

تحلیل پایداری تونل انتقال آب امیرکبیر در حالت کرنش نرم‌شونده بر اساس روش خودتشابهی و استفاده از منحنی همگرایی - همجواری

علیرضا احمدی^{۱*}؛ کورش شهریار^۲؛ احمد اسدی^۳

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن؛ گرایش اکتشاف؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران - جنوب؛ کارشناس سازمان صنعت، معدن و تجارت استان تهران

۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استادیار؛ دانشکده‌ی فنی شهید کلاتری؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران - جنوب

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۸/۰۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی	چکیده
تونل امیرکبیر کرنش نرم‌شونده همگرایی - همجواری سامانه‌ی نگهداری روش اجزای محدود	تونل انتقال آب امیرکبیر با قطر ۴٫۷ متر برای انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه‌ی شماره‌ی شش تهران طراحی شده و در حال احداث است. در طی فرآیند احداث زیرسطحی، تعیین فشار وارده بر سامانه‌ی نگهداری برای طراحی ایمن تونل اصلی، مسئله‌ای مهم و تاثیرگذار است. برای محاسبه‌ی این فشار و ترسیم منحنی همگرایی زمین، شناخت رفتار پس از شکست توده‌سنگ اهمیت بسیاری دارد. توده‌سنگ در برگیرنده‌ی تونل امیرکبیر از مدل رفتاری کرنش نرم‌شونده تبعیت می‌کند. بر خلاف مدل‌های رفتاری کشسان-شکننده و مومسان کامل، در حالت کرنش نرم‌شونده نمی‌توان از گزاره‌های فرم‌بسته برای محاسبه‌ی همگرایی استفاده نمود؛ بنابراین در این مقاله برای محاسبه‌ی همگرایی در حالت کرنش نرم‌شونده از روابط خودتشابهی و برای اعتبارسنجی نتایج نیز از روش عددی اجزای محدود استفاده شده است.

۱- پیشگفتار

محاسبه‌ی همگرایی برای طراحی سامانه‌ی نگهداری تونل‌های انتقال آب امری ضروری است. در این پژوهش برای محاسبه‌ی مقدار جابجایی رخ داده در تونل از روش همگرایی-همجواری استفاده شده است. در این روش برای تخمین فشار وارد بر سامانه‌ی نگهداری، باید رفتار توده‌سنگ تحت بارگذاری مشخص شود. به همین دلیل هوک (Hoek) چهار نوع رفتار توده‌سنگ را بر اساس مقدار اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI) معرفی کرده است [1]:

۱- $65 < GSI < 90$: توده‌سنگ پس از نقطه‌ی شکست دارای رفتار شکننده است.

۲- $45 < GSI < 65$: توده‌سنگ پس از نقطه‌ی شکست دارای رفتاری شبیه گراول است.

۳- $40 < GSI < 45$: توده‌سنگ پس از نقطه‌ی شکست از خود رفتار نرم‌شونده نشان می‌دهد و مدول آن بین صفر تا بینهایت تغییر می‌کند.

۴- $GSI < 40$: پس از نقطه‌ی شکست، توده‌سنگ را می‌توان مومسان کامل فرض نمود.

آلجانو (Alejano) با بررسی‌های بیش‌تر بر روی رفتار توده‌سنگ دریافت هنگامی که اندیس مقاومت سنگ در بازه‌ی $25 < GSI < 75$ قرار دارد، می‌توان رفتار توده‌سنگ را بصورت کرنش نرم‌شونده در نظر گرفت؛ بنابراین بازه‌ی

* تهران؛ سعادت‌آباد؛ میدان کاج؛ خیابان کیان؛ پلاک ۱۵؛ سازمان صنعت، معدن و تجارت استان تهران؛ صندوق پستی: ۱۴۶۵۵۵۵۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۸۳۲۱۳۵۲۳؛ دورنگار: ۰۲۱-۲۲۱۴۲۷۳۳؛ رایانامه: ali_en_86@yahoo.com

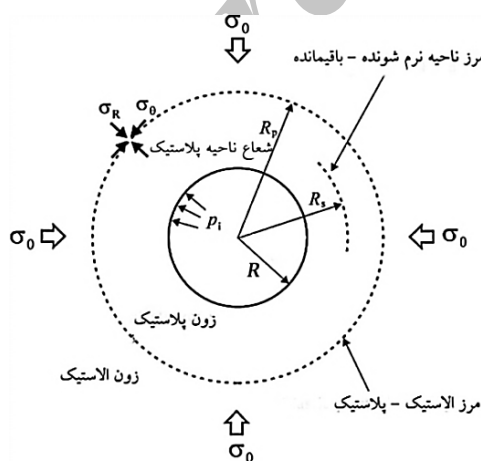
بدست آمده در این پژوهش را تایید می‌کنند.

۲- مبانی و روش انجام پژوهش

برای انجام این پژوهش ترکیبی از روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی بکار برده شده است. مفاهیم و گزاره‌های مورد استفاده در ادامه تشریح شده است.

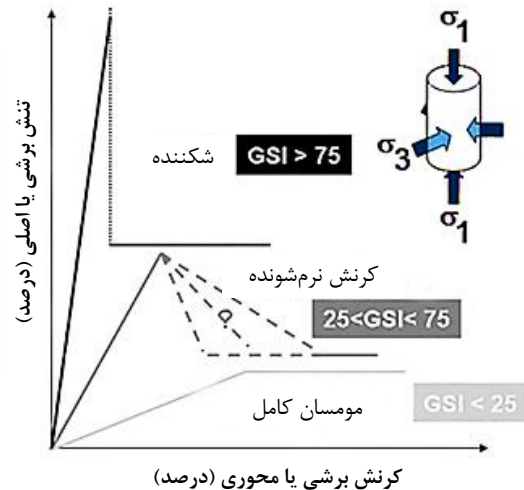
۲-۱- فرضیات

مقطع تونل دایره‌ای و توده‌سنگ دربرگیرنده، پیوسته، کشسان-مومسان، همگن، همسانگرد و دارای تنش برجای هیدرواستاتیک ($k=1$) فرض شده است. این فرضیات برای بکارگیری گزاره‌های همگرایی-همجواری ضروری است. اگر چه بار وارده در طول مسیر تونل یکنواخت نیست؛ اما در مقاطع مورد بررسی بصورت یکنواخت فرض شده است. کرنش رخ داده در طول مسیر تونل بصورت صفحه‌ای فرض شده است؛ بنابراین کرنش در راستای محور تونل را می‌توان برابر با صفر در نظر گرفت (تونل بصورت دایره‌ای در حال حفاری است). همگرایی در جهت محور تونل، تنها ناشی از پیشروی جبهه‌ی حفاری فرض می‌شود؛ بگونه‌ای که با پیشروی حفاری از فشار محصورکننده در جبهه‌ی حفاری کاسته شده و در این حالت تنش‌ها توزیع مجدد یافته که موجب شکسته شدن توده‌سنگ و همگرایی آن به درون تونل می‌شود [7]. شکل ۲، تونلی دایره‌ای در یک محیط بینهایت را نشان داده و محدوده‌ی کشسان و مومسان را مشخص می‌کند. برای برآورده شدن گزاره‌های تنش از معیار شکست موهر-کولمب استفاده شده است [8].



شکل ۲- تونل دایره‌ای در ناحیه‌ی بینهایت [8]

گسترده‌ای از سنگ‌ها در محدوده‌ی رفتار کرنش نرم‌شونده قرار می‌گیرند. شکل ۱ سه حالت رفتاری توده‌سنگ را بر اساس مطالعات آجانو نشان می‌دهد [2].



شکل ۱- رفتارهای پس از شکست توده‌سنگ بر مبنای مقادیر مختلف GSI [2]

از آنجایی که اندیس مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی تونل امیرکبیر در بازه‌ی $25 < GSI < 75$ قرار دارد، منحنی همگرایی-همجواری باید بر اساس رفتار کرنش نرم‌شونده مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مدل رفتاری به دلیل کاهش تدریجی تنش از مقدار اوج، همزمان با افزایش کرنش تا مقدار باقیمانده نمی‌توان از گزاره‌های فرمیسته برای محاسبه‌ی همگرایی استفاده نمود.

در این پژوهش گزاره‌های تحلیلی ارایه شده توسط آلنسو (Alonso) برای محاسبه‌ی همگرایی در حالت کرنش نرم‌شونده در محیط *MATLAB* برنامه‌نویسی شده است [3]. در شرایطی که توده‌سنگ دارای اندیس $25 < GSI < 75$ است، برخلاف مدل‌های رفتاری کشسان-شککننده و مومسان کامل، بکارگیری مدل رفتاری کرنش نرم‌شونده سبب می‌شود همگرایی محاسبه شده با همگرایی رخ داده در توده‌سنگ انطباق بیشتری داشته باشد [4]، [5] و [6]. بکارگیری این فرآیند در طراحی سامانه‌ی نگهداری سبب شده است با تعیین دقیق مقدار همگرایی، از استحکام بیش از حد و یا کمتر از مقدار بحرانی پیشگیری شود. نتایج حاصله از فشارسنج‌های تعبیه شده در تونل امیرکبیر نتایج

۲-۲- برآورد همگرایی

به دلیل پیچیدگی‌های موجود در مدل رفتاری کرنش نرم‌شونده بر خلاف مدل‌های رفتاری ساده‌تر از گزاره‌های فرم بسته نمی‌توان برای ترسیم منحنی همگرایی استفاده نمود [9] و [10]. آلسنو گزاره‌های تحلیلی را بر مبنای روش خودتشابهی مندلبرت (*Mandelbrot*) برای محاسبه‌ی همگرایی در حالت نرم‌شونده ارائه کرده است [3]. برای ترسیم منحنی همگرایی زمین گزاره‌های تحلیلی در محیط *MATLAB* برنامه‌نویسی شده است. در این حالت برای طراحی سامانه‌ی نگهداری باید علاوه بر همگرایی تونل، بیش‌ترین مقدار جابجایی مجاز نیز تعیین شود. ساکورایی (*Sakurai*) با تلفیق داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی، گزاره‌ای برای کرنش بحرانی بر اساس مدول یانگ بدست آورده و سه تراز هشدار خطر را ارائه کرده است. ساکورایی تراز هشدار دو را به عنوان مبنای طراحی تونل‌هایی با عمر طولانی پیشنهاد کرده است (گزاره‌ی (۱)) و [11].

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (1)$$

برای بدست آوردن بیش‌ترین جابجایی مجاز در دیواره‌ی تونل می‌توان کرنش بحرانی را در شعاع تونل ضرب نمود.

۲-۳- ترسیم منحنی همگرایی با روش خودتشابهی

بر مبنای تئوری نمو مومسان در گزاره‌های (۲) و (۳)، ماده با یک معیار تسلیم f و یک پتانسیل مومسان g تعریف می‌شود. ویژگی اصلی این مدل رفتاری آن است که معیار شکست و پتانسیل مومسان تنها به تانسور تنش σ_{ij} بستگی ندارد؛ بلکه به پارامتر نرم‌شوندگی η نیز بستگی دارد [3].

$$f(\sigma_{ij}, \eta) = 0 \quad (2)$$

$$g(\sigma_{ij}, \eta) = 0 \quad (3)$$

رفتار کرنش نرم‌شونده توسط یک گذار تدریجی از مقادیر اوج به مقادیر باقیمانده‌ی معیار شکست، مشخص می‌شود. این گذار توسط پارامتر نرم‌شوندگی η تعریف می‌شود. نرم‌شوندگی در شرایطی که $0 < \eta < \eta^*$ باشد، اتفاق می‌افتد. در این حالت، η^* پارامتری است که گذار از حالت کرنش نرم‌شونده به مقدار باقیمانده را کنترل می‌کند. فاکتور مهم دیگر در مشخص کردن رفتار کرنش نرم‌شونده‌ی پس از شکست، تعیین مدول افت است. اگر مدول افت به

سمت بینهایت میل کند، توده‌سنگ از خود رفتار شکننده-مومسان نشان می‌دهد. هنگامی که مدول افت به سمت صفر میل کند، توده‌سنگ دارای رفتار مومسان کامل خواهد بود [3].

۲-۳-۱- پتانسیل مومسان در روش خودتشابهی

رفتار مواد در حالت کرنش نرم‌شونده در گزاره‌ی (۴)، با استفاده از نظریه‌ی نمو تدریجی مومسان و نمو کرنش مومسان برآورد می‌شود [3].

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

در گزاره‌ی (۴)، λ ضریب مومسان است. این گزاره، معادله‌ی تشکیل دهنده‌ی رژیم مومسان است و قانون جریان نامیده می‌شود. اگر پتانسیل مومسان با معیار شکست منطبق و همزمان باشد، آنگاه به آن قانون جریان پیوسته گفته می‌شود؛ در غیر این صورت قانون جریان غیر وابسته نامیده می‌شود. نمو مومسان، حتی اگر مفهوم فیزیکی نداشته باشد، بعنوان یک متغیر موهومی زمان در نظر گرفته می‌شود. این متغیر زمان τ نامیده می‌شود و کنترل‌کننده‌ی نمو کرنش مومسان در گزاره‌ی (۵) است [3].

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{\partial \varepsilon_{ij}^p}{\partial \tau} \quad (5)$$

رابطه‌ی نهایی تشکیل دهنده‌ی رژیم مومسان بر مبنای تحقیقات هیل (*Hill*) از گزاره‌ی (۶) حاصل می‌شود [3].

$$\dot{\sigma}_{ij} = [C_{ijkl}^e - \frac{<1>}{H} \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{mn}} C_{mnij}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} C_{rskl}^e \right)] \dot{\varepsilon}_{kl} \quad (6)$$

$<1>$ بسته به شرایط نمو، یعنی مومسان کامل ($\lambda = 0$) یا مومسان ($\lambda > 0$)، می‌تواند ۰ یا ۱ باشد. H مدول مومسان است و با توجه به گزاره‌های (۷)، (۸) و (۹) به دو بخش کوچکتر H_0 و H_t تقسیم می‌شود [3].

$$H = H_0 + H_t \quad (7)$$

$$H_0 = C_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{kl}} \quad (8)$$

$$H_t = -\frac{\partial f}{\partial \eta} \quad (9)$$

H_0 همزمان با مدول مومسان در رفتار مومسان کامل رخ می‌دهد و H_t بعنوان مدول سخت‌شوندگی-نرم‌شوندگی شناخته می‌شود. با مد نظر قرار دادن گزاره‌های بالا می‌توان گزاره‌ی نهایی تشکیل‌دهنده‌ی رژیم مومسان را به شکل گزاره‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) بازنویسی نمود [3].

و مومسان و با مد نظر قرار دادن گزاره‌ی (۲۰)، گزاره‌ی

تشکیل‌دهنده‌ی مرحله‌ی مومسان به صورت زیر است [3].

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} - A_1 \frac{v_r}{r} = \frac{1}{2G} [A_2 \dot{\sigma}_r - A_3 \dot{\sigma}_\theta] \quad (21)$$

$$A_1 = \frac{\partial g}{\partial \sigma_r} \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_\theta} \right)^{-1} \quad (22)$$

$$A_2 = 1 + v(A_1 - 1) \quad (23)$$

$$A_3 = A_1(1 - v) + v \quad (24)$$

گزاره‌های (۱۴)، (۱۵)، (۲۰) و (۲۱)، سامانه‌ی معادلات

دیفرانسیل جزئی را تشکیل می‌دهند. برای حل این معادلات، باید مقادیر تنش‌های شعاعی و مماسی و جابجایی‌های شعاعی مشخص شود. لازم به تاکید است تنش‌ها و جابجایی‌ها به دو عامل r و τ بستگی دارند. r یک متغیر فیزیکی و بیان‌کننده‌ی فاصله از مرکز حفاری و τ یک متغیر زمان موهومی است که از سیر تکاملی مومسان اندازه‌گیری می‌شود. $u_r(r, \tau)$ و $\sigma_r(r, \tau)$ و $\sigma_\theta(r, \tau)$ به ترتیب جابجایی شعاعی، تنش شعاعی و تنش مماسی هستند. شرایط مرزی این مسئله به صورت گزاره‌های (۲۵) و (۲۶) است [3].

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_r(r, \tau) = \lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_\theta(r, \tau) = \sigma^0 \quad (25)$$

$$\sigma_r(R, \tau) = p_i \quad (26)$$

R شعاع تونل، p_i فشار وارده بر دیواره‌ی تونل و σ^0 تنش میدانی است. از آنجایی که نرخ تنش و کرنش شعاعی پیوسته است؛ می‌توان این مقادیر را در ناحیه‌ی مومسان محاسبه و سپس از آن‌ها در تکمیل گزاره‌های بخش مومسان استفاده نمود [3].

برای موارد خاصی از رفتار کشسان-شکننده که با یک افت ناگهانی در مقدار مقاومت شناخته می‌شود، حد کشسان برآورد شده است [12]. لازم به ذکر است که شرایط مرزی در حالت کرنش نرم‌شونده باید به دقت مورد مطالعه قرار گیرد زیرا یک جهش سریع در حد فاصل محدوده‌ی کشسان-مومسان رخ می‌دهد. در حالت تقارن محوری با جایگزینی شرایط مرزی با شرایط حد فاصل کشسان-مومسان، شرایط مرزی بصورت گزاره‌های (۲۷)، (۲۸) و (۲۹) بازنویسی می‌شود [3].

$$\sigma_r(R_p, \tau) = p_i^* \quad (27)$$

$$\sigma_\theta(R_p, \tau) = 2\sigma^0 - p_i^* \quad (28)$$

$$u_r(R_p, \tau) = \frac{\sigma^0 - p_i^*}{2G} R_p \quad (29)$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}^{ep} \dot{\epsilon}_{kl} \quad (10)$$

$$C_{ijkl}^{ep} = C_{ijkl}^e + C_{ijkl}^p \quad (11)$$

$$C_{ijkl}^{ep} = C_{ijkl}^e - \frac{\langle 1 \rangle}{H} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{mn}} C_{mnij}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} C_{rskl}^e \quad (12)$$

در گزاره‌های بالا C_{ijkl}^e یک ماتریس متقارن و C_{ijkl}^{ep} نامتقارن است. پارامتر ϵ نشان‌دهنده‌ی کرنش کشسان با بالانویس e و مومسان با بالانویس p است [3].

۲-۳-۲ پارامتر نرم‌شوندگی

پارامتر نرم‌شوندگی η کنترل‌کننده‌ی مقادیر اوج و باقیمانده‌ی معیار تسلیم است. آجانو و همکاران در سال ۲۰۰۳ برای محاسبه‌ی پارامتر نرم‌شوندگی گزاره‌ی (۱۳) را ارائه کرده‌اند. در این گزاره، پارامتر نرم‌شوندگی بر اساس تفاضل کرنش‌های مومسان به دست می‌آید [3].

$$\eta = \gamma^p = \epsilon_1^p - \epsilon_3^p \quad (13)$$

۲-۳-۳ تحلیل تنش

با استناد به تقارن محوری می‌توان به گزاره‌ی (۱۴) رسید.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (14)$$

باید بیان نمود که نقطه‌ی هماهنگ $(r, \tau + \Delta\tau)$ باید در گزاره‌ی تسلیم صدق کند. بنابراین \dot{f} باید برابر با صفر باشد و برای مدل رفتاری ارائه شده، گزاره‌ی (۱۵) برقرار خواهد بود [3].

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_r} \frac{\partial \sigma_r}{\partial \tau} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_\theta} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \tau} + \frac{\partial f}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = 0 \quad (15)$$

قانون جریان، حاکم بر رفتار مواد در حالت مومسان است؛ بگونه‌ای که کرنش مومسان را می‌توان با استفاده از گزاره‌ی (۴) بدست آورد. برای مسایل تقارن محوری، کرنش‌های اصلی شعاعی و مماسی با گزاره‌های (۱۶) و (۱۷) بیان می‌شود. معادلات کرنش-جابجایی در مسایل متقارن محوری نیز بصورت گزاره‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) است [3].

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial \epsilon_r}{\partial \tau} \quad (16)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{\partial \epsilon_\theta}{\partial \tau} \quad (17)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{v_r}{r} \quad (18)$$

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial v_r}{\partial r} \quad (19)$$

$$v_r = \frac{\partial u_r}{\partial \tau} \quad (20)$$

با حذف ضریب مومسان از قانون جریان در گزاره‌ی (۴) و گزاره‌های (۱۶) و (۱۷)، تجزیه‌ی کرنش به دو بخش کشسان

با معرفی تونل انتقال آب امیرکبیر منحنی همگرایی برای دو مقطع بحرانی از تونل ترسیم شده است. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل‌ها با روش عددی اعتبارسنجی و سامانه‌ی نگهداری مورد نیاز برای تونل امیرکبیر طراحی شده است.

۳-۱-۱- تأثیر پارامترهای گوناگون بر همگرایی

برای بررسی تأثیر پارامترها بر روی منحنی همگرایی از تونلی دارای مشخصاتی به شرح جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات تونل [2]

پارامتر	واحد	مقدار
فشار همه‌جانبه	مگاپاسکال	۲۰
شعاع تونل	متر	۳
چسبندگی اوج	مگاپاسکال	۱
زاویه‌ی اتساع اوج	درجه	۱۰
زاویه‌ی اتساع باقیمانده	درجه	۵
زاویه‌ی اصطکاک داخلی اوج	درجه	۳۰
مدول کشسانی	گیگاپاسکال	۱۰

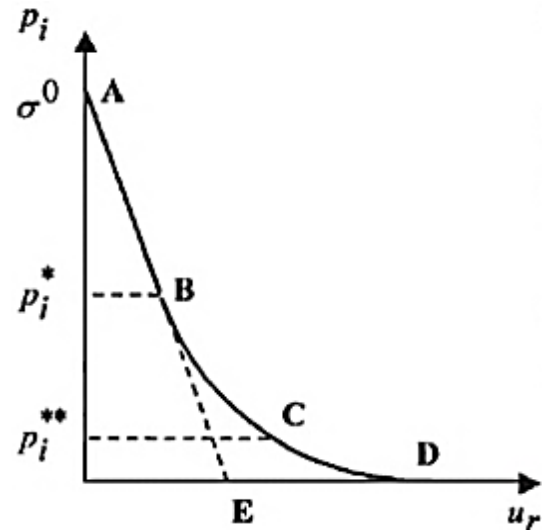
۳-۱-۱-۱- چسبندگی

برای بررسی تأثیر چسبندگی بر همگرایی، این پارامتر به ترتیب ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ درصد مقدار اولیه انتخاب شده است. تأثیر کاهش چسبندگی بر همگرایی بیش‌تر از تأثیر افزایش این پارامتر است؛ به گونه‌ای که کاهش چسبندگی به مقدار ۵۰ درصد، سبب افزایش ۲۳۰ درصدی همگرایی می‌شود. این در حالی است که افزایش چسبندگی به مقدار ۱۰۰ درصد، موجب کاهش همگرایی به مقدار ۷۰ درصد شده است (شکل ۵).

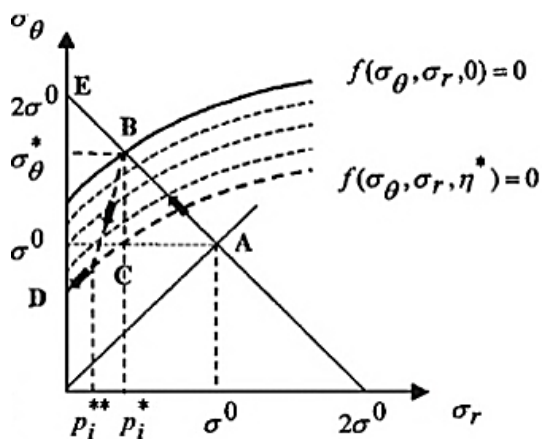
۳-۱-۲- زاویه‌ی اتساع

برای بررسی تأثیر زاویه‌ی اتساع بر همگرایی، این پارامتر معادل با صفر، ۱/۲، ۱/۴ و ۱/۸ برابر زاویه‌ی اصطکاک اوج در نظر گرفته شده است. تأثیر این پارامتر بر همگرایی بسیار ناچیز است؛ گونه‌ای که افزایش ۱۵ درصدی آن سبب افزایش همگرایی به مقدار ۳ تا ۴ درصد شده و تأثیر آن بر شعاع ناحیه‌ی مومسان نیز بسیار اندک است. برای محاسبه‌ی همگرایی با زاویه‌ی اتساع ثابت، پیشنهاد می‌شود زاویه‌ی اتساع، معادل ۱/۸ برابر زاویه‌ی اصطکاک اوج در نظر گرفته شود. در این حالت همگرایی محاسبه شده به همگرایی در

در این گزاره‌ها p_i^* تنش شعاعی در حد فاصل محدوده‌ی کشسان و مومسان و نشان‌دهنده‌ی تقاطع بدست آمده در حالت کشسان با منحنی بدست آمده از معیار تسلیم است (شکل ۳ و شکل ۴). R_p نشان‌دهنده‌ی شعاع ناحیه‌ی مومسان و G مدول برشی مواد را نشان می‌دهد.



شکل ۳- منحنی همگرایی زمین [3]



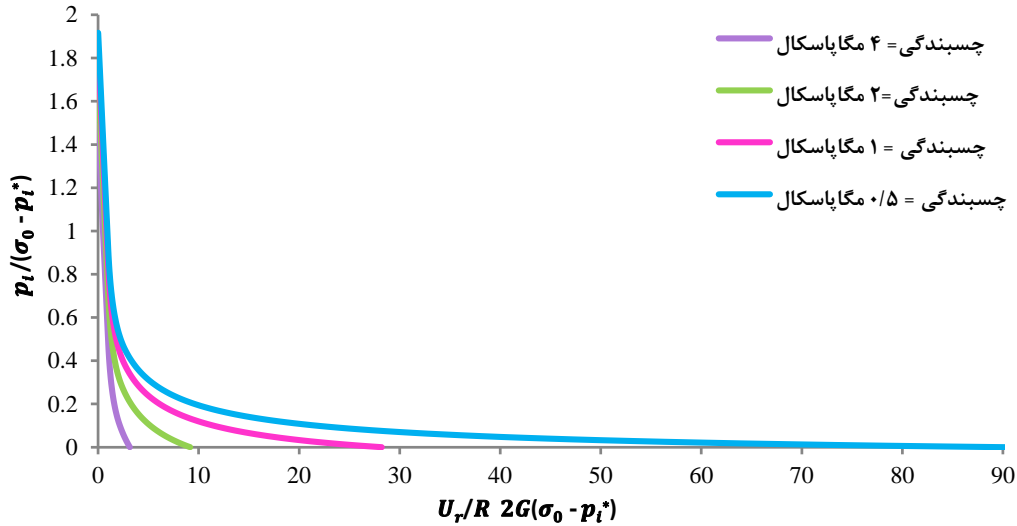
شکل ۴- مسیر تنش در فرآیند باربرداری [3]

۳- کاربرد مفاهیم

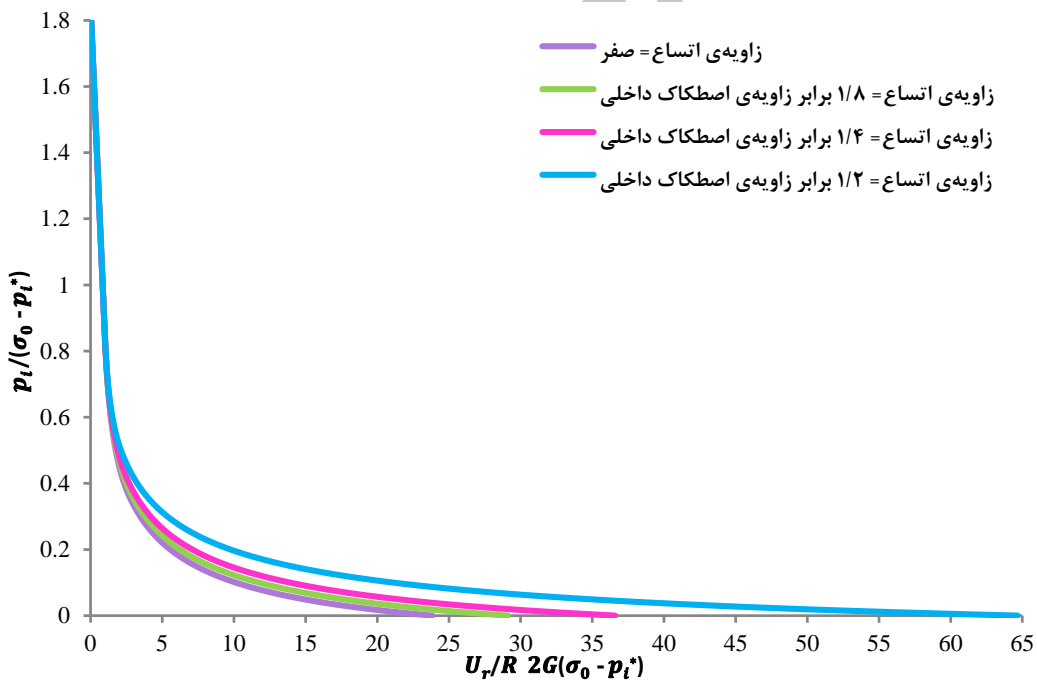
برای پیاده‌سازی مفاهیم بیان شده در بخش پیشین (مبانی و روش انجام پژوهش) با در نظر گرفتن مشخصات یک تونل که توسط آجانو نیز بررسی شده است، تأثیر پارامترهایی از قبیل چسبندگی، زاویه‌ی اتساع، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و تنش همه‌جانبه بر همگرایی تونل تحلیل شده است. سپس

تحلیل پایداری تونل انتقال آب امیرکبیر در حالت کرنش نرم‌شونده بر اساس روش خودتشابهی و استفاده از منحنی همگرایی: ص ۳۷-۴۸

حالت کرنش نرم‌شونده با زاویه‌ی اتساع متغیر بسیار نزدیک خواهد بود (شکل ۶).



شکل ۵- تاثیر چسبندگی بر همگرایی

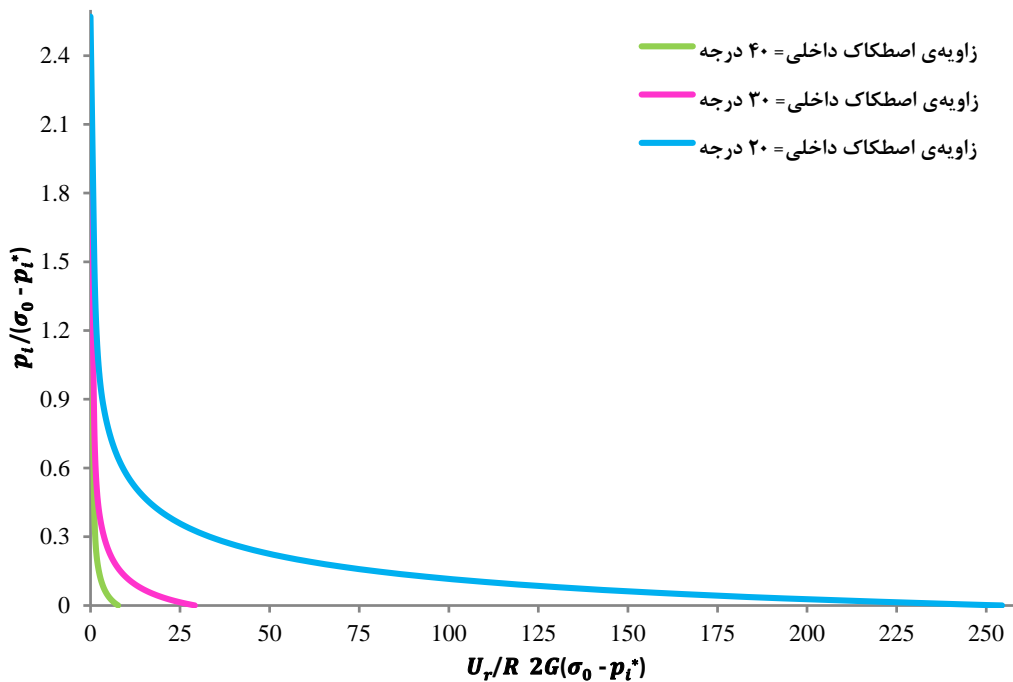


شکل ۶- تاثیر زاویه‌ی اتساع بر همگرایی

همگرایی در حدود ۷۰۰ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک به مقدار ۱۰ درجه، همگرایی در حدود ۷۵ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۷).

۳-۱-۳- زاویه‌ی اصطکاک

کاهش زاویه‌ی اصطکاک به شدت همگرایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد؛ به گونه‌ای که با کاهش آن به مقدار ۱۰ درجه،



شکل ۷- تأثیر زاویه‌ی اصطکاک بر همگرایی

۳-۱-۴- تنش همه‌جانبه

تأثیر تنش همه‌جانبه بر همگرایی از سایر پارامترها بیش‌تر است. بنابراین تعیین این پارامتر توسط آزمایش‌های برجا توصیه می‌شود. در تونل امیرکبیر بر اساس گزاره‌های تئوریک و بیش‌ترین عمق حفاری، نسبت تنش‌ها بین ۰/۵ تا ۱/۵ در نظر گرفته شده است. بر همین اساس محدوده‌ی تغییر تنش در بازه‌ی ۵۰ تا ۱۵۰ درصد مقدار اولیه در نظر گرفته شده است. افزایش تنش همه‌جانبه تا حد زیادی همگرایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش ۵۰ درصدی این پارامتر موجب افزایش همگرایی تا ۲۵۰ درصد و کاهش تنش همه‌جانبه به مقدار ۵۰ درصد، سبب کاهش همگرایی در حدود ۸۰ درصد شده است (شکل ۸).

۳-۲- ترسیم منحنی همگرایی

با مد نظر قرار دادن پارامترهای ژئومکانیکی تونل انتقال آب امیرکبیر در سازند کرج، منحنی همگرایی زمین برای دو مقطع بحرانی AT و ALT ترسیم شده است و برآوردها با روش عددی اجزای محدود اعتبارسنجی شده است. همگرایی‌های به دست آمده نیز با جابجایی مجاز ساکورایی مقایسه و سامانه‌ی نگهداری مناسب طراحی شده است.

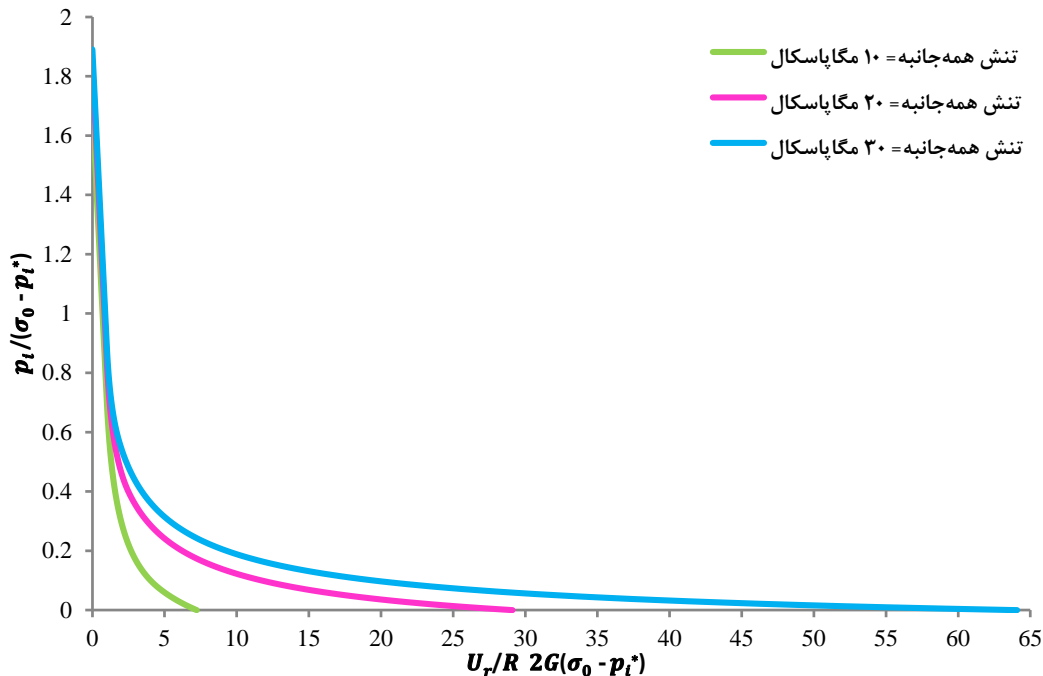
۳-۲-۱- مشخصات عمومی پروژه

گستره‌ی مورد بررسی، بخشی از رشته‌کوه البرز است. این رشته‌کوه در شمال ایران، کمان مرتفعی از رشته‌کوه تالش در باختر تا کپه‌داغ در خاور را تشکیل می‌دهد. سازند کرج در این ناحیه از بعد چینه‌شناسی، به دلیل تکاپوی شدید آتشفشان‌های زیردریایی در زمان ائوسن، سری سبز نام‌گذاری شده است [۱۳].

واحدهای تشکیل‌دهنده‌ی تونل با توجه به ویژگی‌های لیتولوژیکی لایه‌ها، تفاوت‌های ساختاری و ویژگی‌های ژئومکانیکی واحدها به بخش‌های مختلفی تفکیک شده‌اند. از این میان بر اساس مشخصات ژئومکانیکی، روبراه، جنس مصالح و طولی که تونل در واحد زمین‌شناسی مربوطه قرار می‌گیرد، هفت مقطع بحرانی مطابق جدول ۲ انتخاب شده است. این مقاطع از بعد مقدار همگرایی مورد تحلیل قرار گرفته و متناسب با آن سامانه‌ی نگهداری طراحی می‌شود.

از میان مقاطع هفت‌گانه‌ی مورد بررسی، در این پژوهش دو مقطع AT و ALT بصورت نمونه آورده شده است. مشخصات این دو مقطع در جدول ۳ قابل ملاحظه است. مقطع AT نشانه‌ی واحدی است که از خاکستر توف

در نوشتن نوع توف به سبب حجم بیش‌تر آن ماده در توده‌سنگ مقطع است. *Ash Tuff* و *ALT* نشانه واحدی است که از خاکستر توف و توف خرده سنگی (*Lithic Tuff*) تشکیل شده است. تقدم



شکل ۸- تاثیر تنش همه‌جانبه بر همگرایی

جدول ۲- واحدهای زمین‌شناسی بحرانی در مسیر تونل امیرکبیر

واحد	جنس مصالح	توصیف توده‌سنگ	علت انتخاب مقطع
<i>AL</i>	خاکستر توف و توف خرده‌سنگی	خردشده و ضعیف	بررسی یکی از زون‌های ضعیف در بیش‌ترین روباره (۲۶۰ متر)
<i>CZ</i>	گسل پورکان-وردیچ	خردشده‌ی گسله	ضعیف‌ترین و بحرانی‌ترین زون در مسیر تونل
<i>CZ</i>	گسل	خردشده‌ی گسله	بیش‌ترین روباره (۵۸۸ متر) در زون‌های گسله
<i>LA</i>	خاکستر توف و توف خرده‌سنگی	مقاومت متوسط	قرارگیری ۱۲۷۹ متر از تونل در این زون با روباره‌ی قابل توجه (۷۲۲ متر)
<i>MO</i>	مونزدیوریت	مقاومت متوسط	قرارگیری یک کیلومتر از تونل در بیش‌ترین روباره (۸۴۵ متر)
<i>AT</i>	خاکستر توف	خردشده و ضعیف	بررسی یکی از زون‌های ضعیف در بیش‌ترین روباره‌ی زون (۴۱۳ متر)
<i>ALT</i>	خاکستر توف و توف خرده‌سنگی	خردشده و ضعیف	بررسی پایداری یکی از زون‌های ضعیف در بیش‌ترین روباره‌ی زون (۳۴۶ متر)

اساس معیار شکست موهر-کولمب نشان می‌دهد. مقدار مجاز جابجایی بر اساس معیار ساکورایی برابر با ۱۱ میلی‌متر است. برای اعتبارسنجی از روش عددی اجزا محدود و نرم‌افزار *Phase2* استفاده شده است. در حالت تنش هیدرواستاتیک با نسبت تنش یک، همگرایی در حدود ۲۵ میلی‌متر بدست خواهد آمد (شکل ۱۰).

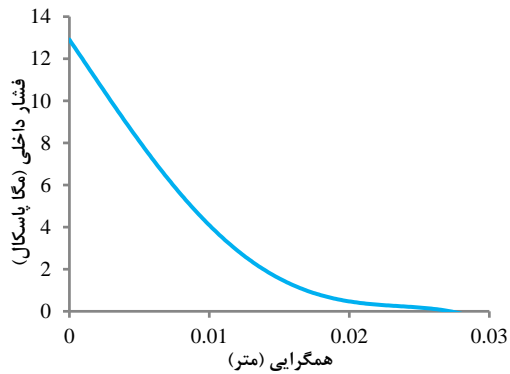
۳-۲-۲- ترسیم منحنی همگرایی در مقطع *AT*

پارامترهای ورودی در کدهای *MATLAB* در جدول ۳ آورده شده است. همگرایی پیش‌بینی شده برای این ناحیه در حدود ۲۴ میلی‌متر است. گسترش ناحیه‌ی مومسان در این مقطع کم و شعاع آن برابر با ۳٫۴۳ متر و ضخامت آن در حدود یک متر خواهد بود. شکل ۹ همگرایی این مقطع را بر

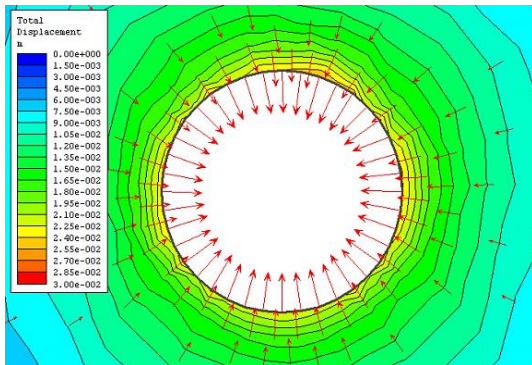
LA و CZ نیاز به نصب سامانه‌ی نگهداری دارند.

۳-۳- طراحی سامانه‌ی نگهداری

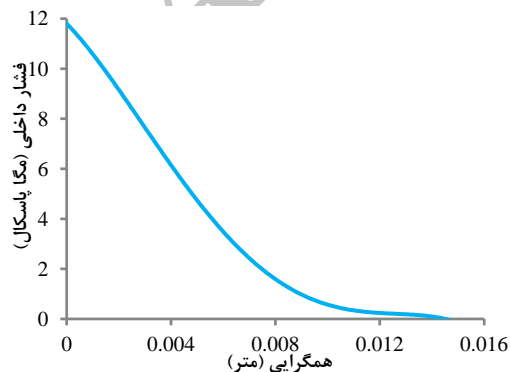
ضریب ایمنی در طراحی سامانه‌ی نگهداری از اهمیت خاصی برخوردار است. در این پروژه ضریب ایمنی به دلیل طول عمر بالای تونل برابر با ۱/۵ در نظر گرفته شده است. مشخصات سامانه‌ی نگهداری این پروژه در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۹- منحنی مشخصه‌ی زمین در مقطع AT



شکل ۱۰- جابجایی و گسترش ناحیه‌ی مومسان در مقطع AT



شکل ۱۱- منحنی مشخصه‌ی زمین در مقطع ALT

جدول ۳- پارامترهای سنگ بکر و توده‌سنگ

مقدار		واحد	نماد	پارامتر	
ALT	AT				
۲,۵۵	۲,۵	gr/cm ³	γ	چگالی	پارامترهای سنگ بکر
۷۵	۷۵	Mpa	UCS	مقاومت فشاری	
۷,۵	۲	Mpa	σ_T	مقاومت کششی	
۱۲,۵	۵	Gpa	E	مدول الاستیک	
۰,۲	۰,۲	-	ν	نسبت پواسون	
۷,۵	۷,۵	Mpa	C	چسبندگی	
۴۲	۴۲	درجه	ϕ	زاویه‌ی اصطکاک	پارامترهای توده‌سنگ
۱۳	۱۳	-	m_i	ثابت سنگ	
۳,۴	۲,۵	Mpa	σ_{cm}	مقاومت فشاری	
۹۰	۶۰	Kpa	σ_{tm}	مقاومت کششی	
۴	۲,۵	Gpa	E_m	مدول تغییر شکل	
۰,۳	۰,۳	-	ν_m	نسبت پواسون	
۱,۵	۱,۵	Mpa	c_m	چسبندگی	طبقه بندی
۴۳	۴۱	درجه	ϕ_m	زاویه‌ی اصطکاک	
۰	۰	درجه	ψ_m	زاویه‌ی اتساع	
۴۱	۴۴	-	-	RMR	
۳	۲,۸	-	-	Q	
۴۵	۴۰	-	-	GSI	

۳-۲-۳- ترسیم منحنی همگرایی در مقطع ALT

این مقطع به سبب داشتن مشخصات ژئومکانیکی سست و بیش‌ترین روباره‌ی تونل در این ناحیه (۳۴۶ متر) انتخاب شده است. با توجه به خردشدگی توده‌سنگ در ناحیه‌ی ALT ، رفتار توده‌سنگ برای تحلیل پایداری به صورت پیوسته در نظر گرفته شده است. مقدار همگرایی رخ داده در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. همگرایی این مقطع برابر با ۱۴/۸ میلی‌متر است. همچنین شعاع ناحیه‌ی مومسان در این مقطع به ۳/۳ متر می‌رسد که از مقدار مجاز ساکورایی بیش‌تر است. جابجایی پیش‌بینی شده با روش عددی در حدود ۱۳ میلی‌متر و مقدار جابجایی مجاز بر اساس معیار ساکورایی در حدود ۱۰ میلی‌متر است (شکل ۱۲).

نتایج تحلیل‌های انجام شده در مقاطع هفت‌گانه نشان می‌دهد از میان مقاطع مورد بررسی زون‌های AL ، ALT

است. تعیین دقیق فاصله‌ی مورد نیاز از جبهه‌ی حفاری برای نصب سامانه‌ی نگهداری سبب پیشگیری از تخریب آن در اثر نصب در زمان نامناسب خواهد شد.

جدول ۵- پارامترهای طراحی شده برای سامانه‌ی نگهداری تونل انتقال آب امیرکبیر در مقاطع بحرانی

همگرایی معادل با نقطه‌ی آغاز نصب سامانه (میلی‌متر)	مدول سختی شاتکریت (مگاپاسکال بر متر)	ضخامت سامانه (میلی‌متر)	بیش‌ترین فشار مورد نیاز برای سامانه (مگاپاسکال)	فشار وارده بر سامانه در نقطه‌ی تعادل (مگاپاسکال)	مقطع
۵	۸۰۷	۱۳۰	۲٫۲	۱٫۴۶	LA
۵٫۵	۲۲۰۰	۳۳۰	۵٫۲	۳٫۵	MLT*
۵	۷۴۰	۱۲۰	۲	۱٫۳۵	GT*
۶٫۱	۸۷۰	۱۴۰	۲٫۳	۱٫۵	AT
۵٫۸	۳۰۰	۵۰	۰٫۸	۰٫۵	ALT
۶٫۷	۱۱۳۷	۱۸۰	۳٫۳	۲٫۱۷	FZ*

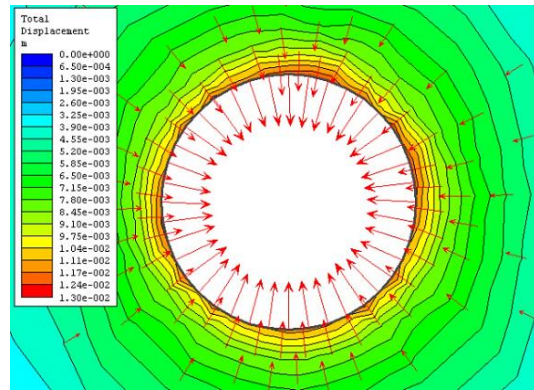
MLT: توف لایبلی توده‌ای

GT: توف خاکستری

FZ: مناطق گسل‌خورده

۴- نتیجه‌گیری

بکارگیری مدل رفتاری کرنش نرم‌شونده موجب شده است همگرایی محاسبه شده، بیش‌ترین انطباق را با شرایط منطقه داشته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در توده‌سنگ‌هایی با رفتار کرنش نرم‌شونده استفاده از مدل رفتاری کشسان-شکننده و مومسان کامل سبب برآورد نادرست همگرایی می‌شود. بنابراین در طراحی سامانه‌ی نگهداری استحکام مورد نیاز در حالت کشسان-شکننده بیش از حد و در حالت مومسان کامل کمتر از حد لزوم در نظر گرفته می‌شود. این فرآیند سبب تحمیل بار مالی به پروژه در هر دو حالت می‌شود. برآورد صحیح از ضخامت مورد نیاز سامانه‌ی نگهداری در این پروژه می‌تواند از ضخامت سگمنت‌های بتنی تا حدود ۴۰ درصد بکاهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد کاهش بار مالی پروژه به میزان ۳۵ درصد به دلیل مواردی نظیر کاهش مواد اولیه‌ی مصرفی، سهولت در حمل و نقل



شکل ۱۲- جابجایی و گسترش ناحیه‌ی مومسان در مقطع ALT

جدول ۴- مشخصات سگمنت بتنی [۱۳]

پارامتر	واحد	مقدار
مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_{cc})	مگاپاسکال	۴۰
مدول یانگ (E_c)	گیگاپاسکال	۳۰٫۲
نسبت پواسون (ν_c)	-	۰٫۲۵

بر اساس ضریب ایمنی پروژه می‌توان بیش‌ترین مقاومت سامانه‌ی نگهداری را برآورد نمود (گزاره‌ی (۳۰)).

$$p_{max} = F_s \times p_{eq} \quad (30)$$

p_{eq} فشار در نقطه‌ی تعادل یعنی محل تقاطع منحنی همگرایی زمین با منحنی سامانه‌ی نگهداری است. بر اساس برنامه‌نویسی انجام گرفته می‌توان فشار در نقطه‌ی تعادلی را برآورد نمود. با استناد به گزاره‌ی (۳۰) ضخامت مورد نیاز برای شاتکریت (سگمنت بتنی) را می‌توان با گزاره‌ی (۳۱) محاسبه نمود [14].

$$t_{shot} = R \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times p_{max}}{\sigma_{cc}}} \right) \quad (31)$$

نتایج طراحی سامانه‌ی نگهداری تونل امیرکبیر در جدول ۵ آورده شده است. استفاده از روند تشریح شده برای محاسبه‌ی سامانه‌ی نگهداری سبب کاهش ۳۵ درصدی ضخامت برآورد شده در مقایسه با ضخامت سگمنت‌های مورد استفاده در پروژه‌ی تونل امیرکبیر (۲۵۰ میلی‌متر) شده است. در نتیجه بار مالی وارده بر پروژه به مقدار قابل توجهی (۳۵ تا ۴۰ درصد) می‌تواند کاهش یابد. تسریع فرآیند احداث تونل از دیگر نتایج مثبت بکارگیری این روش

سگمنت‌ها، افزایش راندمان تولید، کاهش بار مرده‌ی ناشی از سگمنت و افزایش سرعت تولید است.

۵- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
ϵ_c	-	کرنش بحرانی	σ_{cc}	MPa	مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی بتن
ϵ^e	-	کرنش کشسان	λ	-	ضریب مومسان
ϵ^p	-	کرنش مومسان	τ	s	متغیر زمان
ϵ_r	-	کرنش شعاعی	H	-	مدول مومسان
ϵ_θ	-	کرنش مماسی	H_t	-	مدول سخت‌شوندگی-نرم‌شوندگی
u_r	m	جابجایی شعاعی	R	m	شعاع تونل
E	Kgf/cm ²	مدول تغییر شکل‌پذیری	R_p	m	شعاع ناحیه‌ی مومسان
f	-	معیار تسلیم ماده	p_i	MPa	فشار وارد بر دیواره‌ی تونل
g	-	پتانسیل مومسان	p_i^*	MPa	تنش شعاعی
η	-	پارامتر نرم‌شوندگی	p_{max}	MPa	بیش‌ترین مقاومت نگهداری
σ_{ij}	MPa	تانسور تنش	p_{eq}	MPa	فشار در نقطه‌ی تعادل
σ_r	MPa	تنش شعاعی	G	GPa	مدول برشی
σ_θ	MPa	تنش مماسی	F_s	-	ضریب ایمنی
σ^0	MPa	تنش میدانی	t_{shot}	m	ضخامت شاتکریت

۶- منبع‌ها

- [1] Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical Estimates of Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186. [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X).
- [2] Alejano, L. R., Alonso, E., Rodriguez-Dono, A., & Fernandez-Manin, G. (2010). Application of The Convergence-Confinement Method to Tunnels in Rock Masses Exhibiting Hoek-Brown Strain-Softening Behavior. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(1), 150-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.07.008>.
- [3] Alonso, E., Alejano, L. R., Varas, F., Fdez-Manin, G., & Carranza-Torres, C. (2003). Ground Response Curves for Rock Masses Exhibiting Strain-Softening Behavior. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(13), 1153-1185. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.315>.
- [4] Alejano, L. R., Rodriguez-Dono, A., Alonso, E., & Fernandez-Manin, G. (2009). Ground Reaction Curves for Tunnels Excavated in Different Quality Rock Masses Showing Several Types of Post-Failure Behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(6), 689-705. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2009.07.004>.
- [5] Sharan, S. K. (2003). Elastic-Brittle-Plastic Analysis of Circular Openings in Hoek-Brown Media. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(6), 817-824. [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00040-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00040-6).
- [6] Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). *Support of Underground Excavation in Hard Rock*. London: Taylor & Francis. ISBN: 9054101865.
- [7] Labuz, J. F., & Arno Zang, A. (2012). Mohr-Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), 975-979. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>.

- [8] Lee, Y. K., & Pietruszczak, S. (2008). A New Numerical Procedure for Elasto-Plastic Analysis of A Circular Opening Excavated in A Strain-Softening Rock Mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), 588-599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.11.002>.
- [9] Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (1999). The Elasto-Plastic Response of Underground Excavations in Rock Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(6), 777-809. [http://dx.doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00047-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00047-9).
- [10] Sharan, S. K. (2007). Analytical Solutions for Stresses and Displacements Around A Circular Opening in A Generalized Hoek-Brown Rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45(1), 78-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2007.03.002>.
- [11] Sakurai, S. (1997). Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling. *Tunnelling and Underground space Technology*, 12(4), 453-460. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(98\)00004-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00004-2).
- [12] Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (1993). *Rock Mechanics for Underground Mining*. (E. T. Brown, Ed.) London: Chapman & Hall. ISBN: 0412475502.
- [۱۳] توکلی، ح. (۱۳۸۸). گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل امیرکبیر- مقیاس ۱:۲۰۰۰. تهران: موسسه‌ی مهندسی مشاور ساحل.
- [14] Oreste, P. P. (2003). Analysis of Structural Interaction In Tunnels Using The Covergence-Confinement Approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(4), 347-363. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00004-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00004-X).