

محاسبه منحنی واکنش زمین، حداقل فشار نگهداری لازم و حداکثر کرنش مجاز در تاج تونل

حمید محمدی^۱، حسین جلالی فر^۲، محمد علی ابراهیمی فرسنگی^{۳*}، علیرضا احمدی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان h.mohammadi@kgut.ac.ir
- ۲- دانشیار بخش مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان jalalifar@uk.ac.ir
- ۳- دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان maebrahimi@uk.ac.ir
- ۴- استادیار بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان a.ahmadi@kgut.ac.ir

(دریافت ۱۹ خرداد ۱۳۹۳، پذیرش ۷ بهمن ۱۳۹۳)

چکیده

یکی از خصوصیات مهم زون آسیب دیده ناشی از حفاری که در اغلب روش‌های تحلیل پایداری کم‌تر به آن توجه می‌شود، اثر نیروهای حجمی ناشی از وزن توده سنگ شکسته شده است. از این رو هدف اصلی تحقیق حاضر، محاسبه اثر نیروهای حجمی بر روند تغییرات تنش‌های القایی و جابجایی‌های اطراف تونل‌های دایروی شکل و همچنین محاسبه فشار نگهداری است. بنابراین با در نظر گرفتن معیار شکست موهر-کولمب و با استفاده از روش حل تحلیلی، یک حل فرم بسته بر مبنای قانون جریان ناهمراه برای محاسبه منحنی واکنش زمین در تاج تونل به دست آمده و به وسیله دو سری داده معتبر، اعتبار سنجی شد. بررسی نمودار تنش‌های القایی نشان داد که تغییرات آن‌ها در دیواره و تاج تونل بسیار متفاوت بوده به طوری که شکل زون آسیب دیده حتی تحت میدان تنش بر جای هیدرواستاتیک نیز غیر دایروی است. همچنین بر مبنای روش به دست آمده منحنی واکنش زمین در تاج تونل با منحنی واکنش زمین در دیواره مقایسه شد و دو مفهوم جدید "حداقل فشار نگهداری لازم" و "حداکثر کرنش مجاز" به همراه رابطه ریاضی آن‌ها به دست آمد. طبق نتایج مشخص شد که با کاهش زاویه اتساع، حداکثر کرنش مجاز نیز کاهش یافته و بایستی سریع‌تر سیستم نگهداری نصب شود.

کلمات کلیدی

زون آسیب دیده ناشی از حفاری، نیروی حجمی، تنش القایی، منحنی واکنش زمین، زاویه اتساع

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین عواملی که در بررسی پایداری و محاسبه سیستم نگهداری مناسب برای تونل‌ها بایستی به آن توجه شود، خصوصیات زون آسیب دیده ناشی از حفاری^۱ (EDZ) است که در اثر فرآیند حفاری در اطراف تونل به وجود می‌آید. از خصوصیات بارز EDZ می‌توان به مواردی همچون تغییرات محسوس و دائم در میدان تنش‌ها و جابجایی‌ها، تغییر در خصوصیات رفتاری توده سنگ (پلاستیک، شکننده، کرنش نرم شوندگی و غیره) و تغییر در خصوصیات مقاومتی توده سنگ اشاره کرد. در خارج از EDZ نیز تغییرات در میدان تنش‌ها و جابجایی‌ها وجود دارد اما از شدت بسیار پایین‌تری برخوردار هستند به طوری که تأثیر قابل توجهی بر روی شرایط پایداری تونل نخواهند داشت. به این محیط، زون اغتشاش یافته ناشی از حفاری^۲ (EdZ) گفته می‌شود. بایستی توجه داشت اگر بنا به نوع روش حفاری تونل، اضافه حفاری یا زون آسیب دیده ناشی از انفجار^۳ (BDZ) تشکیل شود، این زون بخشی از EDZ خواهد بود [۱].

یکی از روش‌هایی که با استفاده از آن می‌توان شرایط پایداری تونل و نحوه عکس العمل زمین با تونل را مورد بررسی قرار داد، استفاده از منحنی واکنش زمین^۴ (GRC) است. تاکنون روش‌های بسیار زیادی بر مبنای معیار شکست‌های مختلف برای محاسبه و رسم منحنی واکنش زمین در دیواره تونل ارائه شده‌اند در حالی که تعداد بسیار کمی به بحث در مورد اثر نیروهای حجمی ناشی از وزن توده سنگ شکسته شده در داخل EDZ بر روی GRC پرداخته‌اند [۷-۲].

طبق روند منحنی واکنش زمین در دیواره تونل (GRC^{wall})، حداکثر شعاع EDZ و متعاقب آن حداکثر جابجایی شعاعی وقتی اتفاق می‌افتد که فشار داخلی تونل (فشار نگهداری) صفر است اما برای تاج تونل روند به گونه‌ای دیگر است به طوری که تعدادی از محققین نشان دادند در تونل‌های حفر شده در محیط‌های ضعیف، نیروهای حجمی ناشی از وزن توده سنگ شکسته شده در داخل EDZ، بر روی جابجایی‌های EDZ تأثیر قابل توجهی دارند و باعث تغییر روند منحنی واکنش زمین در تاج تونل (GRC^{crown}) نسبت به دیواره می‌شوند و بنابراین می‌بایست اثر این نیروها در محاسبه فشار نگهداری در تاج تونل لحاظ شود [۸-۱۱]. اغلب GRC^{crown} با اضافه کردن فشاری به اندازه ضخامت EDZ در دیواره تونل به فشار داخلی بخش

غیرالاستیک GRC^{wall} بدست می‌آید و در واقع فرض بر این است که اندازه شعاع EDZ در تاج تونل برابر با مقدار آن در دیواره بوده و وزن این زون بدون لحاظ کردن خصوصیات مقاومتی آن به طور کامل به تاج تونل وارد می‌شود. اما روسف نشان داد که اعمال تمامی وزن EDZ به عنوان بار مرده به فشار نگهداری (فشار داخلی تونل)، عملی محافظه کارانه است و در واقع بایستی به خصوصیات مقاومتی توده سنگ آسیب دیده در داخل EDZ نیز توجه شود. همچنین وی نشان داد که در تاج تونل بایستی در محاسبه تنش برجا، اندازه شعاع EDZ لحاظ شود [۱۱]. اما در روش روسف نقایصی وجود دارد که عبارتند از: ۱) عدم توجه به اثر نیروهای حجمی بر اندازه و شکل EDZ، ۲) عدم مطالعه اثر نیروی وزن EDZ بر روی بخش الاستیک منحنی واکنش زمین و مقدار فشار بحرانی، ۳) محاسبه جابجایی‌ها فقط بر مبنای قانون جریان همراه^۵ (۴) مشخص نشدن میزان اهمیت GRC^{crown} و GRC^{wall} در تحلیل پایداری.

هدف از انجام این تحقیق، با در نظر گرفتن اثر نیروهای حجمی ناشی از وزن توده سنگ شکسته شده داخل EDZ، ۱) توسعه روش روسف با در نظر گرفتن قانون جریان ناهمراه^۶ به منظور تأثیر زاویه اتساع، ۲) بررسی علت تفاوت‌ها در روند تغییرات تنش‌های القایی در تاج و دیواره تونل، ۳) بررسی میزان اهمیت GRC^{crown} و GRC^{wall} با توجه به خصوصیات EDZ است. برای رسیدن به این هدف، با در نظر گرفتن یک تونل دایروی شکل حفاری شده در توده سنگ ضعیف و همچنین معیار شکست موهر-کولمب، ابتدا معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان تنش-های اطراف تونل استخراج شده و سپس با استفاده از روش حل تحلیلی، یک روش حل فرم بسته برای میدان تنش‌های القایی و میدان جابجایی‌ها توسعه داده خواهد شد و بر مبنای دو سری داده به دست آمده از مطالعات گذشته اعتبار سنجی می‌شود. در ادامه، با استفاده از روش حل به دست آمده، میزان اهمیت زاویه اتساع بررسی شده و سپس دو مفهوم "حداقل فشار نگهداری لازم" و "حداکثر کرنش مجاز" به همراه فرمولاسیون ریاضی آنها معرفی می‌شوند. در نهایت با استفاده از GRC^{crown} ارتباط تغییرات زاویه اتساع بر روی دو مفهوم تعریف شده بررسی می‌شود.

۲- معادلات میدان تنش‌ها

شکل ۱ مقطعی عرضی از یک تونل عمیق دایروی با شعاع R_0 را

تاج، مشترک است). مرحله دوم، محاسبه اثر نیروهای حجمی داخل EDZ در تاج تونل است که برای محاسبه معادله تعادل تنش‌ها، از المان ۲، قرار گرفته در داخل EDZ استفاده می‌شود. معادلات تعادل در مختصات قطبی برای المان ۱ به صورت زیر نوشته می‌شوند:

(۳)

$$\left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr\right)(r + dr)d\theta - \sigma_r r d\theta - \left(\sigma_\theta + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} d\theta\right)dr \sin \frac{d\theta}{2} - \sigma_\theta dr \sin \frac{d\theta}{2} + \left(\tau_{r\theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} d\theta\right)dr \cos \frac{d\theta}{2} - \tau_{r\theta} dr \cos \frac{d\theta}{2} = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} = 0 \quad (۴)$$

با توجه به کوچک بودن $d\theta$ دو رابطه $\cos(d\theta/2) \approx 1$ و $\sin(d\theta/2) \approx d\theta/2$ برقرار هستند. همچنین اگر از مقادیر کوچک در معادله ۳ صرف نظر شود و طرفین رابطه بر $rdrd\theta$ تقسیم شوند، رابطه ۳ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (۵)$$

با توجه به اینکه مقطع تونل، دایروی بوده و میدان تنش‌ها هیدرواستاتیک است، توزیع تنش‌ها نسبت به محور گذرنده از مبدا O (محور عمود بر صفحه $x-y$) متقارن هستند و اجزاء تنش نسبت به θ نمی‌توانند تغییری داشته باشند. بنابراین سمت چپ رابطه ۴ صفر شده و رابطه ۵ به عنوان معادله تعادل حاکم بر المان ۱ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (۶)$$

بر خلاف المان ۱، از آنجایی که المان ۲ در داخل EDZ قرار گرفته است، نیروهای حجمی ناشی از وزن توده سنگ شکسته شده به آن اعمال می‌شوند و بنابراین در مختصات قطبی، معادلات تعادل برای المان ۲ به صورت روابط ۷ و ۸ هستند:

نشان می‌دهد که در اطراف آن یک زون آسیب دیده ناشی از حفاری (EDZ) به شعاع R_{EDZ} تشکیل شده است. همچنین فشار داخلی P_i نماینده فشار نگهداری است و میدان تنش برجا، شرایط هیدرواستاتیک دارد. مطابق با تحقیقات گذشته، برای محاسبه شعاع EDZ، ابتدا بایستی معادله حاکم بر میدان تنش‌های القایی تعیین شود که لازم است المانی بر روی فصل مشترک EDZ-EdZ انتخاب شود [۷-۲]. تنش σ_0 معرف مقدار تنش برجا بر روی المان قرار گرفته در فصل مشترک EDZ-EdZ است، به طوری که مقدار آن با گسترش EDZ در دیواره تونل مستقل از شعاع EDZ بوده و فقط تابعی از وزن واحد حجم توده سنگ و عمق تونل از سطح زمین تا مرکز تونل است ($H+R_0$). در حالیکه مقدار آن در تاج تونل مطابق با رابطه ۱، تابعی از شعاع EDZ نیز است، بنابراین مقدار σ_0 در دیواره تونل همیشه از مقدار آن در تاج بزرگ‌تر خواهد بود. توجه شود که این شرایط به هیچ عنوان حالت هیدرواستاتیک تنش‌ها را نقض نمی‌کند به دلیل اینکه شرط هیدرواستاتیک بودن تنش‌ها، مربوط به برابر بودن تنش‌های قائم و افقی در یک عمق مشخص است در حالیکه مقدار σ_0 در تاج و دیواره مربوط به دو عمق متفاوت هستند.

$$\sigma_0 = \gamma(H + R_0 - R_{EDZ}) \quad (۱)$$

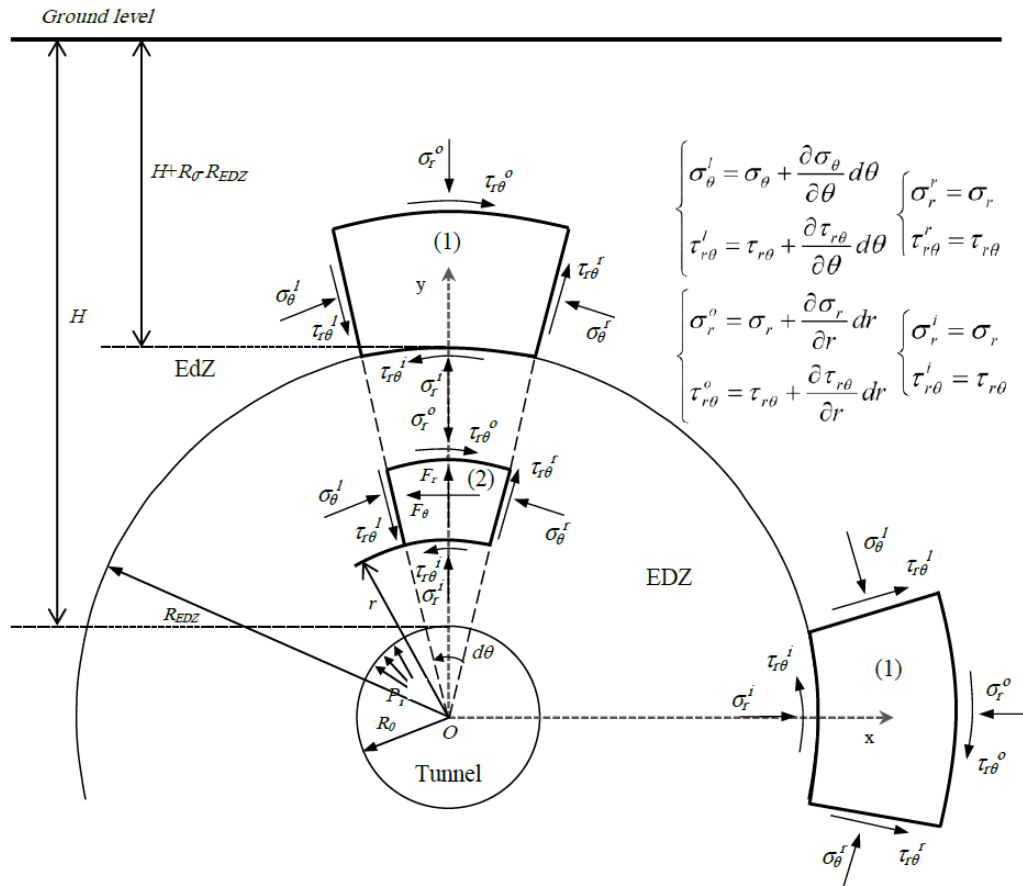
در این رابطه، γ وزن واحد حجم توده سنگ سالم و H نشان دهنده عمق تونل از سطح زمین تا تاج تونل است. همچنین مطابق با رابطه ۲ فرض می‌شود معیار شکست حاکم بر محیط، معیار شکست موهر-کولمب است [۳].

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + \sigma_{cm} \quad (۲)$$

$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad \sigma_{cm} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

در رابطه ۲، σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل، σ_{cm} مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ، c و φ به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای توده سنگ سالم هستند [۳].

برای محاسبه معادلات تعادل حاکم در میدان تنش‌های القایی در بالای تاج تونل، دو مرحله محاسباتی بایستی لحاظ شود: در مرحله اول اندازه EDZ تعیین می‌شود که معادله حاکم (تعادل) مربوطه بر مبنای المان ۱ به دست می‌آید (المان ۱ برای دیواره و



شکل ۱: مقطع عرضی یک تونل عمیق دایروی شکل به همراه مولفه‌های تنش‌های القایی

در این روابط، γ_r وزن واحد حجم توده سنگ شکسته شده است و θ زاویه‌ای است که نسبت به افق سنجدیده می‌شود. مقدار اثر هر کدام از مولفه‌های نیروهای حجمی، بنا به شرایط ثقلی که دارند، بر روی هر نقطه از پیرامون تونل متفاوت است به طوری که در راستای افق ($\theta=0$)، مولفه شعاعی صفر و مولفه مماسی حداکثر بوده و در مقابل در راستای قائم ($\theta=90$)، مولفه مماسی صفر و مولفه شعاعی حداکثر است.

برای المان ۲ نیز مطابق المان ۱، شرایط توزیع تنش متقارن است و اجزاء تنش نسبت به θ نمی‌توانند تغییری داشته باشند و بنابراین سمت چپ رابطه ۸ برابر با صفر شده و رابطه ۷ به عنوان معادله تعادل حاکم بر المان ۲ به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + F_r = 0 \quad (11)$$

با توجه به اینکه در معادله تعادل حاکم، مولفه مماسی نیروهای حجمی وجود ندارد و فقط مولفه شعاعی آن تأثیر گذار است

$$\begin{aligned} & \left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr \right) (r + dr) d\theta - \sigma_r r d\theta \\ & - \left(\sigma_\theta + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} d\theta \right) dr \sin \frac{d\theta}{2} - \sigma_\theta dr \sin \frac{d\theta}{2} \\ & + \left(\tau_{r\theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} d\theta \right) dr \cos \frac{d\theta}{2} - \tau_{r\theta} dr \cos \frac{d\theta}{2} \\ & + F_r r dr d\theta = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} + F_\theta = 0 \quad (8)$$

در روابط فوق، F_r و F_θ به ترتیب مولفه‌های شعاعی و مماسی نیروهای حجمی هستند که با روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۳].

$$F_r = \gamma_r \sin \theta \quad (9)$$

$$F_\theta = \gamma_r \cos \theta \quad (10)$$

مجموع محاسبه شده با استفاده از معیار شکست:

$$\sigma_{\theta} + \sigma_r = (1+k)\sigma_{r=R_{EDZ}} + \sigma_{cm} \quad (18)$$

مجموع حاصل از روابط ۱۶ و ۱۷:

$$\sigma_{\theta} + \sigma_r = 2\sigma_0 \quad (19)$$

با مساوی قرار دادن روابط ۱۸ و ۱۹ با یکدیگر و با استفاده از رابطه ۱، معادله‌ای برای محاسبه مقدار تنش شعاعی در فصل مشترک EDZ-EdZ در تاج تونل به صورت رابطه ۲۰ بدست می‌آید که حل آن مطابق با رابطه ۲۱ است.

$$2(\gamma(H + R_0 - R_{EDZ})) = (1+k)\sigma_{r=R_{EDZ}} + \sigma_{cm} \quad (20)$$

$$\sigma_{r=R_{EDZ}} = \frac{2(\gamma(H + R_0 - R_{EDZ})) - \sigma_{cm}}{1+k} \quad (21)$$

رابطه ۲۱ تابعی از شعاع EDZ است. از طرفی مقدار تنش شعاعی در فصل مشترک EDZ-EdZ با جانشینی شعاع EDZ به جای r در رابطه ۱۵ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma_{r=R_{EDZ}} = \frac{-\sigma_{cm}}{k-1} + \frac{R_{EDZ}^{k-1} \left(P_{il} + \frac{\sigma_{cm}}{k-1} \right)}{R_0^{k-1}} \quad (22)$$

حال با مساوی قرار دادن روابط ۲۱ و ۲۲ با یکدیگر، شعاع EDZ به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{EDZ} = R_0 \left(\frac{\left(\frac{2(\gamma(H + R_0 - R_{EDZ})) - \sigma_{cm}}{1+k} + \frac{\sigma_{cm}}{k-1} \right)^{\frac{1}{k-1}}}{\left(P_{il} + \frac{\sigma_{cm}}{k-1} \right)} \right) \quad (23)$$

همچنین با استفاده از رابطه ۲۳، رابطه ۲۴ برای محاسبه P_{il} به دست می‌آید. طبق این رابطه، وقتی که شعاع EDZ حداکثر مقدار خود را دارد، مقدار P_{il} برابر با صفر است و وقتی که شعاع EDZ برابر با شعاع تونل باشد، EDZ تشکیل نشده و مقدار P_{il} حداکثر است.

رابطه ۲۴ نشان می‌دهد که چگونه فشار فعال بر روی فصل مشترک EDZ-EdZ از طریق گذر از EDZ به سیستم نگهداری نصب شده در جداره تونل منتقل می‌شود و به همین دلیل با افزایش شعاع EDZ، مقدار P_{il} کاهش می‌یابد.

بنابراین در تاج تونل (راستای شعاعی منطبق بر راستای قائم)، مولفه شعاعی حداکثر مقدار خود را دارد. در این تحقیق تمرکز بر روی تاج تونل است و بنابراین با در نظر گرفتن مقدار θ برابر ۹۰ درجه، رابطه ۱۱ به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} + \gamma_r = 0 \quad (12)$$

۳- حل معادلات حاکم

۳-۱- المان ۱

معیار شکست موهر-کولمب که بوسیله معادله ۲ معرفی شد، در مختصات قطبی به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\sigma_{\theta} = k\sigma_r + \sigma_{cm} \quad (13)$$

با جایگزینی رابطه ۱۳ در رابطه ۶، معادله دیفرانسیلی تغییرات تنش شعاعی در فصل مشترک EDZ-EdZ بدست می‌آید (رابطه ۱۴). شرایط مرزی برای حل این معادله عبارت است از: در فاصله شعاعی $r=R_0$ مقدار تنش شعاعی برابر P_{il} است (رابطه ۱۴). نماینده فشار توزیع شده در جداره تونل برای کنترل تنش‌های خارج از EDZ است.

حل این معادله با رابطه ۱۵ نشان داده شده است. همچنین تنش مماسی نیز می‌تواند با جایگزینی رابطه ۱۵ در رابطه ۱۳ محاسبه شود.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(1-k)\sigma_r - \sigma_{cm}}{r} = 0 \quad (14)$$

$$\sigma_r = \frac{-\sigma_{cm}}{k-1} + \frac{r^{k-1} \left(P_{il} + \frac{\sigma_{cm}}{k-1} \right)}{R_0^{k-1}} \quad (15)$$

در فواصل شعاعی $r \geq R_{EDZ}$ تنش‌های شعاعی و مماسی از روابط زیر قابل محاسبه هستند [۱۴].

$$\sigma_r = \sigma_0 - \left(\frac{R_{EDZ}}{r} \right)^2 (\sigma_0 - \sigma_{r=R_{EDZ}}) \quad (16)$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_0 + \left(\frac{R_{EDZ}}{r} \right)^2 (\sigma_0 - \sigma_{r=R_{EDZ}}) \quad (17)$$

در روابط فوق، $\sigma_{r=R_{EDZ}}$ نشان دهنده تنش شعاعی در فصل مشترک EDZ-EdZ است و برای محاسبه آن از روش مجموع اجزاء تنش استفاده می‌شود. در فصل مشترک EDZ-EdZ دو رابطه برای نشان دادن مجموع تنش‌های شعاعی و مماسی وجود دارد که به صورت زیر نوشته می‌شوند:

شعاعی کل در داخل EDZ، با جمع کردن مقدار بدست آمده از روابط ۱۵ و ۲۷ برای هر r مشخص، ($R_0 \leq r \leq R_{EDZ}$) حاصل می‌شود. برای محاسبه تنش مماسی کل نیز ابتدا بایستی با جایگزینی مقدار بدست آمده از رابطه ۱۵ در رابطه ۲ و همچنین مقدار بدست آمده از رابطه ۲۷ در رابطه ۲۵، مقادیر تنش مماسی متناظر با تنش های شعاعی به دست آید و سپس با یکدیگر جمع شوند.

$$P_{i2} = \frac{-\sigma'_{cm}(k'-2) + R_0\gamma(k'-1)}{(k'-1)(k'-2)} - \left(\frac{R_{EDZ}^{1-k'}}{R_0^{1-k'}} \right) \left(\frac{-\sigma'_{cm}(k'-2) + R_{EDZ}\gamma(k'-1)}{(k'-1)(k'-2)} \right) \quad (28)$$

۴- محاسبه فشار نگهداری

فشار فعال بر روی سیستم نگهداری برابر با فشار داخلی بوده و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_i = P_{i1} + P_{i2} \quad (29)$$

مطابق با تحقیقات گذشته، اگر ظرفیت باربری سیستم نگهداری اعمال شده کم‌تر از فشار داخلی محاسبه شده باشد، جابجایی‌ها افزایش خواهند یافت به طوری که اندازه شعاع EDZ محدود به مقدار محاسبه شده از رابطه ۲۳ نشده و تا وقتی که تنش شعاعی در فصل مشترک ($\sigma_{r=R_{EDZ}}$) بزرگ‌تر از صفر باشد، به طور مداوم رشد می‌کند [۱۱]. بنابراین با جایگزینی رابطه ۱ در رابطه ۲۱ و سپس مساوی قرار دادن آن با صفر، مقدار حداکثر شعاع EDZ مطابق با رابطه ۳۰ محاسبه می‌شود. در این شرایط در تاج تونل، سست شدگی اتفاق افتاده و تونل دچار ریزش می‌شود.

بایستی توجه داشت که در محاسبه P_{i1} با استفاده از معادله ۲۴، مقدار شعاع EDZ بین شعاع تونل و حداکثر مقدار بدست آمده از معادله ۲۳ تغییر می‌کند. برای مقادیر بزرگ‌تر از مقدار بدست آمده از معادله ۲۳، P_{i1} منفی می‌شود که هیچ گونه مفهوم مهندسی ندارد و منطقی است که فرض شود در مقدار صفر باقی می‌ماند. اما بر خلاف P_{i1} ، در محاسبه P_{i2} ، مقدار شعاع EDZ بین شعاع تونل و حداکثر مقدار ممکنه (رابطه ۳۰) که می‌تواند در اثر رشد EDZ اتفاق بیفتد، تغییر خواهد کرد. لازم به تذکر است که رابطه ۳۰ بر مبنای اصول محاسباتی حاصل شده و در عمل ممکن است مقدار ریزش حداکثر کم‌تر از مقدار بدست آمده از رابطه ۳۰ شود.

$$P_{i1} = \left(\frac{R_0}{R_{EDZ}} \right)^{k-1} \times \left(\frac{2(\gamma(H + R_0 - R_{EDZ})) - \sigma_{cm}}{1+k} \right) - \frac{\sigma_{cm}}{k-1} \quad (24)$$

۲-۲-۳- المان ۲

برای حل رابطه ۱۲، مشابه المان ۱، بایستی از معیار شکست استفاده شود. اغلب خواص مقاومتی توده سنگ شکسته شده (داخل EDZ) با خواص مقاومتی توده سنگ سالم (خارج از EDZ) متفاوت است و به مقدار باقیمانده خود می‌رسند [۱۱]. بنابراین معیار شکست موهر-کولمب بایستی بر اساس خواص مقاومتی باقیمانده به صورت رابطه ۲۵ بازنویسی شود. در این رابطه اندیس r نشان‌دهنده حالت باقیمانده برای هر کدام از پارامترها است.

$$\sigma_{\theta} = k'\sigma_r + \sigma'_{cm} \quad (25)$$

حال با جایگزینی رابطه ۲۵ در رابطه ۱۲، معادله دیفرانسیلی محاسبه تنش شعاعی در داخل EDZ مطابق با رابطه ۲۶ بدست می‌آید. المان ۲ فقط تنش‌های داخل EDZ را مدل می‌کند به طوری که بر روی مرز بین EDZ و EdZ فاقد هرگونه تأثیری از تنش های خارج از EDZ است. بنابراین شرایط مرزی برای حل این معادله عبارت است از: در فاصله شعاعی $r=R_{EDZ}$ مقدار تنش شعاعی برابر با صفر است.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(1-k')\sigma_r - \sigma'_{cm}}{r} + \gamma_r = 0 \quad (26)$$

رابطه ۲۷، حل معادله داده شده در رابطه ۲۶ است.

(۲۷)

$$\sigma_r = \frac{-\sigma'_{cm}(k'-2) + r\gamma(k'-1)}{(k'-1)(k'-2)} - \left(\frac{R_{EDZ}^{1-k'}}{r^{1-k'}} \right) \left(\frac{-\sigma'_{cm}(k'-2) + R_{EDZ}\gamma(k'-1)}{(k'-1)(k'-2)} \right)$$

در روند حل بالا، چنانچه مقدار r برابر با شعاع تونل در نظر گرفته شود، فشار ناشی از وزن توده سنگ شکسته شده در داخل EDZ که بر روی تاج تونل فعال است، مطابق با رابطه ۲۸ بدست می‌آید (P_{i2}). در واقع، P_{i2} خصوصیات مقاومتی توده سنگ شکسته شده را به همراه وزن آن در نظر می‌گیرد و بنابراین مقدار آن با افزایش شعاع EDZ تغییر می‌کند. همچنین تنش

$$K_{\psi} = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (32)$$

$$R_{EDZ,Max} = H + R_0 - \frac{2c \cos \varphi}{2\gamma(1 - \sin \varphi)} \quad (30)$$

۶- اعتبارسنجی روش

برای اعتبارسنجی روش به دست آمده، از دو سری داده ارائه شده توسط روسف [۱۱] مطابق با جدول ۱ برای رسم GRC^{crown} استفاده شده است.

قابل ذکر است تفاوت اصلی حل ارائه شده با حل روسف در کاربرد قانون جریان نا همراه به منظور در نظر گرفتن زوایای مختلف اتساع است، بنابراین برای قانون جریان همراه، GRC^{crown} بدست آمده برای هر دو سری داده مطابق با شکل ۲ همخوانی کامل با روش حل روسف دارند.

در تحقیق روسف برای هر دو سری داده، فرض شده است که زاویه اتساع برابر با مقدار زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ است، در حالی که چنین فرضی طبق نتایج هوک و براون صحیح نیست. طبق نظر هوک و براون، برای توده سنگ‌های با کیفیت خیلی خوب ($GSI \geq 75$) مقدار زاویه اتساع برابر با $\varphi/4$ ، برای توده سنگ‌های با کیفیت متوسط ($25 < GSI < 75$) و $\varphi/8$ و برای توده سنگ‌های با کیفیت پایین ($GSI \leq 25$) صفر است.

مقدار GSI برای سری داده‌های ۱ و ۲ به ترتیب برابر با ۱۸ و ۲۵ است، بنابراین هر دو در رده توده سنگ ضعیف قرار گرفته و صحیح‌تر آن است که زاویه اصطکاک آن‌ها صفر در نظر گرفته شود. در شکل ۳ مقایسه‌ای بین منحنی واکنش زمین در تاج تونل برای هر دو سری داده با در نظر گرفتن قانون جریان همراه ($\psi = \varphi$) و قانون جریان ناهمراه ($\psi = 0$) نشان داده شده است که به تفاوت‌های آن در بخش ۷-۲-۴ اشاره خواهد شد.

۷- بحث

۷-۱- تنش‌های القایی

در شکل ۴ تغییرات تنش‌های القایی اطراف تونل نسبت به فاصله شعاعی برای هر دو سری داده در تاج تونل و دیواره در شرایط تونل فاقد نگهداری و عدم سست شدگی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات تنش‌های القایی در تاج و دیواره تونل تفاوت‌های زیادی دارند، بنابراین برای بررسی دقیق تغییرات تنش‌های القایی در دیواره و تاج تونل، یک نمودار شماتیک مطابق شکل ۵ رسم شده است.

۵- محاسبه جابجایی‌های شعاعی

روسف در محاسبه جابجایی‌های شعاعی از قانون جریان همراه استفاده نمود به طوری که طبق این قانون مقدار زاویه اتساع (ψ)، بدون توجه به خصوصیات رفتاری توده سنگ، فرض می‌شود همیشه برابر با مقدار زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ است [۱۱]. محققین مختلفی نشان داده‌اند که این فرض صحیحی نیست به طوری که هوک و براون بر مبنای تجربیات عملی و مدل‌سازی‌های عددی اظهار داشتند که مقدار زاویه اتساع بستگی به زاویه اصطکاک داخلی و کیفیت توده سنگ دارد. طبق نظر آن‌ها، برای سنگ‌های با کیفیت خیلی خوب، مقدار زاویه اتساع برابر با $\varphi/4$ ، برای توده سنگ‌های با کیفیت متوسط $\varphi/8$ و برای توده سنگ‌های با کیفیت پایین صفر است. برای در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای زاویه اتساع، قانون جریان همراه کارایی ندارد و بایستی از قانون جریان ناهمراه برای محاسبه جابجایی‌های غیر الاستیک استفاده شود که در سال ۲۰۰۳، شرن روابطی بر این مبنای ارائه داد [۴]. در این تحقیق اساس محاسبه جابجایی‌های شعاعی بر مبنای روش شرن است با این تفاوت که مقدار فشار ناشی از وزن EDZ به همراه خصوصیات مقاومتی آن در روش شرن لحاظ شده است و معادله بدست آمده طبق رابطه ۳۱ است. در این رابطه، ν نسبت پواسون و E مدول یانگ است. لازم به ذکر است برای استفاده از رابطه ۳۱ برای جریان همراه، کافی است، مقدار زاویه اتساع با مقدار زاویه اصطکاک داخلی جایگزین شود.

(۳۱)

$$u = \frac{(1 + \nu)}{E} R_0^{-K_{\psi}} \left(\left(\frac{(\sigma_{r=R_{EDZ}} - \sigma_0) R_{EDZ}^2 - (P_{i1} + P_{i2} - \sigma_0) R_0^2}{R_{EDZ}^2 - R_0^2} \right) (1 - 2\nu) (R_{EDZ}^{K_{\psi}+1} - r^{K_{\psi}+1}) - \left(\frac{(P_{i1} + P_{i2} - \sigma_{r=R_{EDZ}}) R_0^2 R_{EDZ}^2}{R_{EDZ}^2 - R_0^2} \right) (R_{EDZ}^{K_{\psi}-1} - r^{K_{\psi}-1}) - \frac{(1 + \nu) R_{EDZ}}{E} (\sigma_0 - \sigma_{r=R_{EDZ}}) \left(\frac{R_{EDZ}}{r} \right)^{K_{\psi}} \right)$$

جدول ۱: داده های ورودی جهت اعتبار سنجی [۱۱]

| پارامتر | سری داده ۱ | سری داده ۲ |
|---------------------------------|------------|------------|
| γ (MN/m ³) | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۲۴ |
| H (m) | ۲۲ | ۵۰ |
| R_0 (m) | ۳/۵ | ۱۰/۶۰ |
| E (GPa) | ۰/۴۵۰ | ۰/۴۵۰ |
| ν | ۰/۳۲۰ | ۰/۳۲۳ |
| c (MPa) | ۰/۰۸۰ | ۰/۱۳۵ |
| ϕ (deg.) | ۲۰ | ۳۵ |
| γ_r (MN/m ³) | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۲۴ |
| c_r (MPa) | ۰/۰۱۰۷۶ | ۰/۰۲۳۳ |
| ϕ_r (deg.) | ۱۲/۷۲ | ۲۵/۸۰ |
| ψ (deg.) | ۲۰ | ۳۵ |

زمین در تاج تونل برای دو مقدار زاویه اتساع صفر و برابر با زاویه اصطکاک داخلی رسم و با منحنی واکنش زمین در دیواره مقایسه شد.

لازم به ذکر است برای محاسبه GRC^{wall} از روابط مربوط به المان اول استفاده شده است با این تفاوت که در دیواره مقدار تنش برجا ثابت و برابر با γH است. همان طور که در شکل ۶ مشخص است، تفاوت های بسیاری بین این دو منحنی واکنش زمین وجود دارد، بنابراین جهت بررسی دقیق، در شکل ۷ یک نمای شماتیک از هر دو منحنی واکنش زمین نشان داده شده است.

۷-۲-۱- تحلیل بخش الاستیک

طبق شکل ۷، بخش الاستیک GRC^{crown} (AB) نسبت به بخش الاستیک GRC^{wall} (A'B')، به دلیل این که مقدار تنش برجا (σ_0) در تاج (قبل از تشکیل EDZ) به اندازه γR_0 کم تر از دیواره است، همیشه پایین تر قرار می گیرد و بنابراین فشار بحرانی در مرز جابجایی های الاستیک و غیرالاستیک نیز در GRC^{crown} کم تر خواهد بود. (نقاط B و B' نشان دهنده فشار بحرانی در مرز جابجایی های الاستیک و غیرالاستیک هستند که به ترتیب برای GRC^{crown} و GRC^{wall} با P_c^p و $P_c'^p$ نشان داده شده اند. u_c^p و $u_c'^p$ نیز جابجایی های شعاعی بحرانی برای این دو منحنی هستند). از این رو به دلیل فشار بحرانی بالاتر در دیواره، EDZ در دیواره زودتر تشکیل می شود.

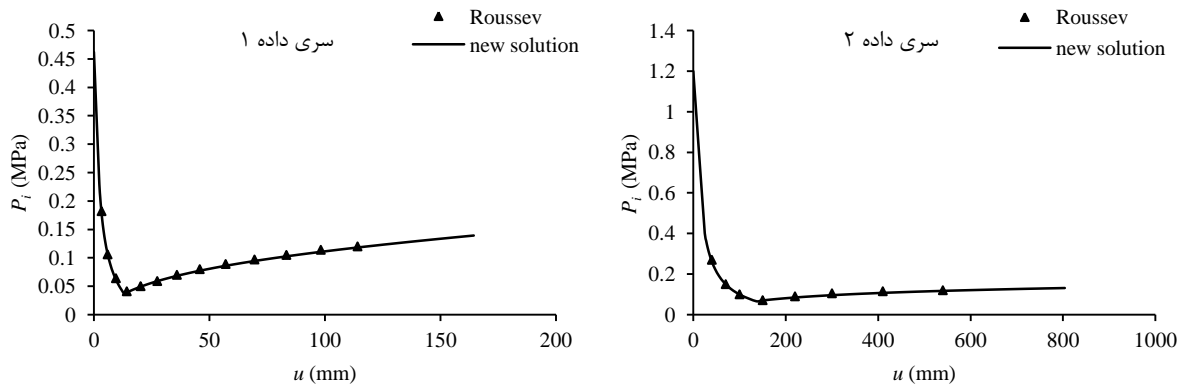
۷-۲-۲- تحلیل بخش غیرالاستیک

در GRC^{wall} بخش غیرالاستیک شامل B'E است. در واقع در دیواره، با کاهش فشار نگهداری جابجایی های غیرالاستیک ایجاد شده و نهایتاً در فشار نگهداری صفر، جابجایی ها به حداکثر مقدار خود می رسند. اما در GRC^{crown} روند به گونه ای دیگر است. در این منحنی در نقطه B، هنوز EDZ تشکیل نشده و بنابراین فشار ناشی از نیروهای حجمی نیز صفر است. بعد از نقطه B، بخش غیرالاستیک شروع شده به طوری که در فاصله نقاط B تا C جابجایی های شعاعی به همراه کاهش فشار داخلی افزایش می یابند اما از نقطه C تا D، فشار P_{i1} صفر بوده و P_{i2} در حال افزایش است، بنابراین ادامه افزایش جابجایی ها همراه با افزایش فشار داخلی است. در نقطه C شعاع EDZ برابر با مقدار تعیین شده از رابطه ۲۳ (با در نظر گرفتن $P_{i1}=0$) است، بنابراین در این نقطه، فشار داخلی P_i برابر با P_{i2} خواهد بود.

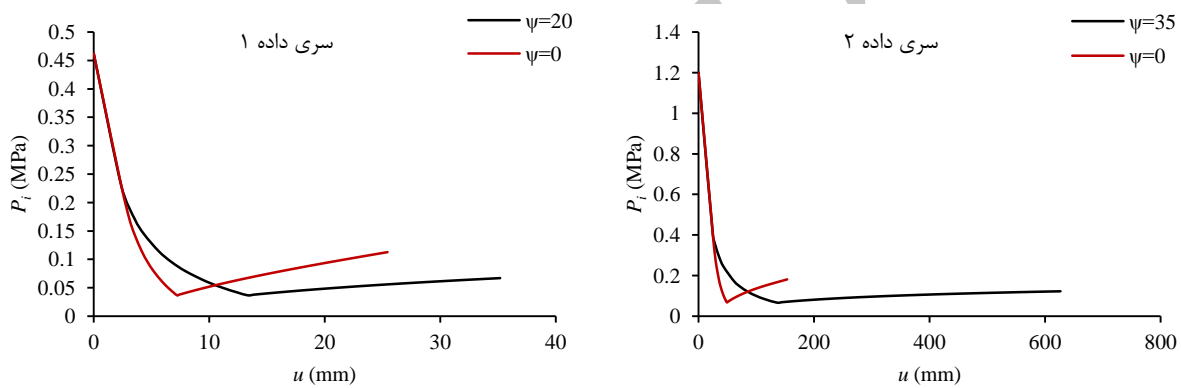
طبق این نمودار، به علت تأثیر نیروهای حجمی در تاج تونل، نمودار تغییرات تنش های القایی در تاج نسبت به دیواره بسیار متفاوت هستند به طوری که در فاصله شعاعی برابر با شعاع تونل، اندازه تنش های القایی در تاج تونل نسبت به دیواره بزرگ تر هستند علی رغم اینکه مقدار σ_0 در تاج تونل کوچک تر از دیواره است. اما از طرفی به دلیل بزرگ تر بودن σ_0 در دیواره نسبت به تاج تونل، اندازه تنش های القایی در فصل مشترک EDZ-EdZ بزرگ تر هستند و متعاقباً اندازه EDZ در دیواره بزرگ تر از اندازه آن در تاج تونل است (اندازه شعاع EDZ هم برای دیواره و هم برای تاج از رابطه ۲۳ بدست آمده است و فرض بر این است که تونل در قسمت تاج دچار سست شدگی نشده است). قابل ذکر است که تفاوت در اندازه EDZ هیچ ارتباطی به محاسبات المان ۲ نداشته و دلیل اصلی آن اختلاف در مقدار تنش برجا در تاج و دیواره است، بنابراین ثابت می شود که حتی در تونل های عمیق، شکل EDZ در شرایطی که میدان تنش ها هیدرواستاتیک است، دایروی نیست.

۷-۲-۳- منحنی واکنش زمین

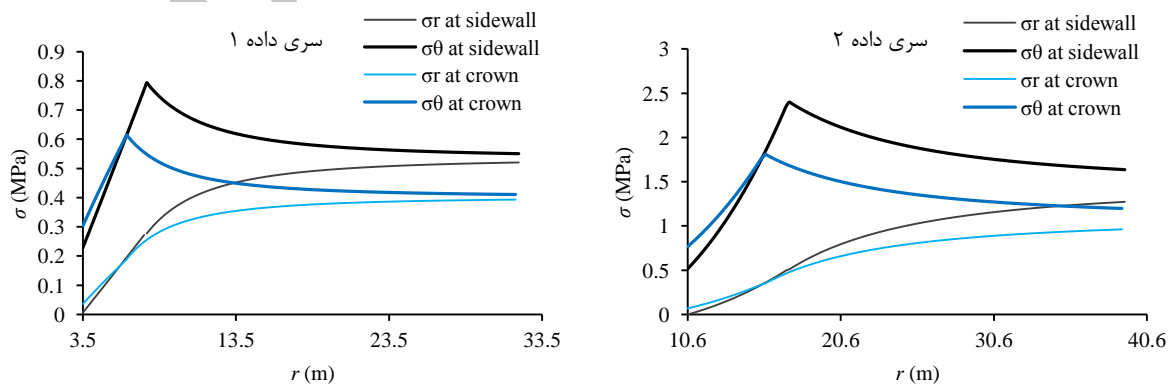
با توجه به اینکه در محاسبه GRC^{crown} فشار داخلی P_i (فشار نگهداری) تابعی از نیروهای حجمی بوده و همچنین اندازه شعاع EDZ در دیواره و تاج تونل به واسطه اختلاف در مقدار σ_0 یکسان نیست، بنابراین انتظار این است که ساختار منحنی واکنش زمین در تاج و دیواره تونل، تفاوت های مهمی با یکدیگر داشته باشند. بنابراین مطابق با شکل ۶ برای هر سری از داده های اعتبارسنجی، بر اساس روش پیشنهادی، منحنی واکنش



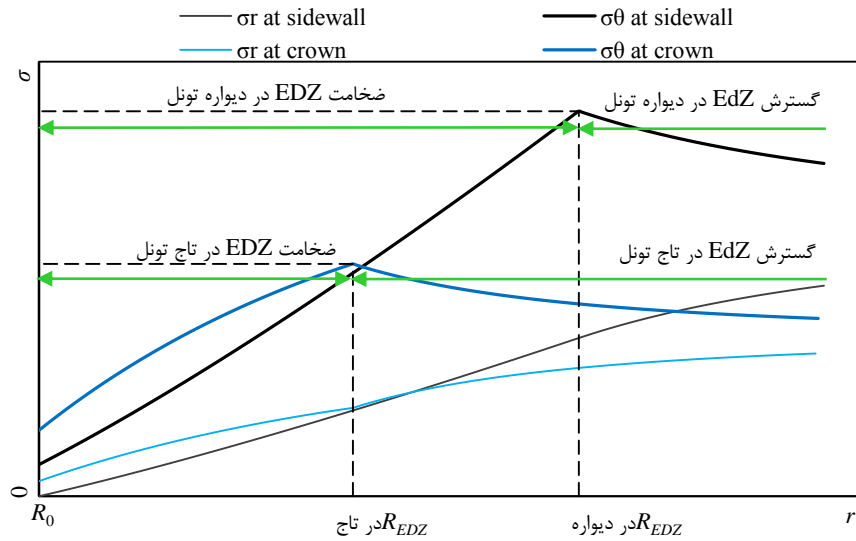
شکل ۲: منحنی واکنش زمین بدست آمده و مقایسه با نتایج روسف



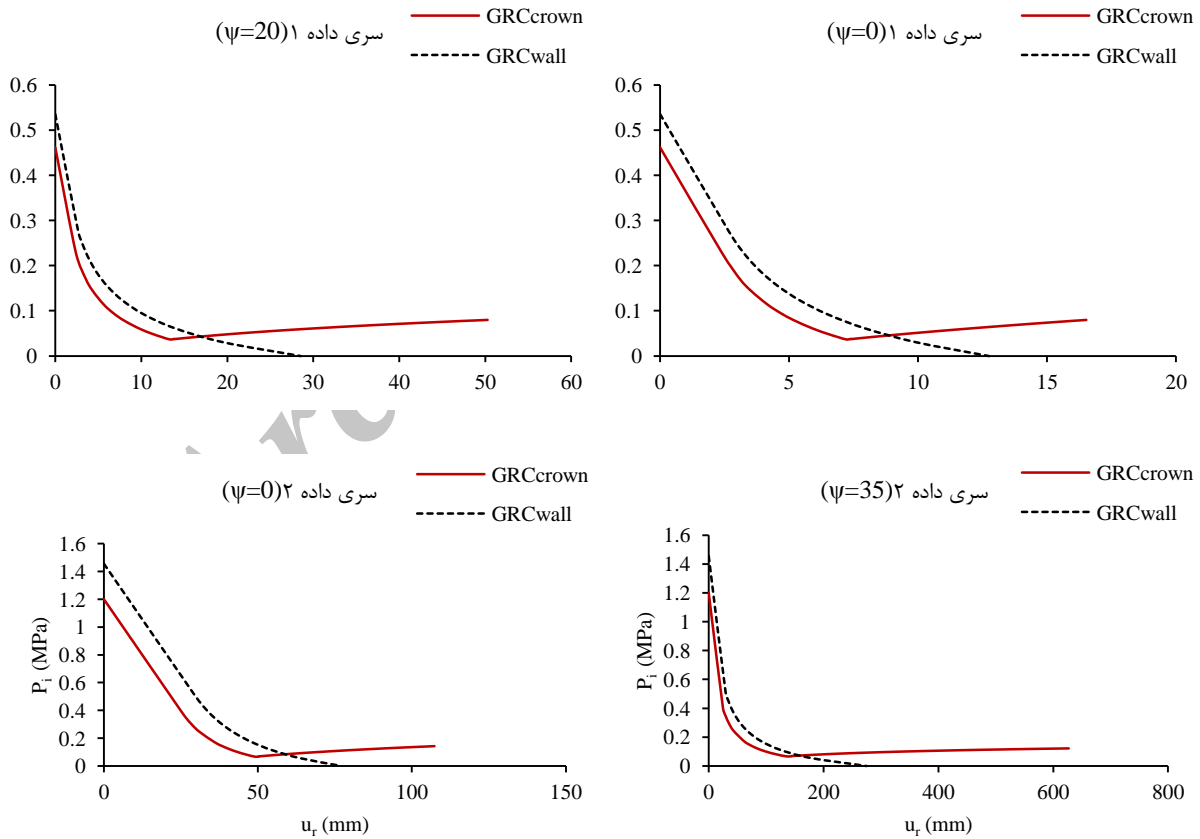
شکل ۳: مقایسه منحنی واکنش زمین در تاج تونل با در نظر گرفتن دو زاویه مختلف اتساع



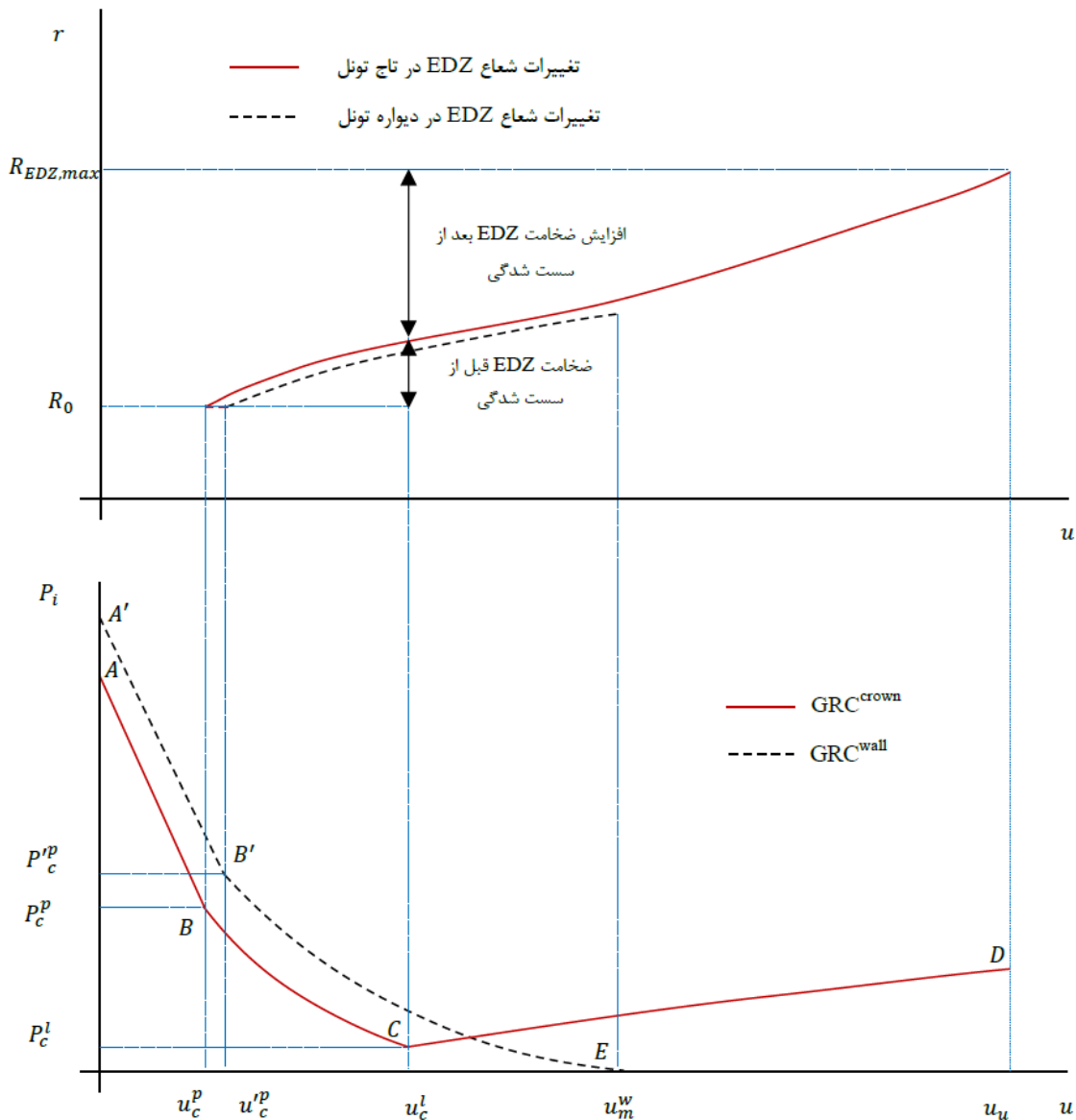
شکل ۴: نمودار تغییرات تنش‌های القایی در تاج و دیواره تونل برای دو سری داده اعتبار سنجی



شکل ۵: نمایشی شماتیک از تغییرات تنش‌های القایی در تاج و دیواره تونل



شکل ۶: مقایسه منحنی‌های واکنش زمین در تاج و دیواره تونل برای داده‌های اعتبارسنجی



شکل ۷: نمایش شماتیک از منحنی های واکنش زمین در تاج و دیواره تونل به همراه نمودار تغییرات شعاع EDZ نسبت به جابجایی

در شکل ۷، نمودار تغییرات شعاع EDZ نسبت به جابجایی که منطبق بر GRC^{crown} شده نیز نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، قبل از سست شدگی، شعاع EDZ در تاج کوچک تر از دیواره است اما بعد از سست شدگی شعاع EDZ در دیواره خیلی بزرگ تر از مقدار آن در دیواره است.

۷-۲-۳- مفاهیم جدید

نقطه C حاوی دو مفهوم جدید است که عبارتند از:

الف) "حداقل فشار نگهداری لازم ($P_{s,min}$)" که برابر با فشار بحرانی سست شدگی بوده و نشان دهنده حداقل فشار لازم برای

از نقطه C به بعد، به علت افزایش جابجایی ها، زون سست شدگی در بالای تونل تشکیل می شود و در نتیجه شعاع EDZ و همچنین اثر نیروهای حجمی ناشی از وزن EDZ (P_{i2}) افزایش می یابند و روند GRC^{crown} از حالت نزولی به حالت صعودی تغییر می کند (در فاصله نقاط C تا D، فشار داخلی P_i برابر با P_{i2} است). بنابراین نقطه C یک نقطه بحرانی برای GRC^{crown} تلقی شده و مقدار فشار داخلی P_i در نقطه C به عنوان فشار بحرانی سست شدگی (P_c^l) معرفی می شود به طوری که بعد از این نقطه، تونل کاملاً ناپایدار خواهد بود و دچار ریزش می شود.

جدول ۲: مقایسه مقادیر حداکثر کرنش مجاز و جابجایی متناظر در مقادیر مختلف زاویه اتساع

| سری داده | ψ (deg.) | u (mm) | ε (%) |
|----------|---------------|----------|-------------------|
| ۱ | ۰ | ۷/۳۹ | ۰/۲ |
| | ۲۰ | ۱۳/۸۵ | ۰/۴ |
| ۲ | ۰ | ۵۰/۳۷ | ۰/۵ |
| | ۳۵ | ۱۴۴/۴۷ | ۱/۴ |

۸- نتیجه گیری

در این تحقیق، با در نظر گرفتن معیار شکست موهر-کولمب و میدان تنش‌های برجای هیدرواستاتیک، یک حل تحلیلی بر مبنای قانون جریان ناهمراه برای محاسبه منحنی واکنش زمین در تاج تونل بدست آمد به طوری که قابلیت لحاظ کردن اثر نیروهای حجمی ناشی از وزن توده سنگ شکسته شده در داخل EDZ به همراه خواص مقاومتی آن‌ها را دارد. نتایج این تحقیق عبارتند از:

الف) به علت اینکه دیواره تونل فاقد هر گونه تأثیری از نیروهای حجمی است، این شرایط باعث می‌شود که بر خلاف نتایج تحقیقات گذشته، نمودار تغییرات تنش‌های القایی در تاج تونل نسبت به دیواره بسیار متفاوت شده به طوری که مقدار این تنش‌ها در تاج و در فاصله شعاعی برابر با شعاع تونل، بزرگ‌تر از مقادیرشان در دیواره هستند.

ب) مجموع اثر نیروهای حجمی ناشی از وزن توده سنگ شکسته شده در EDZ و خواص مقاومتی آن می‌تواند در تاج تونل باعث ایجاد سست شدگی و گسترش شعاع EDZ شود. در این شرایط به علت افزایش بی رویه جابجایی‌ها، تونل کاملاً ناپایدار است.

پ) به دلیل بزرگ‌تر بودن σ_0 در دیواره تونل نسبت به تاج، شکل EDZ دایروی نیست. اندازه شعاع EDZ در دیواره تونل نسبت به تاج، تا قبل از وقوع سست شدگی در تاج تونل، بزرگ‌تر است.

پ) بر اساس حل پیشنهادی، یک منحنی واکنش زمین برای تاج تونل با ساختاری جدید بدست آمد. در این ساختار، به علت اینکه σ_0 تابعی از شعاع EDZ بوده و مقدار آن نسبت به دیواره کم‌تر است، بخش الاستیک منحنی واکنش زمین در تاج با منحنی واکنش زمین دیواره یکسان نبوده بلکه در زیر آن قرار می‌گیرد. بنابراین در دیواره تونل، EDZ زودتر تشکیل می‌شود اما در تاج تونل به علت کوچک‌تر بودن فشار بحرانی، بخش غیرالاستیک دیرتر تشکیل می‌شود. همچنین بخش غیر

سیستم نگهداری در زمان عکس‌العمل با زمین است تا سیستم نگهداری بتواند از ایجاد زون سست شدگی در تاج تونل جلوگیری نماید. مقدار این فشار از رابطه ۳۳ قابل محاسبه است. (۳۳)

$$P_{s,\min} = \frac{-\sigma'_{cm}(k'-2) + R_0\gamma(k'-1)}{(k'-1)(k'-2)}$$

$$-\left(\frac{R_{EDZ}^C}{R_0}\right)^{1-k'} \left(\frac{-\sigma'_{cm}(k'-2) + R_{EDZ}^C\gamma(k'-1)}{(k'-1)(k'-2)}\right)$$

در این رابطه R_{EDZ}^C ، از رابطه ۲۳ بدست می‌آید در شرایطی که P_{i1} برابر با صفر است.

ب) "حداکثر کرنش مجاز (ε_{allow})" که نشان دهنده حداکثر کرنشی است که می‌تواند در تونل قبل از نصب سیستم نگهداری رخ دهد به طوری که هیچ گونه زون سست شدگی در تاج تونل تشکیل نشود و از رابطه ۳۴ قابل محاسبه است. در این رابطه u_c' نشان دهنده جابجایی‌های شعاعی بحرانی در مرز بخش سست شدگی است.

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{R_0} \times 100 = \frac{u_c'}{R_0} \times 100 \quad (34)$$

۷-۲-۴- بررسی اثر زاویه اتساع

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، تغییر زاویه اتساع از مقدار برابر با زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ به مقدار صفر باعث شده است تا روند GRC^{rown} تغییرات زیادی داشته باشد به طوری که محل نقطه C (مرز بین بخش نزولی و صعودی) دچار تغییر زیادی شده است. تغییرات زاویه اتساع بر مقدار حداقل فشار لازم نگهداری تأثیری ندارد به طوری که حداقل فشار لازم نگهداری برای سری داده‌های ۱ و ۲ به ترتیب در مقادیر ۰/۰۳۶ و ۰/۰۶۶ مگاپاسکال ثابت مانده‌اند. اما میزان اهمیت استفاده از قانون جریان ناهمراه و مقدار صحیح زاویه اتساع در محاسبه جابجایی‌ها کاملاً مشهود است به طوری که مطابق با جدول ۲، با کاهش زاویه اتساع حداکثر کرنش مجاز برای سری داده‌های ۱ و ۲، به ترتیب حدود ۵۰ و ۶۴ درصد کاهش یافته است و در نتیجه لازم است که سیستم نگهداری سریعتر نصب شود. همچنین این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از قانون جریان همراه برای محاسبه جابجایی‌های مناسب نبوده و بایستی مقدار صحیح زاویه اتساع در محاسبات در نظر گرفته شود.

- Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues*", Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 2, 149-161.
- [9] Hoek, E., and Brown, E.T.; 1980; "*Underground excavations in rock*", London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- [10] Goodman, R.; 1989; "*Introduction to rock mechanics*", New York: John Wiley & Sons.
- [11] Roussev, P.; 1998; "*Calculation of the displacements and Pacher's rock pressure curve by the associative law for the fluidity-plastic flow*", Tunnelling and Underground Space Technology, 13, 441-451.
- [12] Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B.; 2002; "*Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*", Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, 1, pp. 267-273. Toronto.
- [13] Zareifard, M. R., and Fahimifar, A.; 2012; "*A new solution for shallow and deep tunnels by considering the gravitational loads*", Acta Geotechnica Slovenica, 2, 37-49.
- [14] Timoshenko, S., and Goodier, J.; 1994; "*Theory of Elasticity*", New York.
- [15] Sofianos, A. I., and Nomikos, P. P.; 2006; "*Equivalent Mohr-Coulomb and generalized Hoek-Brown strength parameters for supported tunnels in plastic or brittle rock*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 683-704.

الاستیک در تاج از دو قسمت نزولی و صعودی تشکیل شده که بخش صعودی آن مربوط به مرحله سست شدگی و ریزش تونل است.

ت) با توجه به مقادیر پیشنهادی هوک و براون برای زاویه اتساع، استفاده از قانون جریان همراه برای تعیین جابجایی‌های غیرالاستیک توده سنگ قابل قبول نیست و بایستی از قانون جریان ناهمراه استفاده شود.

ث) بر اساس ساختار جدید منحنی واکنش زمین، دو مفهوم جدید "حداقل فشار نگهداری لازم" و "کرنش بحرانی" معرفی شدند که در تحلیل پایداری تونل و طراحی سیستم نگهداری نقش مهمی دارند. تحلیل‌های انجام شده نشان دادند که با تغییر در زاویه اتساع، مقدار حداقل فشار نگهداری ثابت می‌ماند اما با کاهش زاویه اتساع، مقدار حداکثر کرنش مجاز نیز کاهش یافته و بایستی سیستم نگهداری سریعتر نصب شود.

مراجع

- [1] Tsang, C. F., Bernier, F., and Davies, C.; 2005; "*Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays—in the context of radioactive waste disposal*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42(1), 109-125.
- [2] Brown, E. T., Bray, J. W., Ladanyi, B., and Hoek, E.; 1983; "*Ground Response Curves for Rock Tunnels*", Journal of Geotechnical Engineering, 109(1), 15-39.
- [3] Lee, S. W., Jung, J. W., Nam, S. W., and Lee, I. M.; 2007; "*The Influence of Seepage Forces on Ground Reaction Curve of Circular Opening*", Tunnelling and Underground Space Technology, 22(1), 28-38.
- [4] Sharan, S. K.; 2003; "*Elastic-brittle-plastic analysis of circular openings in Hoek-Brown media*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, 817-824.
- [5] Park, K. H., Tontavanich, B., and Lee, J. G.; 2008; "*A Simple Procedure for Ground Response Curve of Circular Tunnel in Elastic-Strain Softening Rock Masses*", Tunnelling and Underground Space Technology, 23(2), 151-159.
- [6] Shin, Y. j., Kim, B. M., shin, J. H., and Lee, I. M.; 2010; "*The Ground Reaction Curve of Underwater Tunnels Considering Seepage Forces*", Tunnelling and Underground Space Technology, 25(4), 315-324.
- [7] Zhang, C., Zhao, J., Zhang, Q., and Hu, X.; 2012; "*A new closed-form solution for circular openings modeled by the Unified Strength Theory and radius-dependent Young's modulus*", Computers and Geotechnics, 42, 118-128.
- [8] Pacher, F.; 1964; "*Deformationsmessungen im Versuchsstollen der Metteltunnel zur Erforschung des*

پی‌نوشت

- ¹ Excavation Damaged Zone
- ² Excavation disturbed Zone
- ³ Blasting Damaged Zone
- ⁴ Ground Reaction Curve
- ⁵ Associated flow rule
- ⁶ Non-associated flow rule