

## تحلیل اندرکنش سنگ دوزهای تزریقی شعاعی غیرفعال و فعال با توده سنگ در تونل‌ها و طراحی آنها بر مبنای روش کنترل همگرایی

احمد فهیمی فر\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
مسعود رنجبرنیا، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
E-mail: fahim@aut.ac.ir  
دریافت: ۱۳۸۶/۰۵/۲۴ - پذیرش: ۱۳۸۷/۰۷/۳۰

### چکیده

در این مطالعه، بر اساس مفاهیم اندرکنش سنگ - سیستم نگهداری و با فرض مدل رفتاری نرم شونده‌گی کرنش برای توده سنگ تحت معیار مقاومتی هوک - براون، مدل‌های تحلیلی جدیدی بر مبنای روش کنترل همگرایی برای تحلیل اندرکنش سنگ دوزهای تزریقی غیرفعال (غیرکششی) و فعال (پیش تنیده) با توده سنگ ارائه می‌شود. با استفاده از این مدل‌ها، منحنی پاسخ زمین برای توده سنگ مسلح همسان و همگن اطراف تونل دایروی که تحت تنش هیدروستاتیک قرار دارد، رسم شده تا تأثیر و کارآیی هر یک از این سیستم‌ها در پایدار سازی و کنترل همگرایی تونل مشخص شود. مدل تحلیلی فوق: تأثیر تغییر فاصله بندی بولت‌ها از هم، افزایش سطح مقطع سنگ دوز و میزان پیش تنیده کردن آن را در نحوه عملکرد سنگ دوزها و در رسم منحنی پاسخ زمین در نظر می‌گیرد. در انتها، به کمک مدل تحلیلی فوق، مثالهایی حل شده و بررسی صحت و سقم نتایج با نرم افزار *FLAC* انجام می‌گیرد.

واژه های کلیدی: سنگ دوزهای تزریقی، منحنی پاسخ زمین، تونل، کنترل همگرایی

### ۱. مقدمه

[Hoek and Brown, 1980, Indraratna and Kaiser, 1990]. بنابراین مفاهیم اندرکنش سنگ - حائل و روش‌های تحلیلی کلاسیک که برای طراحی سیستم‌های حائل نظیر پوشش‌های بتونی، مجموعه‌های فولادی و سنگ دوزهای غیر تزریقی استفاده می‌شود را نمی‌توان برای سنگ دوزهای تزریقی بکار برد. بر همین اساس در سال‌های اخیر با استفاده از فرض‌های ساده‌کننده، روش‌های تحلیلی برای مدلسازی تأثیر سنگ دوزهای تزریقی در رفتار توده سنگ ارائه شده که خصوصیات توده سنگ در زون مسلح شده تعیین می‌شود. اسمارت و بیچوف [Bischoff and Smart, 1975] تأثیر نصب سنگ دوزهای تزریقی را فشار شعاعی در دیواره تونل در نظر گرفتند، در حالی که گراسو [Grasso (et al.), 1989] مفهوم توده سنگ مسلح را مطرح کرد و نقش سنگ دوزهای تزریقی را افزایش چسبندگی توده سنگ فرض کرد. ایندراواتنا و کایزر (Indraratna and Kaiser, 1990)

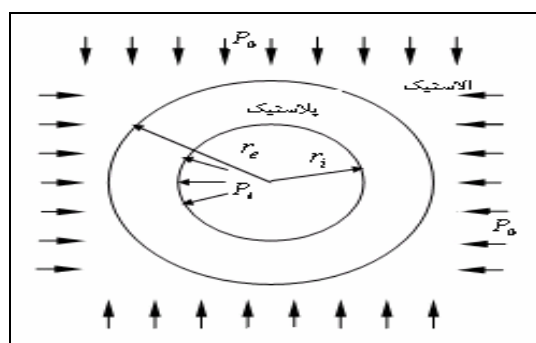
سنگ دوزهای تزریقی از بهترین و رایج ترین سیستم های نگهداری در حفاری های معدنی و عملیات حفر تونل هستند. برای طراحی بهتر سنگ دوزهای تزریقی، فهم کامل رفتار سنگ دوزها در داخل توده سنگ تغییر شکل یافته و نقش آن در چگونگی بهبود خصوصیات مقاومتی توده سنگ شکسته ضروری است. این درک می تواند از مشاهدات محلی، تستهای آزمایشگاهی، و یا مدلسازی عددی و روشهای تحلیلی به دست آید [Stillborg and Li, 1999].

در طراحی منطقی سیستم نگهداری به روش تحلیلی باید طبیعت اندرکنش خصوصیات بار - تغییر شکل توده سنگ و سیستم نگهداری را در نظر گرفت [Hoek and Brown, 1980]. با توجه به اینکه ساز و کار عملکردی سیستم های مسلح کننده، افزایش خواص مقاومتی توده سنگ شکسته از طریق تقویت بافت درونی آن بوده و با سنگ اندرکنش مکانیکی دارند، المانهای مسلح کننده مستقل از توده سنگ عمل نمی‌کنند.

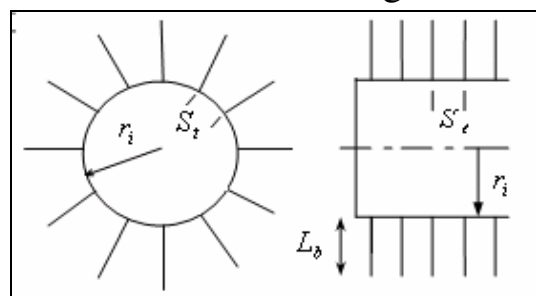
یک توده سنگ الاستیک، هموزن و ایزوتروپ که تحت تنشهای میدانی هیدرواستاتیک  $P_0$  واقع شده است؛ حفر شده و ناحیه‌ای از توده سنگ شکسته به شعاع  $r_e$  در اطراف تونل ایجاد می‌شود (شکل ۱). با توجه به اینکه طول تونل نسبت به ابعاد دیگرش بسیار بزرگ تر است در فاصله بیش از دو برابر از سینه کار (غیر از ابتدا و انتهای تونل) کرنش مسطح بوده [۱۰] و می‌توان تغییر شکل آن در راستای محور تونل را صفر در نظر گرفت و مسأله را در فاصله دور از سینه کار (بیش از دو برابر قطر تونل) به صورت دو بعدی تحلیل کرد. در این صورت با توجه به اینکه تنشهای در امتداد محور تونل حد واسط باقی می‌مانند؛ تنشهای مماسی ( $\sigma_\theta$ ) و شعاعی ( $\sigma_r$ ) را به ترتیب  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  (تنشهای اصلی بزرگ تر و کوچک تر) خواهند بود. از اثر وزن سنگ در ناحیه شکسته یا پلاستیک نیز صرف‌نظر می‌شود.

سیستم نگهداری متشکل از تعدادی سنگ دوز تزریقی به طول  $L_b$  (فرض می‌شود  $L_b$  در نوع غیر فعال حداقل برابر با طول ناحیه شکسته و در نوع فعال مجموع طول ناحیه شکسته و طول گیرداری سنگ دوز است) و سطح مقطع  $A_b$  بوده و به صورت منظم و در راستای عمود بر جدار تونل (راستای شعاعی) نصب شده اند که فاصله بندی آنها در راستای مماسی و محور تونل به ترتیب  $S_1$  و  $S_2$  نامیده می‌شود (شکل ۲).

لازم به یادآوری است که توده سنگ خصوصیات مقاومتی وابسته به زمان نداشته (خزشی نبوده) و همگرایی تونل تنها ناشی از پیشروی حفاری در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- مقطع تونل و شرایط تنش هیدرواستاتیک اولیه



شکل ۲- آرایش نصب سنگ‌دوزها در تونل

رفتار توده سنگ مسلح را بر مبنای مدل‌های متقارن بررسی کرده و آن را با خصوصیات ژئومکانیکی (هم چسبندگی و هم زاویه اصطکاک) بهتر و تقویت یافته نسبت به توده سنگ اصلی مدلسازی کردند. پیلا و ارست (Peila and Oreste, 1995) نیز براساس روش کنترل همگرایی، مدل تحلیلی جدیدی برای مدلسازی توده سنگ مسلح اطراف تونل ارائه کردند. در این مدل اثر سنگ دوز تزریقی در توده سنگ معادل با تغییر کلی خصوصیات آن در نظر گرفته شد، بعدها آنها مدل تحلیلی متقارنی برای محاسبه منحنی پاسخ زمین در توده سنگ مسلح با سنگ‌دوزهای تزریقی در اطراف تونل ارائه داده (Peila and Oreste, 1996) و مشخصه‌هایی نظیر سختی صفحه انتهایی سنگ دوز و فاصله مقطع بولت گذاری شده تا سینه کار را در منحنی پاسخ زمین دخالت دادند. استیل و همکاران (Still et al., 1989) نیز حل بسته‌ای برای سنگ‌دوزهای تزریقی با مدل رفتاری الاستو پلاستیک بر مبنای چهار روش متفاوت اجرای سنگ دوزها و تا حدودی فرضیات ساده کننده ارائه کردند.

از آنجا که استفاده از هر یک از روش‌های تحلیلی ذکر شده دارای محدودیت‌هایی بوده و از طرفی تقریباً اغلب پژوهش‌های قبلی برای بررسی و ارزیابی رفتار سنگ دوزهای تزریقی غیرفعال انجام گرفته و مدل‌های تحلیلی اندکی برای سنگ دوزهای تزریقی فعال ارائه شده است؛ بر مبنای فرض جدیدی، ابتدا یک راه حل تناوبی برای تحلیل سیستم سنگ دوزهای تزریقی غیرفعال ارائه می‌شود که با استفاده از آن منحنی پاسخ زمین برای توده سنگ مسلح ترسیم می‌شود و سپس این مدل برای تحلیل سیستم سنگ دوزهای تزریقی فعال توسعه داده می‌شود. در این مدل‌ها فرض می‌شود که توده سنگ تحت معیار خرابی غیرخطی هوک-براون بوده و مدل رفتاری تنش-کرنش آن نیز نرم‌کرنشی است. مبنای این روش‌ها، در نظر گرفتن اثر سنگ دوزهای تزریقی به صورت افزایش تنش شعاعی توده سنگ پلاستیک در زون مسلح و در نتیجه افزایش مقاومت آن است. این مدل اثر فاصله بندی و میزان پیش‌تیدگی را در همگرایی تونل و در رسم منحنی پاسخ در نظر می‌گیرد. با توجه به اینکه معادلات حاصل شده غیرخطی هستند، این روش حل بسته نداشته و از روش عددی تفاضل محدود برای حل معادلات استفاده می‌شود.

## ۲. شرح مسئله و مفروضات

یک تونل به شعاع  $r_i$  با مقطع دایروی و دارای تقارن محوری به صورت یک مرحله‌ای (با آشکاری و انفجار تا طول معینی) در

### ۳. مدل رفتاری توده سنگ و سنگ دوز

#### ۱-۳ معیار مقاومتی توده سنگ

با توجه به اینکه معیار غیر خطی و تجربی هوک- براون بخوبی مقاومت نقطه پیک و مقاومت باقی مانده توده سنگ را پیش بینی می کند؛ از معیار فوق برای توصیف رفتار مقاومتی توده سنگ استفاده می شود:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2)^{1/2} \quad (1)$$

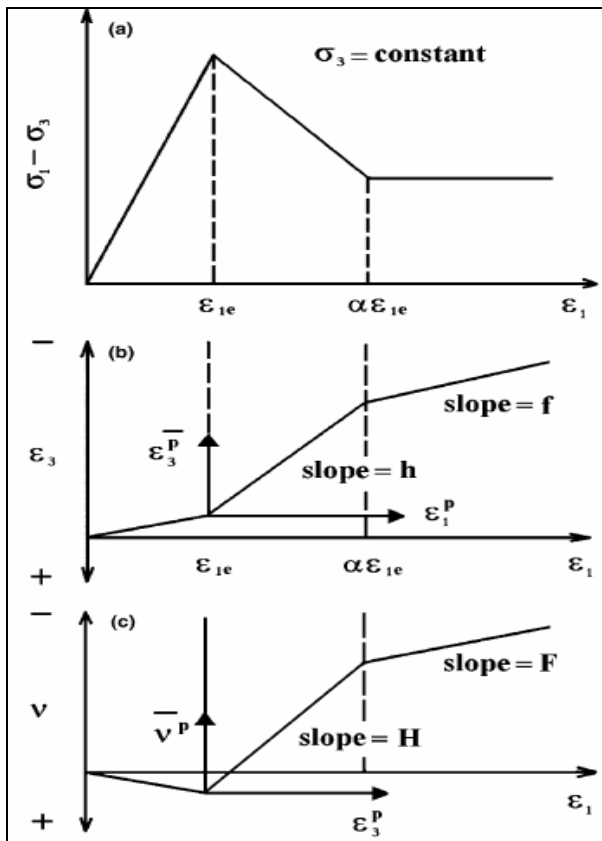
که  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  به ترتیب تنش اصلی بیشتر و تنش اصلی کمتر؛  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر و  $m$  و  $s$  ثابت‌های این معیار بوده و به طبیعت توده سنگ بستگی داشته و مربوط به توده سنگ قبل از حفاری و اعمال تنش‌های خرابی است. این پارامترها با نوع سنگ و کیفیت توده سنگ تغییر کرده و مقدار آنها با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ به روش RMR و NGI تعیین می‌شود (Hoek and Brown, 1980). معادله (۱) در محاسبه مقاومت توده سنگ اولیه استفاده می‌شود. در ناحیه کاملاً شکسته و پلاستیک، پارامترهای  $m$  و  $s$  به  $m_r$  و  $s_r$  کاهش می‌یابند. در این ناحیه، مقاومت باقی مانده و ماندگار توده سنگ برابر است با:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_r \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s_r \cdot \sigma_c^2)^{1/2} \quad (2)$$

#### ۲-۳ رفتار تنش- کرنش توده سنگ

رفتار توده سنگ از لحاظ رابطه بین تنش و کرنش با مدل رفتاری نرم شونددگی کرنش (Strain Softening Behavior) مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۳) این مدل رفتاری را به صورت ایده‌آل نشان می‌دهد. در این مدل مقاومت سنگ از نقطه پیک به تدریج کاسته می‌شود.

در شکل (۳)، پارامترهای  $f$  و  $h$  گرادیان  $\epsilon_3^p$  در مقابل  $\epsilon_1^p$  و  $F$  و  $H$  گرادیان  $e_1^p$  در مقابل  $v^p$  در نواحی پلاستیک و نرم شونددگی کرنش هستند و همگی از اطلاعات تجربی، داده‌های آزمایشگاهی و بکارگیری قوانین جریان مرتبط یا غیر مرتبط قابل محاسبه هستند [Brown (et al.), 1983]. ضریب  $\alpha$  نیز در این شکل مبین کرنشی است که در آن مقاومت ماندگار حاصل می‌شود (در مدل شکننده  $\alpha = 1$ ).  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_3$ ، به ترتیب کرنش‌های اصلی بزرگ تر و کوچک تر و  $v$  کرنش حجمی توده سنگ محیط تونل است.  $\epsilon_1^p$ ،  $\epsilon_3^p$  و  $v^p$  نیز مربوط به کرنش‌های پلاستیک بعد از نقطه پیک است. لازم به یادآوری است که تنش‌های فشاری و کرنش‌های مربوطه مثبت فرض می‌شوند.



شکل ۳. رفتار نرم شونددگی کرنش (Brown et al, 1983)

همچنین در این تحلیل‌ها فرض می‌شود که سنگ دوزها از مدل رفتاری ایده‌آل الاستوپلاستیک کامل (Elasto-Perfectly plastic) پیروی می‌کنند. به این ترتیب مقاومت کششی پلاستیک سنگ دوز برابر با مقاومت نقطه تسلیم خواهد بود.

### ۴. محاسبات تحلیلی سنگ‌دوزهای تزریقی

#### غیرفعال

در این بخش قبل از ارایه مدل، ابتدا به فرضیات و اصول مدل و تأثیر سنگ دوز در رفتار توده سنگ یا به طور کلی به نحوه مدلسازی توده سنگ مسلح پرداخته می‌شود.

پس از حفاری تونل و نصب سریع سنگ دوزها در نزدیکی سینه کار، همزمان با پیشروی مجدد جبهه تونل (تا فاصله دو برابر قطر تونل [Hoek and Brown, 1980]) به تدریج از فشار محصوریت سینه کار در مقطع سنگ دوز شده تونل کمتر شده و توده سنگ اطراف حفاری شکسته می‌شود (ناشی از توزیع مجدد تنش‌های درجا به دلیل پیشروی تونل) و این توده سنگ شکسته تمایل به همگرایی به داخل تونل دارد. با فرض چسبندگی کامل

با اعمال فرض انجام شده برای تحلیل اثر سنگ دوزهای تزریقی در رفتار توده سنگ با مدل رفتاری نرم کرنشی، به طور کلی سه ناحیه در اطراف تونل قابل بررسی است:

- (الف) ناحیه الاستیک مربوط به توده سنگ الاستیک پیرامون تونل که در فاصله دور از مقطع تونل قرار دارد.  
 (ب) ناحیه پلاستیک داخلی مربوط به توده سنگ شکسته که تنش‌ها به مقاومت باقی‌مانده توده سنگ محدود می‌شوند.  
 (ج) ناحیه پلاستیک میانی مربوط به توده سنگ شکسته که تنش‌ها و کرنش‌های آن مربوط به قسمت نرم کرنشی مدل رفتاری است.

(الف) در مواقع نادری، هنگامی که فشار معادل سنگ دوزهای تزریقی در جدار تونل بیشتر از فشار بحرانی باشد ( $P_i > P_{cr}$ )، سنگ دوز و توده سنگ هر دو الاستیک بوده و هیچ ناحیه پلاستیکی در اطراف تونل ایجاد نخواهد شد. فشار بحرانی برابر است با:

$$P_{cr} = P_0 - M \cdot \sigma_c \quad (3)$$

$P_i$  فشار معادل سنگ دوزهای تزریقی؛  $P_{cr}$  تنش بحرانی؛  $P_0$  تنش درجا و هیدروستاتیک اولیه و  $M$  از رابطه زیر به دست می‌آید [Brown (et al.), 1983]:

$$M = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{m}{4} \right)^2 + m \cdot \frac{P_0}{\sigma_c} + s \right] - \frac{m}{8} \quad (4)$$

در این حالت تغییر مکان شعاعی جدار تونل از رابطه زیر حاصل می‌شود [Brown (et al.), 1983]:

$$\frac{u_i}{r_i} = \frac{P_i - P_0}{2G} \quad (5)$$

که در آن  $u_i$  تغییر مکان شعاعی جدار تونل؛  $r_i$  شعاع تونل و  $G$  مدول برشی سنگ بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

$E$  و  $\nu$  به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون توده سنگ است. اگر سنگ دوزهای تزریقی قبل از وقوع هرگونه تغییر شکل الاستیک توده سنگ نصب و تزریق شوند (که چنین حالتی به ندرت در عمل پیش می‌آید)، مقدار  $E$  در رابطه (6) بایستی با مقدار  $E_{eff}$  جایگزین شود. در این صورت داریم:

$$E_{eff} = \frac{E_s A_b}{C} + E \quad (7)$$

توده سنگ و سنگ دوز و در نتیجه پیوستگی و سازگاری کرنشی آنها، تغییر شکل توده سنگ و همگرایی آن موجب کشش سنگ دوز می‌شود. نیروی کششی محوری سنگ دوز را می‌توان معادل اعمال فشار آن به توده سنگ شکسته (و در نتیجه افزایش فشار داخلی توده) در نظر گرفت که میزان این فشار متناسب با کشش سنگ دوز در هر نقطه از طول آن است (فرض اساسی مدل). با توجه به اینکه سنگ دوزها به صورت شعاعی در پیرامون تونل نصب می‌شوند، افزایش فشار ناشی از آنها در داخل توده سنگ به صورت شعاعی و به طور کلی افزایش تنش محصورکنندگی آن خواهد بود. بنابراین به طور خلاصه، اصول و فرضیات اساسی و مهم مدل (علاوه بر موارد ذکر شده در بخش دوم) به صورت زیرند:

- سنگ دوزها بلافاصله پس از حفاری و در نزدیک‌ترین مقطع به سینه کار نصب می‌شوند به طوری که می‌توان از همگرایی تونل پس از حفاری و قبل از نصب سنگ دوزها صرف‌نظر کرد. بنابراین می‌توان رفتار توده سنگ پیش مسلح را نیز با این مدل بررسی کرد.
- پیوستگی کامل بین توده سنگ و سنگ دوز به واسطه دوغاب سیمان برقرار می‌شود و اتصال آنها صلب خواهد بود. بنابراین هیچ تغییر مکان نسبی مابین توده سنگ و سنگ دوز به وجود نمی‌آید. در این شرایط، آشکار است که خصوصیات دوغاب مورد توجه قرار نگرفته و در مدل نقشی نخواهد داشت.
- سنگ دوزهای غیر فعال طی یک مرحله زمانی که توده سنگ تغییر شکل داده، فعال می‌شوند.
- اثر سنگ سنگ‌دوز در توده سنگ شکسته، معادل با افزایش فشار (محصورکنندگی) در داخل توده سنگ شکسته و در محدوده تأثیر سنگ دوز در توده سنگ در نظر گرفته می‌شود.
- گسیختگی سیستم سنگ دوزهای تزریقی معمولاً با سرخوردگی بولت در دوغاب و گاه با جاری شدن سنگ‌دوزها اتفاق می‌افتد. این مدل تحلیلی وقوع هیچ یک از این حالات را مورد بررسی قرار نمی‌دهد.
- سنگ دوزهای تزریقی از طریق اصطکاک سطح جانبی (سطح میله سنگ‌دوز و دوغاب) و نیروی واکنشی صفحه انتهایی، تغییر شکل توده سنگ و تغییر مکان جدار تونل را کنترل می‌کنند.

با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۱)، معیار مقاومتی برای توده سنگ مسلح نتیجه می شود:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_r' + \left( m_r \cdot \sigma_c \cdot \sigma_r' + s_r \cdot \sigma_c^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

با ترکیب معادلات (۱۱) و (۱۲) رابطه زیر حاصل می شود:

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \left[ m_r \sigma_c (\sigma_r - T/C) + s_r \sigma_c^2 \right]^{\frac{1}{2}} - T/C \quad (13)$$

با جایگذاری معادله (۱۳) در معادله (۹) داریم:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\left[ m_r \sigma_c (\sigma_r - T/C) + s_r \sigma_c^2 \right]^{\frac{1}{2}} - T/C}{r} \quad (14)$$

با توجه به اینکه در حل مسأله، کل ناحیه پلاستیک حلقه بندی می شود و از فرایند گام به گام استفاده خواهد شد؛ بنابراین معادلات مربوط به نحوه تحلیل، در قسمت (ج) و با حلقه بندی زون پلاستیک تشریح می شود.

**ج)** برای تعیین مقاومت توده سنگ در زون نرم کرنشی، فرض می شود که  $m$  و  $s$  از مقادیر متناظر با نقطه پیک (Peak) به ازای  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1e}$  به طور خطی به مقادیر  $m_r$  و  $s_r$  به ازای  $\varepsilon_1 = \alpha \varepsilon_{1e}$  در انتهای منطقه نرم کرنشی کاهش می یابند. بنابراین، مقاومت توده سنگ نسبتاً شکسته و ضعیف شده (ناحیه نرم کرنشی) در هر گام یا در هر حلقه از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (\bar{m} \sigma_c \sigma_3 + \bar{s} \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

با توجه به شکل (۳) خواهیم داشت:

$$\bar{s} = s + (s_r - s) \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{1e})}{(\alpha - 1)\varepsilon_{1e}} \quad (16)$$

با توجه به پیچیدگی معادلات جبری، توزیع کامل تنش و کرنش در ناحیه نرم کرنشی به روش حل بسته ریاضی ممکن نبوده، بلکه می توان با استفاده از روش تفاضل محدود، تنش ها و کرنش ها را در مرزهای تعدادی از حلقه هایی که ناحیه پلاستیک توسط آنها تقسیم می شود (شکل ۴)، محاسبه کرد.

$$\bar{m} = m + (m_r - m) \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{1e})}{(\alpha - 1)\varepsilon_{1e}} \quad (17)$$

با توجه به تقسیم بندی فوق، حلقه  $j-1$  مابین شعاع  $j$  و  $j-1$  قرار داشته و تغییر مکان ها، کرنش ها و تنش ها در این شعاع ها به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\varepsilon_{\theta(j)}, \varepsilon_{r(j)}, \sigma_{\theta(j)}, \sigma_{r(j)}, u_{(j-1)}, \sigma_{r(j-1)}, u_j, \varepsilon_{\theta(j-1)}, \varepsilon_{r(j-1)}, \sigma_{\theta(j-1)}$$

$E_{eff}$  مدول الاستیسیته ترکیب توده سنگ و سنگ دوز؛  $E_s$  مدول الاستیسیته سنگ دوز؛  $A_b$  سطح مقطع سنگ دوز و  $C$  سطح مؤثر سنگ دوز بوده و از رابطه زیر حساب می شود:

$$C = S_l \cdot S_t \quad (8)$$

که  $S_l$  و  $S_t$  به ترتیب فاصله داری طولی و محیطی سنگ دوزها از هم است (شکل ۲).

به این ترتیب، در این حالت با جایگزینی  $E_{eff}$  با  $E$  در رابطه (۶) اثر سنگ دوز قابل تحلیل است. یعنی در این حالت تأثیر سنگ دوز در توده منجر به افزایش سختی آن می شود.

لازم به توضیح است در اغلب موارد عملی، ترکیب تنش های درجا و خصوصیات توده سنگ همراه با فشار معادل سنگ دوزهای تزریقی به گونه ای است که نواحی مربوط به بندهای الف، ب و ج با هم در اطراف تونل به وجود می آیند. در زیر به چنین مهمی پرداخته می شود.

**ب)** در این حالت فشار معادل سنگ دوزهای تزریقی در جدار تونل کمتر از فشار بحرانی بوده و توده سنگ شکسته و رفتار پلاستیک از خود نشان می دهد. با فرض اینکه پیوستگی کاملی بین توده سنگ و سنگ دوزها بوسیله دوغاب وجود دارد و همچنین کرنش آنها با هم سازگار بوده و سنگ دوزها با فاصله بندی  $C$  به صورت شعاعی و متقارن در پیرامون تونل نصب شده باشند، معادله دیفرانسیل تعادل توده سنگ پلاستیک مسلح شده اطراف تونل برابر است با:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0 \quad (9)$$

که  $\sigma_r$  و  $\sigma_{\theta}$  به ترتیب تنش های شعاعی و مماسی نقطه ای به فاصله  $r$  از مرکز تونل مسلح شده با سنگ دوز تزریقی است. تنش های شعاعی و مماسی با توجه به تقارن شعاعی و مقطع دایروی تونل به ترتیب تنش اصلی کمتر و بیشتر هستند. بنابراین می توان نوشت:

$$\sigma_3 = \sigma_r \quad \sigma_1 = \sigma_{\theta} \quad (10)$$

با توجه به اینکه نیروی کششی در سنگ دوزهای تزریقی موجب ایجاد تنش های فشاری در توده سنگ شکسته می شود، اثر سنگ دوزهای تزریقی به صورت افزایش تنش شعاعی ناحیه پلاستیک بوده (فرض اصلی مدل تحلیلی) و خواهیم داشت:

$$\sigma_r' = \sigma_r - \frac{T}{C} \quad (11)$$

که  $\sigma_r'$  تنش شعاعی جدید به دلیل عملکرد سنگ دوز تزریقی و  $T$  نیروی محوری سنگ دوز است.

$$\frac{\sigma_{r(j-1)} - \sigma_{r(j)}}{r_{(j-1)} - r_{(j)}} = \frac{\left[ \frac{m_a \sigma_c}{2} \left[ \frac{\sigma_{r(j)} + \sigma_{r(j-1)}}{C} \right] + s_a \sigma_c^2 \right]^{1/2}}{r_{(j)} + r_{(j-1)}} \quad (20)$$

$$\frac{A_b E_s (\varepsilon_{r(j)} + \varepsilon_{r(j-1)} - \bar{\varepsilon}_{r(j)} - \bar{\varepsilon}_{r(j-1)})}{C} \quad (20)$$

برای یک حلقه بسیار نازک و بر اساس روابط کرنش‌ها و تغییر مکان‌ها داریم [Brown et al., 1983]:

$$\frac{r_{(j)}}{r_{(j-1)}} = \frac{2\varepsilon_{\theta(j-1)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}}{2\varepsilon_{\theta(j)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}} \quad (21)$$

پارامتر  $\lambda_{(j)}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda_{(j)} = \frac{r_{(j)}}{r_e} \quad (22)$$

با ترکیب معادلات (21) و (22) داریم:

$$\beta = \frac{\lambda_{(j)}}{\lambda_{(j-1)}} = \frac{2\varepsilon_{\theta(j-1)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}}{2\varepsilon_{\theta(j)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}} \quad (23)$$

و همچنین با استفاده از رابطه (23) و با فرض اینکه  $\gamma = \varepsilon_{r(j-1)} + \varepsilon_{r(j)}$  می‌توان نوشت:

$$\gamma = \varepsilon_{r(j-1)} + \varepsilon_{r(j)} = \frac{2[\lambda_{(j-1)} \varepsilon_{\theta(j-1)} - \lambda_{(j)} \varepsilon_{\theta(j)}]}{\lambda_{(j-1)} - \lambda_{(j)}} \quad (24)$$

اکنون با تعریف:

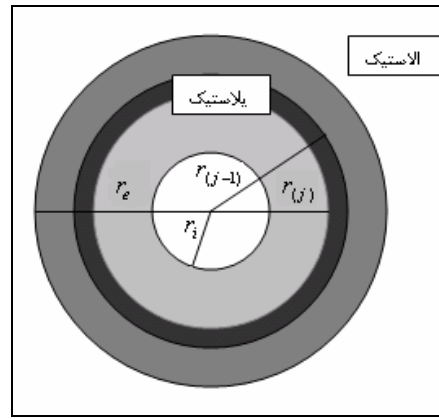
$$K = \frac{\lambda_{(j-1)} - \lambda_{(j)}}{\lambda_{(j)} + \lambda_{(j-1)}} \quad (25)$$

و با ترکیب روابط (24) و (25) در رابطه (20) و سپس ساده‌سازی آن خواهیم داشت:

$$\left[ \frac{\sigma_{r(j-1)} - \sigma_{r(j)}}{2K} + \frac{A_b E_s (\gamma)}{2C} \right]^2 = \frac{m_a \sigma_c}{2} [\sigma_{r(j)} + \sigma_{r(j-1)}] - \frac{m_a \sigma_c A_b E_s (\gamma)}{2C} + s_a \sigma_c^2$$

همچنین با تعریف:

$$K_1 = \frac{A_b E_s}{2C} \gamma \quad (26)$$



شکل ۴: حلقه بندی زون پلاستیک

بنابراین در معادله (12) پارامترهای مقاومتی  $m_r$  و  $S_r$ ، در قسمت نرم کرنشی ثابت نبوده و برای هر حلقه با روابط (16) و (17) حساب می‌شوند:

اگر معادله دیفرانسیل (14) برای یک حلقه دایروی به شعاع داخلی  $r_{(j-1)}$  و شعاع خارجی  $r_{(j)}$  بازنویسی شود، خواهیم داشت:

$$\frac{\sigma_{r(j-1)} - \sigma_{r(j)}}{r_{(j-1)} - r_{(j)}} = \frac{\left[ \frac{m_a \sigma_c}{2} \left[ \frac{\sigma_{r(j)} + \sigma_{r(j-1)}}{C} \right] - \frac{T_{(j)} + T_{(j-1)}}{C} \right]^{1/2} + s_a \sigma_c^2}{\frac{r_{(j)} + r_{(j-1)}}{2}} \quad (18)$$

$$\frac{T_{(j)} + T_{(j-1)}}{2C} \frac{2}{r_{(j)} + r_{(j-1)}} \quad (18)$$

$m_a$  و  $S_a$  پارامترهای مقاومتی حلقه  $j$  است.

پس از نصب و تزریق سنگ دوز، با پیشروی سینه کار توده سنگ اطراف تونل تغییر شکل پلاستیک داده و با ایجاد تنش برشی در سطح مشترک سنگ و دوغاب و سپس دوغاب و سنگ دوز، این تغییر شکل به بولت منتقل می‌شود. در این حالت نیروی محوری و کرنش مربوطه در هر نقطه از طول سنگ دوز ثابت نبوده و متناسب با تغییر مکان توده سنگ در آن نقطه خواهد بود. با توجه به اینکه تغییر مکان توده سنگ از شعاع پلاستیک نهایی تا شعاع تونل به تدریج بیشتر می‌شود؛ کرنش سنگ دوز نیز در جدار تونل به بیشترین مقدار خود رسیده و مقدار آن در شعاع پلاستیک به کرنش شعاعی الاستیک توده سنگ کاهش می‌یابد. بنابراین، نیروی محوری سنگ دوز در حلقه  $j$  برابر است با:

$$T_{(j)} = A_b E_s (\varepsilon_{r(j)}) \quad (19)$$

$A_b$  سطح مقطع سنگ دوز؛  $E_s$  مدول الاستیسیته سنگ دوز و  $\varepsilon_{r(j)}$  کرنش شعاعی توده سنگ در حلقه  $j$  است.

با ترکیب معادلات (18) و (19) رابطه (20) نتیجه می‌شود:

تزریقی تبدیل شود که این مسأله در پیوست الف بررسی شده است.

$$K_2 = \frac{m_a \sigma_c}{4} \quad (28)$$

و قرار دادن آنها در معادله (26) نتیجه زیر به دست می آید:

(29)

$$\left[ \frac{\sigma_{r(j-1)} - \sigma_{r(j)}}{2K} \right]^2 + K_1^2 + \frac{K_1}{K} [\sigma_{r(j-1)} - \sigma_{r(j)}] = 2K_2 \times [\sigma_{r(j)} + \sigma_{r(j-1)}] - 4K_1K_2 + s_a \sigma_c^2$$

معادله (29) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

(30)

$$\frac{\sigma_{r(j-1)}^2}{4K^2} + \frac{\sigma_{r(j)}^2}{4K^2} - \frac{\sigma_{r(j)}\sigma_{r(j-1)}}{2K^2} + K_1^2 + \frac{K_1}{K} \sigma_{r(j-1)} - \frac{K_1}{K} \sigma_{r(j)} - 2K_2\sigma_{r(j)} - 2K_2\sigma_{r(j-1)} + 4K_1K_2 - s_a \sigma_c^2 = 0$$

یا (31)

$$\left( \frac{1}{4K^2} \right) \sigma_{r(j)}^2 + \left( \frac{-K_1}{K} - \frac{\sigma_{r(j-1)}}{2K^2} - 2K_2 \right) \sigma_{r(j)} + \left( \frac{\sigma_{r(j-1)}^2}{4K^2} + K_1^2 + \frac{K_1}{K} \sigma_{r(j-1)} - 2K_2\sigma_{r(j-1)} + 4K_1K_2 - s_a \sigma_c^2 \right) = 0$$

به این ترتیب معادله درجه دومی حاصل می شود که متغیر آن  $\sigma_{r(j)}$  است و به ازای هر  $\sigma_{r(j-1)}$  معلوم، قابل محاسبه است. به این ترتیب می توان نوشت:

$$\sigma_{r(j)} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (32)$$

که در آن:

$$a = \frac{1}{4K^2}, \quad b = \frac{-K_1}{K} - \frac{\sigma_{r(j-1)}}{2K^2} - 2K_2$$

$$c = \sigma_{r(j-1)} \left[ \frac{\sigma_{r(j-1)}}{4K^2} + \frac{K_1}{K} - 2K_2 \right] + K_1^2 + 4K_1K_2 - s_a \sigma_c^2$$

بنابراین معادله (30) به کمک ضرایب بالا بازنویسی می گردد:

$$a \cdot \sigma_{r(j)}^2 + b \cdot \sigma_{r(j)} + c = 0 \quad (33)$$

برای شرایط عدم وجود سنگ دوزهای تزریقی، معادله دیفرانسیل (31) بایستی به معادله معرفی شده براون [Brown (et al.), 1983] برای توده سنگ با رفتار نرم کرنشی و بدون سنگ دوزهای

## 5. محاسبات تحلیلی سنگ دوزهای تزریقی فعال

نصب سنگ دوزهای تزریقی فعال با دوغاب مناسب در دو مرحله و شامل ۱- استقرار سنگ دوز و ایجاد طول گیرداری با تزریق دوغاب و کشیدن سنگ دوز و مهار آن به سطح تونل از طریق صفحه انتهایی و ۲- تزریق طول باقی مانده آن است [Hoek and Brown, 1980].

سنگ دوزهای فعال، پس از نصب و اعمال بار پیش تنیدگی تنها از طریق صفحه انتهایی خود به توده سنگ جدار تونل فشار وارد می کنند. پس از تزریق طول آزاد و ادامه پیش روی حفاری، این سنگ دوزها همانند سنگ دوزهای تزریقی نوع غیر فعال توسط صفحه انتهایی و اصطکاک سطح جانبی همگرایی تونل را محدود می کند. بنابراین سنگ دوزهای تزریقی فعال به لحاظ اصطکاک سطح جانبی همانند سنگ دوزهای غیر فعال عمل کرده و تفاوت عملکرد آنها با نوع غیرفعال، تنها در میزان اعمال فشار اولیه (و در کل فشار بیشتر بر سطح تونل و توده سنگ شکسته در مقایسه با نوع غیر فعال) بر سطح تونل از طریق صفحه انتهایی است.

اصول زیر باید در مدلسازی تحلیلی این سنگ دوزها باید مورد توجه قرار گیرد:

- طول سنگ دوز نیز باید به میزانی انتخاب شود که علاوه بر آنکه طول گیرداری آن برای پیش تنیدگی، خارج از منطقه پلاستیک توده سنگ (یعنی در قسمت الاستیک) قرار گیرد، کشش پیش تنیدگی موجب همگرایی توده سنگ سالم و ایجاد شکست در توده سنگ الاستیک در محدوده طول گیرداری نشود.

- از کرنش ناشی از پیش تنیدگی در طول گیرداری سنگ دوز صرف نظر می شود.

- میزان پیش بارگذاری به حدی است که مجموع آن با باری که در مرحله تغییر شکل توده سنگ در سنگ دوز حاصل می شود، کمتر از کل ظرفیت پذیرش بار سیستم است.

- فشار اولیه ناشی از پیش تنیدگی که از طریق صفحه انتهایی سنگ دوز بر سطح تونل اعمال می شود؛ بدون هیچ کاهش و به صورت شعاعی در عمق توده سنگ پلاستیک شده انتقال می یابد (فرض اساسی مدلسازی سنگ دوزهای تزریقی فعال).

$$K_t = \frac{A_b E_s}{2C} \gamma_t \quad (41)$$

مشابه حالت غیر فعال با ترکیب و سپس ساده سازی روابط، معادله درجه دومی حاصل می شود که متغیر آن  $\sigma_{r(j)}$  است و به ازای هر  $\sigma_{r(j-1)}$  معلوم، قابل محاسبه است:

(42)

$$\left( \frac{1}{4K^2} \right) \sigma_{r(j)}^2 + \left( \frac{-K_1 - K_t}{K} - \frac{\sigma_{r(j-1)}}{2K^2} - 2K_2 \right) \sigma_{r(j)} + \left( \frac{\sigma_{r(j-1)}^2}{4K^2} + K_1^2 + K_t^2 + 2K_1 K_t + \frac{K_1 + K_t}{K} \sigma_{r(j-1)} - 2K_2 \sigma_{r(j-1)} + 4K_1 K_2 + 4K_2 K_t - s_a \sigma_c^2 \right) = 0$$

که در آن:

(43)

$$a = \frac{1}{4K^2}, \quad b = \frac{-K_1 - K_t}{K} - \frac{\sigma_{r(j-1)}}{2K^2} - 2K_2$$

$$c = \sigma_{r(j-1)} \left[ \frac{\sigma_{r(j-1)}}{4K^2} + \frac{K_1 + K_t}{K} - 2K_2 \right] + (K_1 + K_t)^2 + 4(K_1 K_2 + K_2 K_t) - s_a \sigma_c^2$$

در حالت عدم پیش تنیدگی سنگ دوزهای تزریقی، معادله های دیفرانسیل (43) بایستی مشابه معادله معرفی شده برای توده سنگ با رفتار نرم کرنشی و سنگ دوزهای تزریقی غیر فعال باشد. در این صورت:

$$K_t = 0 \quad (44)$$

با جایگذاری این رابطه در معادله دیفرانسیل (42) داریم:

$$\left( \frac{1}{4K^2} \right) \sigma_{r(j)}^2 + \left( \frac{-K_1}{K} - \frac{\sigma_{r(j-1)}}{2K^2} - 2K_2 \right) \sigma_{r(j)} + \left( \frac{\sigma_{r(j-1)}^2}{4K^2} + K_1^2 + \frac{K_1}{K} \sigma_{r(j-1)} - 2K_2 \sigma_{r(j-1)} + 4K_1 K_2 - s_a \sigma_c^2 \right) = 0 \quad (31) \text{ تکراری}$$

این معادله همان دیفرانسیل تعادلی است که برای سنگ دوزهای تزریقی غیر فعال به دست آمد.

بنابراین، این سنگ دوزها فشار شعاعی و محصور کنندگی بیشتری به اندازه فشار پیش تنیدگی در مقایسه با نوع غیر فعال به توده سنگ شکسته اعمال می کنند.

- میزان پیش بارگذاری به حدی است که مجموع آن با باری که در مرحله تغییرشکل توده سنگ در سنگ دوز حاصل می شود، کمتر از کل ظرفیت پذیرش بار سیستم است.

- فشار اولیه ناشی از پیش تنیدگی که از طریق صفحه انتهای سنگ دوز بر سطح تونل اعمال می شود، بدون هیچ کاهش و به صورت شعاعی در عمق توده سنگ پلاستیک شده انتقال می یابد (فرض اساسی مدل سازی سنگ دوزهای تزریقی فعال).

بنابراین این سنگ دوزها فشار شعاعی و محصورکنندگی بیشتری به اندازه فشار پیش تنیدگی در مقایسه با نوع غیر فعال به توده سنگ شکسته اعمال می کنند.

همه فرضیات مسئله در مدل تحلیلی غیر فعال برای این حالت نیز برقرار است. بنابراین معادله دیفرانسیل تعادل در حلقه از رابطه (18) محاسبه می شود. به دلیل اعمال کشش، نیروی محوری سنگ دوز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$T_{(j)} = A_b E_s (\varepsilon_{r(j)} + \varepsilon_{t(j)}) \quad (37)$$

$\varepsilon_t$  کرنش ناشی از پیش تنیدگی بوده و با توجه به اینکه پیش تنیدگی قبل از تزریق قسمت آزاد سنگ دوز صورت می گیرد؛ بنابراین مقدار آن در طول سنگ دوز در قسمت آزاد آن ثابت خواهد بود:

$$\varepsilon_{t(j)} = \varepsilon_{t(j-1)} \quad (38)$$

با ترکیب معادلات (18) و (37) داریم:

(39)

$$\frac{\sigma_{r(j-1)} - \sigma_{r(j)}}{r_{(j-1)} - r_{(j)}} = \frac{\left[ \frac{m_a \sigma_c}{2} \left( \frac{\sigma_{r(j)} + \sigma_{r(j-1)}}{C} \right) + s_a \sigma_c^2 \right]^{1/2}}{\frac{r_{(j)} + r_{(j-1)}}{2}} = \frac{A_b E_s \left( \varepsilon_{r(j)} + \varepsilon_{r(j-1)} + 2\varepsilon_{t(j)} \right)}{C \left( r_{(j)} + r_{(j-1)} \right)}$$

تمام روابط مدل تحلیلی حالت غیر فعال برای این حالت صادق بوده و تنها به دلیل کرنش پیش تنیدگی روابط زیر را نیز تعریف می کنیم:

$$\gamma_t = 2\varepsilon_{t(j)} \quad (40)$$



## ۶. برنامه کامپیوتری و حل چند مثال

در این مثال فرض می‌شود که  $A_b = 0$  است. بنابراین منحنی پاسخ توده سنگ غیر مسلح محاسبه می‌شود.  
**مثال ۲:** در این تونل سنگ دوزهای تزریقی غیرفعال با مشخصات مندرج در جدول ۱ نصب می‌شوند.  
**مثال ۳:** در تونل مورد نظر، سنگ دوزها با اعمال نیروی پیش تنیدگی در حالت فعال بکار گرفته می‌شوند.

### ۶-۱ بررسی نتایج تحلیل مثال‌های ۱ تا ۳

در مثال دوم، انتظار می‌رود تغییر شکل‌های ناحیه پلاستیک توده سنگ مسلح به دلیل وجود سنگ دوزهای تزریقی در قیاس با توده سنگ غیر مسلح کمتر باشد. جدول ۱ و شکل (۵) این مهم را تأیید می‌کنند. همگرایی تونل نیز به کمتر از  $0.3$  همگرایی آن در حالت غیر مسلح کاهش می‌یابد. در مثال سوم، به دلیل پیش تنیدگی سنگ دوزهای تزریقی و کشش بیشتر بولت، فشار شعاعی توده سنگ نسبت به حالت غیرفعال بیشتر افزایش می‌یابد و در این حالت همگرایی تونل نسبت به شرایطی که سنگ دوزهای تزریقی غیرفعال بکار گرفته می‌شوند؛  $23/6\%$  کاهش می‌یابد. منحنی پاسخ زمین برای سه مثال اول در شکل (۵) ترسیم شده است.

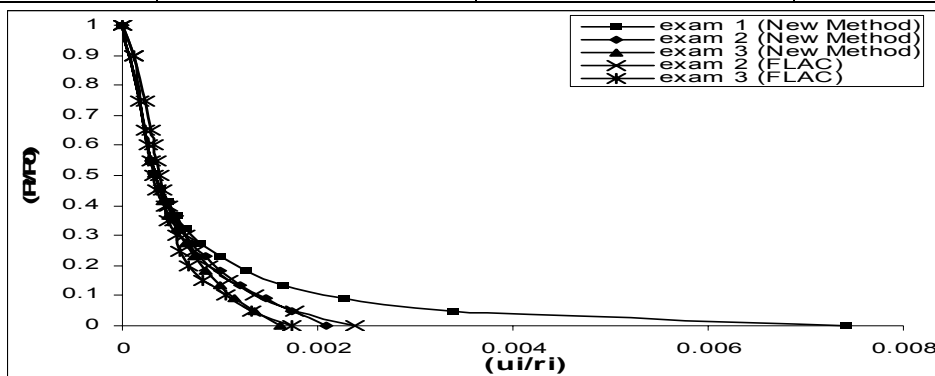
برای حل معادلات دیفرانسیل مدل‌های تحلیلی ارایه شده برای سنگ دوزهای تزریقی فعال و غیرفعال به روش عددی، برنامه کامپیوتری در محیط MathCad تهیه شده است. با استفاده از این برنامه، محاسبات مربوط به منحنی پاسخ زمین برای توده سنگ مسلح شده با سنگ دوزهای تزریقی فعال و غیرفعال که از مدل رفتاری نرم شوندگی کرنش پیروی می‌کند؛ انجام شده و منحنی مربوطه رسم می‌شود. علاوه بر آن در حالت خاص، این برنامه قابلیت ترسیم منحنی پاسخ زمین برای توده سنگ اطراف تونل را نیز داراست که این امر با در نظر نگرفتن اثر سنگ دوز محقق می‌شود. برای نشان دادن کارایی مدل‌ها تعدادی مثال از مراجع [Brown (et al.), 1980, Hoek and Brown, 1980] انتخاب و با استفاده از این برنامه حل می‌شود. برای مقایسه نتایج حاصل از مدل‌ها از لحاظ کمی، از نرم‌افزار FLAC نیز استفاده می‌شود.

**مثال ۱** (تونل آزمایشی کیلدر در مادستون فورفیتیم): تونل دایروی به شعاع  $1/65 m$  در عمقی که تنش هیدروستاتیک اولیه آن  $P_0 = 2.56 MPa$  است؛ حفاری می‌شود. خصوصیات توده سنگ به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 37 MPa, & \nu &= 0.25, & E_r &= 5 MPa \\ s &= 0.00008 & m &= 0.1, & f &= 1, & h &= 0, & \alpha &= 1 \\ m_r &= 0.05 & s_r &= 0.00001 \end{aligned}$$

جدول ۱. اطلاعات ورودی سنگ دوزهای تزریقی در مثال‌های ۱ و ۲ و ۳

مثالها		مثال ۱	مثال ۲	مثال ۳
مشخصات سنگ دوزهای تزریقی	C	-	$0.5 m^2$	$0.5 m^2$
	F <sub>y</sub>	-	$5000 (Kg/cm^2)$	$5000 (Kg/cm^2)$
	A <sub>b</sub>	۰	$5 cm^2$	$5 cm^2$
	E <sub>s</sub>	-	$200 GPa$	$200 GPa$
	P	۰	۰	$\lambda ton$



شکل ۵. منحنی‌های پاسخ زمین مثال‌های ۱ و ۲ و ۳

۶-۲ بررسی نتایج تحلیل مثال‌های ۴ تا ۷

در مثال ۵، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود (طبق جدول ۳ و شکل ۶) وجود سنگ دوزهای تزریقی و مسلح کردن توده سنگ موجب کاهش قابل توجه همگرایی تونل می‌شود (حدود ۶۹٪ همگرایی آن در حالت غیر مسلح).

مثال ۶، نقش فاصله بندی سنگ دوزها را در کنترل همگرایی بررسی می‌کند. در این مثال، فاصله بندی سنگ دوزها ۶۰٪ کاهش نسبت به مثال ۵ کاهش یافته و همین امر موجب می‌شود که تغییر مکان جدار تونل ۱۲٪ نسبت به حالت قبلی کمتر شود. در واقع به ازای سطح مقطع واحد، تعداد سنگ‌دوزها و به عبارتی سطح مؤثر سنگ‌دوزها افزایش می‌یابد و افزایش سطح مؤثر سنگ‌دوز تزریقی معادل با افزایش خصوصیات مقاومتی توده سنگ شکسته از طریق خاصیت مسلح کنندگی و بافتن آن به یکدیگر است.

مثال ۴: یک تونل راه به قطر ۱۰/۷ متر قرار است در سنگ گنیس با کیفیت متوسط در عمق ۱۲۲ متری زمین حفر شود. مشخصات توده سنگ به شرح زیر است:

$$\sigma_c = 27.6 \text{ MPa}, \nu = 0.25, E_r = 4.38 \text{ GPa}$$

$$s = 0.001 \quad m = 0.5, f = 1.2, h = 2, \alpha = 3.5$$

$$P_0 = 3.31 \text{ MPa} \text{ و } m_r = 0.1 \quad s_r = 0$$

همگرایی تونل و منحنی پاسخ توده سنگ غیر مسلح محاسبه می‌شود. نتایج تحلیل در جدول ۳ و منحنی پاسخ زمین در حالت غیر مسلح در شکل (۶) نمایش داده شده است.

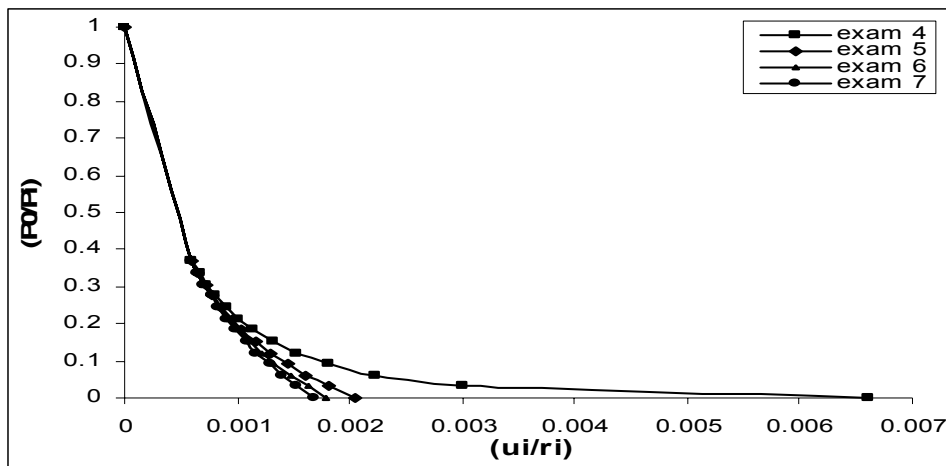
مثال ۵: در این تونل سنگ‌دوزهای تزریقی غیر فعال با مشخصات مندرج در جدول ۲ نصب می‌شوند.

مثال ۶: سنگ دوزهای تزریقی غیر فعال با فاصله بندی کمتری نسبت به مثال قبل نصب می‌شوند. اطلاعات ورودی در جدول ۲ آورده شده است.

مثال ۷: در این مثال، سنگ دوزهای غیر فعال با سطح مقطع بزرگ‌تری نسبت به مثال ۶ نصب می‌شوند.

جدول ۲. اطلاعات ورودی سنگ‌دوزهای تزریقی در مثال‌های ۴ تا ۱۰

مثالها	مثال ۴	مثال ۵	مثال ۶	مثال ۷	مثال ۸	مثال ۹	مثال ۱۰
C	-	۰/۴m <sup>2</sup>	۰/۲۵m <sup>2</sup>	۰/۲۵m <sup>2</sup>	۰/۴m <sup>2</sup>	۰/۴m <sup>2</sup>	۰/۲۵m <sup>2</sup>
F <sub>y</sub>	-	۵۰۰۰ (Kg/cm <sup>2</sup> )	۵۰۰۰ (Kg/cm <sup>2</sup> )	۵۰۰۰ (Kg/cm <sup>2</sup> )	۵۰۰۰ (Kg/cm <sup>2</sup> )	۵۰۰۰ (Kg/cm <sup>2</sup> )	۵۰۰۰ (Kg/cm <sup>2</sup> )
A <sub>b</sub>	۰	۵cm <sup>2</sup>	۵cm <sup>2</sup>	۶/۲ cm <sup>2</sup>	۵cm <sup>2</sup>	۵cm <sup>2</sup>	۵cm <sup>2</sup>
E <sub>s</sub>	-	۲۰۰GPa	۲۰۰GPa	۲۰۰GPa	۲۰۰GPa	۲۰۰GPa	۲۰۰GPa
P	۰	۰	۰	۰	۵ton	۸ton	ton۸



شکل ۶. منحنی‌های پاسخ زمین مثال‌های ۴ تا ۷

پیش تنیدگی، به دلیل افزایش فشار همه حانبه توده سنگ است. زیرا افزایش پیش تنیدگی سنگ دوز تنها موجب افزایش فشار شعاعی بر دیواره تونل از طریق صفحه انتهایی است. همچنین با مقایسه این نتایج مثال ۱۰ با نتایج مثال ۶ ملاحظه می شود که با پیش تنیده کردن سنگ دوز همگرایی تونل نسبت به حالت غیر فعال ۱۵/۶٪ کاهش می یابد. مقایسه این مقدار کاهش (۱۵/۶٪) با حالت مشابه آن در مثالهای ۵ و ۹ (۱۴٪) نشان می دهد که با کاهش فاصله بندی نقش فعال کردن سنگ دوزها در کنترل همگرایی بیشتر می شود. منحنی پاسخ زمین در مثالهای ۸، ۹ و ۱۰ همراه مثالهای ۴ و ۵ در شکل (۷) ترسیم شده است تا میزان پیش تنیده کردن در مقدار کاهش همگرایی ملاحظه شود.

### ۶-۴ مدل سازی مثال ها در نرم افزار FLAC

از مدل رفتاری تنش- کرنش نرم شونده و معیار خرابی مورکولمب برای مدل سازی رفتار توده سنگ استفاده می شود. همچنین در مدل سازی سنگ دوز در این نرم افزار (المان کابل) از قابلیت استفاده شده است که اتصال بولت به محیط توده سنگ به صورت صلب فراهم شود (فرض انجام شده در مدل تحلیلی). سنگ دوزها با تغییر شکل شبکه بندی که ناشی از انجام حفاری و تنش های محلی است؛ تحت اثر نیروهای محوری کششی یا فشاری در طول خود قرار می گیرند و از تغییر شکل بیشتر محیط جلوگیری می کنند [FLAC, user's Manual, 2002]. بنابراین این نرم افزار نیز اثر سنگ دوزها را اعمال فشار به توده سنگ فرض می کند (مطابق با فرض انجام گرفته در مدل تحلیلی) که این فشار دور شدن از سنگ دوز کاهش می یابد. حال آنکه در مدل تحلیلی فشار وارده از سنگ دوز به توده سنگ در محدوده آن (یعنی C) ثابت باقی می ماند.

مثال ۷، نقش سطح مقطع سنگ دوزها را تسلیح توده سنگ مورد بررسی قرار می دهد. با توجه به نتایج کمی تحلیل (جدول ۳) ملاحظه می گردد که همگرایی تونل نسبت به مثال ۵ کمتر شده است. (حدود ۱۸٪ نسبت به مثال ۵). در واقع کاهش بیشتر همگرایی تونل نسبت به مثال ۶ ناشی از افزایش سطح مقطع سنگ دوز است.

بنابراین با توجه به مباحث صورت گرفته چنین نتیجه می شود که کاهش فاصله بندی سنگ دوزها بیش از افزایش سطح مقطع آنها در افزایش سختی سیستم نگهداری موثر است. منحنی پاسخ زمین برای این مثالها در شکل (۶) ترسیم شده است.

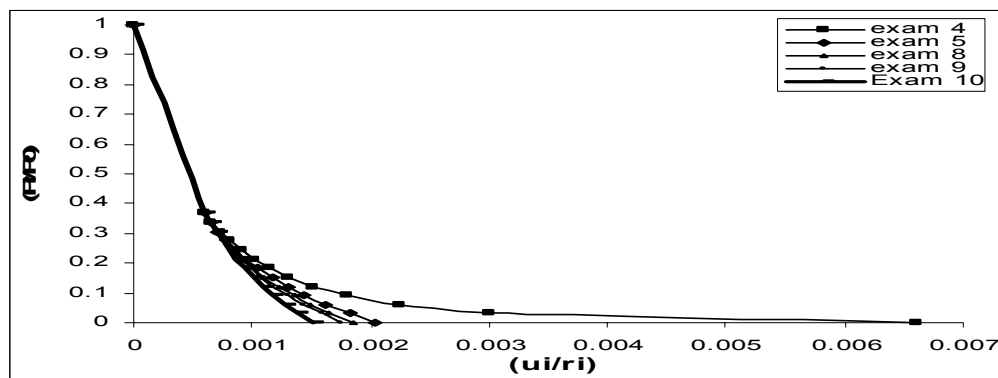
مثال ۸: در تونل مورد بحث در مثال ۴، سنگ دوزها با اعمال نیروی پیش تنیدگی (۲۰٪ حد تسلیم بولت) و با مشخصات مندرج در جدول ۲ در حالت فعال بکار گرفته می شوند (نصب سنگ دوزهای فعال در مثال ۵).

مثال ۹: در این مثال سنگ دوزهای تزریقی فعال با نیروی پیش تنیدگی بیشتری نسبت به مثال قبل نصب می شوند. اطلاعات ورودی در جدول ۲ آورده شده است.

مثال ۱۰: در مثال ۶ سنگ دوزهای تزریقی فعال نصب می شوند.

### ۶-۳ بررسی نتایج تحلیل مثالهای ۸ تا ۱۰

مثالهای بالا نقش پیش تنیدگی و فعال کردن سنگ دوزها را در کنترل همگرایی تونل بررسی می کند. با رجوع به نتایج تحلیل در جدول ۳، ملاحظه می شود که فعال کردن سنگ دوزها (مثال ۸) همگرایی تونل را ۹/۲٪ نسبت به حالت غیر فعال آن (مثال ۵) کاهش می دهد. همچنین به دلیل اعمال نیروی پیش تنیدگی بیشتر (مثال ۹)، همگرایی تونل (مثال ۸) محدودتر می شود. در مثال ۹، تغییر مکان جدار تونل نسبت به مثال ۵/۱۴٪ کمتر می شود. در واقع، افزایش مقاومت توده سنگ ناشی از



شکل ۷- منحنی های پاسخ زمین مثالهای ۸ تا ۱۰

جدول ۳: نتایج تحلیل مثال‌ها با روش تحلیلی و FLAC

مثال	$(P_i/P_0)\%$	۰	۴/۶	۹/۲	۱۳/۷	۱۸/۳	۲۲/۹	۲۷/۵	۳۲/۱	۳۶/۶	۴۱/۲	
۴۵/۸	۵۰/۴	۵۵	۱۰۰									
۱	$(u_i/r_i)\%$	۰/۷۴۱	۰/۳۳۷	۰/۲۲۵	۰/۱۶۳	۰/۱۲۵	۰/۰۹۸	۰/۰۸۰	۰/۰۶۶	۰/۰۵۵	۰/۰۴۶	۰/۰۳۹
۰/۰۳۳	۰/۰۲۹	۰										
۲		۰/۲۱۰	۰/۱۷۴	۰/۱۴۹	۰/۱۲۱	۰/۱۰۱	۰/۰۸۵	۰/۰۷۲	۰/۰۶۱	۰/۰۵۲	۰/۰۴۴	
۰/۰۳۸	۰/۰۳۳	۰/۰۲۹	۰									
۳		۰/۱۶۱	۰/۱۳۶	۰/۱۱۶	۰/۰۹۹	۰/۰۸۵	۰/۰۷۳	۰/۰۶۳	۰/۰۵۵	۰/۰۴۸	۰/۰۴۲	
۰/۰۳۷	۰/۰۳۳	۰/۰۲۹	۰									
	$(P_i/P_0)\%$	۰	۳/۱	۶/۱	۹/۲	۱۲/۲	۱۵/۳	۱۸/۴	۲۱/۴	۲۴/۵	۲۷/۶	
۳۰/۶	۳۳/۷	۳۶/۷	۱۰۰									
۴	$(u_i/r_i)\%$	۰/۶۶۲	۰/۳۰۰	۰/۲۲۴	۰/۱۸۱	۰/۱۵۲	۰/۱۳۲	۰/۱۱۵	۰/۱۰۲	۰/۰۹۱	۰/۰۸۲	۰/۰۷۳
۰/۰۶۶	۰/۰۶۰	۰										
۵		۰/۲۰۵	۰/۱۸۲	۰/۱۶۱	۰/۱۴۴	۰/۱۲۹	۰/۱۱۷	۰/۱۰۵	۰/۰۹۶	۰/۰۸۶	۰/۰۷۹	
۰/۰۷۲	۰/۰۶۶	۰/۰۶۰	۰									
۶		۰/۱۷۹	۰/۱۶۲	۰/۱۴۷	۰/۱۳۳	۰/۱۲۲	۰/۱۱۱	۰/۱۰۲	۰/۰۹۲	۰/۰۸۵	۰/۰۷۸	
۰/۰۷۱	۰/۰۶۵	۰/۰۶۰	۰									
۷		۰/۱۶۸	۰/۱۵۳	۰/۱۴۰	۰/۱۲۸	۰/۱۱۷	۰/۱۰۸	۰/۰۹۹	۰/۰۹۱	۰/۰۸۳	۰/۰۷۷	
۰/۰۷۱	۰/۰۶۵	۰/۰۶۰	۰									
۸		۰/۱۸۵	۰/۱۶۵	۰/۱۴۹	۰/۱۳۵	۰/۱۲۲	۰/۱۱۱	۰/۱۰۱	۰/۰۹۳	۰/۰۸۵	۰/۰۷۹	
۰/۰۷۲	۰/۰۶۶	۰/۰۶۰	۰									
۹		۰/۱۷۹	۰/۱۵۹	۰/۱۴۳	۰/۱۳۰	۰/۱۱۸	۰/۱۰۸	۰/۰۹۹	۰/۰۹۱	۰/۰۸۳	۰/۰۷۶	
۰/۰۷۱	۰/۰۶۵	۰/۰۶۰	۰									
۱۰		۰/۱۵۱	۰/۱۳۹	۰/۱۲۸	۰/۱۱۸	۰/۱۱۰	۰/۱۰۱	۰/۰۹۴	۰/۰۸۷	۰/۰۸۰	۰/۰۷۵	
۰/۰۷۰	۰/۰۶۵	۰/۰۶۰	۰									
	$(P_i/P_0)\%$	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	
۵۰	۵۵	۶۰	۱۰۰									
۲ (FLAC)	$(u_i/r_i)\%$	۰/۲۳۹	۰/۱۷۶	۰/۱۳۴	۰/۱۰۸	۰/۰۸۸	۰/۰۷۴	۰/۰۶۳	۰/۰۵۳	۰/۰۴۷	۰/۰۴۲	
۰/۰۳۹	۰/۰۳۵	۰/۰۳۲	۰	۳ (FLAC)		۰/۱۷۵	۰/۱۳۲	۰/۱۰۵	۰/۰۸۴	۰/۰۶۸	۰/۰۶۰	۰/۰۵۵
۰/۰۴۷	۰/۰۴۳	۰/۰۳۷	۰/۰۳۴	۰/۰۳۱	۰/۰۲۸	۰						

## ۷. بحث و نتیجه‌گیری

و تحلیل اندرکنش آنها با توده سنگ در پایدارسازی تونل بر اساس روش کنترل همگرایی ارایه شد و سپس این مدل برای سنگ دوزهای تزریقی فعال نیز توسعه داده شد. در این مدل‌ها فرض شد که توده سنگ تحت معیار خرابی غیر خطی هوک‌براون

اصول کلاسیک رسم منحنی پاسخ زمین و خط حائل موجود برای سنگ دوزهای تزریقی، به دلیل اندرکنش مکانیکی آن با توده سنگ اطراف خود، بکار نمی‌آید. در این مطالعه، مدل تحلیلی جدیدی برای درک رفتار سنگ دوزهای تزریقی غیر فعال

بوده و مدل رفتاری تنش- کرنش آن نیز نرم کرنشی است.

در این مدل‌ها اثر سنگ دوزهای تزریقی به صورت افزایش تنش شعاعی (تنش محصور کنندگی) در عمق توده سنگ پلاستیک (از سطح تونل تا شعاع پلاستیک) فرض شد که میزان افزایش تنش شعاعی متناسب با کرنش شعاعی توده سنگ و میزان پیش تیدگی سنگ‌دوز (در نوع فعال) در نظر گرفته شده است. این مدل‌ها اثر فاصله بندی و میزان پیش تیدگی را در همگرایی تونل و در رسم منحنی پاسخ در نظر می‌گیرد. سپس مثالهایی حل شده و منحنی پاسخ زمین برای توده‌سنگ مسلح اطراف تونل ترسیم شد. مقایسه نتایج کمی این مثالها با حل نرم‌افزار FLAC کارآمدی این مدلها را نشان می‌دهد.

## ۸. مراجع

per la atabilizzaazione della gallerie". Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, 29, pp. 35-41.

- Hoek, E., Brown, E.T. (1980) "Underground excavations in rock", The Institution of Mining and Metallurgy.

- Kaiser, P. K., Indraratna, B. (1990a) "Design for grouted rock bolts based on the convergence control method", International journal for the numerical and analytical methods in Geomechanics, No 27, pp 269-281.

- Kaiser, P. K., Indraratna, B. (1990b) "Analytical model for the design of grouted rock bolts", International journal for the numerical and analytical methods in Geomechanics. No 14, pp 227-251.

- Peila, D. and Oreste, P.P. (1995) "Axisymmetric analysis of ground reinforcing in tunneling design", Computers and Geomechanics, No 17, pp 253-274

- Peila, D. and Oreste, P.P. (1996), "Radial passive rockbolting in tunneling design with a new convergence-confinement model, Int. J. Rock Mech. Mining Sci and GeoMech, vol 33 pp 443-454

- Stillborg, B., Li, C. (1999) "Analytical models for rock bolts", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 36, 1013- 1029

- Still, H., Holmberg, M. and Nord, G. (1989) "Support of weak rock with grouted bolts and shotcrete", Int. J. of Rock Mech. Mining Sci and Geo Mech., 27, pp 269-281

- Bischoff, J.A. and Smart, J.D. (1975) "A method of computing rock reinforcement system which is structurally equivalent to an internal support system", In: Proc. 16 Symp. On Rock Mechanics, Univ. of Minnesota, pp. 179-184.

- Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B. and Hoek, E. (1983) "Ground response curve for rock tunnels", Journal of Geotechnical Engineering", 109(1), pp. 15-39 .

- Flac, fast lagrangian analysis of continua, (2002) Version 4, Users Manual.

- Grasso, P.G., Mahtab, A. and Pelizza, S. (1989) "Riquilificazione della massa rocciosa: un criterio

## پیوست الف

در حالت نبود سنگ دوزهای تزریقی، معادله های دیفرانسیل (۳۱) باید به معادله معرفی شده براون برای توده سنگ با رفتار نرم کرنشی و بدون سنگ دوز تبدیل شود:

$$\sigma_{r(j)} = b' - \sqrt{b'^2 - a'} \quad (\text{الف-۱})$$

که:

$$a' = \sigma_{r(j-1)}^2 - 4k \left[ \frac{1}{2} m_a \sigma_c \sigma_{r(j-1)} + s_a \sigma_c^2 \right] \quad (\text{الف-۲})$$

$$b' = \sigma_{r(j-1)} + k m_a \sigma_c$$

و

$$k = \left[ \frac{r_{(j-1)} - r_{(j)}}{r_{(j-1)} + r_{(j)}} \right]^2$$

برای کنترل این موضوع، با استفاده از معادلات (۲۳) و (۲۵) داریم:

$$K = \frac{\lambda_{(j-1)} - \lambda_{(j)}}{\lambda_{(j)} + \lambda_{(j-1)}} = \frac{r_{(j-1)} - r_{(j)}}{r_{(j-1)} + r_{(j)}} = k^{\frac{1}{2}} \quad (\text{الف-۳})$$

$K^2$  در این معادلات می تواند با  $k$  معادله ارایه شده توسط براون جایگزین شود. از طرفی، در صورت عدم وجود سنگ دوزهای تزریقی،  $A_b$  برابر با صفر می شود. بنابراین مقدار  $K_1$  در معادله (۲۹) برابر با صفر خواهد بود. معادله (۳۲) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_{r(j)} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-b}{2a} - \sqrt{\frac{b^2 - 4ac}{4a^2}} \quad (\text{۳۲ تکراری})$$

همچنین براون [۱۵] نشان داد که:

$$\sigma_{r(j)} = b' - \sqrt{b'^2 - a'} \quad (\text{الف-۱})$$

که:

$$a' = \sigma_{r(j-1)}^2 - 4k \left[ \frac{1}{2} m_a \sigma_c \sigma_{r(j-1)} + s_a \sigma_c^2 \right] \quad (\text{الف-۴})$$

$$b' = \sigma_{r(j-1)} + k m_a \sigma_c$$

با مقایسه معادله (الف-۱) با معادله (۳۲) استنباط می شود که:

$$-\frac{b}{2a} = b' \quad \frac{b^2 - 4ac}{4a^2} = b'^2 - a' \quad (\text{الف-۵})$$

برای اثبات داریم:

$$\frac{-b}{2a} = \frac{-\left[ \frac{-K_1}{K} - \frac{\sigma_{r(j-1)}}{2K^2} - 2K_2 \right]}{2 \times \frac{1}{4K^2}} = 4K_1K^2 + \sigma_{r(j-1)} + 4K_2K^2 \quad (\text{الف-۶})$$

نشان داده شد که  $A_b K^2 = k$ ،  $K_1 = 0$  و  $K_2 = \frac{m_a \sigma_c}{4}$ . بنابراین معادله (الف-۶) به رابطه (الف-۷) تبدیل می شود:

$$-\frac{b}{2a} = \sigma_{r(j-1)} + k m_a \sigma_c = b' \quad (\text{الف-۷})$$

تحلیل اندرکنش سنگ دوزهای تزریقی شعاعی غیرفعال و فعال با توده سنگ...

با توجه به رابطه (الف-۴)،  $b'^2 - a'$  را به صورت زیر نیز می توان نوشت:

$$b'^2 - a' = [\sigma_{r(j-1)} + km_a \sigma_c]^2 - \sigma_{r(j-1)}^2 + \frac{4km_a \sigma_c \sigma_{r(j-1)}}{2} + 4ks_a \sigma_c^2 \quad (\text{الف-۸})$$

اکنون با توجه به روابط (الف-۵)، عبارت  $\frac{b^2 - 4ac}{4a^2}$  بایستی با عبارت  $b'^2 - a'$  برابر شود.

$$\frac{b^2 - 4ac}{4a^2} = \frac{\left[ \frac{\sigma_{r(j-1)}}{2k} + \frac{2m_a \sigma_c}{4} \right]^2 - 4 \frac{1}{4k} \left[ \frac{\sigma_{r(j-1)}^2}{4k} - \frac{2m_a \sigma_c \sigma_{r(j-1)}}{4} - s_a \sigma_c^2 \right]}{4 \left( \frac{1}{16k^2} \right)} \quad (\text{الف-۹})$$

$$\begin{aligned} &= 4k^2 \left[ \frac{\sigma_{r(j-1)}^2}{4k^2} + \frac{m_a^2 \sigma_c^2}{4} + \frac{\sigma_{r(j-1)} m_a \sigma_c}{2k} - \frac{\sigma_{r(j-1)}^2}{4k^2} + \frac{m_a \sigma_c \sigma_{r(j-1)}}{2k} \right] + 4ks_a \sigma_c^2 \\ &= \sigma_{r(j-1)}^2 + m_a^2 \sigma_c^2 k^2 + 2\sigma_{r(j-1)} \sigma_c km_a - \sigma_{r(j-1)}^2 + 2km_a \sigma_c \sigma_{r(j-1)} + 4ks_a \sigma_c^2 \\ &= b'^2 - a' \end{aligned}$$

همان گونه که مشاهده می شود معادلات (الف-۸) و (الف-۹) یکسان هستند.