

## بررسی تاثیر روش های حفاری مکانیزه و آتشیاری بر وسعت ناحیه آسیب دیده تونل های دایره ای

علی دادی گیوشاد<sup>۱</sup>؛ مرتضی احمدی<sup>۱\*</sup>؛ حمیدرضا نجاتی<sup>۱</sup>

۱- گروه مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹

### چکیده

پیامد حفر هرگونه فضای زیرزمینی، توزیع مجدد تنش های اولیه پیرامون آن است. این توزیع تنش همراه با تغییر شکل و ایجاد درز و شکاف در پیرامون حفاری می باشد. در این تحقیق ناحیه آسیب دیده ناشی از حفر تونل با در نظر گرفتن روش حفاری آتشیاری و مکانیزه مورد مطالعه قرار گرفت و پارامترهای موثر بر میزان گسترش آن (پارامترهای ژئومکانیکی سنگ در برگزیده و تنش برجا) مطالعه گردید. در این مطالعه یک تونل دایره ای شکل به قطر ۴ متر و طول ۹ متر، توسط روش عددی (نرم افزار *FLAC3D*) مدل سازی شد. در مدل عددی از مترای صفر الی ۶/۰ تونل بصورت حفاری مکانیزه و از مترای ۶/۰ الی ۹/۰ تونل به روش آتشیاری حفاری شد و ضخامت ناحیه آسیب در هر یک تعیین شد. در مجموع، ۳۰ مدل عددی ساخته شد و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که ناحیه آسیب ناشی از حفر تونل در محدوده تحت تاثیر روش آتشیاری دارای گسترش بیشتری است. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که افزایش تنش بر جای عمودی، سبب افزایش شعاع ناحیه آسیب در دیواره های تونل و افزایش چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نسبت تنش افقی به قائم سبب کاهش شعاع ناحیه آسیب در دیواره ی تونل می شود.

### واژگان کلیدی

ناحیه آسیب، روش عددی، تونل دایره ای، روش آتشیاری و حفاری مکانیزه.

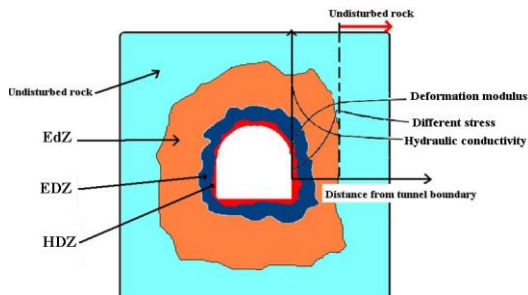
### ۱- مقدمه

ایجاد تغییر شکل به واسطه رشد ترک و کاهش پارامترهای ژئومکانیکی سنگ را آسیب می نامند. توسعه آسیب می تواند سبب شکستگی و ناپایداری و همچنین تغییر ویژگی های مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ در اطراف حفاریات زیرزمینی شود. از نظر تئوری، منطقه آسیب دیده از سطح حفاری شروع شده و تا فاصله ای که خواص فیزیکی، مکانیکی و هیدرومکانیکی تغییر کرده را شامل می شود [۱، ۲].

تسانگ و همکاران، منطقه آسیب را به ۳ ناحیه مجزای *EDZ*، *EIZ* و *HDZ* تقسیم بندی کرده اند (شکل ۱). ناحیه *HDZ* شامل شکستگی های بزرگ مقیاس و خردشدگی می باشد. بیشترین آسیب در اثر حفاری در این ناحیه ایجاد می شود. آسیب ایجاد شده در ناحیه *EDZ* تحت تاثیر تنش های القایی ناشی از حفاری می باشد. در این محدوده، تغییرات در توده سنگ، شامل نفوذپذیری و تنش های اولیه

می باشد. در ناحیه *EdZ* مقدار تنشهای القایی کمتر از مقداری است که بتواند میکروترک ایجاد نماید، لذا آسیب ایجاد شده در این ناحیه برگشت پذیر می باشد [۱، ۲].

در این تحقیق تاثیر مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی سنگ در برگزیده تونل و تنشهای بر جای بر میزان ناحیه آسیب ناشی از حفر با در نظر گرفتن دو روش حفاری مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- تقسیم بندی نواحی آسیب اطراف تونل [۲].

## ۲- فشار ناشی از انفجار در دیواره چال

در روش آتشی، فشار گاز ناشی از انفجار ماده ناریه سبب تخریب سنگ در برگزیده تونل می‌شود. میزان آسیب ایجاد شده در این روش بستگی به مقدار فشار گاز ماده منفجره دارد که به دیواره چال اعمال می‌شود. بنابراین لازم است در ابتدا، مقدار این فشار توسط معادلات ریاضی بیان شود و در تحلیل عددی استفاده شود [۳]. پیرسون و همکاران (۱۹۹۳) جهت محاسبه این فشار در چال استوانه‌ای رابطه ۱ را ارائه دادند [۴]:

$$P_d = \frac{\rho_e V_d^2}{4} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $P_d$  مقدار فشار وارد به چال،  $\rho_e$  دانسیته ماده منفجره،  $V_d$  سرعت ماده منفجره می‌باشد. فشار واقعی  $P_e$ ، نصف این فشار می‌باشد [۵]. فشاری که گاز به دیواره تونل وارد می‌کند ( $P_b$ ) مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۴]:

$$P_b = P_e \left(\frac{d_c}{d_h}\right)^3 \quad (2)$$

در این رابطه  $d_c$  قطر ماده منفجره  $d_h$ ، قطر چال می‌باشد. در جدول شماره ۱ خصوصیات دو ماده مرسوم انفجاری امولایت و آنفو که در حفاریات زیرزمینی استفاده می‌شود، ارائه شده است. با جایگذاری رابطه ۲ در رابطه ۱، فشار گاز اعمالی به دیواره چال مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۴]:

$$P_b = \frac{\rho_e V_d^2}{8} \left(\frac{d_c}{d_h}\right)^3 \quad (3)$$

فشار گاز وارد بر چال به صورت تابعی از زمان را مطابق رابطه ۴ می‌توان نیز محاسبه نمود [۷]:

$$P_t = 4P_b \left( e^{-\frac{\beta t}{\sqrt{2}}} - e^{-\beta t \sqrt{2}} \right) \quad (4)$$

در رابطه فوق  $\beta$  فاکتور میرایی می‌باشد و طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

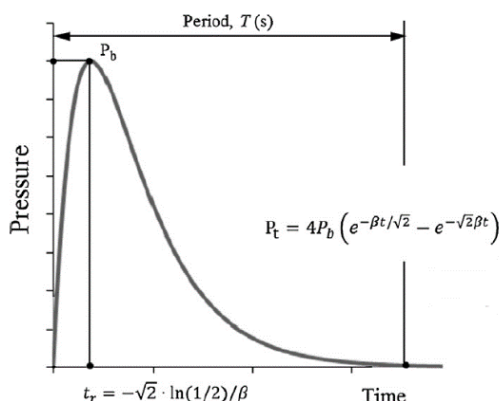
$$\beta = -\sqrt{2} \ln\left(\frac{1}{2}\right) / t_r \quad (5)$$

$t_r$  زمان میرایی موج انفجار می‌باشد که بین ۱۰ میکروثانیه تا ۱۰۰۰ میکروثانیه می‌باشد [۸].

### جدول ۱- پارامترهای سرعت، چگالی و فشار گاز دو ماده منفجره

[۶]		نوع ماده انفجاری
مقدار	نوع پارمتر	
۴۰۵۲	سرعت (متر بر ثانیه)	آنفو
۷۸۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	
۱/۶	فشار (گیگا پاسکال)	
۵۵۸۲	سرعت (متر بر ثانیه)	امولایت
۱۲۵۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	
۴/۹	فشار (گیگا پاسکال)	

در شکل ۲ نمودار تئوری فشار-زمان وارد به دیواره چال و در شکل ۳ فشار وارد به دیواره چال با در نظر گرفتن نوع ماده انفجاری (آنفو خط پر و امولایت خط چین) و زمان های میرایی مختلف (۱۰ تا ۱۰۰۰ میکروثانیه) نشان داده شده است.

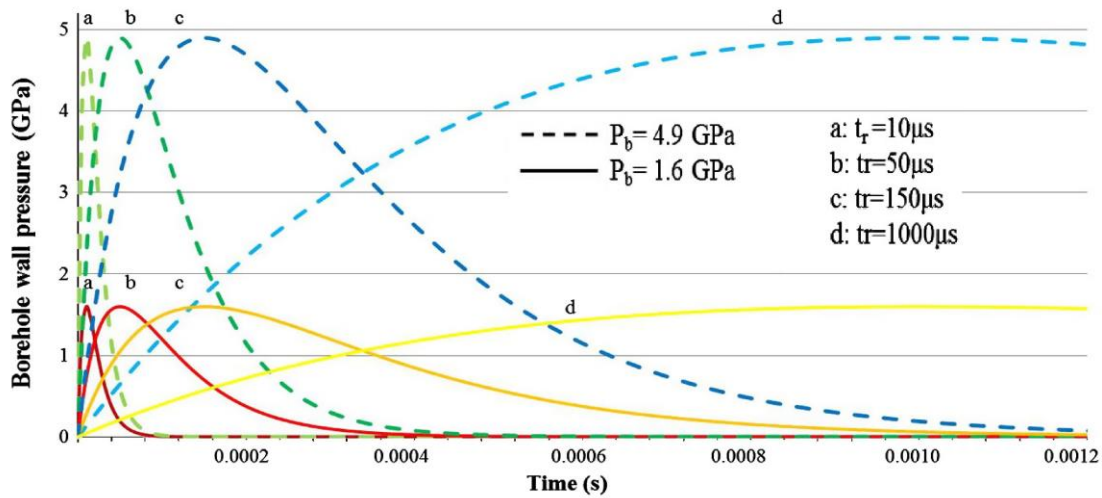


شکل ۲- نمودار تئوریک فشار-زمان وارد به دیواره چال [۸].

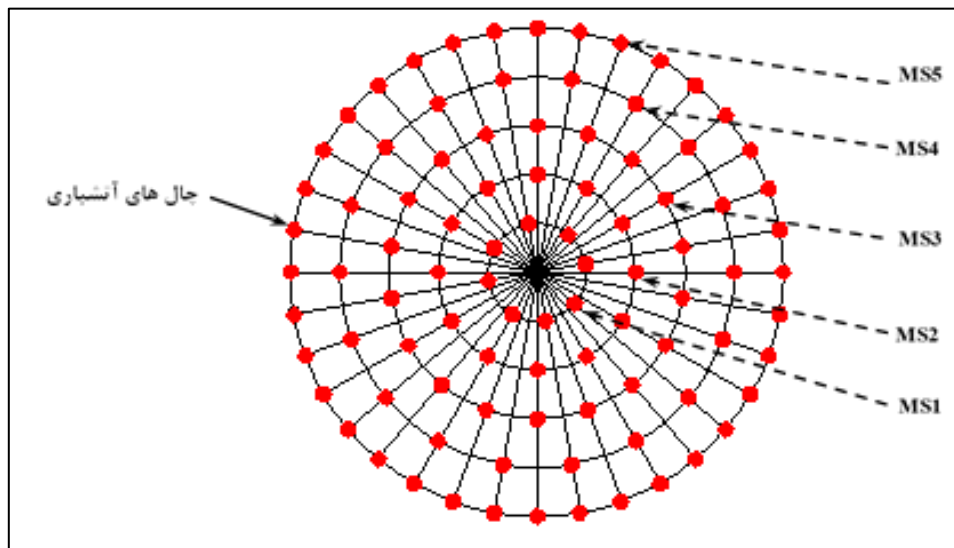
## ۳- تحلیل عددی ناحیه آسیب

در این تحقیق، از نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> جهت مدل سازی عددی ناحیه آسیب استفاده شد و تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی سنگ در برگزیده تونل و مقادیر تنش‌های برجا با در نظر گرفتن روش آتشی بر ناحیه آسیب مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور تونل دایره‌ای شکلی به قطر ۴ متر و طول ۹ متر در نظر گرفته شد. محدوده تنش بر جای قائم از ۲ مگاپاسکال الی ۱۵ مگاپاسکال، نسبت تنش افقی به قائم از ۰/۲۵ الی ۱/۰۰، مقاومت کششی از صفر الی ۲ مگاپاسکال، زاویه اصطکاک داخلی سنگ از ۲۰ الی ۴۵ درجه و چسبندگی از ۲ الی ۱۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در اولین مرحله از مدل سازی، ۶ متر ابتدایی تونل با روش حفاری مکانیزه حفاری گردید و در مرحله بعدی از متر ۶ تا ۹، با حفر چال‌های ۳ متری و با استفاده از روش آتشی حفاری گردید. الگوی کلی چال‌های آتشی در نظر گرفته شده در این تحقیق در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به اینکه چاشنیهای انفجاری قرار گرفته در چال‌ها از نوع میلی ثانیه می‌باشد، در شکل ۴ با MS نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که در مدل عددی ساخته شده، مطابق آنچه در حفاری واقعی تونل ها انجام می‌شود، ماده انفجاری اصلی در چال-های خط کنتور تونل (چالهای قرار گرفته در محیط تونل) امولایت و ماده انفجاری اصلی چال‌های پیشروی (چالهای قرار گرفته در مقطع تونل) آنفو می‌باشد. پارامترهای مواد ناریه در این تحقیق مطابق جدول شماره ۱ در نظر گرفته شد. در مجموع ۳۰ مدل عددی با نرم-افزار FLAC<sup>3D</sup> اجرا و مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل‌های ۵ الی ۶ نمونه‌ای از نتایج مدل‌های عددی ارائه شده است.



شکل ۳- نمودار فشار وارده به دیواره چال با در نظر گرفتن نوع ماده انفجاری (آنفو خط پر و امولایت خط چین) و زمانهای میرایی مختلف (۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرو ثانیه) [۸].

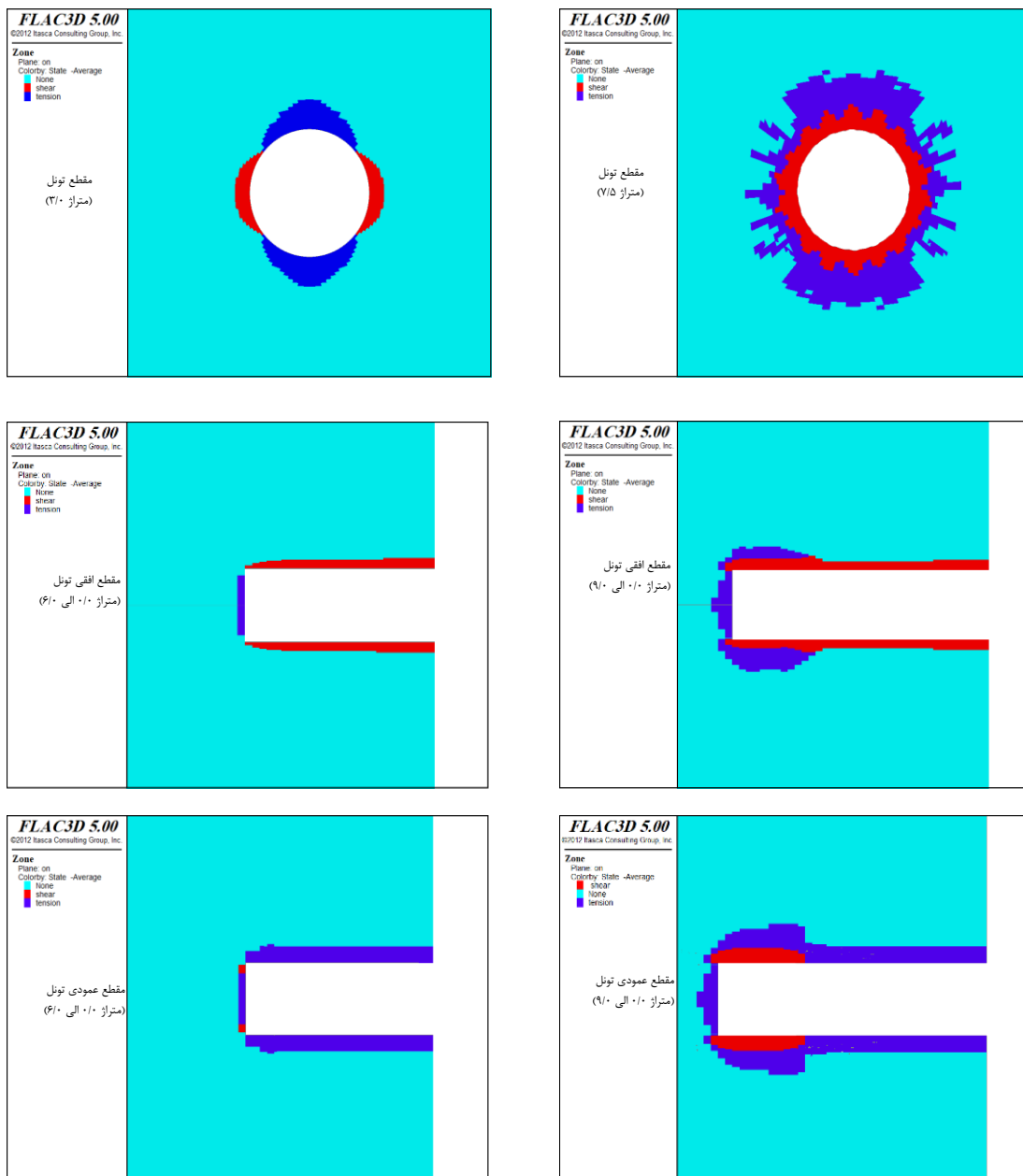


شکل ۴- نمایی از جانمایی چالهای آتشیاری در مدل عددی مورد مطالعه.

و ادامه انتشار موج در سنگ پیرامون تونل، سبب ایجاد ناحیه ترک خورده می‌شود.

در شکل شماره ۶، تونل با توجه به شرایط تنش هیدرواستاتیک مدل سازی شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود در ۶ متر ابتدای تونل فقط آسیب برشی رخ داده است. اما در محدوده مترها ۶/۰ الی ۹/۰ با اعمال بارهای ناشی از انفجار، ضمن گسترده‌تر شدن ناحیه آسیب، در جداره تونل آسیب برشی و سپس کششی مشاهده می‌شود. از ارائه نتایج بصورت تصویری به منظور کاهش صفحات مقاله خودداری و نتایج بصورت کمی در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

در شکل ۵، هنگامیکه  $K=0/33$  است، وضعیت ناحیه آسیب در سقف تقریباً دو برابر دیواره‌ها بوده و آسیب ایجاد شده در سقف تونل از نوع کششی و در دیواره‌ها از نوع برشی می‌باشد. در ادامه هنگامی که حفاری در مترها ۶/۰ الی ۹/۰ با روش آتشیاری ادامه می‌یابد، دو نکته وجود دارد؛ اول اینکه گستره ناحیه آسیب در سقف و دیواره‌های تونل به وضوح نسبت به ۶ متر ابتدای تونل بیشتر است و دوم اینکه برخلاف مترهای صفر الی ۶/۰، که آسیب کششی در سقف تونل و آسیب برشی در دیواره‌ها رخ می‌دهد. در مترها ۶/۰ الی ۹/۰ ترکیبی از آسیب کششی و برشی در پشت جداره سرتاسر تونل مشاهده می‌شود. در توضیح موارد مذکور می‌توان بیان داشت که موج ناشی از انفجار ابتدا سبب ایجاد ناحیه خرد شده در ناحیه پیرامونی چال شده



(الف)

(ب)

شکل ۵- نواحی آسیب در سقف و دیواره تونل برای  $K=0.33$  (الف: حفاری مکانیزه ، ب: حفاری به روش آتشیاری).

روابط برازش شده جهت برآورد آسیب در دیواره و سقف تونل دایره- ای که با استفاده از روش آتشیاری حفاری شده است به ترتیب در رابطه ۷ و ۸ ارائه داده شده است.

$$\frac{R_p}{R} = \left[ \frac{2.770\sigma_z^{-0.212}\sigma_t^{-0.006}}{K^{0.058}C^{0.034}\left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right)^{0.098}} \right] R = 0.991 \quad (7)$$

با استفاده از داده‌های جدول شماره ۲ و روشهای آماری (نرم‌افزار SPSS) سعی شد روابط ریاضی مناسبی جهت برآورد ضخامت ناحیه آسیب در محدوده EDZ ارائه شود. رابطه برازش شده جهت برآورد آسیب در دیواره تونل دایره‌ای در روش حفاری مکانیزه (غیر آتشیاری) مطابق رابطه ۶ می‌باشد:

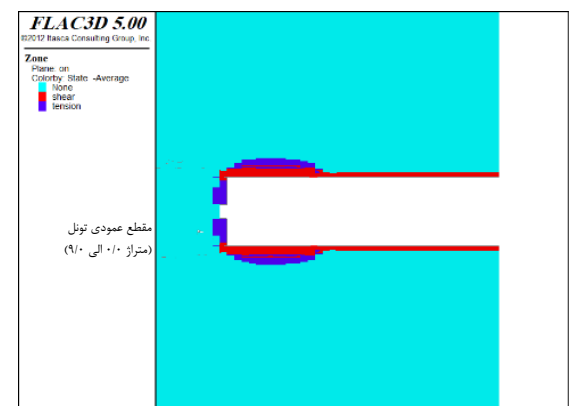
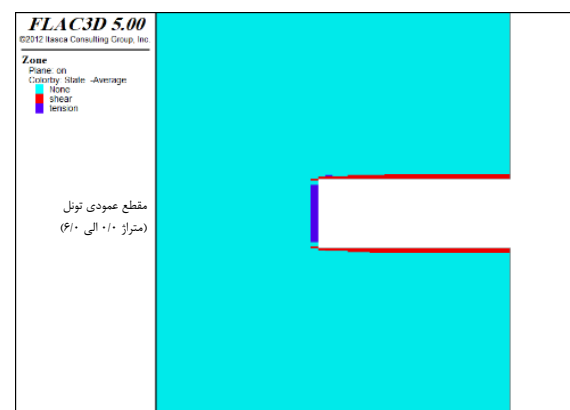
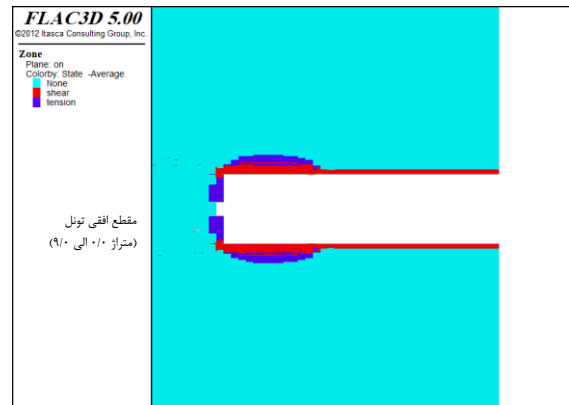
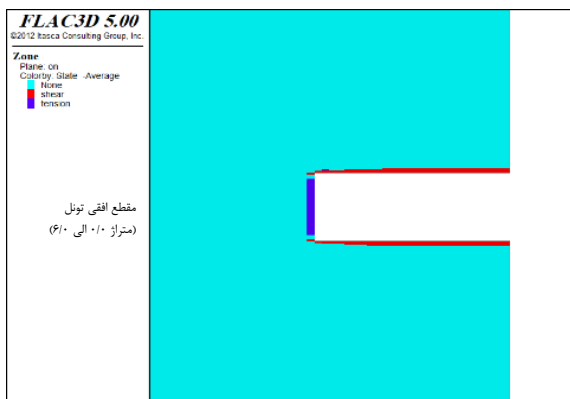
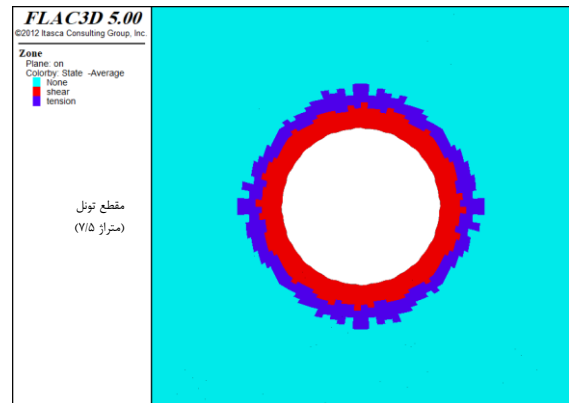
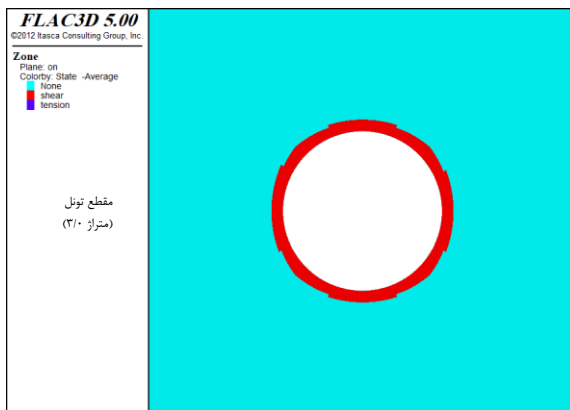
$$\frac{R_p}{R} = \left[ \frac{1.829e^{(0.031\sigma_z)}}{e^{(0.174K)}C^{0.252}\left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right)^{0.283}} \right] R = 0.975 \quad (6)$$

دیواره‌های تونل بی‌تاثیر است، در حالی که مقاومت کششی یکی از پارامترهای تاثیر گذار آسیب ایجاد شده در دیواره‌های تونل در حفاری آتشفشانی است. در واقع در روش حفاری آتشفشانی به علت ایجاد همزمان آسیب کششی و برشی در دیواره‌ها و سقف تونل، مقدار مقاومت کششی در گسترش ناحیه آسیب تاثیر گذار است.

$$\frac{R_p}{R} = \left[ \frac{2.266\sigma_z^{-0.149}\sigma_t^{-0.007}}{K^{0.192}C^{0.039}\left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right)^{0.015}} \right] R = 0.986 \quad (\lambda)$$

در روابط فوق  $\sigma_z$  مقدار تنش قائم،  $K$  نسبت تنش افقی به قائم،  $C$  چسبندگی،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد.

با توجه به روابط فوق ذکر این نکته ضروری است که در روش حفاری مکانیزه مقدار مقاومت کششی سنگ در ناحیه آسیب ایجاد شده در



(الف)

(ب)

شکل ۶- میزان گسترش ناحیه آسیب در سقف و دیواره تونل با در نظر گرفتن نسبت تنش افقی به قائم ۱/۰ (الف: حفاری مکانیزه، ب: حفاری به روش آتشفشانی).

جدول ۲- نتایج بدست آمده از تحلیل عددی ناحیه آسیب ناشی از حفر تونل با استفاده از حفاری مکانیزه و حفاری آتشی کنترل نشده

آسیب حفاری با روش آتشی		آسیب حفاری با روش مکانیزه		پارامترهای مدل عددی				ردیف	
سقف دیواره (متر)	سقف دیواره (متر)	سقف دیواره (متر)	سقف دیواره (متر)	$\sigma_t$ (MPa)	$\varphi^0$	C (MPa)	K		$\sigma_z$ (MPa)
۱/۹۳	۱/۶۸	۰/۴۲	۰/۰۷	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۵	۵	۱
۱/۷۰	۱/۳۸	۰/۴۲	۰/۲۹	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۵	۷/۵	۲
۱/۵۴	۱/۱۸	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۳
۱/۴۲	۱/۰۴	۰/۴۲	۰/۷۱	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۲/۵	۴
۱/۳۸	۰/۹۱	۰/۴۲	۰/۹۱	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۵	۵
۲/۵۲	۲/۴۸	۰/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۵	۲	۶
۲/۰۴	۱/۳۳	۰/۹۶	۰/۶۳	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۲۵	۱۰	۷
۱/۸۴	۱/۲۵	۰/۹۰	۰/۵۸	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۳۳	۱۰	۸
۱/۷۰	۱/۲۲	۰/۷۲	۰/۵۵	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۴۰	۱۰	۹
۱/۴۲	۱/۱۷	۰/۵۷	۰/۴۷	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۶۰	۱۰	۱۰
۱/۲۴	۱/۱۰	۰/۳۹	۰/۴۱	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۸۰	۱۰	۱۱
۱/۱۰	۱/۰۶	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۱/۰۰	۱۰	۱۲
۱/۶۴	۱/۲۶	۰/۴۲	۱/۲۴	۰/۰۱	۲۵	۲/۰	۰/۵	۱۰	۱۳
۱/۵۱	۱/۱۶	۰/۴۲	۰/۳۴	۰/۰۱	۲۵	۵/۰	۰/۵	۱۰	۱۴
۱/۴۹	۱/۱۴	۰/۴۲	۰/۱۸	۰/۰۱	۲۵	۶/۰	۰/۵	۱۰	۱۵
۱/۴۵	۱/۱۱	۰/۴۲	۰/۱۰	۰/۰۱	۲۵	۸/۰	۰/۵	۱۰	۱۶
۱/۴۲	۱/۰۹	۰/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۲۵	۱۰/۰	۰/۵	۱۰	۱۷
۱/۴۰	۱/۰۷	۰/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۲۵	۱۲/۰	۰/۵	۱۰	۱۸
۱/۵۵	۱/۲۴	۰/۴۲	۰/۶۶	۰/۰۱	۲۰	۴/۰	۰/۵	۱۰	۱۹
۱/۵۴	۱/۱۸	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۰۱	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۰
۱/۵۳	۱/۱۲	۰/۴۲	۰/۳۵	۰/۰۱	۳۰	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۱
۱/۵۲	۱/۰۶	۰/۴۲	۰/۲۰	۰/۰۱	۳۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۲
۱/۵۲	۱/۰۰	۰/۴۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۴۰	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۳
۱/۵۰	۰/۹۳	۰/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۴۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۴
۱/۵۱	۱/۱۲	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۱۰	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۵
۱/۴۸	۱/۱۲	۰/۲۷	۰/۴۴	۰/۲۵	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۶
۱/۴۷	۱/۱۱	۰/۱۴	۰/۴۴	۰/۵۰	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۷
۱/۴۴	۱/۱۰	۰/۰۴	۰/۴۴	۰/۷۵	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۸
۱/۴۱	۱/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۴	۱/۰۰	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۲۹
۱/۴۰	۱/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۴	۲	۲۵	۴/۰	۰/۵	۱۰	۳۰

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق ضخامت ناحیه آسیب ناشی از حفر تونل دایره‌ای شکل در دو روش حفاری مکانیزه و حفاری آتشی بررسی شد و اثر پارامترهای موثر بر میزان آسیب مطالعه شد. برای دستیابی بدین منظور از روش عددی کمک گرفته شد و تونل دایره‌ای شکل به قطر

۴ متر و طول ۹ متر مدل شد. در مدل عددی حفاری در ۶ متر ابتدائی با روش حفاری مکانیزه و از متر ۶/۰ الی ۹/۰ با روش آتشی انجام گرفت.

نتایج این تحقیق به عبارت است از:

plastic clays in the context of radioactive waste disposal”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, pp 109-125, 2005.

[۳] دادی گیوشاد، علی "ارائه روشی جهت برآورد میزان آسیب ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی با استفاده از انتشار آکوستیک" رساله دکتری رشته مهندسی معدن- مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران، ۱۳۹۸.

[4] Persson, A., Holmberg, R. and Lee, J. "Rock Blasting and Explosives Engineering", CRC press, 1993.

[5] Konya, C.J. and Walter, E.J. "Rock Blasting and Overbreak Control", National Highway Institute, U.S. Dept. of Trans. Federal Highway Administration Office of Implementation, 1991.

[6] Vanbrabant, F., Chacon, E.P. and Quinones, L.A. "P and S mach waves generated by the detonation of a cylindrical explosives charge-experiments and simulations", *Fragblast* 6 (1), pp. 21-35, 2002.

[7] Jong, Y., Lee, C., Jeon, S., Cho, Y.D. and Shim, D.S. "Numerical modeling of the circular-cut using particle flaw code", in: 31st Annular Conference of Explosives and Blasting Technique, Orlando, CO., USA, CD-ROM, 2005.

[8] Yilmaz, O. and Unlu, T. "Three-dimensional numerical rock damage analysis under blasting load", *Tunnelling and Underground Space Technology* Vol 38 pp 266-278, 2013.

[9] Sarahan, M. R., Mitri, H.S. and Jethwa, J.L. "Rock fracturing by explosive energy: review of state-of-the-art", *Fragblast* 10, pp. 61-81, 2006.

[10] Yang, J. H., Jiang, QH., Zhang, QB. and Zhao, J. "Dynamic stress adjustment and rock damage during blasting excavation in a deep-buried circular tunnel", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol 71, pp. 591-604, 2018.

- ناحیه آسیب ناشی از حفر در محدوده تحت تاثیر روش آتشباری (متراژ ۶ الی ۹/۰) گسترده‌تر از ۶ متر ابتدای تونل می‌باشد. علاوه بر این برخلاف ۶ متر ابتدای تونل که آسیب کششی عموماً در سقف و آسیب برشی در دیواره‌ها رخ می‌دهد، در مترژ ۶/۰ الی ۹/۰ عملاً ترکیبی از آسیب‌های کششی و برشی در پیرامون تونل بوجود آمده است.
- با افزایش تنش برجای عمودی وارده بر تونل از ۲ مگاپاسکال تا ۱۵ مگاپاسکال، شعاع ناحیه آسیب در دیواره‌ها افزایش یافته در حالی که در سقف تونل تغییر محسوس در گستره ناحیه آسیب مشاهده نشد. همچنین مقایسه نواحی آسیب در محدوده‌ای که تحت تاثیر بار آتشباری قرار گرفته نشان می‌دهد که با افزایش تنش برجای قائم، شعاع آسیب هم در سقف و هم در دیواره‌ها کاهش می‌یابد، هر چند میزان این کاهش در دیواره‌ها بیشتر از سقف می‌باشد.
- هنگامی که نسبت تنش افقی به قائم از ۰/۲۵ به ۱/۰ افزایش می‌یابد، میزان شعاع آسیب در سقف و دیواره‌ها کاهش می‌یابد ولی نسبت این کاهش در سقف بیشتر از دیواره‌ها است. در ناحیه تحت تاثیر آتشباری نیز نتایج مشابه حالت مدل استاتیکی است.
- افزایش میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ در برگیرنده تونل، در گسترش ناحیه آسیب سقف تونل بی‌تاثیر است و سبب کاهش ناحیه آسیب دیواره‌های آن می‌شود، در حالی که در ناحیه تحت تاثیر آتشباری شعاع آسیب هم در سقف و هم در دیواره‌ها کاهش می‌یابد.
- در روش حفاری مکانیزه، افزایش مقاومت کششی سبب کاهش آسیب در سقف تونل می‌شود و تاثیری در گسترش ناحیه آسیب دیواره‌ها ندارد. در حالی که در روش حفاری آتشباری، به دلیل ایجاد همزمان ناحیه آسیب کششی و برشی در پیرامون تونل، افزایش مقاومت کششی سبب کاهش ناحیه آسیب هم در سقف و هم در دیواره‌ها می‌شود.
- با استفاده از روابط ریاضی برازش شده در این تحقیق می‌توان براحتی نواحی آسیب در پیرامون تونل را با انتخاب نوع حفاری (مکانیزه یا آتشباری) برآورد و محاسبه نمود.

## ۵- منبع‌ها

- [1] Fattahi, H., Shojaee, S. and Ebrahimi, M. A. "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, 2013.
- [2] Tsang, CF., Bernier, F. and Davies, C. "Geohydromechanical processes in excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and

