

### تحلیل عددی ناحیه آسیب ناشی از انفجار در تونل با نرم افزار UDEC

#### پژوهشی

محمد حسین امیری هزاوه<sup>۱\*</sup>؛ شکرالله زارع<sup>۲</sup>؛ دانیال شیرین<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، mhah.92@gmail.com

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، zare@shahroodut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهندسی معدن، دانشگاه تهران، danialshirin@ut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۱۲/۰۹

شماره صفحات: ۱ تا ۱۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2022.9982.1398

واژگان کلیدی	چکیده
تونل‌سازی چال‌زنی و انفجار EDZ مدل‌سازی عددی UDECE GSI	با وجود پیشرفت‌های فراوان در احداث سازه‌های زیرزمینی به روش‌های مکانیزه و تمام مقطع، همچنان روش چال‌زنی و انفجار در احداث تونل‌ها و کارگاه‌های استخراج معادن نقش به‌سزایی دارد. این روش، گذشته از مزایای گوناگون مانند انعطاف‌پذیری و هزینه سرمایه‌ای پایین معایبی نیز دارد که یکی از آن‌ها گسترش ناحیه آسیب ناشی از انفجار در اطراف سازه است که منجر به افزایش درزه و ترک در محیط اطراف و در نتیجه کاهش پایداری و افزایش تراوایی و در مواردی نشست سطح زمین می‌شود. عوامل مختلفی بر ناحیه آسیب ناشی از حفاری موثر است. روش‌های مختلفی از جمله روش اندازه‌گیری، تجربی و مدل‌سازی فیزیکی و عددی برای بررسی این عوامل موجود است. در این مقاله، مدل‌سازی عددی برای سه حالت مختلف حفاری شامل انفجار تمام چال‌ها، انفجار چال‌های محیطی و بدون انفجار انجام شده و عوامل مختلف موثر بر ناحیه آسیب ناشی از حفاری، بیان شده است. بیشترین تاثیر بر روی ناحیه آسیب، مربوط به مقاومت کششی و چسبندگی سنگ است. علاوه بر آن تاثیر شاخص مقاومت زمین‌شناسی سنگ (GSI) به عنوان یکی از شاخصه‌های مهم در شناخت توده‌سنگ مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر کاهش ناحیه آسیب با افزایش GSI مشاهده شده است؛ بنابراین با کاهش کیفیت توده‌سنگ، ناحیه آسیب در اطراف تونل افزایش می‌یابد.

#### ۱- پیش‌گفتار

دلیل مزایای زیادی که دارد به عنوان یکی از روش‌های مرسوم در حفر تونل به شمار می‌رود. از این رو تحلیل میزان و شعاع ناحیه آسیب ناشی از انفجار راه‌کار مناسبی را برای طراحی و اجرای تونل در محیط‌های سنگی ارائه می‌دهد. این تجزیه و تحلیل می‌تواند به صورت اندازه‌گیری میدانی، محاسبات تحلیلی و یا مدل‌سازی عددی باشد. پر واضح است اندازه‌گیری در محیط اطراف تونل امری پرهزینه و مشکل

یکی از چالش‌های پیش‌رو در احداث فضاهای زیرزمینی در محیط‌های سنگی، بروز ناحیه آسیب ناشی از حفاری (Damage Zone) و انفجار است. ناپایداری‌هایی که پس از حفر فضاهای زیرزمینی اتفاق می‌افتد و پیش‌بینی ناحیه آسیب حین حفاری موضوعی اساسی در مطالعات طراحی و اجرای فضاهای زیرزمینی است. روش چال‌زنی و انفجار به

\* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه شاهرود؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه سوم؛ کدپستی: ۳۴۱۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره تلفن: ۰۲۳-۲۲۳۰۰۳۰۰؛ دورنگار: ۰۲۳-۲۲۳۰۰۲۸۰

همکاران نیز با بررسی اثر انفجار بر تونل در سه حالت مختلف علاوه بر مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار *FLAC*، رابطه‌ای را برای پیش‌بینی گسترش ناحیه آسیب پیشنهاد دادند (*Park, et al, 2018*).

بیشتر مدل‌سازی‌های عددی در زمینه ناحیه آسیب ناشی از انفجار یا مربوط به تک‌چال انفجاری است و یا با اعمال فشار معادل انفجار چال‌های انفجاری به دیواره تونل بررسی شده است. در این پژوهش انفجار به صورت یک طرح آتش‌باری کامل صورت گرفته است و هر چال انفجاری به صورت یک چال مجزا منفجر شده است و فشار (انفجار) به دیواره‌های چال اعمال شده است (نه به صورت اعمال فشار کلی به دیواره تونل) و گسترش ناحیه آسیب ناشی از انفجار تمامی چال‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. عوامل مختلف موثر بر گسترش ناحیه آسیب مورد بررسی قرار گرفته و برای توده‌سنگ معادل و تاثیر تغییرات *GSI* سنگ بر ناحیه آسیب مدل‌سازی انجام شده است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی در این پژوهش دارای دو بخش کلی تحلیل استاتیکی و تحلیل دینامیکی است. چالش مهم در بحث مدل‌سازی انفجار، مدل‌سازی دینامیکی است. از آنجا که فرآیند انفجار یک فرآیند وابسته به زمان است نمی‌توان با اعمال فشار استاتیکی آن را مدل‌سازی کرد. نرم‌افزار *UDEC* یکی از نرم‌افزارهایی است که قابلیت اعمال بار دینامیکی را دارد. برای مدل‌سازی دینامیکی مدل رفتاری سنگ بکر موهر - کولمب انتخاب شده است. برآورد خصوصیات دینامیکی سنگ به دلیل رفتار سنگ اغلب فرآیندی پیچیده است. اما، در میان پارامترهای دینامیکی، مدول یانگ دینامیکی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (*Boostan, et al, 2010*):

$$v_s = 0.7v_d \quad (1)$$

$$E_s = 0.74E_d - 0.82 \quad (\text{سنگ‌های رسوبی}) \quad (2)$$

$$E_s = 1.26E_d - 22.5 \quad (\text{سنگ‌های آذرین و دگرگونی}) \quad (3)$$

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 + V_s^2} \quad (4)$$

که در آن‌ها  $E_s$  و  $E_d$  به ترتیب مدول یانگ دینامیکی

است؛ از این‌رو، یک روش عددی مبتنی بر داده‌های صحیح و مقایسه نتایج آن با روش‌های تحلیلی و فرمول‌های تجربی معتبر می‌تواند راه‌حل مناسبی را برای پیش‌بینی ناحیه آسیب ناشی از انفجار فراهم آورد.

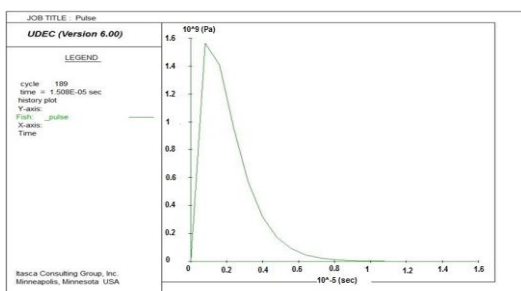
تا کنون بیشتر مطالعاتی که در این زمینه انجام شده، معطوف به انفجار تک‌چال بوده است. ژی و همکاران بر اساس داده‌های یک انفجار واقعی یک مدل‌سازی با نرم‌افزار *LSDYNA* انجام دادند. سپس با انفجار یک تک‌چال و اعتبارسنجی مدل خود این نتایج را برای شرایط تحت تنش هیدروستاتیک زیاد تعمیم داده‌اند و در انتها یک طرح انفجاری بهینه شده برای یک تونل با کمترین مقدار آسیب به محیط اطراف به دست آورده‌اند (*Xie, et al. 2017*). بخشنده امنیه و بهادری بر اساس نتایج آزمایش میدانی تک چال انفجاری در توده گل‌سنگی سد گتوند علیا، به کمک نرم‌افزار *UDEC* نحوه انتشار ترک‌ها و لرزش‌های ناشی از انفجار را مدل‌سازی کردند و نتایج را با آزمایش میدانی مقایسه نموده‌اند (*Bakhshandeh & Bahadori, 2013*). هم‌چنین ژو و همکاران به منظور بررسی مکانیزم شکست دینامیکی ناشی از انفجار و انتشار ترک، مدل‌های سنگی دایره‌ای، شامل یک منبع انفجار که در مرکز واقع شده است را با استفاده از نرم‌افزار *AUTODYN 2D* اجرا کرده‌اند. سپس تاثیر جفت‌شدگی، مرز انعکاسی و قطر چال را در گسترش شکست‌های برشی و کششی مورد بررسی قرار داده‌اند (*Xie, et al. 2017*).

برخی دیگر از محققان، اثر انفجار را برای یک تونل تمام مقطع مورد بررسی قرار داده‌اند. یانگ و همکاران به روش مدل‌سازی عددی اثرات توزیع دینامیکی موج انفجار را با نرم‌افزار *LSDYNA* به صورت دوبعدی شبیه‌سازی کرده و سپس فشار حاصل از این انفجار را به سنگ اعمال و اثرات آن را بررسی کرده‌اند (*Yang, et al. 2017*)؛ هم‌چنین سایانگ و نوردلوند بر اساس داده‌های یک تونل راه در سوئد با نرم‌افزار *FLAC* تاثیر پارامترهای موثر بر ناحیه آسیب ناشی از انفجار را بررسی کرده‌اند. ابتدا خصوصیات سنگ را در حالت بدون آسیب محاسبه کردند و پس از اجرای مدل و بررسی تغییرات حاصل در محیط اطراف خصوصیات سنگ با حالت بدون آسیب در مرز مدل و در مرز ناحیه آسیب مقایسه کردند (*Saiang & Nordlund, 2009*). پارک و

(Shahnazari, et al, 2009)

$$P(t) = P_e \frac{et}{t_r} e^{-\left(\frac{t}{t_r}\right)} \quad (5)$$

که در آن  $P_e$  حداکثر فشار انفجار بر حسب پاسکال و  $t_r$  زمان خیز فشار بر حسب ثانیه است. بار دینامیکی به صورت شعاعی و عمود بر دیواره چال‌ها وارد شده است. نمودار فشار-زمان مربوط به بار دینامیکی در شکل ۲، نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار فشار-زمان بار دینامیکی

برای به دست آوردن حداکثر فشار انفجار، می‌توان از فشار انفجار ناشی از آزاد شدن ناگهانی گازها استفاده کرد (Shahnazari, et al, 2009)

$$P_d = \frac{449.93 \times SG_e \times VOD^2}{1 + 0.8SG_e} \quad (6)$$

که در آن‌ها  $P_d$  فشار انفجار بر حسب پاسکال،  $SG_e$  چگالی ماده منفجره بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب،  $VOD$  سرعت انفجار بر حسب متر بر ثانیه است. برای در نظر گرفتن تأثیر جفت نشدگی بین ماده منفجره و چال می‌توان از رابطه ۷ استفاده کرد. این رابطه، به رابطه گاما مشهور است (Hustrulid, 1999):

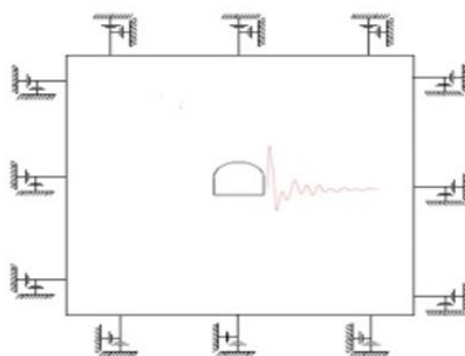
$$P_b = P_d \left(\frac{d_c}{d_h}\right)^{2\gamma} \quad (7)$$

که در آن  $d_c$  و  $d_h$  به ترتیب قطر ماده منفجره و قطر چال بر حسب میلی‌متر و  $\gamma$  جرم حجمی ماده منفجره بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب هستند.

در این مقاله با توجه به اینکه نسبت طول چال به قطر چال بزرگ است، انفجار از نوع استوانه‌ای است و می‌توان در صفحه دوبعدی آن را مورد بررسی قرار داد (Hustrulid, 1999).

شکل ۳، تاریخچه سرعت ورودی به تونل در محیط بدون درزه (محیط پیوسته) را نمایش می‌دهد. فرکانس غالب

و مدول یانگ استاتیکی برحسب گیگاپاسکال و  $v_s$  و  $v_d$  به ترتیب ضریب پواسون استاتیکی و دینامیکی و  $\rho$  وزن حجمی سنگ بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب هستند. در مورد سازه‌های زیرزمینی، محیط مورد نظر محیطی با مرزهای نامحدود است و در نتیجه برای جلوگیری از افزایش ابعاد مدل و همچنین برگشت امواج به داخل مدل از مرزهای ویسکوز استفاده شده است. شرایط مرزی برای تحلیل دینامیکی در شکل ۱، مشاهده می‌شود.



شکل ۱- شرایط مرزی برای تحلیل دینامیکی شرایط مرزی برای تحلیل دینامیکی

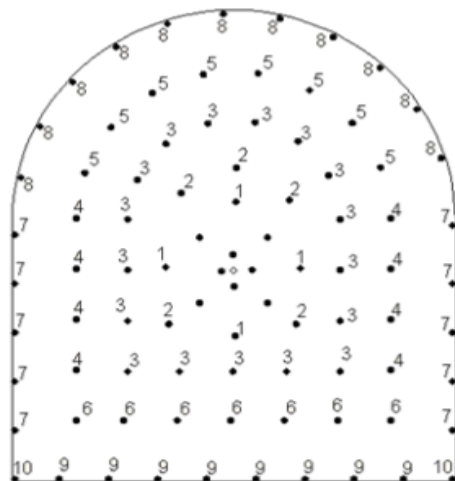
به طور کلی الگوریتم المان مجزا بر پایه دو دسته محاسبات که در هر گام زمانی انجام می‌گیرد، استوار است. ابتدا معادلات حرکت بروز شده و سپس با اعمال مدل رفتاری نیروها و تنش‌ها محاسبه می‌شوند. بار دینامیکی اعمالی در نرم‌افزار UDEC به صورت‌های زیر است:

- تاریخچه سرعت
- تاریخچه تنش (فشار)
- تاریخچه نیرو

در این مقاله با در نظر گرفتن طرح کلی انفجار یک تونل، هر چال انفجاری به صورت یک واحد مجزا در نظر گرفته شده است. تاریخچه تنش (فشار انفجار) هر چال به دیواره اطراف خود و تجمیع این چال‌ها، فشار انفجار کلی تونل را رقم می‌زند. به منظور تعریف تاریخچه فشار وابسته به زمان روابط گوناگونی وجود دارد که با توجه به پژوهش‌های پژوهشگران تابع فشار دینامیک یون و ژئون (رابطه ۵) با زمان خیز یک میکروثانیه و زمان افت نه میکروثانیه در این مدل‌سازی استفاده شده است

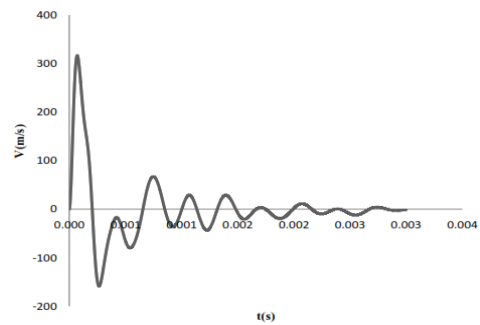
یکی دیگر از مولفه‌های مهم در مدل‌سازی اندازه المان یا مش‌بندی است. از جمله تفاوت‌های عمده تحلیل دینامیکی با تحلیل استاتیکی، متغیر زمان است. زمان محاسبه در این تحلیل‌ها نیز وابسته به اندازه مش‌بندی یا المان است. با توجه به اینکه حداکثر سرعت ذرات در فاصله‌ای برابر یک هشتم طول موج ( $1/8 \lambda$ ) رخ می‌دهد، بنابراین اندازه المان در این نوع تحلیل‌ها باید کمتر از این فاصله در نظر گرفته شود. برای تحلیل مناسب باید ابعاد مش‌بندی در حوالی تونل که انفجار در آن صورت می‌گیرد از این نسبت پیروی کند. با توجه به قرار گرفتن تونل در یک توده سنگ آهکی و با در نظر گرفتن سرعت امواج طولی و عرضی در سنگ آهک و فرکانس بار انفجار حاصل شده از مدل‌سازی، کوچک‌ترین بعد برای مش‌بندی ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این بعد از مش‌بندی تا محدوده مشخصی از اطراف تونل اعمال شده است و پس از آن به منظور افزایش سرعت مدل‌سازی ابعاد المان‌ها افزایش می‌یابد؛ همچنین با توجه به روابط ۳ تا ۶ ضریب پواسون دینامیکی ۰/۳۶ و مدول یانگ دینامیکی سنگ بکر  $GPa$  ۱۶ انتخاب شده است.

شکل ۴، طرح انفجار این تونل را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲، فشار حاصل از انفجار به دست می‌آید و مدل دینامیکی پس از به تعادل رسیدن استاتیکی (شکل ۵) اجرا می‌شود.



شکل ۴- الگوی انفجار (Shahhoseini, 2013)

در ورودی سرعت انفجار  $3000 Hz$  است.



شکل ۳- تاریخچه سرعت ورودی به مدل

مولفه‌ی بعدی که باید در مدل‌سازی مشخص باشد، میرایی محیط است. دو دلیل برای اضافه کردن میرایی به مدل عبارتند از: جلوگیری از نوسانات مدل و ایجاد میرایی فیزیکی در سیستم. به دلیل اینکه میرایی در مواد زمین (سنگ و خاک) تابع فرکانس نیست و همچنین با توجه به این که میرایی رایلی طوری عمل می‌کند که میرایی ایجاد شده در مدل مستقل از فرکانس باشد، به همین دلیل در این مقاله از این روش میرایی برای مدل‌سازی استفاده شده است. برای تخمین فرکانس طبیعی می‌توان از منحنی جابه جایی قائم- زمان ناشی از برخورد یک بلوک منفرد با یک تکیه‌گاه صلب به وسیله اعمال ناگهانی نیروی ثقل استفاده کرد. در این پژوهش فرکانس طبیعی با استفاده از این روش  $14/5$  هرتز به دست آمده است. نسبت میرایی بحرانی نیز بر طبق پیشنهاد *ITASCA* برای خاک و سنگ، بین ۲ تا ۵ درصد است، سه درصد انتخاب شده است. جدول ۱، خصوصیات سنگ را بیان می‌کند (Shahhoseini, 2013).

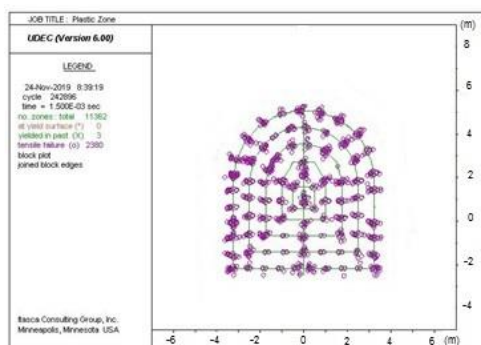
جدول ۱- خصوصیات مکانیکی سنگ آهک (Shahhoseini, 2013)

عنوان	واحد	مقدار / نوع
نوع سنگ	-	آهک
دانسیته	$Kg/m^3$	۲۷۴۰
مدول الاستیک	$Gpa$	۱۱
نسبت پواسون	-	۰/۲۵
مقاومت فشاری تک محوری	$Mpa$	۶۳
مقاومت کششی	$Mpa$	۶/۳
چسبندگی	$Mpa$	۱۴/۶
زاویه اصطکاک	$deg$	۴۵
نسبت تنش افقی به قائم	-	۰/۳۳

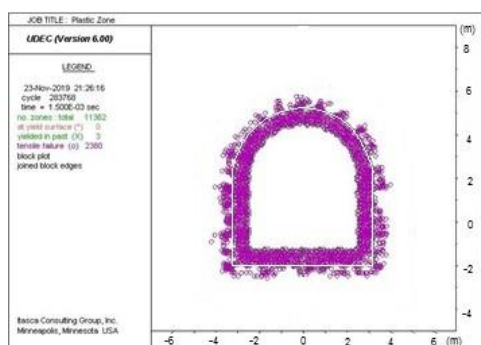
معادل حفاری غیر انفجاری نظیر حفاری با دستگاه مکانیزه و نیمه مکانیزه حفاری دانست. همانطور که مشخص است در این حالت، میزان آسیب در مقایسه با حالت‌های حفاری با انفجار ناچیز است. از این رو برای بررسی بهتر گسترش ناحیه آسیب تمرکز بررسی‌ها روی حالت‌های با انفجار است.

جدول ۲- مشخصات الگوی انفجار و خصوصیات ماده منفجره (Shahhoseini, 2013)

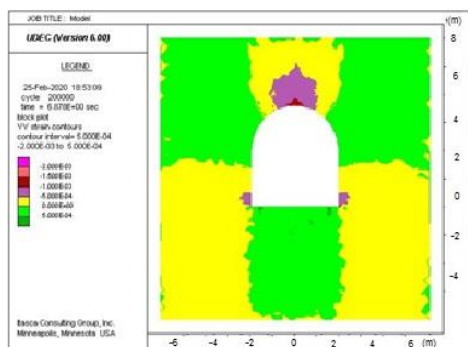
پارامتر	واحد	مقدار
قطر چال	mm	۴۵
طول چال	m	۳/۲
قطر خرج	mm	۳۰
چگالی ماده منفجره	gr/cm <sup>3</sup>	۱/۴۵
سرعت انفجار	m/s	۶۵۰۰



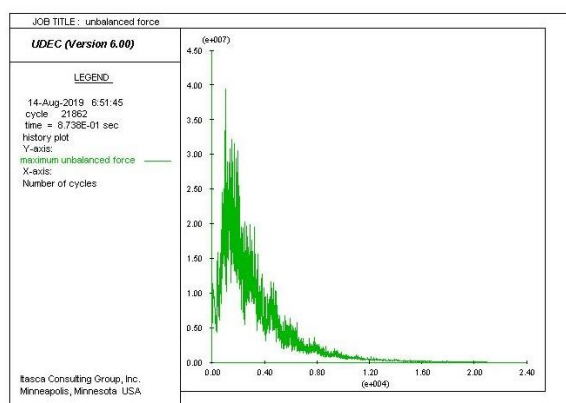
شکل ۶- گسترش ناحیه پلاستیک در اثر انفجار تمام چال‌ها (مدل ۱)



شکل ۷- گسترش ناحیه پلاستیک در اثر انفجار چال‌های محیطی (مدل ۲)



شکل ۸- کرنش در صفحه YY در اطراف تونل برای حالت بدون انفجار



شکل ۵- تعادل نیروهای نامتعادل کننده

### ۳- تجزیه و تحلیل مدل عددی

پس از تعیین مشخصات مدل‌سازی، از آنجا که مدت زمان انفجار در مدل‌ها یک میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است، لذا برای بررسی چگونگی و نحوه شکست توده‌سنگ اطراف تونل در اثر انفجار، برنامه به مدت ۱/۵ میلی‌ثانیه اجرا شده است.

مدل به سه صورت اجرا شده است:

- حالت اول: انفجار تمام چال‌ها در یک مرحله
- حالت دوم: انفجار چال‌های محیطی
- حالت سوم: تونل‌زنی بدون انفجار

گسترش ناحیه پلاستیک (تخریب) برای دو حالت انفجار تمامی چال‌ها و چال‌های محیطی در شکل ۶ و شکل ۷، مشاهده می‌شود که حجم خردشدگی در حالت دوم به دلیل وجود سطح آزاد بیشتر است. شکل ۸ و شکل ۹، کرنش صفحه‌های XX و YY را برای حالت بدون انفجار نشان می‌دهد که بیشترین کرنش و ناحیه تخریب در قسمت بالایی تاج و پایهی دیواره‌ها است. این حالت را می‌توان

که در آن  $PPV$  بیشینه سرعت ذرات بر حسب میلی‌متر بر ثانیه،  $V_p$  سرعت موج  $p$  در سنگ بر حسب میلی‌متر بر ثانیه و  $\sigma_d$  تنش دینامیکی بر حسب مگاپاسکال است. زمانی که کرنش دینامیکی القایی مساوی یا بزرگ‌تر از کرنش کششی بحرانی ( $\epsilon_t$ ) شود، آسیب سنگ را می‌توان از رابطه ۱۰ حساب کرد:

$$\epsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} \quad (10)$$

سپس با جایگذاری این رابطه در روابط ۹ و ۱۰ ناحیه آسیب ناشی از انفجار از روابط ۱۱ تا ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$PPV = \frac{\sigma_t \cdot V_p}{E} \quad (11)$$

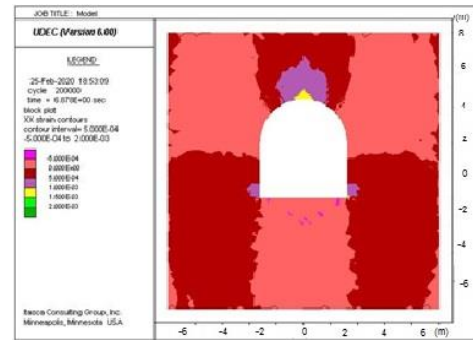
$$\frac{\sigma_t \cdot V_p}{E} = 77.42 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.5} \quad (12)$$

$$D_{EDZ} = \left( \frac{77.42 E}{\sigma_t \cdot V_p} \right)^{\frac{1}{1.5}} \cdot \sqrt[3]{W} \quad (13)$$

در این رابطه  $D_{EDZ}$  میزان ناحیه آسیب بر حسب متر،  $\sigma_t$  مقاومت کششی سنگ بر حسب گیگاپاسکال و  $E$  مدول الاستیسته بر حسب گیگاپاسکال هستند.

بر این اساس می‌بایست ابتدا سرعت موج  $p$  برای محیط انفجار به دست آید. به این منظور انفجار یک تک‌چال با خصوصیات محیط انفجار مدل شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود، یک بلوک دایره‌ای با قطر ۱۰ متر مدل شده است که در میانه آن چال انفجاری به قطر ۰/۱ متر قرار گرفته است. پس از اجرای مدل سرعت انتشار موج ۶۵۰۰ متر بر ثانیه به دست آمده است.

با جایگذاری این عدد در رابطه ۱۳ میزان ناحیه آسیب ( $D_{EDZ}$ ) برابر ۰/۶ متر می‌شود که این مقدار نزدیک به نتایج عددی می‌شود.



شکل ۹- کرنش در صفحه XX در اطراف تونل برای حالت بدون انفجار

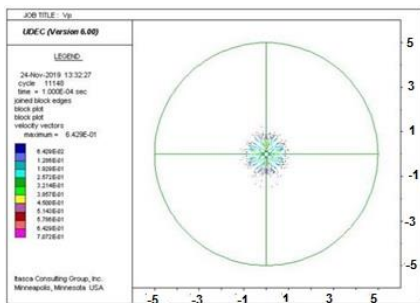
#### ۴- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل، نتایج به دست آمده از مدل را می‌توان با روابط تجربی مقایسه کرد. شعاع ناحیه آسیب در بحرانی‌ترین حالت (حالت انفجار چال‌های محیطی) در حدود ۰،۵۵ متر است. روابط تجربی متعددی برای به دست آوردن ناحیه آسیب ناشی از انفجار موجود است که رابطه پارک و همکاران رابطه مورد پذیرشی است که علاوه بر خصوصیات ماده منفجره خصوصیات محیط انفجار را هم لحاظ می‌کند. پارک و همکاران پژوهشی پیرامون ناحیه آسیب ناشی از انفجار انجام داده‌اند. در این پژوهش علاوه بر مدل‌سازی انفجار تونل با نرم‌افزار *FLAC*، پیش‌بینی گسترش ناحیه آسیب انفجار به وسیله روابط تجربی صورت گرفته است. در ابتدا از یک رابطه که از آزمایش‌های متعدد در تونل مطالعاتی *KURT* در کشور کره صورت گرفته، استفاده شده است. این رابطه نیز بر اساس *PPV* و خرج‌گذاری در هر تاخیر بوده و فارغ از محیط انفجار است (Park, et al, 2018):

$$PPV = 77.42 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.5} \quad (8)$$

که در این رابطه  $D$  فاصله از انفجار بر حسب میلی‌متر،  $W$  خرج‌گذاری در هر تاخیر بر حسب کیلوگرم در هر تاخیر و  $PPV$  سرعت بیشینه ذرات بر حسب میلی‌متر بر ثانیه است. سپس رابطه‌ی دیگر *PPV* را بیان کرده است و با جایگذاری در رابطه ۸، یک رابطه تجربی حاصل شده است که علاوه بر خصوصیات ماده منفجره، خصوصیات محیط انفجار را نیز در محاسبات لحاظ می‌کند:

$$PPV = \sigma_d \cdot V_p \quad (9)$$



شکل ۱۰- محاسبه سرعت موج p

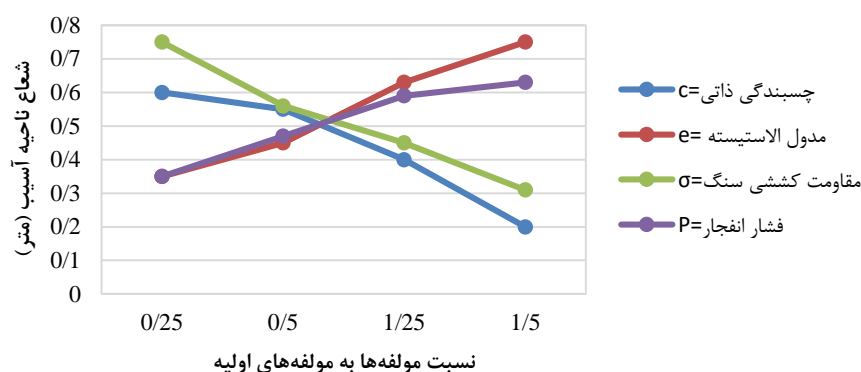
و نیروی انفجار به میزان  $0/25$ ،  $0/5$ ،  $1/25$  و  $1/5$  برابر حالت اولیه، بر ناحیه آسیب ناشی از انفجار در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود.

همچنین تغییرات ناحیه آسیب نسبت به قطرهای مختلف چال انفجاری (۴۸، ۵۱ و ۶۴ میلی‌متر) و زوایای مختلف اصطکاک داخلی به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۳، نشان داده شده است.

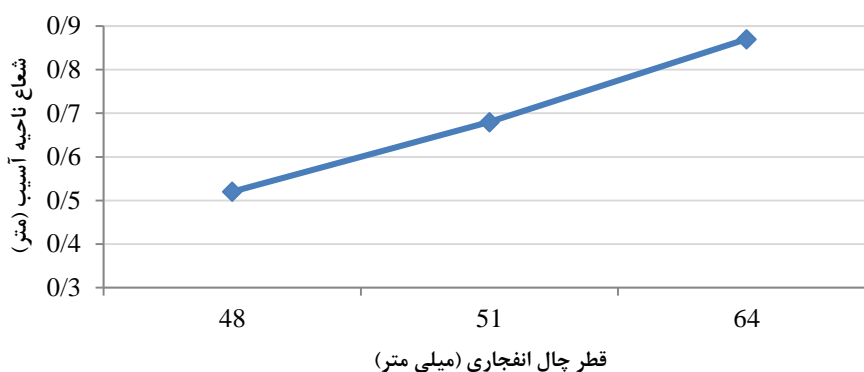
همانطور که مشاهده می‌شود، از بین خصوصیات سنگ مدول الاستیسته و چسبندگی ذاتی و در خصوصیات ماده منفجره، فشار حاصل از انفجار بیشترین تاثیر را بر شعاع ناحیه آسیب ناشی از انفجار دارد.

## ۵- تحلیل حساسیت مولفه‌های موثر بر ناحیه آسیب

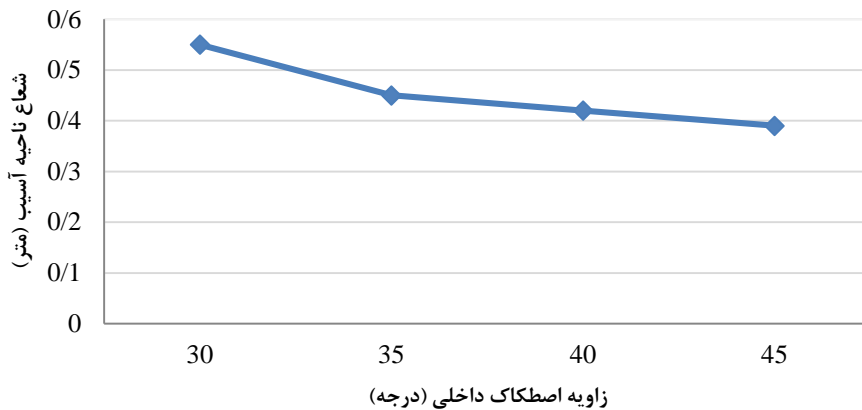
به منظور تحلیل حساسیت هر کدام از عوامل موثر بر گسترش ناحیه آسیب میزان آنها تغییر کرده و با ثابت نگه‌داشتن دیگر مولفه‌ها و اثر آن بر روی گسترش ناحیه آسیب مورد بررسی قرار گرفته شده است. برخی از این مولفه‌ها مربوط به خصوصیات سنگ هستند که عبارتند از مقاومت کششی، مدول الاستیسته، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذاتی و برخی از این مولفه‌های مربوط به ماده منفجره است که عبارتند از قطر چال و فشار انفجار. اثر تغییرات مقاومت کششی، مدول الاستیسته، چسبندگی ذاتی



شکل ۱۱- تغییرات شعاع ناحیه آسیب نسبت به تغییرات مولفه‌های موثر



شکل ۱۲- تغییرات شعاع ناحیه آسیب نسبت به قطر چال انفجاری



شکل ۱۳- تغییرات شعاع ناحیه آسیب نسبت به زاویه اصطکاک داخلی

ناشی از انفجار نیز افزایش پیدا می‌کند. به منظور تعیین خصوصیات توده‌سنگ به وسیله نرم‌افزار *Roclab* باید علاوه بر مدول الاستیسته و تنش فشاری تک‌محوری، ضریب اغتشاش ( $D$ ) و  $mi$  مشخص شود. بر طبق پیشنهاد نرم‌افزار برای شرایط سنگ آهک و چالزنی و انفجار معمولی در یک سنگ با مقاومت متوسط مقادیر  $D=0/7$  و  $mi=8$  در نظر گرفته شده است. پس از تعیین این مشخصات خروجی های نرم‌افزار *Roclab* به نرم‌افزار *UDEC* داده شده و مدل‌سازی انجام می‌گیرد. شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نمودار تنش عمودی به برشی را برای دو حالت  $GSI=45$  و  $GSI=65$  را نشان می‌دهد.

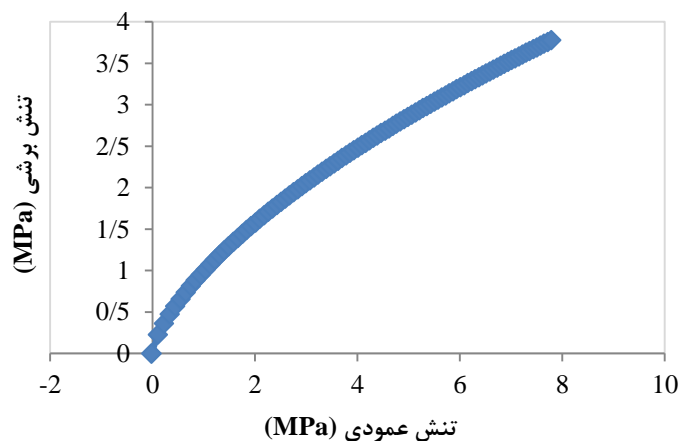
#### ۶- بررسی ناحیه آسیب در توده‌سنگ

همانطور که بیان شد، شرایط مورد بررسی برای شرایط بدون درزه و با خصوصیات سنگ بکر است. به منظور بررسی شرایطی نزدیک‌تر به واقعیت و شرایط توده‌سنگ با استفاده از خروجی نرم‌افزار *Roclab* مدل‌سازی برای توده‌سنگ معادل با دو حالت:

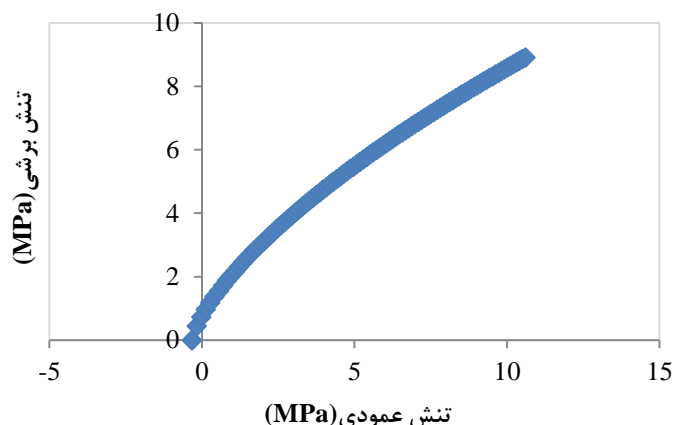
$GSI=45$

$GSI=65$

انجام گرفته است. واضح است که شبیه‌سازی شرایط توده‌سنگ با استفاده از خصوصیات سنگ بکر، خصوصیات و ورودی‌های نرم‌افزار *UDEC* کاهش و در نتیجه ناحیه آسیب

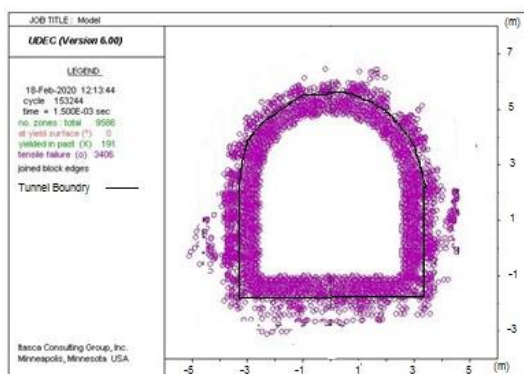


شکل ۱۴- نسبت تنش عمودی به تنش برشی برای  $GSI=45$



شکل ۱۵- نسبت تنش عمودی به تنش برشی برای  $GSI=65$

مدل‌سازی بسیار زیاد شود، اما در مقایسه با روش‌های دیگر اندازه‌گیری شعاع ناحیه آسیب این زمان قابل چشم‌پوشی است.

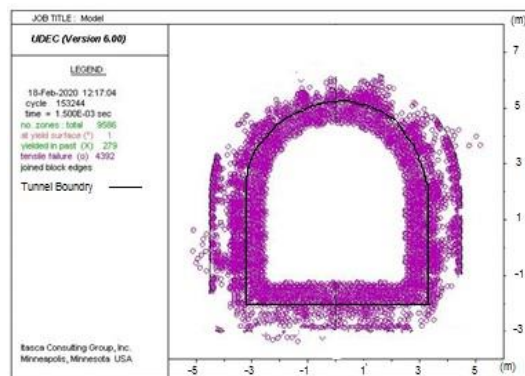


شکل ۱۷- گسترش ناحیه پلاستیک به ازای  $GSI=65$

#### ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

حفر فضاهای زیرزمینی نظیر تونل به علت هزینه‌های بالا و مخاطرات فراوان نیازمند طراحی‌های دقیق و همراه با در نظر گرفتن مولفه‌های گوناگون است. یکی از این مخاطرات مهم ناحیه آسیب ناشی از حفاری است. در این پژوهش ناحیه آسیب ناشی از حفاری برای سه حالت طرح کامل انفجار، انفجار چال‌های محیطی و تونل‌زنی بدون انفجار مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، مشخص شد که در مدل‌سازی عددی انفجار چال‌های محیطی که بحرانی‌ترین حالت است برای تونلی به عرض ۶/۵ متر و ارتفاع ۴ متر به

شکل ۱۶ و شکل ۱۷، نشان دهنده ناحیه آسیب ناشی از انفجار برای دو  $GSI$  ۴۵ و ۶۵ را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، با در نظر گرفتن توده‌سنگ معادل خصوصیات سنگ ضعیف می‌شود و گسترش ناحیه پلاستیک (آسیب) در اطراف تونل نسبت به حالت سنگ بکر افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۶- گسترش ناحیه پلاستیک به ازای  $GSI=45$

از آنجا که در محیط‌های زیرزمینی اندازه‌گیری مستقیم کار دشوار و پیچیده‌ای است، نتایج عددی حاصل می‌تواند راهکار مناسبی در جهت طراحی تونل و پیش‌بینی ناحیه آسیب اطراف تونل باشد. طبیعی است هر چه میزان داده‌های ورودی دقیق‌تر و شرایط نزدیک به واقعیت باشد نتایج حاصل از مدل‌سازی معتبرتر و مورد اعتماد بیشتر است. هر چند ممکن است با اعمال جزئیات بیشتر زمان

جدول ۳- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
تنش	MPa	$\sigma$
عمق	M	$h$
ضریب پواسون	-	$\nu$
وزن مخصوص	kg/m <sup>3</sup>	$\gamma$
مدول الاستیک	Gpa	$E$
فشار انفجار	Pa	$P$
زمان	Sec	$T$
چگالی ماده منفجره	gr/cm <sup>3</sup>	$SG_e$
سرعت انفجار	m/s	$VOD$
قطرچال	Mm	$D$
ضخامت ناحیه آسیب	M	$S$
تراکم خرج مصرفی	kg/m	$Q$
فاصله از انفجار	Mm	$D$
خرج گذاری در هر تاخیر	kg/delay	$W$
سرعت پیشینه ذرات	mm/s	$PPV$
سرعت	mm/s	$V$
کرنش	-	$\epsilon$
شاخص مقاومت زمین شناسی	-	$GSI$

صورت نعل اسبی و به صورت چال‌زنی و انفجار حفر شده است، ناحیه آسیب ناشی از حفاری (EDZ) حدود ۰/۵۵ متر است که این میزان با روابط تجربی همبستگی مناسبی دارد. همچنین خصوصیات مختلف سنگ (مدول الاستیسته، مقاومت کششی، چسبندگی ذاتی و زایه اصطکاک داخلی) و ماده منفجره (فشار انفجار و قطر چال) مورد بررسی قرار گرفت که مشخص شد، موثرترین مولفه مقاومت کششی و چسبندگی ذاتی سنگ است. در انتها نیز برای بررسی شرایط نزدیک به واقعیت توده‌سنگ معادل با دو  $GSI=45$  مدل‌سازی شد و میزان شعاع ناحیه آسیب برای  $GSI=45$  حدود ۱/۲ متر و برای  $GSI=65$  حدود ۰/۸ متر به دست آمد.

#### ۸- فهرست نمادها

در جدول ۳، سیاهه نمادها نشان داده شده است.

#### ۹- مراجع

- Bakhshandeh H., Shirin D. (2018). Numerical and Field Analysis of effect of hole diameter on the measure of the damage zone around a single blast-hole. *First Natoinal Conference on Modeling in Mining Engineering*.
- Bakhshandeh, H., & Bahadori, M. (2013). Numerical and field analysis of wave propagation and cracks caused by presplit blasting in conglomerate rock mass at Gotvand Olya dam. *Iranian Journal of Geophysics*, 7.
- Hustrulid, W. (1999). *Blasting Principles For Open Pit Mining*. London: Taylor and Francis Group.
- Park, S., Kim, J., & Kwon, S. (2018). Investigation of the development of an excavation damaged zone and its influence on the mechanical behaviors of a blasted tunnel. *Geosystem Engineering*.
- Pusch, R., & Stanfors, R. (1992). The Zone of disturbance around blasted tunnels at depht. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol 29.
- Saiang, D., & Nordlund, E. (2009). Numerical Analyses of the Influence of Blast-Induced Damaged Rock Around Shallow Tunnels in Brittle Rock. *Rock Mechanics And Rock Engineering*, vol 42.
- Boostan zar, H., Shahriar, K., Torabi, R., Mohamadi, H. (2010). Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of Gol Gohar mine magnetite by dynamic parameters.

*International Mining Congress.*

- Shahnazari, H., Esmaeili, M., & Hoseini Ranjbar, H. (2009). Simulating the Effects of Projectile Explosion on a Jointed Rock Mass using 2D DEM. *International Journal of Civil Engineering*, vol 8.
- Shahhoseini, A. (2013). The effect of blasting parameters on the dynamic failure of rock mass around the tunnel using numerical methods. *Isfahahn university of technology, Master Thesis.*
- Xie, L., Lu, W., Zhang, Q., Jiang, Q., Chen, M., & Zha, J. (2017). Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses. 66.
- Yang, J., Yao, C., Jiang, Q., Lu, W., & Jiang, S. (2017). 2D numerical analysis of rock damage induced by dynamic in-situ stress redistribution and blast loading in underground blasting excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 70.
- Zhu, Z., Mohanty, B., & Xie, H. ( 2007). Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol 44.

## Numerical analysis of the blast damaged zone in tunnels using UDEC

M.H. Amiri<sup>1</sup>; S. Zare<sup>\*2</sup>; D. Shirin<sup>3</sup>

1- Master Student; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, mhah.92@gmail.com

2- Associate Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, zare@shahroodut.ac.ir

3- Master Student; Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, danielshirin@ut.ac.ir

Received: 28 Sep 2020; Accepted: 28 Feb 2022

DOI: 10.22044/TUSE.2022.9982.1398

### Keywords

Tunelling  
Drilling and blasting  
EDZ  
Numerical modeling  
UDEC  
GSI

### Extended Abstract

#### Summary

Despite many improvements in the underground construction by mechanized methods, the drilling and blasting still plays an important role in the construction of tunnels and mines. In addition to various advantages of the drilling and blasting such as flexibility and low capital cost, this method also possesses some disadvantages, one of which is the expansion of the blast

damage zone around the underground structure, leading to increased joints and cracks in the surrounding environment, and consequently, reduced resistance and increased permeability, and also, in some cases, the land subsidence occurs. Various factors affect the damage zone. Different methods such as measurement, experimental and modeling methods are available to investigate these factors. In this paper, numerical modeling has been carried out for three different states of drilling. Moreover, in addition to a brief mentioning of different factors affecting the damage zone, it is determined that the maximum impact on the damage area is related to tensile strength and cohesion of the surrounding rock. In addition, the effect of the rock geological strength index (GSI) is investigated as one of the important factors in recognizing the rock mass and the effect of reducing the damage area with increasing GSI is observed.

### Introduction

In this study, the explosion has been carried out as a complete firing plan and each explosion hole has been detonated as a separate hole and pressure (explosion) has been applied to the walls of the hole, and then, the expansion of the blasting damage zone of all holes has been studied. Various factors affecting the spread of the damage zone have been investigated and modeling has been performed for the equivalent rock mass and the effect of the GSI rock changes on the damage zone has been investigated.

### Methodology and Approaches

Numerical modeling in this research is carried out in two general parts of static and dynamic analyses. This modeling has been made using UDEC software in 3 modes: explosion of all holes, explosion of peripheral holes and the mode without explosion. After examining the radius of the damage zone, the modeling is validated by the experimental relationship presented by Park. Sensitivity analysis is then performed for the cohesion, elastic modulus, rock tensile strength, blast pressure, blast hole diameter and internal friction angle, and also for the GSIs equal to 45 and 65.

### Results and Conclusions

In this paper, it has been found that in the numerical modeling of the explosion of environmental holes, which is the most critical condition for a tunnel with a width of 6.5 m and a height of 4 m as a horseshoe and drilling and blasting method, the excavation damage zone (EDZ) is about 0.55 meters. This result is in good correlation with experimental relationships. Furthermore, various properties of the rock and explosive material have been investigated, and

consequently, it has been found that the tensile strength and cohesion of the rock are the most effective factors in this study. Finally, the rock mass equivalent to two different GSIs has been modeled, and as a result, the radius of the damage area of about 1.2 meters for GSI = 45 and about 0.8 meters for GSI = 65 has been obtained.

---