

ارائه رابطه برای یافتن ضخامت ناحیه آسیب ناشی از حفر تونل با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و روش عددی

علی دادی گیوشاد^۱؛ مرتضی احمدی^{۲*}؛ حمیدرضا نجاتی^۲

۱- دانشجوی دکتری گروه مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۲- هیئت علمی گروه مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵

چکیده

یکی از روش‌هایی که جهت بررسی ناحیه آسیب ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی می‌توان مورد استفاده قرار داد، روش انتشار آوایی می‌باشد. این روش بر مبنای دریافت امواج الاستیک تولیدشده ناشی از تغییر شکل و ترک‌خوردگی در توده سنگ اطراف فضای تحت تنش می‌باشد. در این تحقیق ناحیه آسیب ناشی از حفر تونل نعل اسبی با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی کمک گرفته شده از دستگاه انتشار آوایی، روش عددی و آماری مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور مطالعه منطقه آسیب اطراف تونل، بر روی مغزه‌های به دست آمده از حفاری گمانه در جداره یک تونل، آزمایش فشارشی یک محوره به همراه برداشت‌های آوایی انجام شد. مدل عددی تونل در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ ساخته و تحت شرایط آزمایشات انجام شده اجرا شد. در مرحله بعد، ارتباط بین نواحی آسیب به دست آمده از نمونه آزمایشگاهی با نواحی تسلیم به دست آمده از مدل عددی، توسط نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ مورد مقایسه قرار گرفت. روابط ریاضی جهت برآورد ناحیه آسیب ناشی از حفر در شرایط تنش غیریکنواخت بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار SPSS بدست آمد. این روابط ریاضی برحسب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت کششی توده سنگ اطراف تونل، مقدار تنش قائم و نسبت تنش افقی به قائم و نسبت مقاومت به تنش می‌باشد.

ناحیه آسیب ناشی از حفر تونل، آزمون‌های آزمایشگاهی، روش انتشار آوایی، تحلیل عددی و نرم‌افزار $FLAC^{3D}$.

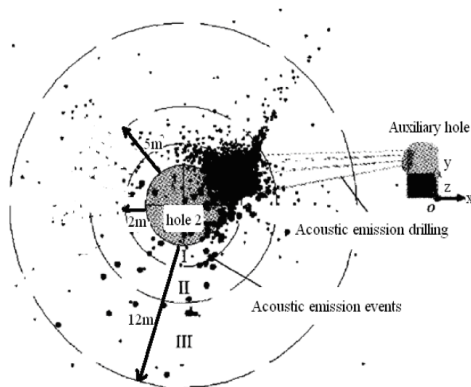
واژگان کلیدی

۱- مقدمه

تغییر شکل و شکست سنگ در اثر رشد ترک را آسیب می‌نامند. توسعه آسیب در اطراف حفاریات زیرزمینی می‌تواند سبب شکستگی و ناپایداری و همچنین تغییر ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ نزدیک به سطح حفاری شود. بنابراین مطالعه ناحیه آسیب، مسئله بسیار مهمی در حفاریات زیرزمینی بخصوص مخازن نگهداری زباله‌های هسته‌ای می‌باشد، چرا که هرگونه ناپایداری جزئی در این حفاریات یا نشت ناچیز مواد سمی به خارج از محیط حفر شده می‌تواند پیامدهای سنگین زیست محیطی را به همراه داشته باشد [۱،۲]. در پروژه‌های عمرانی و سدسازی نیز عدم شناسایی منطقه آسیب‌دیده ناشی از حفر فضای زیرزمینی می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری داشته باشد. بدون آگاهی از محدوده آسیب‌دیده نمی‌

توان فضاهای زیرزمینی را در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها و پیرامون آن‌ها احداث نمود، چرا که حفر این فضاها علاوه بر برهم زدن توزیع تنش در توده سنگ، باعث ایجاد درز و ترک، افزایش ضریب هدایت هیدرولیکی و بالطبع نشت آب از توده سنگ می‌شود [۱،۲]. از نظر تئوری، منطقه آسیب‌دیده ناشی از حفر از سطح رویه حفاری شروع شده و تا فاصله‌ای که خواص فیزیکی، مکانیکی و هیدرومکانیکی تغییر می‌کند را شامل می‌شود. شکل و ابعاد منطقه آسیب‌دیده بستگی به عوامل زمین‌شناسی، میدان تنش اولیه، هندسه حفاری، پارامترهای مکانیکی سنگ پیرامون حفاری دارد [۱،۳]. روش‌های فیزیکی و عددی مختلفی جهت شناسایی منطقه آسیب‌دیده ناشی از حفر ارائه شده که هر کدام از این روش‌ها دارای پیچیدگی‌های خاص مربوط به خود می‌باشد. امروزه از روش انتشار آوایی (AE^1) به عنوان یک روش جدید و غیرمخرب جهت تشخیص و

آسیب می‌باشد. بنابراین D در بازه $[0,1]$ قرار می‌گیرد [۵]. در مبحث تقسیم‌بندی نواحی آسیب اطراف فضای زیرزمینی با استفاده از روش انتشار آوایی تحقیقات بسیار اندکی صورت گرفته است. تحقیقات ژئو کیانگ و همکاران^۶ (۲۰۱۲) تقریباً تنها تحقیق کاربردی در زمینه تقسیم‌بندی نواحی آسیب ناشی از حفر می‌باشد. وی نواحی آسیب را در حفريات زیرزمینی با عمق حدود ۲۵۰۰ متر، با استفاده از آزمون‌های برجای آوایی مورد مطالعه قرار داد (شکل ۲) [۶]. طبق مطالعات ژئو کیانگ و همکاران، نواحی آسیب اطراف تونل را می‌توان با استفاده از پراکندگی رخدادهای آوایی، دامنه و انرژی به ۳ ناحیه تقسیم‌بندی نمود که ناحیه اول از رویه حفاری صفر تا ۲ متری پشت دیواره‌ها و ناحیه دوم از ۲ الی ۵ متری و ناحیه سوم از ۵ الی ۱۲ متری دیواره‌های فضای زیرزمینی قرار می‌گیرد [۶].



شکل ۲- رخدادهای آوایی ثبت‌شده در مطالعات ژئو کیانگ و همکاران [۶].

در بحث روابط ریاضی معرف ناحیه آسیب ناشی از حفر، تاکنون روابط مختلفی توسط محققین ارائه شده است. این روابط عموماً مربوط به تونل‌های دایره‌ای می‌باشند و جهت برآورد شعاع ناحیه پلاستیک ارائه شده‌اند و شامل کل ناحیه آسیب نمی‌باشند. یکی از اولین روابطی که جهت برآورد ناحیه آسیب ارائه شده است، رابطه بری و همکاران^۷ (۱۹۶۷) می‌باشد. وی بر اساس معیار شکست موهر-کلمب، شعاع ناحیه پلاستیک را در شرایطی که تونل دایره‌ای تحت تنش هیدرواستاتیک قرار دارد، مورد مطالعه قرار داد. بری بر اساس فرض معیار موهر-کلمب، ترک‌ها در ناحیه پلاستیک به صورت اسپریال لگاریتمی ایجاد می‌شوند. در این حالت شعاع ناحیه پلاستیک بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۷]:

$$R = a \left(\frac{2p - q_u + [1 + \tan^2(45 + \phi/2)] S_J \cot \phi_j}{[1 + \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})] (p_i + S_J \cot \phi_j)} \right)^{1/Q} \quad (2)$$

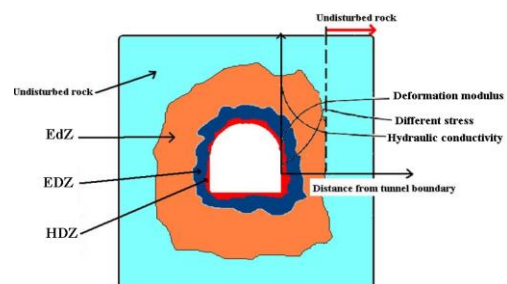
در رابطه فوق؛ a شعاع تونل، P تنش هیدرواستاتیک موجود در اطراف تونل، q_u مقاومت فشاری تک محوره سنگ، P_i فشار داخلی تونل ناشی از سیستم نگهداری، ϕ زاویه اصطکاک داخلی سنگ ϕ_j

ارزیابی سطح آسیب در سازه‌ها استفاده می‌شود [۴]. رخدادهای آوایی در اثر انتشار امواج الاستیک ناشی از تغییر شکل و ترک‌خوردگی در ماده جامد ایجاد می‌شوند و با این روش می‌توان آسیب وارده به توده سنگ در برگرنده فضاهای زیرزمینی را ارزیابی نمود. در این تحقیق سعی شد با استفاده از نتایج آزمون آزمایشگاهی که بر روی مغزه‌های سنگی همزمان با ثبت رخدادهای آوایی انجام شده، نواحی آسیب ناشی از حفر مطالعه شده و در ادامه از روش‌های عددی و آماری کمک گرفته شده تا روابط ریاضی ناحیه آسیب برای تخمین ارائه شود.

۲- معرفی ناحیه آسیب ناشی از حفاری و پیشینه

مطالعات

مطابق تعریف تسانگ و همکاران، منطقه آسیب ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی به سه ناحیه مجزای EDZ ، HDZ و EdZ تقسیم‌بندی می‌شود (شکل ۱). ناحیه HDZ شامل شکستگی‌های بزرگ مقیاس و خردشدگی می‌باشد. بیشترین میزان آسیب در حفاری فضای زیرزمینی در این ناحیه ایجاد می‌شود.



شکل ۱- تقسیم‌بندی نواحی آسیب اطراف تونل [۲].

در ادامه آسیب ایجادشده در ناحیه EDZ تحت تاثیر تنش‌های القایی ناشی از حفاری می‌باشد. در این محدوده تغییرات در توده سنگ شامل تغییر شکل محیط حفاری، نفوذپذیری و تغییر تنش‌های اولیه می‌باشد.

در ناحیه EdZ مقدار تنش‌های القایی ایجادشده ناشی از حفاری، کمتر از مقدار لازم برای ایجاد میکروترک‌ها بوده، لذا آسیب ایجادشده در این ناحیه برگشت‌پذیر می‌باشد [۱،۲].

با توجه به اینکه توسعه و ایجاد ترک همراه با انتشار امواج آوایی می‌باشد، ژانگ و همکاران^۵ در سال ۲۰۰۶ رابطه بین پارامترهای آوایی و متغیر آسیب (D) را به صورت رابطه شماره ۱ تعریف نمودند [۵]:

$$D = \frac{\Omega}{\Omega_m} \quad (1)$$

در رابطه فوق Ω یکی از پارامترهای AE (مانند هیت، کانت، انرژی) در طول دوره آسیب و Ω_m پارامتر تجمعی AE در پایان دوره

منظور یکی از تونل‌های نعل اسبی واقع در جنوب غربی ایران با ابعاد معادل ۸ متر عرض و ۸ متر ارتفاع، جهت انجام مطالعه موردی انتخاب شد. لازم به ذکر است که تونل مذکور در بخش نسبتاً ضعیف سازند آسماری واقع شده و جنس لایه‌ها عمدتاً از مارن و مارن آهکی می‌باشد.

با توجه به اینکه تجهیزات برداشت برجای داده‌های آوایی مهیا نبود، سعی شد مغزه‌های حفاری از پیرامون محیط تونل تهیه شده و آزمون‌های آزمایشگاهی به همراه ثبت اصوات بر روی آن انجام شود. مغزه‌ها از حفاری گمانه برای نصب اکستنسومتر در دیواره تونل و گمانه پیرومتر الکتریکی در کف تونل تهیه شد. عمق گمانه اکستنسومتر در دیواره تونل ۲۲ متر و عمق گمانه پیرومتر الکتریکی در کف تونل، ۳۰ متر می‌باشد. در گمانه‌های مورد مطالعه سعی شد از هر راد حفاری یک متری، یک نمونه مناسب جهت انجام آزمایش‌ها تهیه شود. در شکل ۴ نمونه‌ای از مغزه‌های مورد آزمایش و دستگاه بارگذاری نشان داده شده است. لازم به ذکر است در بعضی از رادهای حفاری، امکان تهیه نمونه مناسب جهت انجام آزمایش‌ها مهیا نشد.

برای اعمال بار به نمونه‌ها از دستگاه بارگذاری با ظرفیت ۱۰۰ تنی *Santam* با دقت اندازه‌گیری بار ۰/۵٪ و دقت اندازه‌گیری تغییر شکل ۰/۱٪ استفاده شد. عملکرد این دستگاه بصورت خودکنترل بوده و جهت کنترل بار از بازخورد لودسل و جابجایی دقیق فک‌ها استفاده می‌کند.

در این تحقیق همچنین جهت انجام آزمایش‌های آوایی از سیستم انتشار آوایی *AMS-5* که ساخت شرکت *"Vallen system GmbH"* آلمان است، استفاده شد (شکل ۵). این سیستم با دریافت سیگنال‌های صوتی، آن‌ها را به یک سری معادلات موج تبدیل نموده و بر اساس این معادلات پارامترهای هر موج شامل دامنه، انرژی و کانت را تعیین می‌کند.



شکل ۴: انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مغزه‌های حفاری شده از دیواره و کف تونل

زاویه اصطکاک سطح درز، S_r چسبندگی سطح درز می‌باشد و Q نیز طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۷]:

$$Q = \left[\frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \phi_j)} - 1 \right] \quad (3)$$

در رابطه فوق δ برابر با $(\phi/2 + 45^\circ)$ می‌باشد.

کندی و لیندبرگ^۸ نیز شعاع ناحیه پلاستیک را با در نظر گرفتن کرنش صفحه‌ای طبق رابطه (۴) محاسبه نمودند [۷]:

$$R_e = A \left\{ \frac{2}{N_0 + 1} \left(\frac{\sigma_c + p_0(N_0 - 1)}{\sigma_c + p_i(N_0 - 1)} \right) \right\}^{\frac{1}{N_0 - 1}} \quad (4)$$

در رابطه ۴، N_0 را می‌توان طبق رابطه ۵ محاسبه نمود:

$$N_0 = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5)$$

در ادامه لی و همکاران^۹ (۲۰۱۷) نیز ناحیه پلاستیک را در شرایط تنش غیریکنواخت با تقسیم آن به دو ناحیه تنش یکنواخت و شرایط تنشی تک محوره مطابق رابطه ۶ محاسبه نمود (شکل ۳) [۸].

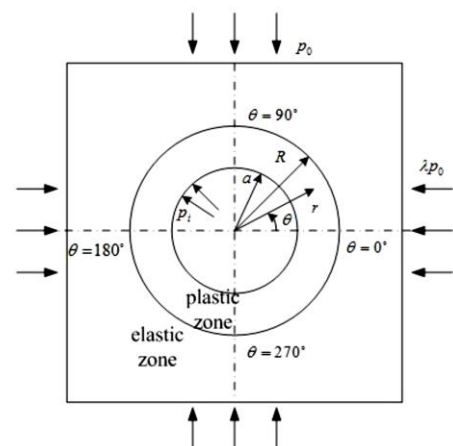
$$R = a \left[\frac{\frac{(1+\lambda)p_0 + 2(1-\lambda)p_0 \cos 2\theta - B}{A+1} + c \cot \phi}{p_i + c \cot \phi} \right]^{\frac{1}{A-1}} \quad (6)$$

در معادله فوق a شعاع تونل، p_0 تنش عمودی، λ نسبت تنش افقی به قائم، c چسبندگی و ϕ زاویه اصطکاک داخلی سنگ و A و B نیز طبق روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{(1+b-b\mu) + \sin \phi (1-b+b\mu)}{(1-\sin \phi)(b\mu+1)} \quad (7)$$

$$B = \frac{2c \cos \phi (1+b)}{(1-\sin \phi)(b\mu+1)} \quad (8)$$

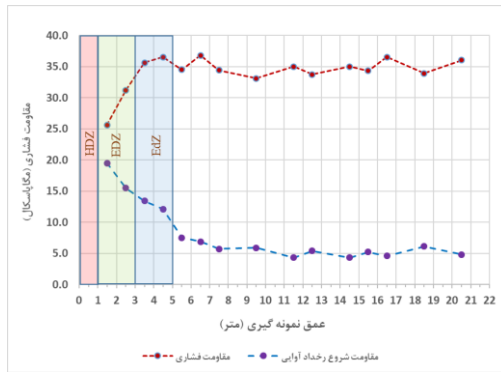
در معادله فوق μ ضریب پواسون سنگ است و مقدار b نیز در معیار شکست موهر-کلمب برابر صفر است [۸].



شکل ۳- شرایط تنش غیریکنواخت در اطراف تونل در مدل لی و همکاران [۸].

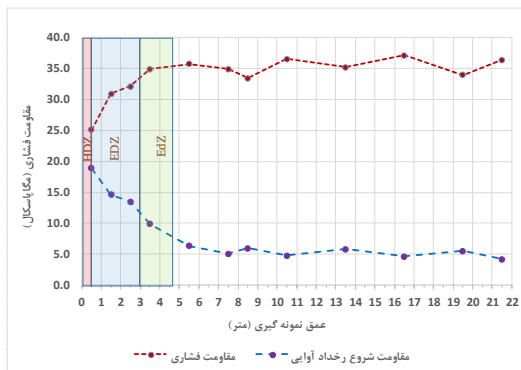
۳- آزمون آزمایشگاهی

در این قسمت از تحقیق سعی شد نواحی آسیب پیرامون فضاهای زیرزمینی با استفاده از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و با کمک گرفتن از انتشار آوایی مورد مطالعه قرار گیرد. برای دستیابی بدین

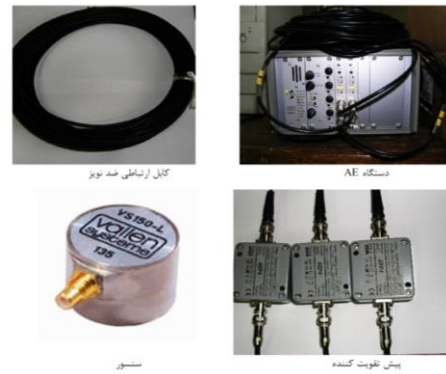


شکل ۷- نمودار تغییرات مقاومت فشاری در گمانه اکستنسومتر شماره یک در دیواره تونل نعل اسبی

همان طور که در جدول شماره ۱ و اشکال شماره ۷ الی ۱۰ نشان داده شده است، در توده سنگ مورد مطالعه این تحقیق، امکان تهیه نمونه‌های سالم از مغزه‌های حفاری، جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری در عمق‌های کمتر از نیم متر عملاً وجود نداشت. بنابراین با توجه آنچه در بخش ۲ به آن اشاره شد، می‌توان این ناحیه را که ضخامت آن از سطح دیواره تونل بین ۰/۵ تا ۱/۰ متر است را ناحیه HDZ یا ناحیه با آسیب بالا نامید. ضخامت این ناحیه عموماً به روش حفاری وابسته است. لازم به ذکر است تونل مورد مطالعه با روش آتشیاری آرام حفاری شده است.

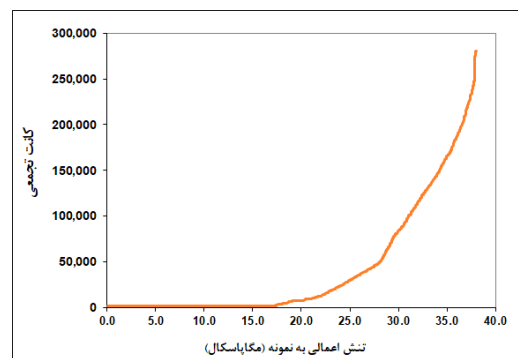


شکل ۸- نمودار تغییرات مقاومت فشاری در گمانه اکستنسومتر شماره دو در دیواره تونل نعل اسبی



شکل ۵: اجزاء تشکیل‌دهنده سیستم انتشار آوایی

با توجه به تئوری اثر کایزر هرگاه نمونه‌ای در شرایطی قرار گیرد که تنش اعمالی به آن بیش از تنشی باشد که قبلاً در آن قرار داشته، رخدادهای آوایی جدیدی در آن تولید خواهند شد [۹]. بنابراین در این قسمت از تحقیق آزمایش‌های آوایی همزمان با آزمایش‌های مقاومت فشاری انجام گرفت و میزان تنشی که در آن تنش رخدادهای آوایی شروع به تولید نموده‌اند با σ_A نامگذاری گردید. در شکل شماره ۶ نمونه‌ای از داده‌های آوایی ثبت‌شده حین انجام آزمون‌های آزمایشگاهی ارائه شده است.



شکل ۶- نمودار کانت تجمعی رخدادهای آوایی بر حسب تنش اعمالی به نمونه

در جدول شماره ۱ و شکل‌های شماره ۷ الی ۱۰ نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق ارائه شده است.

۱۱ مطالبی ارائه شده است).

همان طور که در جدول شماره ۱ و شکل‌های شماره ۷ الی ۱۰ نشان داده شده است، میزان تنش‌ی که در آن رخدادهای آوایی شروع به تولید نموده‌اند، با افزایش فاصله از دیواره تونل کاهش یافته است. در توضیح این رویداد می‌توان بیان نمود که حفر فضای زیرزمینی، سبب تمرکز تنش پیرامون آن شده است و با فاصله گرفتن از دیواره تونل میزان این تمرکز کاهش یافته و به حد تنش‌های برجای طبیعی موجود در منطقه رسیده است. طبق مباحثی که در بخش ۲ مطرح گردید به این ناحیه *Edz* گفته می‌شود. در این ناحیه تمرکز تنش هر چند به حدی نیست که سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش گردد، ولی سبب تولید ترک‌های میکروسکوپی و یا لغزش محدود دانه‌ها روی یکدیگر شده و رخدادهای آوایی تولید شده است. این ناحیه از مرز ناحیه *EDZ* شروع می‌شود و تا جایی که نرخ تولید رخدادهای آوایی ثابت شود، ادامه می‌یابد. لازم به ذکر است، به ناحیه‌ای که خارج از ناحیه *Edz* قرار می‌گیرد، ناحیه الاستیک گفته می‌شود. در این ناحیه تمرکز تنش‌ها به حدی نیست که میکروترک‌های جدید تولید شود و یا مقاومت فشاری سنگ کاهش یابد.

بنابراین با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و انتشار آوایی بر روی مغزه‌های حفاری بدست آمده از پیرامون محیط حفاری می‌توان تا حد قابل اطمینانی نواحی اطراف فضاهای زیرزمینی را از نظر میزان آسیب وارده به ۴ ناحیه *EDZ*، *Edz* و الاستیک تقسیم‌بندی نمود. این روش در زمانی که امکان انجام آزمایش‌های برجای آوایی وجود نداشته باشد می‌تواند کم هزینه‌ترین و ساده‌ترین روش جهت شناسایی نواحی آسیب پیرامون فضای زیرزمینی باشد.

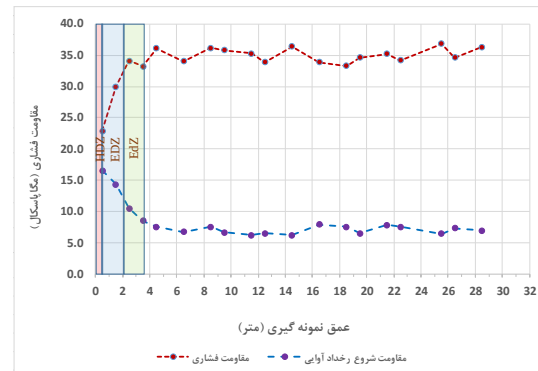
۴- روش عددی

در ادامه از روش عددی به منظور درک بهتر آزمون‌های آزمایشگاهی استفاده شد. برای دستیابی بدین منظور از نرم‌افزار *FLAC^{3D}* کمک گرفته شد. از معیار تسلیم موهر-کلمب جهت مدل‌سازی عددی استفاده شد. در نرم‌افزار *FLAC^{3D}* نواحی که نسبت مقاومت به تنش در آن کمتر از یک باشد به عنوان نواحی تسلیم نمایش داده می‌شوند.

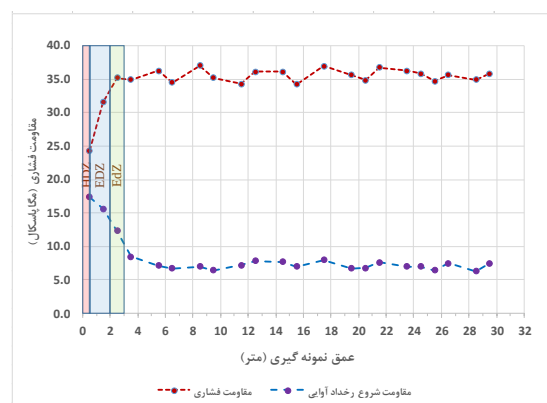
کد ویژه‌ای نوشته شد که بتواند نسبت مقاومت به تنش را در هر مرحله از بارگذاری به صورت تجمعی برای حالت‌های تسلیم برشی و یا کششی به صورت مجزا محاسبه نماید. در این نرم‌افزار، تنش فشاری با علامت منفی و تنش کششی با علامت مثبت فرض می‌شود. بنابراین بر اساس معیار شکست موهر کلمب (۹)، نسبت مقاومت به تنش را می‌توان طبق رابطه شماره ۱۰ محاسبه نمود [۱۱].

$$\sigma_{1f} = \left(\frac{1+\sin(\varphi)}{1-\sin(\varphi)} \right) \sigma_3 - 2C \sqrt{\frac{1+\sin(\varphi)}{1-\sin(\varphi)}} \quad (9)$$

$$r_b/r_a = \frac{\sigma_3 - \sigma_{1f}}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (10)$$



شکل ۹- نمودار تغییرات مقاومت فشاری در گمانه پیژومتر الکتریکی شماره یک در کف تونل نعل اسبی.



شکل ۱۰- نمودار تغییرات مقاومت فشاری در گمانه پیژومتر الکتریکی شماره دو در کف تونل نعل اسبی

در ادامه همان طور که در جدول شماره ۱ و اشکال شماره ۷ الی ۱۰ نشان داده شده است، مقاومت فشاری نمونه‌های اخذشده از دیواره تونل تا عمق مشخصی کمتر از مقاومت نمونه‌های اخذشده از عمق‌های بیشتر گمانه است. این محدوده در واقع ناحیه *EDZ* می‌باشد. در این ناحیه آسیب وارده به توده سنگ دربرگیرنده تونل، به حدی بوده که سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز شده است. نمونه‌هایی که از اعماق بیشتر گمانه اخذ شده‌اند، عملاً فاقد اختلاف معنی‌داری در مقاومت فشاری تک محوره بوده‌اند. در این تحقیق عمق ناحیه *EDZ* در دیواره‌ها تا ۳ متر و در کف تا ۲ متر پشت جداره تونل می‌باشد.

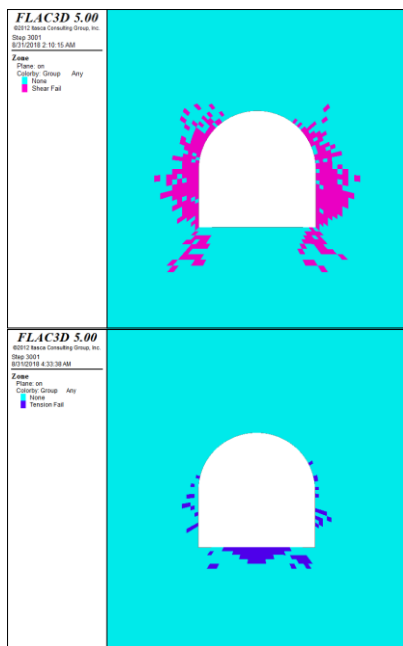
در ادامه این تحقیق همان طور که ذکر شد، علاوه بر آزمایش‌های مقاومت فشاری، آزمایش‌های انتشار آوایی نیز همزمان انجام گرفت و روند تولید پارامترهای کلیدی آوایی مانند کانت و انرژی در طول آزمایش مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت و میزان تنش‌ی که در آن رخدادهای آوایی شروع به تولید نمودند ثبت گردید. طبق تئوری اثر کایزر این تنش، نشان‌دهنده تنش فعلی موجود در محل نمونه‌گیری می‌باشد (در مورد کلیات این تئوری در منابع ۱۰ و

جدول شماره ۱- مقاومت فشاری و تنش شروع رخدادهای آوایی در نمونه‌های تهیه شده از سقف و دیواره تونل مورد مطالعه

ردیف	عمق نمونه (متر)	گمانه کشیدگی سنج شماره یک (دیواره)	گمانه کشیدگی سنج شماره دو (دیواره)	گمانه پیزومتر الکتریکی شماره یک (کف)	گمانه کشیدگی سنج شماره دو (دیواره)	گمانه پیزومتر الکتریکی شماره دو (کف)
		σ_c (مگاپاسکال)	$\sigma_{Acoustic}$ (مگاپاسکال)	σ_c (مگاپاسکال)	$\sigma_{Acoustic}$ (مگاپاسکال)	σ_c (مگاپاسکال)
۱	۰/۵	-	-	۲۲/۹	۱۶/۵	۲۴/۳
۲	۱/۵	۲۵/۶	۱۹/۵	۳۰/۰	۱۴/۳	۳۱/۵
۳	۲/۵	۳۱/۲	۱۵/۵	۳۴/۱	۱۰/۵	۳۵/۲
۴	۳/۵	۳۵/۶	۱۳/۴	۳۳/۲	۸/۵	۳۴/۹
۵	۴/۵	۳۶/۵	۱۲/۱	۳۶/۱	۷/۵	-
۶	۵/۵	۳۴/۵	۷/۵	-	-	۳۶/۲
۷	۶/۵	۳۶/۸	۶/۹	۳۴/۰	۶/۷	۳۴/۵
۸	۷/۵	۳۴/۴	۵/۷	-	-	-
۹	۸/۵	-	-	۳۶/۲	۷/۵	۳۷/۰
۱۰	۹/۵	۳۳/۱	۵/۹	۳۵/۸	۶/۶	۳۵/۲
۱۱	۱۰/۵	-	-	-	-	-
۱۲	۱۱/۵	۳۵/۰	۴/۳	۳۵/۳	۶/۲	۳۴/۳
۱۳	۱۲/۵	۳۳/۷	۵/۴	۳۳/۹	۶/۵	۳۶/۱
۱۴	۱۳/۵	-	-	-	-	-
۱۵	۱۴/۵	۳۵/۰	۴/۳	۳۶/۴	۶/۲	۳۶/۱
۱۶	۱۵/۵	۳۴/۳	۵/۲	-	-	-
۱۷	۱۶/۵	۳۶/۵	۴/۶	۳۳/۹	۷/۹	-
۱۸	۱۷/۵	-	-	-	-	۳۶/۹
۱۹	۱۸/۵	۳۳/۹	۶/۱	۳۳/۳	۷/۵	-
۲۰	۱۹/۵	-	-	۳۴/۶	۶/۵	۳۵/۶
۲۱	۲۰/۵	۳۶/۰	۴/۸	-	-	۳۴/۸
۲۲	۲۱/۵	-	-	۳۵/۲	۷/۸	۳۶/۷
۲۳	۲۲/۵	-	-	۳۴/۲	۷/۵	-
۲۴	۲۳/۵	-	-	-	-	۳۶/۲
۲۵	۲۴/۵	-	-	-	-	۳۵/۸
۲۶	۲۵/۵	-	-	۳۶/۸	۶/۴	۳۴/۷
۲۷	۲۶/۵	-	-	۳۴/۶	۷/۳	۳۵/۶
۲۸	۲۷/۵	-	-	-	-	-
۲۹	۲۸/۵	-	-	۳۶/۳	۶/۹	۳۴/۹
۳۰	۲۹/۵	-	-	-	-	۳۵/۸

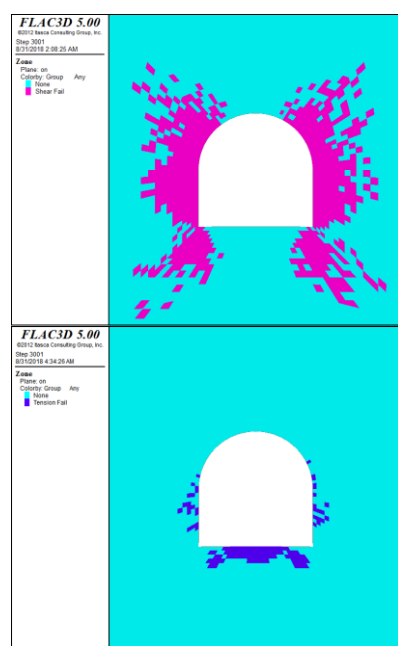
در معادلات فوق r_a و r_b شعاع دواير تنش تفاضلی در منحنی تنش-برش است. از نسبت r_b/r_a برای محاسبه ضریب اطمینان (F) نیز استفاده می‌شود. بنابراین طبق معادلات فوق، می‌توان برای هر المان از مدل عددی و در هر مرحله از بارگذاری نمونه، نسبت r_b/r_a

را برای شکست برشی محاسبه نمود و المان‌هایی که دارای ضریب اطمینان مورد نظر هستند را نمایش داد [۱۲]. در ادامه جهت محاسبه ضریب اطمینان در نواحی که تحت تاثیر تنش کششی هستند، ابتدا المان‌هایی که دارای تنش مینیمم



شکل ۱۲- نواحی آسیب با در نظر گرفتن نسبت مقاومت به تنش

۱/۳۰



شکل ۱۳- نواحی آسیب با در نظر گرفتن نسبت مقاومت به تنش

۱/۶۰

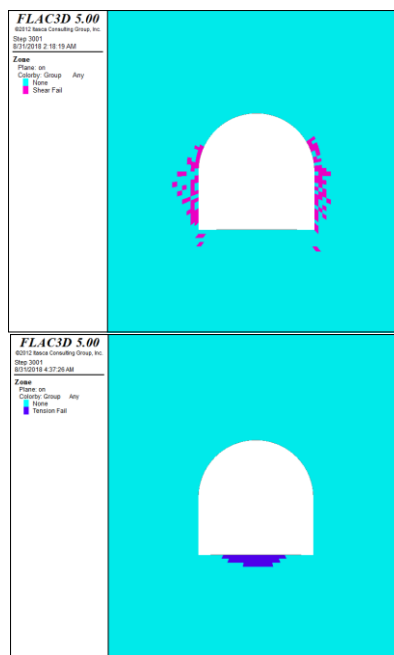
بنابراین در مدل عددی ناحیه Edz را تنها در صورتی می‌توان برآورد نمود که نسبت مقاومت به تنش بیشتر از یک باشد. هنگامی که نسبت مقاومت به تنش برابر ۱/۶ در نظر گرفته شود، شعاع ناحیه پلاستیک تقریباً برابر با شعاع محدوده Edz خواهد شد. بنابراین تنها در صورتی می‌توان توسط مدل‌سازی عددی کل محدوده آسیب را تعیین نمود که کد ویژه نوشته شده استفاده نمود

(σ_3) مثبت هستند، مشخص می‌شود و سپس ضریب اطمینان شکست کششی طبق رابطه شماره ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$F = \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \quad (11)$$

با توجه به توضیحات فوق در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ کد عددی ویژه‌ای نوشته شد که بتواند با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ نسبت مقاومت به تنش را از نوع برشی و یا کششی در هر مرحله از بارگذاری برای هر المان به صورت تجمعی محاسبه و ترسیم نماید. در این تحقیق به طور پیش‌فرض نسبت‌های مقاومت به تنش ۱/۰، ۱/۳۰ و ۱/۶۰ مبنای مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی قرار گرفت.

در واقع این موضوع بررسی شد که نواحی آسیب مشاهده شده در اطراف تونل مورد مطالعه با کدام یک از نواحی آسیب مدل‌سازی شده هم‌خوانی دارد. در شکل‌های شماره ۱۱ تا ۱۳ نواحی تسلیم کششی و برشی مدل‌سازی شده و با در نظر گرفتن نسبت مقاومت به تنش مختلف نمایش داده شده است. همان طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود با افزایش نسبت مقاومت به تنش، نواحی تسلیم کششی و برشی گسترده‌تر می‌شود.



شکل ۱۱- نواحی آسیب با در نظر گرفتن نسبت مقاومت به تنش ۱/۰۰

با مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و انتشار آوایی (شکل‌های ۷ الی ۱۰) می‌توان به این نتیجه رسید که وقتی نسبت مقاومت به تنش در مدل عددی برابر یک فرض می‌شود، عمق ناحیه پلاستیک در مدل عددی برابر با ناحیه EDZ در آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

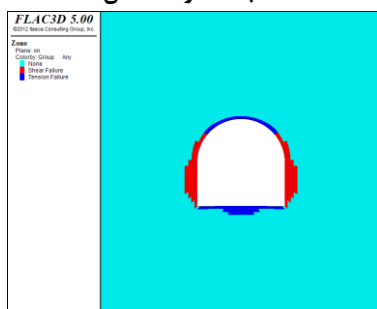
جدول ۲- شعاع ناحیه آسیب بدست آمده از مدل سازی عددی نسبت به نصف عرض تونل

نسبت شعاع ناحیه آسیب به نصف عرض تونل		پارامترهای مدل						ردیف
کف	دیواره	F	σ_t (MPa)	φ (درجه)	C (MPa)	K	σ_z (MPa)	
۱/۱۹	۱/۰۰	۱/۰	۰/۳	۳۴	۱۱	۰/۳۳	۱۵	۱
۱/۲۸	۱/۰۰	۱/۳	۰/۳	۳۴	۱۱	۰/۳۳	۱۵	۲
۱/۳۱	۱/۰۶	۱/۶	۰/۳	۳۴	۱۱	۰/۳۳	۱۵	۳
۱/۳۶	۱/۲۸	۲/۰	۰/۳	۳۴	۱۱	۰/۳۳	۱۵	۴
۱/۱۲	۱/۰۰	۱/۰	۱/۳	۴۲	۹	۰/۳۳	۱۵	۵
۱/۱۷	۱/۰۰	۱/۳	۱/۳	۴۲	۹	۰/۳۳	۱۵	۶
۱/۲۱	۱/۱۳	۱/۶	۱/۳	۴۲	۹	۰/۳۳	۱۵	۷
۱/۲۶	۱/۲۸	۲/۰	۱/۳	۴۲	۹	۰/۳۳	۱۵	۸
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰	۴/۵	۳۲	۹	۰/۳۳	۱۵	۹
۱/۰۵	۱/۱۳	۱/۳	۴/۵	۳۲	۹	۰/۳۳	۱۵	۱۰
۱/۱۲	۱/۲۸	۱/۶	۴/۵	۳۲	۹	۰/۳۳	۱۵	۱۱
۱/۱۲	۱/۴۵	۲/۰	۴/۵	۳۲	۹	۰/۳۳	۱۵	۱۲
۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۰	۰/۰	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۰	۱۳
۱/۳۵	۱/۲۰	۱/۳	۰/۰	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۰	۱۴
۱/۳۵	۱/۲۰	۱/۶	۰/۰	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۰	۱۵
۱/۳۷	۱/۳۵	۲/۰	۰/۰	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۰	۱۶
۱/۱۲	۱/۰۰	۱/۰	۰/۳	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۰	۱۷
۱/۱۲	۱/۰۰	۱/۳	۰/۳	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۰	۱۸
۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۶	۰/۳	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۰	۱۹
۱/۱۲	۱/۳۶	۲/۰	۰/۳	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۰	۲۰
۱/۱۹	۱/۱۹	۱/۰	۰/۰	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۵	۲۱
۱/۳۶	۱/۲۸	۱/۳	۰/۰	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۵	۲۲
۱/۳۶	۱/۴۵	۱/۶	۰/۰	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۵	۲۳
۱/۳۶	۱/۶۵	۲/۰	۰/۰	۲۷	۸	۰/۵۰	۱۵	۲۴
۱/۳۵	۱/۲۰	۱/۰	۰/۰	۲۷	۸	۰/۳۳	۱۰	۲۵
۱/۴۵	۱/۲۰	۱/۳	۰/۰	۲۷	۸	۰/۳۳	۱۰	۲۶
۱/۴۵	۱/۲۰	۱/۶	۰/۰	۲۷	۸	۰/۳۳	۱۰	۲۷
۱/۴۵	۱/۳۶	۲/۰	۰/۰	۲۷	۸	۰/۳۳	۱۰	۲۸
۱/۱۹	۱/۲۰	۱/۰	۰/۰	۲۷	۸	۱/۰۰	۱۵	۲۹
۱/۲۸	۱/۲۱	۱/۳	۰/۰	۲۷	۸	۱/۰۰	۱۵	۳۰
۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۶	۰/۰	۲۷	۸	۱/۰۰	۱۵	۳۱
۱/۵۳	۱/۵۳	۲/۰	۰/۰	۲۷	۸	۱/۰۰	۱۵	۳۲
۱/۱۲	۱/۰۰	۱/۰	۰/۳	۳۷	۶/۵	۰/۵۰	۱۰	۳۳
۱/۱۲	۱/۰۰	۱/۳	۰/۳	۳۷	۶/۵	۰/۵۰	۱۰	۳۴
۱/۱۲	۱,۱۰	۱/۶	۰/۳	۳۷	۶/۵	۰/۵۰	۱۰	۳۵
۱/۱۲	۱/۲۸	۲/۰	۰/۳	۳۷	۶/۵	۰/۵۰	۱۰	۳۶
۱/۰۰	۱/۰۶	۱/۰	۱/۰	۲۸	۵/۰	۰/۵۰	۱۰	۳۷

ادامه جدول ۲- شعاع ناحیه آسیب بدست آمده از مدل سازی عددی نسبت به نصف عرض تونل

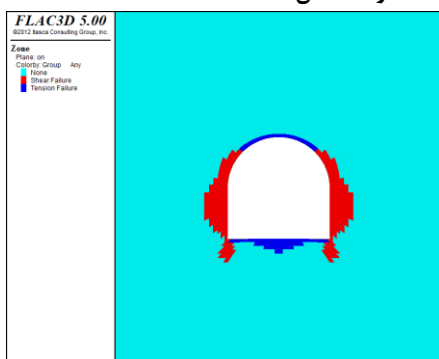
ردیف	پارامترهای مدل						نسبت شعاع ناحیه آسیب به نصف عرض تونل	
	σ_z (MPa)	K	C (MPa)	ϕ (درجه)	σ_t (MPa)	F	دیواره	کف
۳۸	۱۰	۰/۵۰	۵/۰	۲۸	۱/۰	۱/۳	۱/۳۷	۱/۰۰
۳۹	۱۰	۰/۵۰	۵/۰	۲۸	۱/۰	۱/۶	۱/۴۵	۱/۰۰
۴۰	۱۰	۰/۵۰	۵/۰	۲۸	۱/۰	۲/۰	۱/۶۴	۱/۰۰
۴۱	۱۰	۰/۵۰	۵/۰	۲۳	۰/۰	۱/۰	۱/۲۱	۱/۲۰
۴۲	۱۰	۰/۵۰	۵/۰	۲۳	۰/۰	۱/۳	۱/۴۵	۱/۳۵
۴۳	۱۰	۰/۵۰	۵/۰	۲۳	۰/۰	۱/۶	۱/۶۴	۱/۳۷
۴۴	۱۰	۰/۵۰	۵/۰	۲۳	۰/۰	۲/۰	۱/۸۷	۱/۴۴

شده (نسبت مقاومت تنش ۱/۰)



شکل ۱۵: نواحی آسیب در دیواره و کف تونل نعل اسبی مدل

شده (نسبت مقاومت تنش ۱/۳)



شکل ۱۶: نواحی آسیب در دیواره و کف تونل نعل اسبی مدل شده

(نسبت مقاومت تنش ۱/۶۰)

پیش فرض فرمت کلی رابطه پیشنهادی توسط نرم افزار SPSS

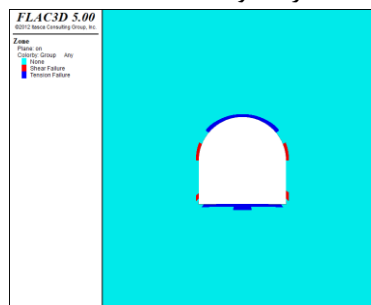
به صورت رابطه ۱۲ می باشد:

$$\frac{R_D(Wall)}{R} = a \times \left[\frac{C^{b_1}}{b_1^C} \right] \times \left[\frac{(1+\sin(\phi))^{b_2}}{b_2^{1-\sin(\phi)}} \right] \times \left[\frac{\sigma_z^{b_3}}{b_3^{\sigma_z}} \right] \times \left[\frac{K^{b_4}}{b_4^K} \right] \times \left[\frac{F^{b_5}}{b_5^F} \right] \times \left[\frac{\sigma_t^{b_6}}{b_6^{\sigma_t}} \right] \quad (12)$$

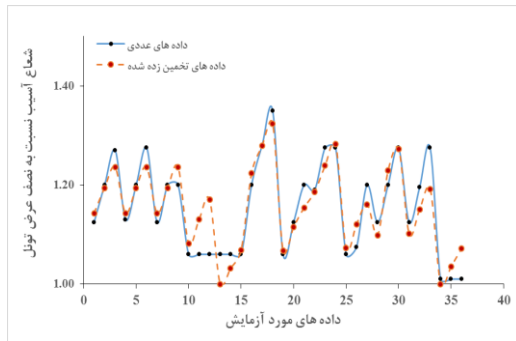
تا بتوان نسبت مقاومت به تنش را بیشتر از یک را اعمال نمود تا نواحی تسلیم حاصله را مشخص نمود در حالی که نرم افزار $FLAC^{3D}$ به طور پیش فرض فقط ناحیه پلاستیک را برآورد می کند. لازم به ذکر است که ناحیه پلاستیک تنها جزئی از ناحیه آسیب است و فقط شامل ناحیه EDZ می شود.

۵- تعیین رابطه ریاضی جهت تخمین ناحیه آسیب

سعی شد تا روابط ریاضی مناسبی جهت تخمین نواحی آسیب ناشی از حفر تونل های نعل اسبی بر اساس چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت کششی توده سنگ اطراف تونل، مقدار تنش قائم و نسبت تنش افقی به قائم و نسبت مقاومت به تنش ارائه شود. برای دستیابی بدین منظور مدل عددی ساخته شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$ در قسمت قبل برای شش پارامتر ورودی مختلف اجرا و ضخامت نواحی آسیب تعیین شد. نتایج حاصل از مدل سازی های انجام شده در جدول شماره ۲ ارائه شده و نمونه ای از مدل های عددی انجام شده نیز در شکل های شماره ۱۴ الی ۱۶ نشان داده شده است. در ادامه از مدل های ترکیبی غیرخطی جهت تخمین ناحیه آسیب ناشی از حفر استفاده شد و سعی شد بهترین رابطه ریاضی چند متغیره غیرخطی با استفاده از تحلیل حساسیت انجام شده توسط نرم افزار SPSS ارائه شود [۱۳].



شکل ۱۴: نواحی آسیب در دیواره و کف تونل نعل اسبی مدل



شکل ۱۸: مقادیر مدل سازی شده و تخمین زده شده ناحیه آسیب در کف تونل نعل اسبی.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ناحیه آسیب ناشی از حفر تونل توسط روش های آزمایشگاهی با کمک انتشار آوایی، مدل سازی عددی و روش آماری مورد مطالعه قرار گرفت. برای دستیابی بدین منظور، مغزه های حفاری تهیه شده از دیواره و کف یک تونل نعل اسبی مورد مطالعه قرار گرفت و سعی شد نواحی آسیب پیرامون آن تقسیم بندی شود. در ادامه نواحی آسیب برآورد شده توسط نرم افزار $FLAC^{3D}$ مدل سازی عددی شد. در انتهای تحقیق نیز سعی شد با استفاده از نتایج بدست آمده از مراحل قبل و روش های آماری (نرم افزار SPSS) روابط ریاضی کاربردی جهت برآورد ناحیه آسیب ناشی از حفر در تونل های نعل اسبی در شرایط تنش غیریکنواخت ارائه شود. نتایج کلی تحقیق به شرح ذیل می باشد:

- نواحی آسیب پیرامون تونل را می توان با انجام آزمون های آزمایشگاهی و انتشار آوایی به سه ناحیه مجزای EDZ، HDZ و Edz تقسیم بندی نمود.
- در ناحیه EDZ مقاومت فشاری نمونه ها کمتر از نمونه های اخذ شده در اعماق بیشتر گمانه است. در این ناحیه آسیب وارده به سنگ دربرگیرنده تونل به حدی بوده که سبب کاهش مقاومت نمونه ها شده است.
- آسیب وارده به ناحیه Edz تأثیری در کاهش مقاومت نمونه های اخذ شده از گمانه نداشته است. با این وجود تمرکز تنش در این ناحیه به حدی بوده که سبب وقوع محدود رخداد های آوایی شده، لذا تنش شروع رخداد های آوایی ثبت شده در این ناحیه بالاتر از حد تنش برجای موجود در منطقه می باشد.
- نتایج مدل سازی عددی نشان داد که توسط کدهای عددی ویژه مورد استفاده در این تحقیق، می توان علاوه بر ناحیه پلاستیک، سایر نواحی آسیب را نیز پیرامون تونل برآورد نمود. نتایج بدست آمده از مدل سازی عددی تطابق خوبی با نتایج بدست آمده از آزمون های آزمایشگاهی دارد.
- توسط روابط ریاضی ارائه شده می توان کلیه نواحی آسیب در پیرامون تونل های نعل اسبی، حتی در شرایط تنش غیریکنواخت با ضریب همبستگی بالا مشخص نمود.

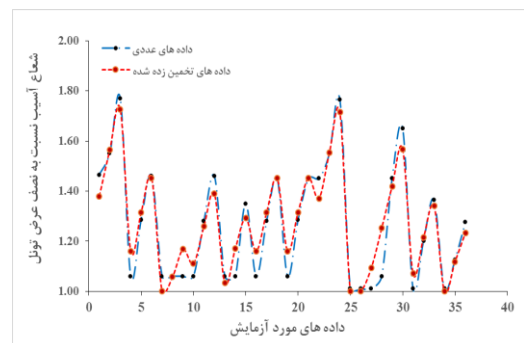
در این رابطه C چسبندگی بر حسب مگاپاسکال، φ زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه، σ_z تنش در راستای قائم بر حسب مگاپاسکال، K نسبت تنش افقی به قائم و F نسبت مقاومت به تنش و σ_t مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال می باشد. منطق کلی تحلیل حساسیت انجام شده توسط نرم افزار SPSS، ارائه رابطه ریاضی با در نظر گرفتن بیشترین ضریب همبستگی بین پارامترهای پیشگوکننده و حذف پارامترهای با ضریب همبستگی ضعیف از معادله چند متغیره در سطح اعتماد ۹۵٪ درصد آماری است.

با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده توسط نرم افزار SPSS رابطه ریاضی نهایی که جهت برآورد ناحیه آسیب در دیواره رابطه ۱۳ و کف تونل رابطه ۱۴ پیشنهاد می شود:

$$R_{D(Wall)} = L/2 \left[\frac{1.243 F^{0.477} \sigma_z^{0.410}}{\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}^{0.404} K^{0.105} C^{0.427}} \right] \quad (13)$$

$$R_{D(Floor)} = L/2 \left[\frac{0.949 F^{0.167} \sigma_z^{0.091}}{e^{0.069 \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} K^{0.132} \sigma_t^{0.099}} \right] \quad (14)$$

ضریب همبستگی رابطه ۱۳ و ۱۴ به ترتیب برابر ۰/۹۴۶ و ۰/۹۰۵ می باشد. در شکل شماره ۱۷ و ۱۸ میزان تطابق بالای نتایج پیش بینی شده توسط روابط فوق و مدل سازی ارائه شده است.



شکل ۱۷: مقادیر مدل سازی شده و تخمین زده شده ناحیه آسیب در دیواره تونل نعل اسبی

روابط ارائه شده در این تحقیق می تواند جهت برآورد ضخامت ناحیه آسیب در تونل های غیردایره ای، در شرایط تنش برجای هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک استفاده شود. همچنین در این روابط با تغییر پارامتر F می توان علاوه بر ناحیه پلاستیک، سایر نواحی آسیب را نیز برآورد نمود.

۷- منابع

- [12] Itasca. FLAC Manual. www.Itascacg.com.
- [13] Kinnear P.R. and Gary, C.O., (2007). SPSS for windows. Published by Psychology Press.
- [14] Zhiqiang, K., Yang, Y., Haimin, W., 2012. Damage evolution of rock and acoustic emission study about deep diversion tunnel in the excavation process" Advanced Materials Research Vol 366 pp 243-246.
- [15] Lemaitre, J., (2012). A course on damage mechanics. Published by Springer Science & Business Media
- [16] Zhao, M.J., Sun, X., Wang, S., (2014). Damage evolution analysis and pressure prediction of surrounding rock of a tunnel based on rock mass classification. EJEg, pp 603-627.
- [17] Grosse, CU., Ohtsu, M., 2008. Acoustic Emission Testing", Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [18] Xu, SD., Li, YH., Liu, JP., (2017). Detection of cracking and damage mechanisms in brittle granites by moment tensor analysis of acoustic emission signals. Acoustical Physics. 63(3), pp 359-367.
- [19] Zareifard, MR., Fahimifar, A., (2016). Analytical solutions for the stresses and deformations of deep tunnels in an elastic-brittle-plastic rock mass considering the damaged zone. Tunnelling and Underground Space Technology, 58, pp186-196.
- [20] Siren, T., Kantia, P., Rinne, M., (2015). Considerations and observations of stress-induced and construction-induced excavation damage zone in crystalline rock. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 73, PP165-174.
- [21] Zhu, WC., Liu, J., 2005. Tang CA, Zhao XD, Brady BH., 2005. Simulation of progressive fracturing processes around underground excavations under biaxial compression. Tunneling and Underground Space Technology, 20, pp 231-247.
- [22] Liang, Z., Liu, X., Zhang, Y., Tang, C., 2013. Analysis of precursors prior to rock burst in granite tunnel using acoustic emission and far infrared monitoring. Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering.
- [1] Fattahi, H., Shojaei, S., Ebrahimi, MA., (2013). Application of adaptive neuro-fuzzy inference system for the assessment of damage zone around underground spaces. International Journal of Optimization in Civil Engineering, 3(4), pp 673-693.
- [2] Tsang, CF., Bernier, F., Davies, C., (2005). Geohydromechanical processes in 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, pp 109-125 .
- [3] Shen, B., Barton, N., (1997). The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 34(1), pp 117-125.
- [4] Suzuki, K., Nakata, E., Minami, M., Hibino, E., Tani, T., Sakakibara, J., Yamada, N., (2004). Estimation of the zone of excavation disturbance around tunnels, using resistivity and acoustic tomography, Explor Geophys, 35(1), pp 62-69.
- [5] Ji, M., Zhang, YD., Liu, WP., Cheng, L., (2014). Damage evolution law based on acoustic emission and weibull distribution of granite under uniaxial stress. Acta Geodyn Geomater, 11(3), pp 269-277 .
- [6] Zhiqiang, K., Yang, Y., Haimin, W., (2012). Damage evolution of rock and acoustic emission study about deep diversion tunnel in the excavation process" Advanced Materials Research Vol 366 pp 243-246.
- [7] Goodman, RE., (1989). Introduction to rock mechanics. published by simultaneously in canada, second edition.
- [8] Li, CM., Shi, WB., Liu, WR., Feng, RU., (2017). Elastic-plastic analysis of surrounding Rock in deep roadway considering shear dilatancy property under non-uniform stress field. Journal of Engineering Science and Technology Review 10 (4), pp 16-24.
- [9] Lavrov, A., 2003. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. Int. J. Rock Mech. Min, vol. 40, no. 2, pp. 151-171.
- [10] Seto M, Nag DK, Vutukuri VS (1999). In situ stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis. Geotech Geol Eng J 17:241-26
- [11] Lin HM, Wu JH, Lee DH (2006). Evaluating the pre-stress of Mu-Shan sandstone using acoustic emission and deformation rate analysis in-situ rock stress. Taylor & Francis, London

- 1- Acoustic Emission
2- Highly Damage Zone
3- Excavation Damaged Zone
4- Excavation disturbed Zone
5- Zhang et al.
6- Zhiqian et al.
7- Bary et al.
8- Candy & Linderberg
9- Li et al.