی توده سنگ بر پایداری تونل‌های با پوشش بتنی بر اساس معیار مور - کولمب

محمد رضا زارعی فرد^۱، شبیر ارشدنژاد^{۲*}

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی استهبان، استهبان ایران، zareefard@aut.ac.ir
^۲ استادیار گروه مهندسی معدن، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات ایران، s_arshadnejad@yahoo.com

(دریافت: ۱۳ بهمن ۱۳۹۷ - پذیرش: ۳۱ شهریور ۱۳۹۸)

چکیده

روش چالزنی و آتشیاری یکی از عمومی‌ترین روش‌های حفاری تونل‌ها و معادن در سراسر جهان است. اگر چه روش چالزنی و آتشیاری از لحاظ فنی پیشرفت قابل ملاحظه‌ای کرده است ولی به هر حال این روش با مشکل از رفتن کیفیت توده سنگ و تشکیل ناحیه آسیب دیده با پارامترهای مقاومتی و سختی کاهش یافته روبه‌رو است. در روش‌های سنتی تحلیل تونل‌ها برای استخراج پارامترهای سختی و مقاومتی هوک و براون از مقدار ضریب به هم خوردگی **D** واحدی برای کل توده سنگ استفاده می‌شود. بر اساس این روش پایداری توده سنگ دست پایین تخمین زده می‌شود. در واقع ناحیه آسیب دیده ناشی از انفجار با ضخامت محدود در طراحی و تحلیل پایداری تونل‌ها اهمیت زیادی دارد. در این مقاله رفتار یک تونل در شرایط آسیب‌دیدگی مختلف بررسی می‌شود. در این ارتباط یک روش حل بسته ارائه خواهد شد. این روش تحلیل برای یک تونل حفاری شده در توده سنگ الاستوپلاستیک ترد با معیار گسیختگی مور - کولمب ارائه می‌شود. فرض می‌شود که ناحیه آسیب دیده استوانه ای شکل با ضریب به هم خوردگی **D** باشد. نتایج به دست آمده از روش ارائه شده نشان می‌دهد که تأثیر تغییر پارامترهای توده سنگ در ناحیه پلاستیک و الاستیک بر پایداری تونل ممکن است، قابل ملاحظه باشد.

کلمات کلیدی

تونل با پوشش بتنی، توده سنگ، ناحیه آسیب دیده، تحلیل الاستوپلاستیک، معیار مور - کولمب.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

روش بر مبنای تحلیل اندرکنش پوشش - توده سنگ ارایه شده است. در روش کنترل همگرایی رفتار پوشش و توده سنگ معمولاً به صورت مستقل از هم در نظر گرفته می‌شود. در این ارتباط رفتار توده سنگ با یک منحنی پاسخ زمین بیان می‌شود (توده سنگ شامل نواحی الاستیک و پلاستیک است). این منحنی تغییرات همگرایی توده سنگ را بر حسب فشار داخلی بیان می‌کند. از سوی دیگر رفتار پوشش در مقابل فشار وارده از طرف توده سنگ نیز با منحنی مشخصه پوشش بیان می‌شود.

در اثر حفاری تونل‌ها یک ناحیه آسیب دیده با ابعاد محدود و با پارامترهای متفاوت نسبت به توده سنگ برجای پیرامونی ایجاد می‌شود. بیشترین ابعاد ناحیه آسیب دیده و بالاترین سطح آسیب‌دیدگی مربوط به روش حفاری چالزنی و آتشباری است. در این روش در جبهه کار چال‌هایی حفاری می‌شود و پس از خرج‌گذاری عملیات آتشباری انجام می‌گیرد. در صورتی که انفجار به صورت کنترل شده نباشد به توده سنگ آسیب زیادی وارد می‌شود. از سوی دیگر در روش‌های حفاری مکانیزه و چالزنی و آتشباری کنترل شده، آسیب وارده به توده سنگ ناچیز است. پارامترهای توده سنگ در ناحیه آسیب دیده نسبت به توده سنگ اولیه متفاوت‌اند. دلیل این امر افزایش تعداد و ابعاد شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌ها در توده سنگ به وسیله القای تنش دینامیکی است. در روش‌های تحلیل مرسوم [۹-۱۱] آسیب‌دیدگی به کل توده سنگ اعمال می‌شود، این در حالیست که ورای ناحیه آسیب دیده توده سنگ سالم می‌ماند. بنابراین شرایط محافظه‌کارانه در نظر گرفته می‌شود.

تعیین پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ آسیب دیده در عمل مشکل است. بر این اساس، دو روش نظری (بر مبنای آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی) برای تخمین این پارامترها ارایه شده است:

- در روش اول از معیار گسیختگی هوک و براون [۱۰] استفاده می‌شود. در این روش یک ضریب آسیب‌دیدگی D بین صفر و یک در نظر گرفته می‌شود. به هر حال تجارب برای انتخاب مقدار مناسب این پارامتر در تونل‌ها محدود است.
- در روش دوم از روش اندرکنش ذرات برای تعیین پارامترهای مور - کولمب استفاده می‌شود. برای این منظور از نرم‌افزار PFC [۱۱] و یک دسته آزمون دو محوری و برزیلی استفاده می‌شود.

روش‌های عددی و نظری محدودی وجود دارند که در آن‌ها اثر ناحیه آسیب دیده لحاظ شده است. هر یک از این روش‌ها

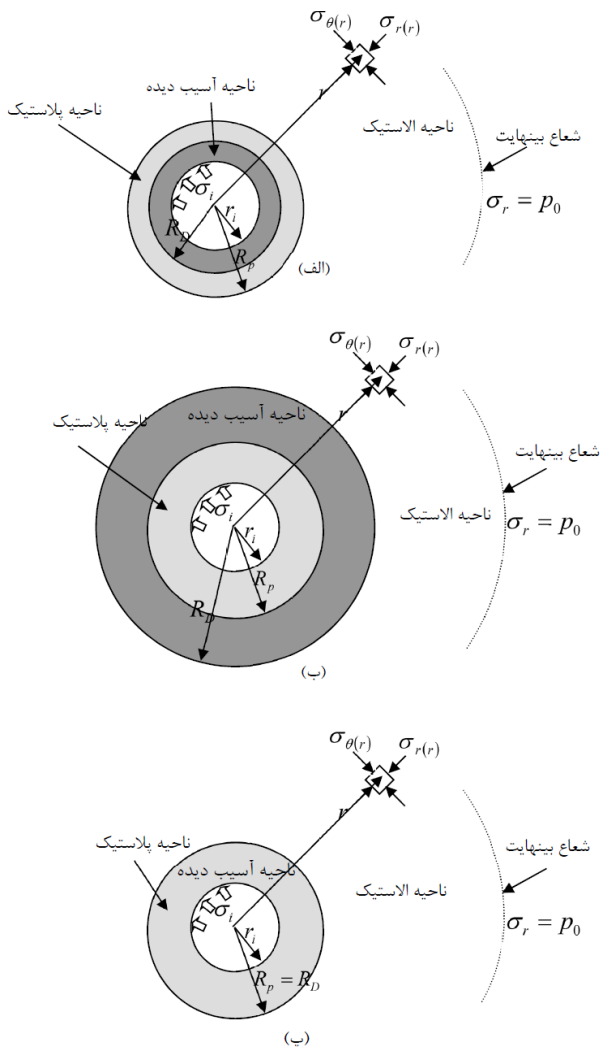
تحلیل تنش‌ها و تغییرشکل‌ها پیرامون حفاری‌های دایره‌ای در توده‌های سنگ همسان یکی از مسایل اساسی در مهندسی ژئوتکنیک و معدن است. با فرض اینکه تنش‌های برجا هیدروستاتیک باشند، می‌توان مساله را هیدروستاتیک فرض کرده و برای آن راه حل تحلیلی استخراج کرد. این راه‌حل‌ها در شرایط مختلفی مفیدند. این مزایا شامل صحت‌سنجی مدل‌های رفتاری، ارزیابی پایداری تونل‌ها، اعتبارسنجی برنامه‌های عددی، ترسیم منحنی‌های اندرکنش یا پاسخ زمین و نظایر آن است. در حالت کلی برای انجام یک تحلیل مناسب به روش‌های غیرخطی الاستوپلاستیک نیاز است. بر اساس مطالعات تاریخیچهای (براون و همکاران [۱]؛ آلونسو و همکاران [۲]) روش‌های الاستوپلاستیک نسبت به روش‌های الاستیک محبوب‌تر و دقیق‌تر به نظر می‌رسند.

تحلیل الاستوپلاستیک تونل‌های دایره‌ای حفاری شده در توده‌های سنگی به وسیله محققان مختلفی مطالعه شده است. تعدادی از راه‌حل‌ها بسته‌اند. این روش‌ها، به دلیل فرضیات ساده‌کننده، تقریبی‌اند. در حالت الاستوپلاستیک ترد، براون و همکاران [۱] یک روش حل بسته برای تحلیل تنش و تغییرشکل پیرامون تونل ارایه کردند. به هر حال، آن‌ها تغییرات کرنش الاستیک ناشی از باربرداری در ناحیه پلاستیک را لحاظ نکردند. به علاوه راه حل براون و همکاران در تخمین شعاع پلاستیک بر اساس مطالعات وانگ [۳] با مشکل روبه‌روست. اخیراً راه‌حل‌های اصلاح شده به وسیله محققان دیگری ارایه شده است. از جمله راه‌حل کارنزا-تورس و فیرهورست [۴] که این راه حل بر اساس یک روش خود متشابه ارایه شده است و از دید نظری دقیق است. این روش برای کاربری عملی نسبتاً پیچیده به نظر می‌رسد و تنها برای رفتار الاستوپلاستیک کامل قابل استفاده است. راه حل تحلیلی شاران [۵] نیز در محاسبه تغییر مکان در ناحیه پلاستیک دقیق نیست. در این روش فرض می‌شود که کرنش‌های الاستیک در ناحیه پلاستیک مشابه مساله استوانه جدار ضخیم‌اند. از سوی دیگر راه‌حل‌های ارایه شده به وسیله پارک و همکاران [۶] و کارنزا-تورس [۷] و زارعی فرد و فهیمی‌فر [۸-۹] تغییرمکان‌های دقیق در ناحیه پلاستیک را به دست می‌دهند.

یکی از پرکاربردترین روش‌هایی که برای تحلیل و طراحی تونل‌ها استفاده می‌شود، روش کنترل همگرایی^۱ است. در این روش توده سنگ الاستوپلاستیک در نظر گرفته می‌شود. این

^۱ - Convergence method confinement

تونل صرف نظر می‌شود [۱۷]. 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، یک ناحیه پلاستیک پیرامون تونل شکل می‌گیرد و توده سنگ دچار همگرایی می‌شود. رفتار توده سنگ الاستوپلاستیک ترد در نظر گرفته می‌شود. بعد از گسیختگی مقاومت به صورت ناگهانی به مقاومت باقیمانده افت می‌کند. این رفتار نرم‌شونده در حالت خاص به رفتار الاستوپلاستیک کامل قابل تبدیل است (شکل ۲). دو ناحیه شامل ناحیه الاستیک خارجی و ناحیه پلاستیک داخلی با شعاع R_p پیرامون تونل شکل می‌گیرد. بر این اساس با توجه به شعاع نواحی آسیب دیده و پلاستیک سه حالت مختلف ممکن است مشاهده شود (شکل ۱).



شکل ۱- تونل دایره‌ای عمیق در توده سنگ آسیب دیده تحت تنش‌های هیدروستاتیک، الف- حالت ۱: $R_p > R_D$ ب- حالت ۲: $R_p = R_D$ پ- حالت ۳: $R_p < R_D$

به دلیل در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده با محدودیت‌هایی همراهاند [۱۲-۱۶]

در این ارتباط زارعی فرد و فهیمی فر [۱۲] اثر ناحیه آسیب دیده را در روش تحلیل بسته خود لحاظ کردند. در روش آن‌ها اندرکنش پوشش- توده سنگ لحاظ نشده است و اثر پوشش تونل به صورت یک فشار داخلی یکنواخت در سطح داخلی تونل اعمال شده است. علاوه بر این زارعی فرد و فهیمی فر از یک روش آزمون و خطا برای انتخاب روش تحلیل مناسب استفاده کردند و حدود کاربری حالت‌های مختلف را به وضوح مشخص نکردند.

بر این اساس در این مقاله یک روش تحلیلی برای محاسبه تنش‌ها و تغییر شکل‌های مربوط به تونل‌های حفاری شده در توده سنگ الاستوپلاستیک با معیار گسیختگی مور- کولمب با در نظر گرفتن اندرکنش پوشش- توده سنگ ارائه می‌شود. دلیل استفاده از معیار مور- کولمب سادگی آن و امکان حل تحلیلی معادلات حاکم است. دلیل دیگر این است که می‌توان پارامترهای توده سنگ را به هر دو روش یاد شده به دست آورد. علاوه بر آن این معیار در بیشتر نرم‌افزارهای عددی تحلیل موجود است و می‌توان با کمک روش تحلیل ارائه شده برای اعتبارسنجی این نرم‌افزارهای عددی استفاده کرد. در روش ارائه شده، توده سنگ آسیب دیده در اثر حفاری بدون کیفیت (شعاع آسیب‌دیدگی می‌تواند نسبت به شعاع پلاستیکی بزرگتر، کوچکتر یا با آن برابر باشد) در نظر گرفته می‌شود. در روش ارائه شده فشار داخلی، حدی بین حالت‌های مختلف تحلیل نیز مشخص می‌شود. از روش ارائه شده می‌توان برای تحلیل و طراحی تونل‌های عمیق دایره‌ای و استخراج منحنی‌های اندرکنش پوشش- توده سنگ استفاده کرد.

۲- توصیف مسأله

یک تونل دایره‌ای شعاع r_i در توده سنگ الاستوپلاستیک همگن و همسان تحت تنش‌های اولیه هیدروستاتیک p_0 حفاری شده و بعد از یک همگرایی اولیه Δu_0 پوشش با شعاع داخلی r_0 نصب می‌شود (شکل ۱). این پوشش فشار یکنواخت داخلی $\sigma_i = \sigma_{r(r_i)}$ را به سطح داخلی توده سنگ اعمال می‌کند. رفتار پوشش الاستیک در نظر گرفته می‌شود و مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آن به ترتیب برابر است با E_c و ν_c است. در اثر حفاری نامطلوب یک ناحیه آسیب دیده استوانه‌ای با شعاع داخلی r_i و خارجی R_D پیرامون تونل شکل می‌گیرد. از تاثیر وزن توده سنگ پلاستیک پیرامون

میانی $\sigma_{2(r)}$ خواهد بود.

در شرایط متقارن محوری معادله تعادل بین تنش‌های شعاعی $\sigma_{r(r)}$ و تنش‌های مماسی $\sigma_{\theta(r)}$ در شعاع r به شکل رابطه ۱ است [۱۸]:

$$\frac{d\sigma_{r(r)}}{dr} - \frac{\sigma_{\theta(r)} - \sigma_{r(r)}}{r} = 0 \quad (۱)$$

در شرایط متقارن محوری رابطه تغییر مکان شعاعی $u_{r(r)}$ در شعاع r با کرنش‌های شعاعی $\varepsilon_{r(r)}$ و مماسی $\varepsilon_{\theta(r)}$ در این شعاع به صورت رابطه ۲ است [۱۸]:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} \quad (۲)$$

در هر دو ناحیه توده سنگ، رابطه بین کرنش القایی الاستیک ε_r^e و ε_{θ}^e و تنش‌های القایی نهایی σ_r و σ_{θ} و تنش هیدروستاتیک اولیه p_0 را می‌توان به صورت رابطه ۳ و ۴ نوشت [۱۸]:

$$\varepsilon_r^e = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)(\sigma_r - p_0) - \nu(\sigma_{\theta} - p_0)] \quad (۳)$$

$$\varepsilon_{\theta}^e = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)(\sigma_{\theta} - p_0) + \nu(\sigma_r - p_0)] \quad (۴)$$

که در آن:

E مدول الاستیسیته

ν ضریب پواسون توده سنگ

در این ارتباط پارامترهای توده سنگ آسیب دیده با پیشوند D بیان می‌شوند. یعنی پارامترهای الاستیک توده سنگ آسیب دیده E_D و ν_D خواهد بود.

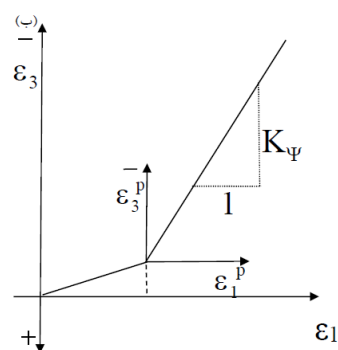
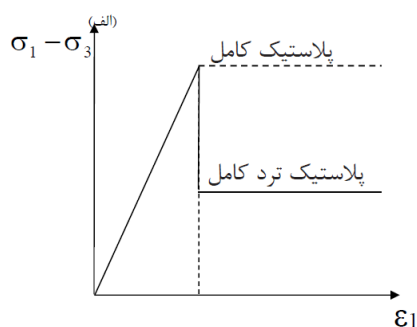
در حالت پلاستیک نیز معیار گسیختگی خطی مور-کولمب استفاده می‌شود (رابطه ۵):

$$\sigma_1 = A + B\sigma_3 \quad (۵)$$

که در آن $\left(A = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, B = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)$ و σ_1 و σ_3 به

ترتیب تنش‌های اصلی بزرگتر و کوچکتر در شرایط گسیختگی‌اند و C و φ ثابت‌های معیار گسیختگی مور-کولمب توده سنگ‌اند (C چسبندگی و φ زاویه اصطکاک توده سنگ در معیار مور-کولمب است).

در شرایط متقارن محوری تنش‌های اصلی σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های مماسی σ_{θ} و شعاعی σ_r خواهند بود و در نتیجه رابطه ۵ به صورت رابطه ۶ بازنویسی می‌شود:



شکل ۲- مدل رفتاری مورد استفاده برای توده سنگ آسیب دیده و آسیب ندیده، الف- رفتار تنش کرنش و ب- قانون جریان.

- حالت اول (آسیب دیدگی محدود): شعاع ناحیه آسیب دیده کوچکتر از شعاع ناحیه پلاستیک است.
- حالت دوم (آسیب دیدگی گسترده): شعاع ناحیه آسیب دیده بزرگتر از شعاع ناحیه پلاستیک است.
- حالت سوم (آسیب دیدگی متوسط): شعاع ناحیه آسیب دیده برابر با شعاع ناحیه پلاستیک است.

شرایط حاکم بر مساله در حالت‌های سه‌گانه متفاوت است و بنابراین در هر یک از حالات روش تحلیل متفاوت خواهد بود. با توجه به اینکه شعاع پلاستیک R_p از ابتدا مشخص نیست برای انتخاب روش تحلیل مناسب باید فشارهای حدی داخلی بین حالت‌های مختلف تحلیل ابتدا مشخص شوند.

با در نظر گرفتن شرایط متقارن محوری نشان داده شده در شکل ۱ (سه حالت مختلف)، تنش حاصله در فاصله شعاعی r با تنش شعاعی $\sigma_{r(r)}$ و تنش مماسی $\sigma_{\theta(r)}$ مشخص می‌شود. تنش‌های $\sigma_{r(r)}$ و $\sigma_{\theta(r)}$ به ترتیب تنش‌های اصلی کوچکتر $\sigma_{3(r)}$ و بزرگتر $\sigma_{1(r)}$ خواهند بود. تغییر مکان نقاط نیز با تغییر مکان شعاعی $u_{r(r)}$ مشخص می‌شود. در تونل‌های بلند شرایط کرنش صفحه‌ای حاکم است و در این حالت تنش خارج از صفحه $\sigma_z(r)$ تنش اصلی

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

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

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

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

باید توجه داشت که پارامترهای توده سنگ آسیب دیده متفاوتند و بنابراین در توده سنگ آسیب دیده از ضرایب زیر استفاده می‌شود (رابطه ۱۳):

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

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

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

۳- تحلیل ناحیه الاستیک

همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، در خارج از ناحیه پلاستیک توده سنگ الاستیک می‌ماند. راه حل مساله برای حالت‌های ۱ و ۳ و حالت ۲ متفاوت است.

۳-۱- حالت‌های 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 پ). تنش‌ها و تغییر مکان‌ها در این ناحیه را می‌توان بر اساس قانون استوانه‌های جدار ضخیم در الاستیسیته به دست آورد [۱۸]:

$$\sigma_{r(r)} = p_0 - (p_0 - \sigma_{r(R_p)}) \frac{R_p^2}{r^2}$$

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

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

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

$$\sigma_\theta = A + B\sigma_r \quad (۶)$$

برای توده سنگ اولیه رابطه ۶ را می‌توان به صورت رابطه ۷ نوشت:

$$\sigma_\theta = A_i + B_i\sigma_r \quad (۷)$$

که در آن $\left(A_i = \frac{2C_i \cos \varphi_i}{1 - \sin \varphi_i}, B_i = \frac{1 + \sin \varphi_i}{1 - \sin \varphi_i} \right)$ و C_i و φ_i ثابت‌های مور-کولمب برای توده سنگ اولیه‌اند.

در ناحیه پلاستیک $r_i \leq r \leq R_p$ (شکل ۱) رابطه ۶ به صورت رابطه ۸ ساده می‌شود.

$$\sigma_\theta = A_r + B_r\sigma_r \quad (۸)$$

که در آن $\left(A_r = \frac{2C_r \cos \varphi_r}{1 - \sin \varphi_r}, B_r = \frac{1 + \sin \varphi_r}{1 - \sin \varphi_r} \right)$ و C_r و φ_r ثابت‌های مور-کولمب برای توده سنگ پلاستیک‌اند.

باید توجه داشت که پارامترهای توده سنگ آسیب دیده متفاوت از سنگ بدون آسیب‌اند. پارامترهای این ناحیه با پیشوند D نمایش داده می‌شوند (یعنی C_{rD} ، φ_{rD} ، $C_{\theta D}$ ، $\varphi_{\theta D}$).

در ناحیه پلاستیک کرنش‌های شعاعی و مماسی کل ε_r و ε_θ را می‌توان به اجزای الاستیک و پلاستیک تقسیم کرد (رابطه ۹):

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^p, \quad \varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^e + \varepsilon_\theta^p \quad (۹)$$

با فرض ثابت بودن ضریب اتساع و با فرض اینکه قانون جریان غیرهمبسته برقرار است رابطه بین کرنش‌های شعاعی و مماسی پلاستیک به صورت رابطه ۱۰ خواهد بود [۶]:

$$\varepsilon_r^p + K_\Psi \varepsilon_\theta^p = 0 \quad (۱۰)$$

که در آن:

$$K_\Psi = (1 + \sin \Psi) / (1 - \sin \Psi)$$

Ψ زاویه اتساع توده سنگ (در ناحیه آسیب دیده با Ψ_D نمایش داده می‌شود).

با ترکیب روابط ۲ و ۱۰ رابطه سازگاری تغییر مکان‌ها به صورت رابطه ۱۱ استخراج می‌شود [۶]:

$$\frac{du_r}{dr} + K_\Psi \frac{u_r}{r} = f(r) \quad (۱۱)$$

که در آن:

۴- تحلیل ناحیه پلاستیک

۴-۱- حالت ۱

ناحیه پلاستیک از یک ناحیه خارجی بدون آسیب با پارامترهای بدون تغییر و یک ناحیه آسیب دیده با پارامترهای تقلیل یافته تشکیل شده است (شکل ۱- الف). در این حالت نواحی آسیب ندیده و آسیب دیده در شعاع R_D با یکدیگر تماس دارند. در این شعاع این دو ناحیه با تنش شعاعی مرزی $\sigma_{r(R_D)}$ با یکدیگر اندرکنش دارند. با استفاده از رابطه ۲۵ تنش مماسی $\sigma_{\theta(R_p)}$ در شعاع R_p به دست می‌آید:

$$\sigma_{\theta(R_p)} = 2p_0 - \sigma_{r(R_p)} \quad (25)$$

تنش‌های اصلی بزرگتر و کوچکتر باید در معیار گسیختگی توده سنگ آسیب ندیده 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 (رابطه ۲۶):

$$\sigma_{r(R_p)} = (2p_0 - A_i) / (B_i + 1) \quad (26)$$

بعد از محاسبه مقدار $\sigma_{r(R_p)}$ از رابطه ۲۶ مقدار متناظر $\sigma_{\theta(R_p)}$ از روابط ۲۵ یا ۷ به دست می‌آید. سپس تغییر مکان شعاعی $u_{r(R_p)}$ از رابطه ۱۶ به دست می‌آید. با جایگزینی رابطه ۸ در رابطه ۱ و حل معادله دیفرانسیل حاصل با در نظر گرفتن شرایط مرزی $\sigma_{r(r_i)} = \sigma_i$ در $r = r_i$ ، رابطه بسته زیر برای تنش شعاعی $\sigma_{r(r)}$ در قسمت آسیب دیده ناحیه پلاستیک به دست می‌آید ($r \leq R_D$):

$$\sigma_{r(r)} = \left[A_{rD} + \left(\frac{r_i}{r} \right)^{1-B_{rD}} \right] / (1-B_{rD}) \quad (27)$$

سپس با حل معادله دیفرانسیل یاد شده برای ناحیه آسیب ندیده رابطه ۲۸ به دست می‌آید:

$$\sigma_{r(r)} = \left[A_r + \left(\frac{R_D}{r} \right)^{1-B_r} \right] / (1-B_r) \quad (28)$$

در رابطه ۲۸ تنش شعاعی $\sigma_{r(R_D)}$ از رابطه ۲۷ به دست می‌آید.

مقدار تنش مماسی σ_{θ} متناظر نیز از معیار گسیختگی یعنی رابطه ۸ به دست می‌آید. شعاع ناحیه پلاستیک R_p از

R_D در تماس‌اند و با تنش شعاعی $\sigma_{r(R_D)}$ با هم اندرکنش دارند.

تنش‌ها و تغییر مکان‌ها در نواحی بدون آسیب و آسیب دیده را می‌توان با کمک قانون استوانه‌های جدار ضخیم در الاستیسیته به دست آورد [۱۸]:

در ناحیه بدون آسیب:

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

$$\sigma_{\theta(r)} = p_0 + (p_0 - \sigma_{r(R_D)}) \frac{R_D^2}{r^2} \quad (18)$$

$$u_{r(r)} = \frac{1+\nu}{E} (p_0 - \sigma_{r(R_D)}) \frac{R_D^2}{r} \quad (19)$$

در ناحیه آسیب دیده:

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

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

$$\sigma_{\theta(r)} = \left(\sigma_{r(R_D)} - \sigma_{r(R_p)} \right) \frac{R_p^2}{R_D^2 - R_p^2} \quad (21)$$

$$\left(1 + \frac{R_D^2}{r^2} \right) + \sigma_{r(R_D)}$$

$$u_{r(r)} = \frac{1+\nu_D}{E_D} \left(\sigma_{r(R_D)} - \sigma_{r(R_p)} \right) \quad (22)$$

$$\frac{R_p^2}{R_D^2 - R_p^2} \left((1-2\nu_D) + \frac{R_D^2}{r} \right) +$$

$$\frac{1+\nu_D}{E_D} (\sigma_{r(R_D)} - p_0) (1-2\nu_D) r$$

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

$$\sigma_{r(R_D)} = \alpha_1 (\sigma_{r(R_D)} - p_0) + p_0 \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{2R_p^2 E (1-\nu_D^2)}{\left(E_D (1+\nu) (R_D^2 - R_p^2) - E (1+\nu_D) ((2\nu_D - 1) R_D^2 - R_p^2) \right)} \quad (24)$$

۴-۲- حالت ۲

نواحی الاستیک و آسیب دیده پلاستیک در شعاع R_p با تنش شعاعی مرزی $\sigma_{r(R_p)}$ با هم اندرکنش دارند. با جایگذاری $\sigma_{r(R_D)}$ به دست از رابطه ۲۳ در رابطه ۲۱ تنش مماسی $\sigma_{\theta(R_p)}$ در شعاع R_p بر حسب $\sigma_{r(R_p)}$ به دست می آید (رابطه ۳۴):

$$\sigma_{\theta(R_p)} = (1 + \alpha)p_0 - \alpha\sigma_{r(R_p)} \quad (34)$$

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

که در آن α_1 از رابطه ۲۴ و α_2 از رابطه ۳۵ به دست می آید:

$$\alpha_2 = \frac{R_D^2 + R_p^2}{R_D^2 - R_p^2} \quad (35)$$

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 حاصله تنش شعاعی مرزی $\sigma_{r(R_p)}$ بدست می آید (رابطه ۳۶):

$$\sigma_{r(R_p)} = \frac{(\alpha + 1)p_0 - A_{iD}}{B_{iD} + \alpha} \quad (36)$$

بعد از محاسبه مقدار $\sigma_{r(R_p)}$ از رابطه ۳۶ مقدار $\sigma_{\theta(R_p)}$ متناظر از روابط ۳۴ یا ۷ به دست می آید. سپس تغییر مکان شعاعی $u_{r(R_p)}$ از رابطه ۲۲ 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 ۲۷ به دست می آید. مقدار متناظر تنش مماسی $\sigma_{\theta(r)}$ نیز از رابطه معیار گسیختگی (رابطه ۸) به دست می آید.

تنش شعاعی در شعاع پلاستیک (به دست آمده از رابطه ۲۷) باید با مقدار متناظر آن از رابطه ۳۶ برابر باشد. دلیل آن اینست که تنش شعاعی باید در کل نواحی پیوسته باشد (شرط تعادل). بنابراین معادله ۳۷ برای شعاع ناحیه پلاستیک R_p به دست می آید:

$$R_p = r_i \left(\frac{A_{rD} - \sigma_{r(R_p)}(1 - B_{rD})}{A_{rD} - \sigma_i(1 - B_{rD})} \right)^{\frac{1}{1 - B_{rD}}} \quad (37)$$

حال با حل معادله دیفرانسیل ۱۱ برای ناحیه پلاستیک $(r \leq R_p)$ رابطه ۳۸ و ۳۹ به دست می آید:

پیوستگی تنش شعاعی در محل تماس نواحی الاستیک و پلاستیک به دست می آید.

تنش شعاعی در شعاع پلاستیک (که از رابطه ۲۸ به دست می آید) باید با مقدار متناظر آن در رابطه ۲۶ برابر باشد. دلیل آن این است که تنش شعاعی در کل نواحی باید پیوسته باشد (شرط تعادل). بنابراین رابطه ۲۹ برای شعاع ناحیه پلاستیک R_p به دست می آید:

$$R_p = R_D \left(\frac{A_r - \sigma_{r(R_p)}(1 - B_r)}{A_r - \sigma_{r(R_D)}(1 - B_r)} \right)^{\frac{1}{1 - B_r}} \quad (29)$$

با حل رابطه دیفرانسیل ۱۱ با اعمال شرایط مرزی تغییر مکان شعاعی در شعاع پلاستیک $u_{r(R_p)}$ ، رابطه بسته ۳۰ برای تغییر مکان شعاعی $u_{r(r)}$ در قسمت آسیب ندیده از ناحیه پلاستیک $(R_D \leq r \leq R_p)$ به دست می آید:

$$u_r = \frac{1}{r^{K_\Psi}} (G(r) - G(R_p)) + u_{r(R_p)} \left(\frac{R_p}{r} \right)^{K_\Psi} \quad (30)$$

که در آن:

$$G(r) = \frac{\left(\frac{B_1 + B_3 A_r - A_r (B_2 + B_3 B_r)}{(B_r - 1)} + \frac{(\sigma_{r(R_D)}(B_r - 1) + A_r)(B_2 + B_3 B_r)}{(K_\Psi + B_r)(B_r - 1)} \right) r^{(K_\Psi + 1)}}{(K_\Psi + 1)} \quad (31)$$

از سوی دیگر با حل معادله دیفرانسیل ۱۱ برای قسمت آسیب دیده $(r \leq R_D)$ رابطه ۳۲ و ۳۳ به دست می آید:

$$u_r = \frac{1}{r^{K_{\Psi_D}}} (F(r) - F(R_D)) + \quad (32)$$

$$u_{r(R_D)} \left(\frac{R_D}{r} \right)^{K_{\Psi_D}} \quad F(r) = \frac{\left(\frac{B_{1D} + B_{3D} A_{rD} - A_{rD} (B_{2D} + B_{3D} B_{rD})}{(B_{rD} - 1)} + \frac{(\sigma_i (B_{rD} - 1) + A_{rD})(B_{2D} + B_{3D} B_{rD})}{(K_{\Psi_D} + B_{rD})(B_{rD} - 1)} \right) r^{(K_{\Psi_D} + 1)}}{(K_{\Psi_D} + 1)} \quad (33)$$

r_i در رابطه معیار گسیختگی توده سنگ آسیب دیده صدق می‌کنند و ناحیه پلاستیک شروع به شکل گیری می‌کند (رابطه ۴۰):

$$p_{cr} = \frac{\sigma_0(1+\beta_2) - A_{iD}(1+\beta_1)}{\beta_2 - \beta_1 + B_{iD}(1+\beta_1)} \quad (40)$$

که در آن:

$$B_{iD} = \frac{1 + \sin \phi_{iD}}{1 - \sin \phi_{iD}}, \quad A_{iD} = \frac{2C_{iD} \cos \phi_{iD}}{1 - \sin \phi_{iD}} \quad (41)$$

$$\beta_1 = \frac{E(1+\nu_D)}{E_D(1+\nu)} \left(\frac{r_i^2}{R_D^2 - r_i^2} (1 - \nu_D) + \right) \quad (42)$$

$$\beta_2 = \frac{R_D^2 (R_D^2 + r_i^2)}{r_i^2 (R_D^2 - r_i^2)} \quad (43)$$

برای مقادیر فشار داخلی σ_i بزرگتر از p_{cr} باید تحلیل الاستیک و برای مقادیر کوچکتر از آن باید حالت ۲ تحلیل در نظر گرفته شود.

۲-۵- محاسبه فشار حدی بین حالت یک و سه σ_i^{1-3}

اگر فشار داخلی از σ_i^{1-3} کوچکتر باشد باید از حالت ۱ تحلیل و اگر از آن بزرگتر باشد باید از حالت ۳ تحلیل استفاده کرد. مدل مورد بررسی در اینجا شبیه شکل ۱-ب است ولی شرایط مرزی در مرز پلاستیک متفاوت‌اند. در این حالت باید تنش‌های ایجاد شده در شعاع $R_D = R_p$ از توده سنگ آسیب دیده در معیار گسیختگی صدق کنند. بنابراین تنش شعاعی $\sigma_{(R_D)}^{1-3}$ در شعاع پلاستیک از رابطه ۴۴ به دست می‌آید:

$$\sigma_{(R_D)}^{1-3} = \frac{2p_0 - A_i}{B_i + 1} \quad (44)$$

با داشتن این مقدار تنش مرزی، می‌توان توزیع تنش در نواحی آسیب دیده و آسیب ندیده را مشخص کرد (از جمله σ_i^{1-3}).

۳-۵- محاسبه فشار حدی بین حالت ۲ و ۳ σ_i^{2-3}

اگر فشار داخلی از σ_i^{2-3} کوچکتر باشد باید از حالت ۳ تحلیل و اگر از آن بزرگتر باشد باید از حالت ۲ تحلیل استفاده کرد. مدل مورد بررسی در اینجا شبیه شکل ۱-ب است ولی شرایط مرزی در مرز پلاستیک متفاوت‌اند. در این حالت باید سازگاری تغییر مکان‌ها در شعاع $R_D = R_p$ تامین شود (تغییر مکان‌ها باید پیوسته باشند). برای این منظور باید تغییر مکان

$$u_r = \frac{1}{r^{K_{\psi D}}} (H(r) - H(R_p)) + u_{r(R_p)} \left(\frac{R_p}{r} \right)^{K_{\psi D}} \quad (38)$$

$$H(r) = \frac{\left(\frac{B_{1D} + B_{3D}A_{rD} - A_{rD}(B_{2D} + B_{3D}B_{rD})}{(B_{rD} - 1)} + r^{(K_{\psi D} + 1)} \right) \left(\frac{\sigma_i(B_{rD} - 1) + A_{rD}}{(B_{2D} + B_{3D}B_{rD})} \right)}{(K_{\psi D} + B_{rD})(B_{rD} - 1)} \quad (39)$$

۴-۳- حالت ۳

در این حالت، شعاع پلاستیک از ابتدا معین 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 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 $\sigma_{r(r)} = \sigma_i$ در $r = r_i$ ، تنش شعاعی $\sigma_{r(r)}$ ناحیه پلاستیک آسیب دیده از رابطه ۲۷ به دست می‌آید. مقدار متناظر تنش مماسی $\sigma_{\theta(r)}$ نیز از معیار گسیختگی (رابطه ۸) به دست می‌آید. در شعاع پلاستیک با به دست آوردن مقدار $\sigma_{r(R_p)}$ از رابطه ۲۷، مقدار متناظر $\sigma_{\theta(R_p)}$ از رابطه ۸ به دست می‌آید. سپس تغییر مکان شعاعی $u_{r(R_p)}$ از رابطه ۱۶ به دست می‌آید. تغییر مکان شعاعی نیز در این حالت مانند حالت ۲ از رابطه ۳۸ محاسبه می‌شود.

۵- محاسبه فشارهای حدی بین حالت‌های مختلف

۵-۱- محاسبه فشار حدی بحرانی تحلیل پلاستیک p_{cr}

اگر فشار داخلی تونل بیشتر از یک مقدار مشخص p_{cr} باشد، توده سنگ الاستیک می‌ماند و باید از تحلیل الاستیک استفاده شود. در این حالت برای تحلیل هر قسمت از توده سنگ (شامل نواحی آسیب دیده و آسیب ندیده) باید از قانون استوانه جدار ضخیم در نظریه الاستیسیته [۱۸] استفاده شود. در این حالت نیز شرط سازگاری و تعادل باید در مرز نواحی تامین شود. تحلیل شباهت زیادی به حالت ۲ تحلیل دارد ولی در این حالت ناحیه پلاستیکی وجود ندارد. بنابراین می‌توان از روابط ارائه شده برای ناحیه الاستیک حالت ۲ استفاده کرد. البته باید در اینجا به جای R_p از r_i و به جای $\sigma_{r(R_p)}$ از σ_i استفاده شود. همانطور که گفته شد، به ازای یک مقدار مشخص $\sigma_i = p_{cr}$ تنش‌های بدست آمده از تحلیل الاستیک در شعاع

(روابط ۵۲ تا ۵۴) [۱۸]:

$$u_{r(r)} = \frac{1+\nu_c}{E_c} (\sigma_i) \frac{r r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} \left((1-2\nu_c) + \frac{r_i^2}{r^2} \right) + \quad (52)$$

$$\frac{1+\nu_c}{E_c} \sigma_i r (1-2\nu_c)$$

$$\sigma_{r(r)} = \sigma_i \frac{r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} (1 - \frac{r_i^2}{r^2}) + \sigma_i \quad (53)$$

$$\sigma_{\theta(r)} = \sigma_i \frac{r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} (1 + \frac{r_i^2}{r^2}) + \sigma_i \quad (54)$$

که در آن:

E_c مدول الاستیسیته

ν_c ضریب پواسون پوشش

σ_i تنش تماسی پوشش - توده سنگ

r_0 شعاع داخلی پوشش

r_i شعاع خارجی پوشش

با توجه به رابطه ۵۴ ماکزیم تنش مماسی در سطح داخلی پوشش ایجاد می شود.

۷- شرایط مرزی در محل تماس پوشش - توده سنگ

در محل تماس پوشش باید معادلات تعادل و سازگاری تغییر شکلها برقرار باشند. بر این اساس با در نظر گرفتن شرط تعادل تنشهای شعاعی باید در شعاع r_i پیوسته باشند، یعنی $\sigma_i^{rock\ mass} = \sigma_i^{lining}$.

پوشش بعد از یک تغییرمکان شعاعی اولیه δu_0 نصب می شود. تنش شعاعی در شعاع تونل از شرط سازگاری تغییر مکانها در این شعاع به دست می آید (رابطه ۵۵):

$$u_r^{lining} + \delta u_0 = u_r^{rock} \quad (55)$$

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

۸- ترسیم منحنی های روش کنترل همگرایی

۸-۱- منحنی پاسخ زمین

برای ترسیم منحنی پاسخ زمین، محاسبات با روش تحلیل الاستیک برای مقادیر $\sigma_i \leq p_0$ شروع می شود. σ_i به تدریج کاسته می شود تا جایی که σ_i به p_{cr} برسد و به ازای هر مقدار σ_i همگرایی توده سنگ محاسبه می شود. حال σ_i به

شعاعی در این شعاع در دو سمت (یعنی در ناحیه آسیب دیده و آسیب ندیده) با هم برابر باشند (رابطه ۴۵):

$$u_{r(R_D)}^{damaged} = u_{r(R_D)}^{undamaged} \quad (45)$$

در نتیجه کرنش مماسی با توجه به رابطه ۲ (یعنی $\epsilon_{\theta} = \frac{u_r}{r}$) در این شعاع در دو سمت (یعنی در ناحیه آسیب دیده و آسیب ندیده) با هم برابر باشند (رابطه ۴۶):

$$\epsilon_{\theta(R_D)}^{damaged} = \epsilon_{\theta(R_D)}^{undamaged} \quad (46)$$

در سمت ناحیه آسیب دیده پلاستیک کرنش کل برابر است با کرنش الاستیک یعنی برای به دست آوردن $\epsilon_{\theta(R_D)}^{damaged}$ از رابطه ۲ استفاده می شود (رابطه ۴۷):

$$\epsilon_{\theta(R_D)}^{damaged} = [(1-\nu)(\sigma_{\theta} - p_0) + \nu(\sigma_r - p_0)] \quad (47)$$

در رابطه ۴۷، σ_{θ} از رابطه ۷ برای توده سنگ آسیب دیده به دست می آید ($\sigma_{\theta} = A_{iD} + B_{iD} \sigma_r$).

از سوی دیگر با توجه به رابطه ۱۹، $u_{r(R_D)}^{damaged}$ برابر با رابطه ۴۸ است:

$$u_{r(R_D)}^{damaged} = \frac{1+\nu}{E} (p_0 - \sigma_{r(R_D)}) R_D \quad (48)$$

بنابراین $\epsilon_{\theta(R_D)}^{undamaged}$ با توجه به رابطه (۲)، برابر است با:

$$\epsilon_{\theta(R_D)}^{undamaged} = \frac{1+\nu}{E} (p_0 - \sigma_{r(R_D)}) \quad (49)$$

کرنشهای مماسی بدست آمده از رابطه ۴۷ و ۴۹ با هم برابرند. با حل معادله حاصل $\sigma_{r(R_p)}^{2-3}$ در شعاع پلاستیک $R_D = R_p$ از رابطه ۵۰ به دست می آید:

$$\sigma_{r(R_p)}^{2-3} = \frac{p_0(1+\alpha-2\nu_D) + \nu_D A_{iD}}{\alpha + B_{iD}(1-\nu_D)} \quad (50)$$

که در آن:

$$\alpha = \frac{E_D(1+\nu)}{E(1+\nu_D)} \quad (51)$$

با داشتن این مقدار تنش مرزی، می توان توزیع تنش در نواحی آسیب دیده و آسیب ندیده را مشخص کرد (از جمله σ_i^{2-3}).

۶- تحلیل پوشش

تنشها و تغییرمکان پوشش را می توان از تئوری استوانه های جدار ضخیم در نظریه الاستیسیته به دست آورد

شامل موارد زیر است:

$$\sigma_{e\text{ intact}} = 35 \text{ MPa}, \quad m_{\text{intact}} = 10, \quad E_{\text{int act}} = 13 \text{ GPa}, \\ \nu_{\text{int act}} = 0.25$$

که در آن:

$$\sigma_{e\text{ intact}} \text{ مقاومت فشاری} \\ m_{\text{intact}} \text{ ثابت هوک و براون [۱۹]} \\ E_{\text{int act}} \text{ مدول الاستیسیته} \\ \nu_{\text{int act}} \text{ ضریب پواسون سنگ بکر}$$

رفتار توده سنگ الاستوپلاستیک ترد کامل است. بر این اساس از رابطه ۵۶ برای محاسبه GSI توده سنگ در ناحیه با مقاومت باقیمانده (GSI_r) استفاده می‌شود [۱۹]:

$$GSI_r = GSIe^{(-0.0134GSI)} \quad (۵۶)$$

با استفاده از رابطه فوق $GSI_r = 25.6$ به دست می‌آید.

در معیار گسیختگی هوک و براون برای اعمال آسیب‌دیدگی توده سنگ ناشی از حفاری بدون کیفیت از ضریب به هم خوردگی D استفاده می‌شود. این ضریب بین صفر برای حالت بدون آسیب‌دیدگی (حفاری با کیفیت) تا یک برای (حفاری بسیار نامطلوب تغییر می‌کند). برای استخراج پارامترهای معیار گسیختگی هوک و براون و مور - کولمب از روابط هوک و همکاران [۱۰] و برای استخراج مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ از رابطه دقیق‌تر هوک و دیدریکس [۲۰] استفاده شده است. در توده سنگ بدون آسیب ضریب به هم خوردگی $D=0$ در نظر گرفته می‌شود و در ناحیه آسیب دیده، آسیب‌دیدگی شدید ($D=1$) در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای مور کولمب از برازش خطی پوش گسیختگی هوک و براون در محدوده تنش نزدیک به تنش‌های اولیه توده سنگ به دست می‌آیند. در اینجا اتساع بر اساس روش هوک و همکاران [۲۱] تعیین می‌شود. بر این اساس در توده سنگ با کیفیت عالی ($GSI > 75$) زاویه اتساع برابر با $\Psi = \frac{\phi_i}{4}$ در نظر گرفته می‌شود، در توده سنگ با کیفیت متوسط ($25 < GSI < 75$) زاویه اتساع برابر با $\Psi = \frac{\phi_i}{8}$ در نظر گرفته می‌شود و در توده سنگ با کیفیت ضعیف ($GSI < 25$) زاویه اتساع برابر با $\Psi = 0$ در نظر گرفته می‌شود. خلاصه پارامترهای توده سنگ در جدول ۱ نمایش داده شده است.

تدریج کاسته می‌شود و برای تحلیل از حالت ۲ استفاده می‌شود (و همگرایی توده سنگ محاسبه می‌شود) تا جایی که σ_i به σ_i^{2-3} برسد. یعنی به ازای $\sigma_i^{2-3} < \sigma_i < p_{cr}$ از حالت دو تحلیل استفاده می‌شود.

برای ترسیم منحنی پاسخ زمین، محاسبات با روش تحلیل الاستیک برای مقادیر $\sigma_i \leq p_0$ شروع می‌شود. σ_i به تدریج کاسته می‌شود تا جایی که σ_i به p_{cr} برسد و به ازای هر مقدار σ_i همگرایی توده سنگ محاسبه می‌شود. حال σ_i به تدریج کاسته می‌شود و برای تحلیل از حالت ۲ استفاده می‌شود (و همگرایی توده سنگ محاسبه می‌شود) تا جایی که σ_i به σ_i^{2-3} برسد. یعنی به ازای $\sigma_i^{2-3} < \sigma_i < p_{cr}$ از حالت دو تحلیل استفاده می‌شود.

حال σ_i به تدریج کاسته می‌شود و برای تحلیل از حالت ۳ استفاده می‌شود (و همگرایی توده سنگ محاسبه می‌شود) تا جایی که σ_i به σ_i^{1-3} برسد. یعنی به ازای $\sigma_i^{1-3} < \sigma_i < \sigma_i^{2-3}$ از حالت دو تحلیل استفاده می‌شود.

حال σ_i به تدریج کاسته می‌شود و برای تحلیل از حالت ۱ استفاده می‌شود (و همگرایی توده سنگ محاسبه می‌شود) تا جایی که σ_i به فشار داخلی تعادل نهایی با پوشش برسد. یعنی به ازای $0 < \sigma_i < \sigma_i^{1-3}$ از حالت یک تحلیل استفاده می‌شود.

۸-۲- منحنی مشخصه پوشش

برای ترسیم منحنی مشخصه پوشش σ_i به تدریج افزوده می‌شود و تغییر مکان از رابطه ۵۵ (با در نظر گرفتن رابطه ۵۲) به دست می‌آید تا جایی که همگرایی نهایی در محل تماس پوشش و توده سنگ تامین شود.

۹- بررسی اثر ناحیه آسیب دیده بر تحلیل

در اینجا برای بررسی اثر ناحیه آسیب دیده بر اندرکنش پوشش - توده سنگ از روش تحلیل ارایه شده، استفاده می‌شود. یک تونل دایره‌ای با شعاع $r_i = 5 \text{ m}$ در یک توده سنگ نسبتاً ضعیف با $GSI = 50 \text{ MPa}$ (GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده سنگ است) [۱۰] در عمق ۳۷۰ متری حفاری می‌شود. وزن مخصوص توده سنگ به صورت متوسط ۲۷ کیلونیوتن بر مترمکعب است و بنابراین تنش‌های برجا در این عمق از توده سنگ برابر با $p_0 = 10 \text{ MPa}$ به دست می‌آید. پارامترهای سنگ بکر تشکیل‌دهنده این توده سنگ

جدول ۱- پارامترهای توده سنگ مورد بررسی

توده سنگ بدون آسیب (پارامتر اولیه)	توده سنگ بدون آسیب (پارامتر باقیمانده)	توده سنگ آسیب دیده (پارامتر اولیه)	توده سنگ آسیب دیده (پارامتر باقیمانده)	
۰	۰	۱	۱	ضریب به هم خوردگی (D)
۵۰	۲۵٫۶	۵۰	۲۵٫۶	GSI
۱٫۶۷	۰٫۷	۰٫۲۸۱	۰٫۴۹	پارامتر هوک و براون (m)
۰٫۰۰۳۹	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۰۲	۰٫۰۰۰۰۴	پارامتر هوک و براون (s)
۰٫۵۰۶	۰٫۵۳۰	۰٫۵۰۶	۰٫۵۳۰	پارامتر هوک و براون (a)
۱٫۱۵	۰٫۷۱	۰٫۵۸	۰٫۲۲۸	چسبندگی (c)، MPa
۳۵٫۹	۲۸٫۳	۲۱٫۹	۱۰٫۸	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)
۳۹۹۳		۸۰۶		مدول تغییرشکل پذیری (E)، GPa
۴٫۵	۴٫۵	۴٫۵	۴٫۵	زاویه اتساع (Ψ°)

پوشش بتنی با شعاع داخلی $r_0 = 4.7 m$ و پارامترهای الاستیک $E_c = 25 GPa$ و $\nu_c = 0.2$ و مقاومت فشاری تک محوری $\sigma_{cc} = 30 MPa$ بعد از یک همگرایی مجاز اولیه $\delta u_0 = 50 mm$ نصب می‌شود. در نتیجه با توجه به روابط ۵۲ و ۵۵ منحنی مشخصه پوشش از رابطه ۵۷ به دست می‌آید:

پوشش بتنی با شعاع داخلی $r_0 = 4.7 m$ و پارامترهای الاستیک $E_c = 25 GPa$ و $\nu_c = 0.2$ و مقاومت فشاری تک محوری $\sigma_{cc} = 30 MPa$ بعد از یک همگرایی مجاز اولیه $\delta u_0 = 50 mm$ نصب می‌شود. در نتیجه با توجه به روابط ۵۲ و ۵۵ منحنی مشخصه پوشش از رابطه ۵۷ به دست می‌آید:

$$u_r^{(mm)} = 3.059\sigma_i + 50 \quad (57)$$

بر مبنای روش تحلیل ارایه شده یک برنامه کامپیوتری تهیه شد. از این برنامه برای بررسی اثر آسیب‌دیدگی بر اندرکنش پوشش-توده سنگ استفاده می‌شود. خلاصه مهم‌ترین نتایج تحلیل در جدول ۲ ارایه شده است.

تحلیل برای سه شعاع آسیب دیدگی مختلف $R_D = 5 m$

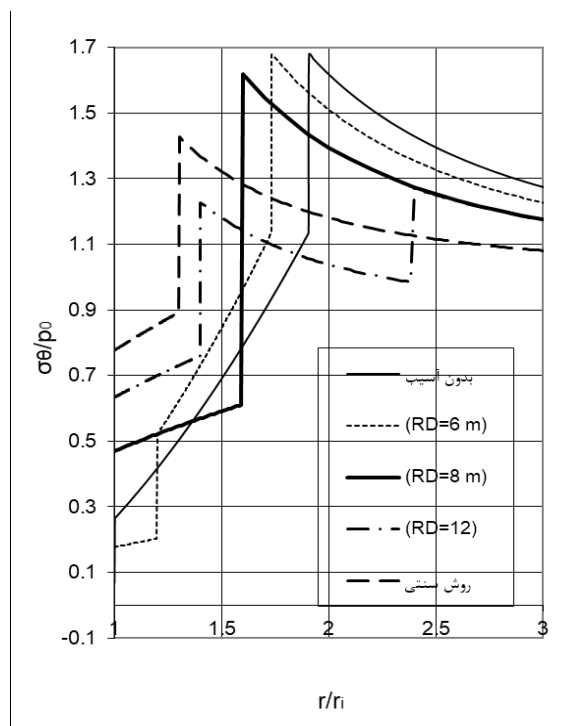
جدول ۲- خلاصه نتایج تحلیل اندرکنش

R_D	نوع تحلیل	شعاع پلاستیک (متر)	همگرایی نهایی (میلی‌متر)	تنش شعاعی بین پوشش و توده سنگ (مگاپاسکال)	تنش مماسی در سطح داخلی پوشش (مگاپاسکال)
۵	بدون آسیب	۹٫۵۳	۵۰٫۲۷	۰٫۹۳۸	۱٫۶
۶	حالت ۱	۶۶٫۸	۵۲٫۴	۰٫۸۳۴	۱۴٫۳
۸	حالت ۳	۸	۵۸٫۴	۲٫۸۴	۴۸٫۸
۱۲	حالت ۲	۷	۶۱٫۶	۳٫۹۶	۶۸
∞	روش سنتی	۶٫۵۱	۶۴٫۵	۴٫۹۳۹	۸۴٫۸

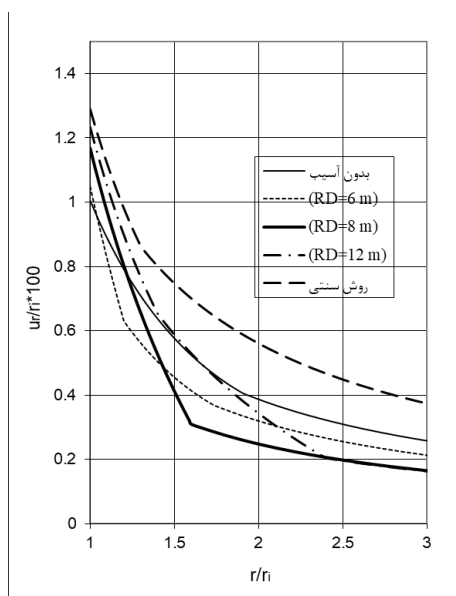
در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب تغییرات تنش‌های بی‌بعد شعاعی ($\frac{\sigma_r}{\sigma_i}$) و مماسی ($\frac{\sigma_\theta}{\sigma_i}$) و در شکل ۵ تغییرات همگرایی داخلی بی‌بعد ($[\frac{u_r}{r_i}]$) توده سنگ بر حسب فاصله بی‌بعد شعاعی نمایش داده شده است.

در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب تغییرات تنش‌های بی‌بعد شعاعی ($\frac{\sigma_r}{\sigma_i}$) و مماسی ($\frac{\sigma_\theta}{\sigma_i}$) و در شکل ۵ تغییرات همگرایی داخلی بی‌بعد ($[\frac{u_r}{r_i}]$) توده سنگ بر حسب فاصله بی‌بعد شعاعی نمایش داده شده است.

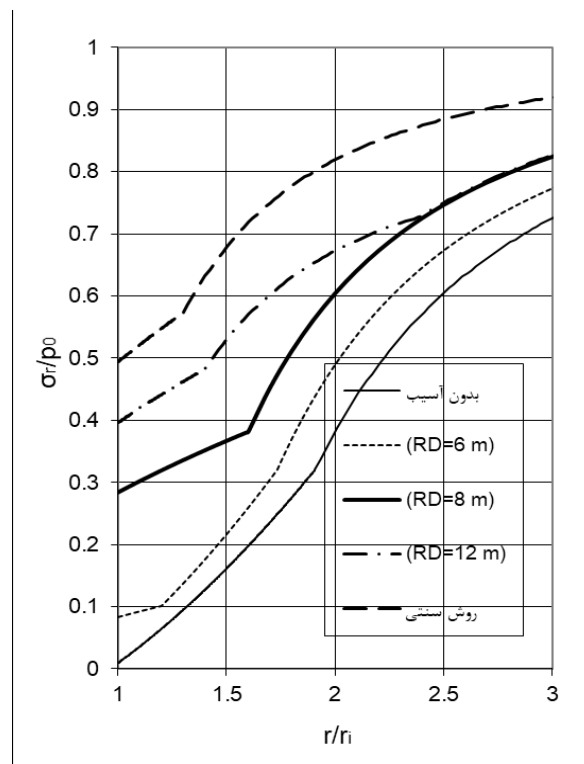
داخلی مشخص با افزایش شعاع آسیب‌دیدگی، شعاع پلاستیک نیز رشد می‌کند. نتایج اینجا روند معکوسی را نشان می‌دهد. دلیل این امر این است که با افزایش شعاع ناحیه آسیب‌دیده توده سنگ ضعیف می‌شود و در نتیجه سهم بار کمتری را از فشار هیدروستاتیک وارده تحمل می‌کند و در نتیجه شعاع ناحیه پلاستیک افزایش می‌یابد. در واقع در اینجا سهم بار بیشتری به پوشش وارد می‌شود که مطلوب نیست زیرا در بحث اندرکش پوشش - توده سنگ، توده سنگ به عنوان عامل اصلی باربری در نظر گرفته می‌شود و پوشش به عنوان یک عامل کمک‌کننده (ثانویه) و افزایش‌دهنده مقاومت توده سنگ (با افزایش محصورشدگی) در نظر گرفته می‌شود ولی در اینجا پوشش باید با افزایش شعاع آسیب‌دیدگی فشار بسیار بالایی را تحمل کند و تنش مماسی بسیار بالایی (که بسیار بزرگتر از مقاومت بتن است) در آن ایجاد می‌شود. مقایسه نتایج با حالتی که توده سنگ بدون آسیب در نظر گرفته شده است نیز نشان می‌دهد که آسیب‌دیدگی می‌تواند تاثیر بالایی روی پایداری تونل بگذارد و باید تا حد امکان جلوی آن گرفته شود و در صورت رخ دادن آن، باید در تحلیل لحاظ شود و صرف نظر نمودن از آن ایمن نخواهد بود ولی اینکه آسیب‌دیدگی به کل توده سنگ اعمال شود (روش سنتی) نیز نتایج به شدت محافظه‌کارانه‌ای می‌دهد که مطلوب نیست.



شکل ۴- تنش‌های بی‌بعد مماسی $\frac{\sigma_{\theta}}{p_0}$ در توده سنگ پیرامون تونل برای شعاع آسیب‌دیدگی مختلف

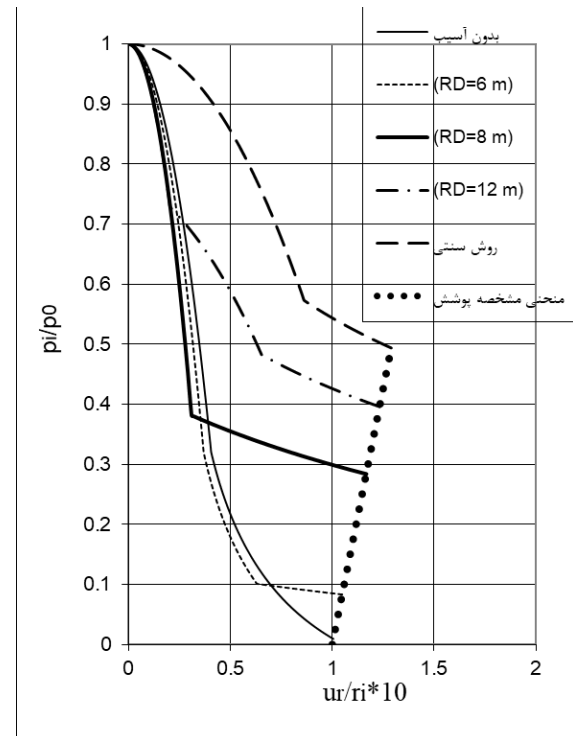


شکل ۵- تغییر مکان بی‌بعد شعاعی $\frac{u_r}{r_i} [\%]$ در توده سنگ پیرامون تونل برای شعاع آسیب‌دیدگی مختلف.



شکل ۳- تنش‌های بی‌بعد شعاعی $\frac{\sigma_r}{p_0}$ در توده سنگ پیرامون تونل برای شعاع آسیب‌دیدگی مختلف.

- Numer. Anal. Meth. Geomech. 27, 1153–1185.
- Wang, Y., 1996. "Ground response of circular tunnel in poorly consolidated rock". J. Geotech. Eng. ASCE 122, 703–708.
 - 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 (5), 777–809.
 - Sharan, S.K., 2003. "Elastic–brittle–plastic analysis of circular openings in Hoek–Brown media". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 40, 817–824.
 - Park, K.H., Kim, Y.J., 2006. "Analytical solution for a circular opening in an elastic–brittle–plastic rock". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43, 616–622.
 - Carranza-Torres, C., 2004. "Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek–Brown failure criterion". In: Hudson, J.A., Xia-Ting, F. (eds.), Proceedings of ISRM SINOROCK 2004 Symposium, China. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41(3) 480–481.
 - 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)
 - Zareifard, M.R., Fahimifar, A. 2015. "Elastic–Brittle–Plastic Analysis of Circular Deep Underwater Cavities in a Mohr–Coulomb Rock Mass Considering Seepage Forces", International Journal of Geomechanics. 15(5)
 - Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, 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, 267–273
 - Itasca, 2004. "PFC2D" 3.10. Itasca Consulting Group, Minnesota.
 - Zareifard, M.R., Fahimifar, A. Tunnel. Underg. Space Technol., "Analytical solutions for the stresses and deformations of deep tunnels in an elastic-brittle-plastic rock mass considering the damaged zone", Pages 186–196, 2017
 - Hedayat, A, Weems, J., 2019, "The Elasto-



شکل ۶- منحنی‌های روش کنترل همگرایی برای شعاع آسیب دیدگی مختلف.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تحلیلی برای محاسبات اندرکنش پوشش- توده سنگ در تونل حفاری شده در توده سنگ با آسیب دیدگی ارائه شد. رفتار توده سنگ الاستوپلاستیک ترد و با معیار گسیختگی مور-کولمب در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که آسیب دیدگی ممکن است تاثیر زیادی بر پایداری داشته باشد و در صورت رخ دادن آسیب، نقش نامطلوب آن باید در نظر گرفته شود. در هر حال اعمال آسیب دیدگی به کل توده سنگ در تحلیل نیز قابل قبول نیست و بسیار محافظه کارانه است. تشکیل ناحیه آسیب دیده و رشد آن باعث انتقال بار از توده سنگ به پوشش و به شدت باعث افزایش تنش‌های ایجاد شده در پوشش می‌شود، بنابراین توصیه می‌شود که در فرآیند اجرای تونل‌ها به نقش توده سنگ به عنوان عامل اصلی باربر توجه و از آسیب دیدگی آن جلوگیری شود.

منابع

- Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B., Hoek, E., 1983; "Ground response curves for rock tunnels". J. Geotech. Eng. ASCE 109, 15–39.
- Alonso, E., Alejano, L.R., Varas, F., Fdez-Manin, G., Carranza-Torres, C., 2003. "Ground response curves for rock masses exhibiting strainsoftening behavior". Int. J.

- curve of deep circular tunnel in rock mass exhibiting Hoek–Brown strain-softening behaviour considering the dead weight loading*". European Journal of Environmental and Civil Engineering, , DOI: 10.1080/19648189.2019.1632745.
18. Timoshenko S. P., Goodier J.N., 1982. "Theory of Elasticity, McGraw-Hill", New York.
 19. Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y., Minamic, M., 2007. "Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 44 (2), 247–265.
 20. Hoek, E. and Diederichs, M.S. 2006. "Empirical estimation of rock mass modulus". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 203–215.
 21. Hoek, E., Brown, E.T., 1997. "Practical estimates of rock mass strength". Int. J. Rock Mech. Sci. Geom. Abstr. 34 (8), 1165–1187.
 14. Ghorbani, A., Hasanzadehshooili, H., 2019. "A comprehensive solution for the calculation of ground reaction curve in the crown and sidewalls of circular tunnels in the elastic-plastic-EDZ rock mass considering strain softening", Tunnel. Undergr. Space Tech., 84: 413-431.
 15. González-Cao J., Alejano L.R., Alonso E., Bastante F.G., "Convergence-confinement curve analysis of excavation stress and strain resulting from blast-induced damage", Tunnelling and Underground Space Technology 73 (2018) 162–169
 16. Saiang, D. and Nordlund, E., 2009. "Numerical Analyses of the Influence of the Blast-Induced Damaged Rock Around Shallow Tunnels in Brittle Rock". Rock Mechanics & Rock Engineering, 42-421.
 17. Zareifard, M.R., 2019. "Ground response