نشریه‌ی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره ششم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۱۹ تا ۳۳

تشکیل ناحیه خرد شده پیرامون تونل در حفاری مکانیزه توده سنگ سخت تحت تنش بالا و تاثیر آن بر انتخاب نوع دستگاه حفاری مکانیزه

بهروز درودیان موحد[۱]؛ کاوه آهنگری[*۲]؛ علی نورزاد [۳]
۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران
۲- دانشیار و مدیر گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران
۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی

دریافت : ۱۴۰۱/۰۲/۲۲؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

چکیده

حفاری مکانیزه بر خلاف روش چالزنی و آتشباری، موجب حداقل آشفتگی در توده سنگ اطراف تونل می شود. با این حال، حفاری در سنگ سخت تحت تنش بالا، ضمن تغییرات در سطح تنش می تواند باعث توسعه ترک و تخریب توده سنگ اطراف تونل شود. تشکیل ناحیه تخریب در چنین شرایطی به صورت پوسته شدگی سنگ ظاهر می شود و با توجه به اینکه دستگاه کفشک دار برای حفاری باید به دیواره تونل جک زنی نماید بنابراین تشکیل ناحیه خرد شده سبب اختلال در عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه تونل، به خصوص از نوع کفشک دار، خواهد شد. در این تحقیق تعیین ضخامت ناحیه آسیب در اطراف فضای حفاری در سنگ سخت بر اساس روش شروع آسیب و حد پوسته شدگی(*DISL*) و با استفاده از مدل سازی عددی سه بعدی در نرم افزار *Midas GTS NX* به انجام رسیده است. بر اساس نتایج تحلیل های صورت گرفته، مشخص شد توده سنگ سخت تحت روباره زیاد (بیش از ۱۰۰۰ متر) یا با روباره کم ولی تحت شرایط تکتونیکی خاص اعم از گسلش معکوس با مقدار ۴ برابری نسبت تنش افقی به عمودی، مستعد تشکیل ناحیه خردشدگی در اطراف فضای حفاری می باشد.

واژگان کلیدی **پوسته شدگی سنگ، روش *DISL*، نرم افزار *Midas GTS NX*، حفاری مکانیزه، سنگ سخت تحت تنش بالا**

۱- مقدمه

در روش حفاری مکانیزه با استفاده از دستگاه مکانیزه حفر تونل[۱] تخریب توده‌سنگ پیرامون تونل ناشی از روش اجرا به حداقل می‌رسد و عملاً آشفتگی در توده‌سنگ نظیر آنچه که در روش چالزنی و انفجار حادث می شود، ایجاد نخواهد شد. این موضوع باعث شده تا هوک، ضریب آشفتگی[۲] را در معیار شکست هوک و براون در روش حفاری با دستگاه مکانیزه را معادل صفر در نظر بگیرد [۱]. بر اساس تجارب موجود حفاری مکانیزه در سنگ های سخت تحت تنش بالا همزمان با حفاری و پیشروی دستگاه بروز ترک و تخریب توده سنگ جداره تونل مشاهده شده است و وقوع این پدیده به تغییرات سطح تنش ناشی از حفاری وابسته می‌باشد [۲]. حین حفاری مکانیزه فاصله بین جبهه‌کار تا موقعیت نصب سگمنت، محلی است تا بدون هیچگونه قیدی جابجایی مقطع تونل صورت پذیرد [۱۷]. بروز این اتفاق مشکلاتی برای پیشروی دستگاه خصوصاً دستگاه های کفشک دار ایجاد می نماید. علی رغم این مسئله، برای انتخاب نوع دستگاه مناسب حفاری مکانیزه در راهنمای *DAUB 2010* که توسط انجمن تونل کشور آلمان منتشر شده است، پدیده پوسته شدگی[۳] به عنوان یکی از مخاطرات حین حفاری برای دستگاه های سنگ سخت مورد نظر قرار نگرفته است. منطبق بر توضیحات فوق، دستگاه های نوع

[1] TBM
[2] Disturbed Zone
[3] Spalling

[*] نویسنده مسئول : دانشیار و مدیر گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران
پست الکترونیک: **kaveh.ahangari@gmail.com**

کفشک دار و سپر تلسکوپی برای حفاری در زمین های سنگی کاربرد دارند. بنابراین بررسی پدیده پوسته شدگی سنگ حین حفاری مکانیزه برای انتخاب این نوع از دستگاه ها حائز اهمیت می باشد و این پدیده می تواند به عنوان معیاری برای انتخاب دستگاه در شرایط توده سنگ سخت تحت تنش های بالا مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، نفوذپذیری توده‌سنگ اطراف تونل به‌واسطه توسعه ترک و همچنین شرایط سازه سگمنت به دلیل تشکیل ضخامتی از توده‌سنگ آشفته و نهایتاً سیستم ابزار دقیق تونل، تغییر خواهد کرد. در این راستا ابتدا حفاری مکانیزه و راهنمای انتخاب دستگاه مرور می شود. تحقیق های به انجام رسیده در زمینه مطالعه ناحیه تخریب خصوصاً در مقاطع دایره ای مورد بررسی قرار می گیرد و روش حد پوسته شدگی و شروع شکست که مبنی تحلیل های عددی صورت گرفته در این تحقیق بوده است، ارائه می شود و در نهایت روش حل مسئله و نتایج حاصل از آن ارائه خواهد شد.

۲- حفاری مکانیزه

حسب تجارب مطرح در سطح دنیا حفاری مکانیزه در بین قطرهای مختلف از ۳ تا ۱۲ متر برای پروژه های تاسیساتی، انتقال آب و فاضلاب، خطوط ریلی و بزرگراهی کاربرد دارد. به طور عمده برای دستگاه های مکانیزه حفر تونل بین قطر ۳ تا ۱۲ متر، پروژه های متنوعی در سطح دنیا به اجرا رسیده است که در بین آنها برای تونل های تاسیساتی و انتقال آب قطرهای حدود ۲ تا ۵ متر، تونل های مسیر خطوط ریلی ۷ تا ۹ متر و تونل های بزرگراهی ۹ تا ۱۲ متر دارای تجارب زیادی بوده است. در شرایط خاص شرکت های بزرگی نظیر هرنکنشت تا قطر ۱۹ متر هم اقدام به تولید دستگاه حفاری مکانیزه حفر تونل از نوع سپر ترکیبی[1] نموده اند که برای محیط های شهری با تنوع شرایط زمین شناسی کاربرد دارد. از طرفی مطابق تجارب موجود در سطح دنیا قطر دستگاه های تک سپره[2] و سپر تلسکوپی[3] و کفشک دار[4] ساخته شده بین ۲ تا ۱۲/۵ متر اعلام شده است. انتخاب دستگاه مکانیزه حفر تونل بر اساس شرایط پروژه خصوصاً شرایط زمین شناسی به انجام می رسد. برای این منظور در راهنمای *DAUB* که به عنوان یکی از مراجع انتخاب دستگاه مکانیزه حفر تونل است، پارامترهای مختلف زمین شناسی و مخاطرات مربوطه ارائه شده است [۳].

در محیط های خاکی و سنگ ضعیف از طریق کنترل میزان جابجایی و همگرایی مقطع تونل ناشی از سطوح تنش شعاعی با استفاده از روش‌هایی نظیر همگرایی -همجواری می‌توان میزان جابجایی مقطع تونل و مقدار بار وارده به سیستم نگهداری را محاسبه نمود [۱۶]. لیکن در سنگ سخت عملاً استفاده از این روش با توجه به جابجایی کم مقطع حفاری جهت بررسی پایداری مقطع و کنترل خطرات حفاری مناسب نمی باشد.

حفاری تونل در سنگ سخت تحت تنش بالا سبب تغییر سطح تنش و تخریب توده سنگ اطراف آن می شود. این پدیده در سنگ سخت تحت تنش بالا اتفاق می افتد که بروز آن تحت عنوان پدیده پوسته شدگی در جداره تونل است. بروز این پدیده سبب اخلال در حفاری تونل و کاهش راندمان اجرا خواهد شد. در دستگاه های کفشک دار که دستگاه مکانیزه حفر تونل برای حفاری نیازمند جک زدن به جداره تونل می باشد، این پدیده سبب برهم زدن عملکرد دستگاه حین حفاری خواهد شد. بر این اساس لازم است در معیار انتخاب دستگاه مکانیزه حفر تونل، قطر حفاری و شرایط توده سنگ از نظر مستعد بودن برای تشکیل ناحیه تخریب ناشی از تغییر سطح تنش در کنار سایر مخاطرات زمین شناسی پیش روی حفاری مکانیزه مورد ارزیابی قرار گیرد.

در راهنمای انتخاب دستگاه مکانیزه حفر تونل مطابق با *DAUB 2010*، جهت انتخاب دستگاه پارامترهای مختلفی نظیر مقاومت سنگ[5]، شاخص کیفی سنگ[6]، طبقه بندی توده سنگ[7]، هجوم آب، سایش، آماس[8]سنگ و فشار سیستم نگهداری مد نظر قرار گرفته است و همانطور که در جدول شماره (۱) ملاحظه می شود، تفاوت معناداری بین محدوده مقادیر هر یک از این پارامترها در انتخاب دستگاه کفشک دار، سپر تلسکوپی و تک سپره وجود ندارد.

جدول ۱- دامنه عملکرد دستگاه های حفاری مکانیزه بر اساس DAUB 2010 [۳]

دستگاه حفاری مکانیزه	کفشک‌دار	سپر تلسکوپی	تک سپره
مقاومت تک محوری (مگاپاسکال)	۲۵۰ - ۲۵	۱۰۰ - ۲۵	۱۰۰ - ۲۵
شاخص کیفی سنگ	۱۰۰ – ۵۰	۷۵ - ۲۵	۷۵ – ۲۵
طبقه بندی توده سنگ	۱۰۰ – ۶۱	۶۰ – ۲۱	۶۰ – ۲۱
هجوم آب در ۱۰ متر از تونل (لیتر بر دقیقه)	۲۵ – ۰	۲۵ – ۰	۲۵ – ۰
سایندگی (*CAI*)	۲ – ۰/۳	۲ – ۰/۳	۲ – ۰/۳
رفتار آماس	ناچیز	ناچیز	ناچیز
فشار نگهداری (بار)	۰	۰	۰

[1] MixShield
[2] Single Shield
[3] Double Shield
[4] Gripper TBM
[5] UCS
[6] RQD
[7] RMR
[8] Swelling

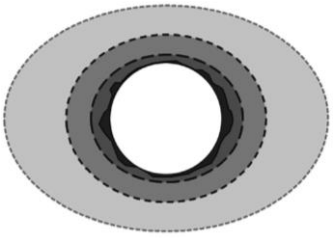
همانطور که در جدول بالا ملاحظه می‌شود، عملاً بازه های کارکرد دستگاه سپر تلسکوپی (برای حفاری نیاز به جک زدن به جداره حفاری دارد) و تک سپره (برای حفاری به سگمنت های نصب شده جک می‌زند) در راهنمای *DAUB* مشابه می‌باشد غافل از اینکه در شرایطی که حفاری تونل منجر به بروز پدیده پوسته‌شدگی[1] تونل شود، دستگاه سپر تلسکوپی به دلیل ضعف جداره حفاری قابلیت خود برای جک زدن به جداره حفاری را از دست خواهد داد.

۳- ناحیه تخریب[2]

حین حفاری میزان تراکم شکستگی‌ها از سطح دیواره فضای حفاری به بیرون کاهش می‌یابد. هریسون[3] و هادسون[4] در سال ۲۰۰۰ این موضوع را به دو بخش تقسیم نموده‌اند. ۱- شکستگی های اولیه ناشی از حفر فضای زیرزمینی ۲- شکستگی های ناشی از روش حفاری. در حالت دوم با تغییر روش حفاری (مثلا روش مکانیزه با استفاده از دستگاه مکانیزه حفر تونل) امکان رسیدن این مقدار به صفر میسر است ولی بدلیل ابعاد مقطع حفاری، ساختار زمین‌شناسی و همچین تغییر سطح تنش خصوصاً در محیط‌های تحت تنش بالا، آسیب به توده سنگ در روش حفاری مکانیزه رخ خواهد داد. [۶].

مطابق تحقیقات صورت گرفته تاکنون، ناحیه تخریب به سه مجموعه تقسیم می‌شود. محدوده با شدت تخریب زیاد که با چشم ترک‌های ایجاد شده قابل رویت است. این محدوده، ناحیه به شدت تخریب شده نامیده می‌شود. نهایتاً با حرکت به سمت بیرون از فضای حفاری، ناحیه تخریب که به‌صورت یک ناحیه انتقالی پیوسته ترک‌های محدود و غیر قابل رویت با چشم در آن ایجاد می‌شود به دو صورت داخلی و خارجی شکل می‌گیرد. دورتر از این محدوده‌ها، محدوه تاثیر تنش یا کرنش که صرفاً تغییر شرایط الاستیک می‌باشد به نام ناحیه تاثیر ناشی از حفاری[5] نامیده می‌شود [۷]. این محدوده تحت عنوان ناحیه آشفتگی ناشی از حفاری[6] نیز نامیده شده است. در شکل شماره (۱) تعریف این مناطق در پیرامون فضای حفاری دایره ای نشان داده شده است.

مارتین و همکاران در سال ۱۹۹۹ با استفاده از معیار شکست هوک-براون نسبت به تعیین عمق تجربی شکست ورقه ای[7] اقدام نموده اند. این یافته‌ها در زمینه مطالعه پایداری تونل در سنگ‌های تحت تنش‌های بالا از سوی محققین دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا دیدریچس و همکاران در سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۷ رابطه هوک- براون را در زمینه بررسی آسیب به توده‌سنگ پیرامون فضای تونل ناشی از حفاری در سنگ تحت تنش‌های بالا را با ارائه رویکرد شروع شکست و حد پوسته شدگی[8] مورد ارزیابی قرار داده‌اند.



شکل۱- ناحیه بندی تخریب پیرامون فضای حفاری [۱۰]

آخرین پیشرفت‌ها برای پیش بینی ناحیه تخریب در سنگ‌های سخت با استفاده از مدل‌سازی پیوسته در ارتباط با امتحان روش عددی برای تعیین عمق تخریب بوده است. روشی که برای بدست آوردن تخریب ناشی از تنش در نرم‌افزارهای مرسوم مهندسی بکارگرفته شده، روش شروع شکست و حد پوسته شدگی[9] می‌باشد. تغییرات عمق شناسایی شده با استفاده از رویکرد شروع شکست و حد پوسته شدگی مورد ارزیابی قرار گرفته است و رهنمودهایی برای تعیین عمق تخریب پیرامون فضای حفاری دایره‌ای در توده‌سنگ سخت پیشنهاد گردیده است [۶]. معادلاتی برای پیش بینی ناحیه‌های تخریب تاکنون پیشنهاد گردیده که بر اساس آن بیشترین عمق ناحیه تخریب حاصل از حل عددی به میزان ۶۸ درصد با مشاهدات تجربی همخوان است [۸].

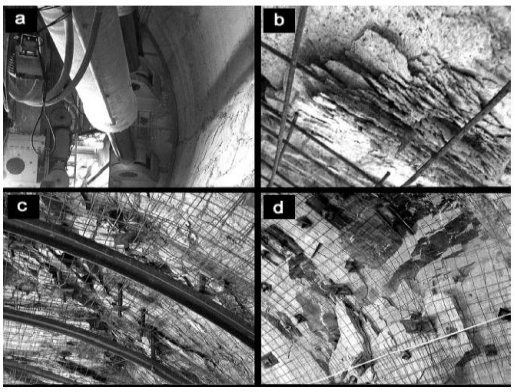
۴- مطالعه ناحیه تخریب درحفاری مکانیزه

مطالعه زیادی بر روی تعیین ناحیه‌های تخریب حفاری[10] و ساختارهای مربوطه در پروسه‌های دراز مدت [۹] بر روی عمق ناحیه تخریب [۱۱] و تغییر شرایط نفوذپذیری صورت پذیرفته است [۱۲]. این مطالعات بر روی سنگ‌های کریستاله، رسی و نمکی صورت پذیرفته است. یکی از مهمترین این اهداف در شناسایی محل دفن زباله‌های اتمی است [۱۰].

تخریب و پوسته شدن سنگ در حفاری با دستگاه مکانیزه حفر تونل با روباره‌های تا ۱۵۰۰ متر در سنگ‌های سخت گرانیت و گنایس مشاهده شده است. از جمله آنها می‌توان به پروژه مترو آلپاین که در عمق ۲ کیلومتری و در سنگ‌های گرانیت و گنایس با دستگاه مکانیزه حفر تونل حفاری شده است، اشاره نمود. در این راستا محققین به دنبال مدل‌های تحلیلی برای بررسی وقوع این پدیده

[1] Spalling
[2] Excavation damage zone (EDZ)
[3] Harrison
[4] Hudson
[5] Excavation influence zone
[6] Excavation Damage Zone
[7] Spalling Failure
[8] Damage Initiation and Spalling Limit (DISL)
[9] Damage initiation and Spalling limit
[10] Excavation Damage Zones

برآمده است. پدیده تخریب و پوسته شدگی سنگ ناشی از حفاری-های عمیق در سنگ سخت توسط رید[1] در سال ۲۰۰۴، مارتین[2] در سال ۱۹۹۷، اورتلپ[3] در سال ۱۹۹۷، کایسر و همکاران[4] در سال ۱۹۹۵، واگنر[5] در سال ۱۹۸۷، هوک و براون در سال ۱۹۸۰، هوک در سال ۱۹۶۸ و فیرهارست و کوک در سال ۱۹۶۶ مستند شده است [۱۳]. از جمله پروژه‌های تونلی که در سنگ سخت و با عمق زیاد حفاری شده است، تونل گتارد[6] در سویس و همچنین پروژه تونل تورین لیون[7] با روباره بین ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ را می‌توان نام برد که با پدیده پوسته شدگی در طول مسیر مواجه بوده اند. در شکل شماره (۲) تصویری از وقوع این پدیده در حفاری با دستگاه مکانیزه حفر تونل نشان داده شده است.



شکل۲- وقوع پدیده پوسته شدگی و تشکیل ناحیه‌های تخریب پیرامون فضای حفاری شده با دستگاه مکانیزه حفر تونل در سنگ سخت گنایس و گرانیت [۱۳]

۵- روش شروع شکست و حد پوسته شدگی[8] برای بررسی پتانسیل تخریب و پوسته شدگی

در خصوص پیش بینی ضخامت ناحیه تخریب پیرامون فضای حفاری در سنگ سخت می‌توان به دستاوردهای پراس[9] و دیدریچس که در مقاله ای تحت عنوان " *Predicting Excavation Damage Zone Depths in Brittle Rock*" اشاره نمود که در ۲۴ دسامبر سال ۲۰۱۵ ارائه شده است [۸].

معیار شکست هوک – براون در سال ۱۹۹۷ به صورت گسترده در شرایط کرنش نرم شونده در جایی که مقاومت بعد از پیک[10] کاهش می‌یابد، مورد استفاده قرار گرفت. این موضوع برای توده‌سنگ با رفتاری از نوع الاستیک – پلاستیک کامل[11] صادق است که می‌توان برای توده‌سنگی در پیرامون فضای حفاری کم عمق یا تحت تنش‌های پایین و همچنین برای موقعیت‌هایی که مقاومت سنگ نسبت به تنش پیرامونی کمتر باشد، بکار برد. این مطلب مربوط می‌شود به شرایط زمین مچاله شونده که مقاومت توده‌سنگ نسبت به تنش محیط کمتر از ۰/۳۵ باشد [۱۵].

از منظر کرنش نرم شونده مقدار چسبندگی و اصطکاک به‌طور همزمان بسیج می‌شوند و هر دو بعد از مقاومت پیک[12] در شرایط پسماند کاهش می‌یابند. از این نظر کرنش نرم شونده نشان داده که در تخمین عمق و گسترش شکست پیرامون فضاهای حفاری در سنگ سخت ناموفق می‌باشد [۱۳]. این موضوع توسط واگنر[13] در سال ۱۹۸۷، پلی و همکاران[14] در سال ۱۹۹۱، مارتین[15] در سال ۱۹۹۷، حاجی عبدالمجید[16] در سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ و والتن و همکاران[17] در سال ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفته است.

شکست پیرامون فضای حفاری در سنگ سخت با روش حد پوسته شدگی[18] که از طریق کاهش میزان چسبندگی و بسیج شدن اصطکاک مورد تحلیل قرار گرفته است. در این خصوص مارتین در سال ۱۹۹۷، حاجی عبدالمجید و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۱۸]، کایسر و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۲۰]، دیدریچس در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴ [۱۹]، تحقیق نموده‌اند. این روش از کارهای اشمرتمن[19] و استربرگ[20] [۲۱] در سال ۱۹۶۰ نشات گرفته است. این روش برای توده‌سنگ توده‌ای[21] و با درزه شدگی متوسط به نحوی که درزه شدگی تاثیر چشم گیری روی توزیع تنش نداشته باشد، کاربردی است. در نهایت دیدریچس در سال ۲۰۰۷ روش *DISL* را برای بررسی پوسته شدگی سنگ و تخریب پیرامون فضای حفاری مبتنی بر بکارگیری معادله شکست تغییر یافته هوک و براون[22] ارائه نمود. این روش همانطور که گفته شد بر اساس معادله شکست تغییر یافته هوک و براون و با استفاده از پارامترهای پیک و باقیمانده که در جدول (۲) ارائه شده می‌باشد. با ارائه این روش امکان مدل‌سازی پروسه تخریب پیرامون فضای حفاری با نرم افزارهای مهندسی مرسوم از جمله *Phase2* فراهم شد. این روش تمایل سنگ سخت برای پوسته شدگی تحت تنش را نشان می‌دهد. این روش از

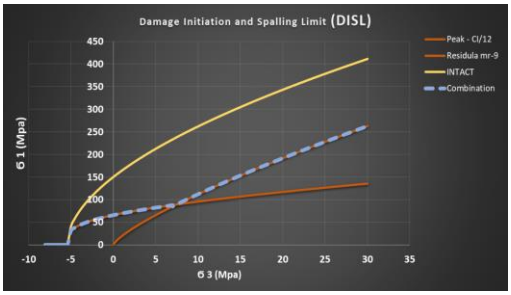
[1] Read
[2] Martin
[3] Ortlepp
[4] Kaiser et al.
[5] Wagner
[6] Gothard
[7] Torini-Lyon
[8] Damage Initiation and Spalling Limit (DISL)
[9] Perras
[1] Post-Yield Strength

[11] Elsatic-Perfectly Plastic
[12] Post-Peak
[13] Wagner
[14] Pelli et al.
[15] Martin
[16] Hajiabdolmajid
[17] Walton et al.
[18] Spalling Limit
[19] Schmertmann
[20] Osterberg
[21] Massive
[22] Generalized Hoek-Brown

دو بخش شامل شروع تخریب[1] با بالا بودن میزان چسبندگی و اصطکاک حداقل و انتقال به حد پوسته شدگی[2] با از دست دادن چسبندگی و افزایش اصطکاک تشکیل یافته است. از دست رفتن چسبندگی با افت پارامتر s و بالارفت اصطکاک با افزایش پارامتر m معنا می‌یابد. همانطور که گفته شد روش *DISL* که با جزئیات از سوی دیدریچس در سال ۲۰۰۷ مورد بحث قرار گرفته، مبتنی بر بکارگیری معادله شکست تغییر یافته هوک – براون در تفسیر نمودار تنش σ_1-σ_3 است. بر اساس یافته‌های موجود، مطابق جدول (۱) مقادیر m_p,s_p و s_r به عنوان پارامترهای ورودی در معادله شکست جهت تشریح پروسه آغاز شکست در روش *DISL* بکار گرفته می‌شوند. مقدار پارامتر a که انحنای منحنی شکست را کنترل می‌نماید، در این پروسه برای آغاز شکست به میزان ۰/۲۵ به عنوان a_p و برای حد پوسته شدگی به میزان ۰/۷۵ به عنوان a_r از سوی دیدریچس در سال ۲۰۰۷ در نظر گرفته شده است. همانطور که گفته شده مقادیر پیک و باقیمانده در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد و منظور از p و r نیز بر گرفته از حرف اول کلمه *Peak* و *Residual* می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی در روش شروع شکست و حد پوسته شدگی [۱۳]

Modeling Method	Damage Initiation	Peak/ Input Parameter	Value/ Equation	Residual/ Input Parameter	Value/ Equation	Spalling Limit
DISL		a_p	0.25	a_r	0.75	
		S_p	$(CI/UCS)^{1/ap}$	S_r	0.001	
		m_p	Sp(ucs/|T|)	m_r	6 – 12	



شکل۳- نمودار ترسیم شده برای سنگ سخت در روش شروع شکست و حد پوسته شدگی

مقادیر پارامترهای مقاومتی توده سنگ سخت در برگیرنده تونل بر اساس منحنی شروع شکست و حد پوسته شدگی و مقادیر زیر در نرم افزار تعریف گردید.

جدول ۳- جزییات خصوصیات استاتیکی سنگ بکر و توده‌سنگ قوی [۱۳]

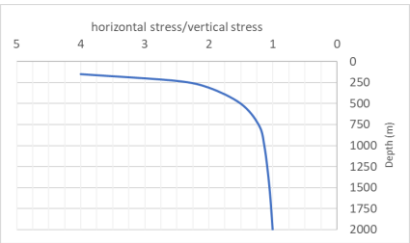
لیتولوژی	UCS	Es	m_i	GSI	Erm
	MPa	*MPa*			*MPa*
سنگ سخت	۱۵۰	۶۳،۷۵۰	۲۵	۷۵	۵۲،۰۰۰

۶- تنش‌های برجا

در خصوص تنش‌های برجا در این مقاله سعی گردیده تا تونل‌های با عمق کم ولی با شرایط تکتونیکی فعال ناشی از عملکرد نیروهای تراستی گسل در ایجاد تنش‌های برجای بالا نظیر برقراری مقدار عدد K معادل ۴ در نظر گرفته شده است. مطابق مدل ارائه شده توسط شئوری، با کاهش میزان روباره، بر اساس مقدار مدول الاستیک، مقدار نسبت تنش افقی به قائم در شرایط تکتونیزه افزایش می‌یابد. سه رژیم تنش‌های اصلی بر اساس نظریه گسلش اندرسون[3] را می توان برای توصیف نسبت تنش‌های درجا استفاده کرد [۱۴]. جهت انجام تحلیل‌های عددی به ازای قطرهای مختلف تونل مکانیزه، مقدار تنش به صورت متغیر در تحلیل‌های صورت گرفته مد نظر قرار گرفت.

- گسل نرمال: $\sigma_V \geq \sigma_H \geq \sigma_h$.
- گسل راستالغز: $\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$
- گسل معکوس: $\sigma_H \geq \sigma_h \geq \sigma_V$.

همچنین تاثیر افزایش عمق تونل در نسبت تنش افقی به قائم بر اساس عمق قرارگیری تونل و مدول تغییر شکل توده سنگ مطابق با رابطه شئوری[4] تعیین گردید. مقادیر مختلف قطر حفاری به ازای تنش های مختلف اعم از روباره کم با تکتونیک فعال و روباره زیاد تا ۱۵۰۰ متر مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل۴- نسبت تنش افقی به قائم بر حسب عمق قرارگیری تونل در روش شئوری [۲۲]

[1] Damage Initiation
[2] Spalling Limit
[3] Anderson
[4] Sheorey

بر اساس توضیحات بالا از منظر سطوح تنش ناشی از عمق قرارگیری تونل و همچنین تنش‌های تکتونیکی، ماتریسی از مقادیر مختلف تنش مطابق جدول شماره (۴) تهیه شد. پتانسیل پوسته‌شدگی[1] سنگ سخت تحت تاثیر تنش‌های بالا، به ازای مقادیر مختلف نسبت تنش افقی به قائم (K) مطابق جدول شماره (۴) مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در این جدول ملاحظه می‌شود، بررسی پتانسیل-های مختلف شکل‌گیری سطح تنش در توده سنگ، در اعماق زیاد باعث افزایش مقادیر تنش افقی و قائم و نزدیک شدن نسبت این دو نوع تنش نسبت به یکدیگر خواهد شد (مقدار عدد K به سمت یک میل خواهد کرد) و در اعماق کم بدلیل عملکرد تنش های تکتونیکی، نسبت تنش افقی به قائم زیاد خواهد شد که اتفاقاً یکی از پتانسیل-های تشکیل ناحیه تخریب در اطراف فضای حفاری، افزایش زیاد نسبت تنش افقی به قائم خواهد بود.

جدول ۴- مقادیر تنش مورد استفاده در تحلیل‌ها بر اساس عمق قرارگیری تونل و شرایط تکتونیک

نوع گسل	σ_V	σ_H	σ_h	K	عمق (متر)
معکوس	۴	۱۶	۱۶	۴	۱۵۰
	۴	۱۶	۸		
معکوس	۱۴	۲۰	۲۰	۱.۵	۵۰۰
امتداد لغز	۱۴	۲۰	۱۰		
معکوس	۲۷	۳۱	۳۱	۱.۱۳	۱۰۰۰
امتداد لغز	۲۷	۳۱	۱۵		
نرمال	۴۱	۴۱	۲۰	۱	۱۵۰۰
	۵۴	۵۴	۲۷		۲۰۰۰

۷- پروسه شکست در سنگ سخت

توسعه ترک ناشی از بارگذاری فشاری در سطح تنش σ_{ci} سنگ آغاز می‌شود و با حفظ مقاومت تا رسیدن به سطح تنش σ_{cd} طول ترک‌ها افزایش می‌یابد. بنیاوسکی ۱۹۶۷، هوک و بنیاویسکی (۱۹۸۴) و نعمت – ناصر و هوری (۱۹۸۲) [۲۳]. آغاز ترک در سطح ۱/۳ تا ۲/۳ برابر مقاومت حداکثر در عمده سنگ‌های سخت رخ می‌دهد [۲۴].

در آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ بکر، سطح تنش برای آغاز و توسعه ترک‌های پایدار با اتساع مشخص گردید. برای این موضوع از نمودار تنش–کرنش حجمی استفاده شده است [۲۵].

کرنش حجمی الاستیک بر اساس رابطه زیر بدست می آید [۲۶].

$$\varepsilon_{Velastic} = \frac{1-2v}{E}\,\sigma_{axial} \qquad (۱)$$

کرنش حجمی شامل کرنش حجمی ترک و کرنش حجمی الاستیک است. لذا در صورتیکه کرنش حجمی محاسبه شود می‌توان با کسر کرنش الاستیک نسبت به برآورد میزان کرنش حجمی ترک اقدام نمود.

برای بررسی شرایط ایجاد ناحیه تخریب در اطراف فضای حفاری، میزان کرنش حجمی و تنش‌های حداقل و حداکثر در کنار یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است [۲۶].

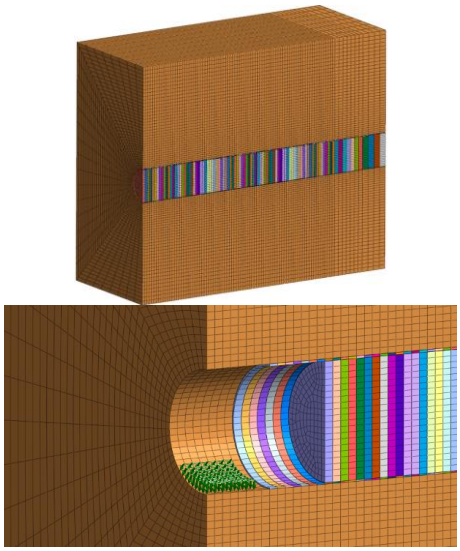
$$\varepsilon_{vcrack} = \varepsilon_v - \varepsilon_{elastic} \qquad (۲)$$

۸- مدل‌سازی عددی

برای این تحقیق از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار تحلیل سه بعدی اجزای محدود به نام *Midas GTS NX* استفاده شده است. به نحوی که مراحل حفاری مکانیزه در مدل تعریف شده است. جزئیات زیر در مدل‌سازی حفاری مکانیزه در سنگ سخت مد نظر قرار گرفته است.

تعیین هندسه مدل بر اساس انتخاب قطرهای معرف اعم از ۳ ، ۷ و ۱۱ متری به انجام رسیده است. این مقادیر قطر تمام شده تونل است که بر اساس قطر حفاری، ضخامت گروت و ضخامت سگمنت بدست آمده است. در تهیه مدل مراحل حفاری مکانیزه اعم از طول رینگ گذاری، طول شیلد و وزن دستگاه لحاظ شده است.

در تعیین مشخصات مصالح، پارامترهای توده سنگ بر اساس روش شروع شکست و حد پوسته شدگی به مدل معرفی شد. پارامترهای گروت، سگمنت و وزن دستگاه منطبق بر جدول شماره (۵) و بر اساس تجربه سایر پروژه‌های حفاری مکانیزه تعیین گردید. در مدل‌سازی تعداد مراحل تحلیل به نحوی انتخاب گردید که محدوده شیلد دستگاه با نصب سگمنت به اندازه حداقل معادل طول شیلد به انجام رسد و برای جلوگیری از اثر توزیع تنش ها در موقعیت جبهه کار، جبهه کار به میزان نصف طول مدل در راستای حفاری، باقی نگه داشته شده است.



شکل ۵- مدل تهیه شده در نرم افزار midas

[1] Spalling

تمامی مراحل حفاری مکانیزه در مدل به صورت زیر تعریف شده است:

۱. تحلیل تنش برجا و شکل گیری شرایط توزیع اولیه زمین
۲. حفاری اولین مرحله در موقعیت کاترهد
۳. پیشروی دستگاه مکانیزه حفر تونل و قرار دادن تمام وزن سپر بر روی کف تونل
۴. فعال شدن سگمنت های بتنی
۵. فعال شدن پرکننده پشت سگمنت متناسب با افزایش مقاومت دوغاب با زمان

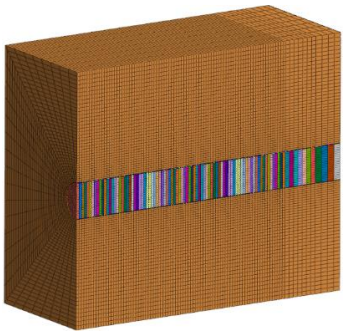
جدول ۵- پارامترهای حفاری مکانیزه جهت مدل‌سازی

مشخصات دستگاه	مقدار	مشخصات سگمنت	مقدار	مشخصات پی گراول	مقدار
وزن قطر ۳ متر (تن)	۱۳۳	عرض برای قطر ۳ متر	۱/۲	ضخامت – قطر ۳ متر	۰/۱۲
تنش نرمال (کیلونیوتن متر مربع)	۳۰۸	ضخامت برای قطر ۳ متر	۰/۲		
وزن قطر ۷ متر (تن)	۶۵۰	عرض برای قطر ۷ متر	۱/۵	ضخامت – قطر ۷ متر	۰/۱۳
تنش نرمال (کیلونیوتن متر مربع)	۳۵۱	ضخامت برای قطر ۷ متر	۰/۳		
وزن قطر ۱۱ متر (تن)	۱۱۵۰	عرض برای قطر ۱۱ متر	۲	ضخامت – قطر ۱۱ متر	۰/۱۹
تنش نرمال (کیلونیوتن متر مربع)	۴۲۰	ضخامت برای قطر ۱۱ متر	۰/۴		
طول شیلد برای قطر ۳ متر	۹	مدول الاستیک گیگاپاسکال	۲۵	مدول الاستیک گیگاپاسکال	۱
طول شیلد برای قطر ۷ متر	۱۰	ضریب پواسون	۰/۲	ضریب پواسون	۰/۳
طول شیلد برای قطر ۱۱ متر	۱۱	دانسیته (کیلونیوتن مترمکعب)	۲۴	دانسیته (کیلونیوتن مترمکعب)	۲۴

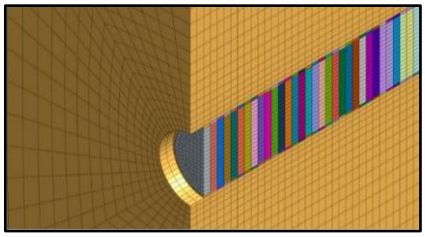
مراحل مدلسازی حفاری مکانیزه نیز در شکل شماره (۴) نشان داده شده است. وزن دستگاه بر روی یک قطاع ۹۰ درجه از دایره در کف تونل لحاظ شده است. با پیشروی حفاری به ازای یک رینگ و رعایت فاصله مابین شیلد جلویی[1] و شیلد دنباله[2] اجرای سگمنت به همراه تزریق پشت آن در مدل وارد شده است. فاصله بین جبهه‌کار و اولین سگمنت نصب شده متناسب با طول شیلد دستگاه تعیین شده است.

۸-۱- برآورد ناحیه آسیب به توده سنگ بر اساس مدل عددی

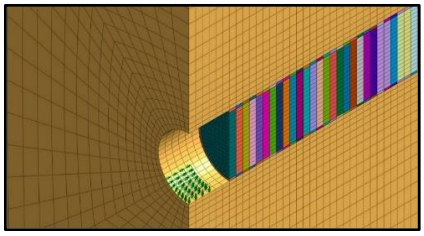
از جمله پارامترهای کلیدی برای بررسی شرایط توده سنگ در اطراف فضای حفاری کنترل تغییر تنش‌های اصلی، جابجایی در جهت‌های مختلف، ناحیه‌های پلاستیک و در نهایت کرنش حجمی در توده سنگ بوده است. خصوصاً اینکه کرنش حجمی با توجه به نیاز به اثر توسعه ترک در دو فاز مختلف کرنش حجمی الاستیک و کرنش ناشی از افزایش حجم ترک مورد بررسی قرار گرفته است.



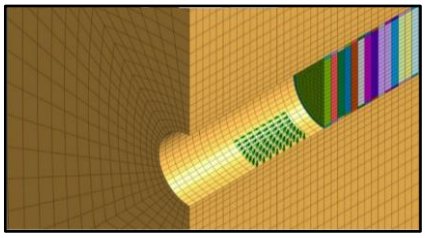
الف) مدل‌سازی در نرم افزار *Midas* برای اقطار مختلف حفاری



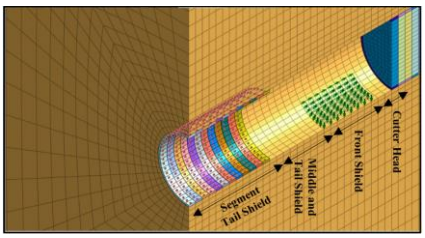
ب) اولین مرحله حفاری جهت ورود دستگاه



ج) ورود کامل کاترهد و قرارگیری سپر جلویی روی کف تونل



د) ورود کامل دستگاه با لحاظ فاصله کاترهد، وزن شیلد، طول شیلد میانه و دنباله



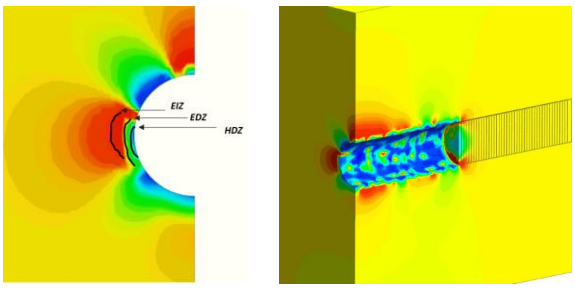
ن) نصب سگمنت‌های بتنی و تزریق پشت آن

شکل۵- مراحل مدل‌سازی در نرم‌افزار Midas

در آنالیز تنش–کرنش می‌توان تمرکز تنش ناشی از حفاری را در پیرامون فضای حفاری بدست آورد و متناسب با تعیین ناحیه‌های تخریب در روش شروع شکست و حد پوسته شدگی می‌توان نسبت به تعیین شرایط تخریب توده سنگ ناشی از تغییر سطح تنش در اطراف اقدام نمود. لذا در این تحقیق از هر دو روش برای کنترل

[1] Front Shield
[2] Tail Shield

فضای تخریب در اطراف فضای حفاری استفاده شده است. از آنجایی که بررسی میزان کرنش توده سنگ در اطراف فضای حفاری بعد از حفاری به مراتب راحت تر از اندازه‌گیری تغییر سطح تنش می‌باشد، لذا در حفاری مکانیزه برای قطرهای مختلف در سطوح تنش متفاوت که در این مقاله به بررسی آن پرداخته شده است، نصب کرنش سنج مد نظر قرار گرفته تا بتوان با ارائه راهکار اصولی نسبت به قرائت و پایش مقطع حفاری مکانیزه برای کنترل شرایط تخریب اطراف فضای حفاری و خصوصاً پدیده پوسته شدگی، تعیین عمق گمانه‌های تزریق تحکیمی و آببندی در اطراف تونل اقدام نمود. در شکل شماره (۶) نحوه ناحیه بندی بر اساس نتایج تحلیل نشان داده شده است.

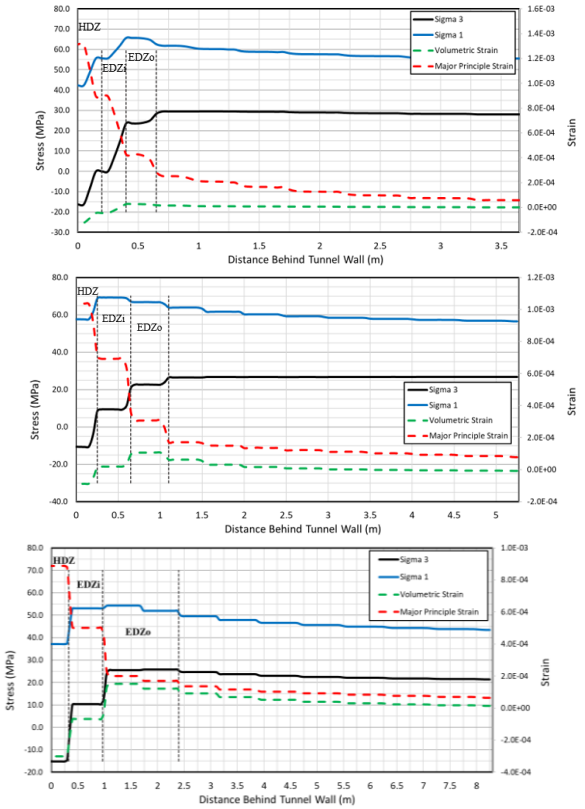


شکل ۶- اندازه‌گیری مقادیر تنش و کرنش اصلی به همراه کرنش حجمی در مدل با قطر ۱۱ متر و ۱۰۰۰ متر روباره سنگی

در اقطار مختلف تحلیل‌های صورت گرفته، مقدار تنش اصلی حداکثر و جداقل در مقابل کرنش حجمی و کرنش اصلی ترسیم گردید تا بتوان نسبت به بررسی کرنش ترک در پیرامون فضای حفاری مکانیزه اظهار نظر نمود. با اندازه‌گیری مقدار کرنش حجمی چنانچه روند تغییر کرنش مثبت و در جهت انقباض باشد، این تغییر به معنای رفتار الاستیک توده سنگ می‌باشد و چنانچه تغییر کرنش حجمی به سمت منفی شدن و در جهت انبساط باشد، این موضوع به معنای شروع تخریب و کرنش ترک‌های ایجاد شده در توده سنگ می‌باشد.

در شکل شماره (۷) ناحیه‌های مختلف ناحیه آسیب به ترتیب برای قطر ۳، ۷ و ۱۱ متر در روباره ۱۵۰۰ متر ترسیم شده است که بر اساس آن مقدار ضخامت ناحیه به شدت تخریب شده با افزایش قطر و میزان تنش افزایش یافته است. در عمق‌های کم ولی تحت شرایط تکتونیک بالا که سبب افزایش نسبت تنش افقی به قائم می‌شود، مقدار ضخامت ناحیه آسیب[1] افزایش می‌یابد.

برای امکان مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری مجموع ضخامت ناحیه آسیب[2] و همچنین ناحیه به شدت آسیب دیده[3]، شکل شماره (۱۰) ترسیم شده است. در این نمودارها، گراف مربوط به تنش متناسب با روباره و نسبت تنش افقی به قائم نیز جهت مقایسه با روند شکل‌گیری نواحی مذکور پیرامون حفاری تونل مکانیزه نشان داده شده است.



شکل ۷- اندازه‌گیری مقادیر تنش و کرنش اصلی به همراه کرنش حجمی به ترتیب برای قطر ۳ ، ۷ و ۱۱ با روباره ۱۵۰۰ متر جهت تعیین ضخامت ناحیه آسیب در جداره حفاری

ضخامت ناحیه آسیب مجموع ضخامت ناحیه به شدت آسیب دیده، ناحیه شکست و ناحیه تحت تأثیر می‌باشد که بر اساس نتایج حاصله غالباً از روند گراف تنش (متناسب با معادله شئوری) تبعیت می‌نماید. از طرفی ضخامت ناحیه به شدت آسیب دیده از روند افزایش روباره تونل پیروی می‌نماید. ضخامت ناحیه به شدت آسیب دیده در اقطار مختلف تونل و تحت روباره‌های مختلف، بین صفر تا ۵۳ سانتیمتر در حداکثر روباره بدست آمده است. ضخامت ناحیه آسیب نیز بین صفر تا ۶۵۰ سانتیمتر در حداکثر مقدار نسبت تنش افقی به قائم (K) بدست آمده است. در جدول شماره (۶) مقدار کمی ضخامت نواحی آسیب در اطراف فضای حفاری در قطر و سطوح تنش مختلف ارائه شده است.

از سویی جهت کنترل نتایج با سایر تحقیق‌های صورت گرفته، در ادامه بررسی‌هایی صورت گرفته است.

مارتین و همکاران ضخامت ناحیه آسیب را بر اساس شعاع حفاری در مقابل حداکثر تنش شعاعی نسبت به مقاومت فشاری تک

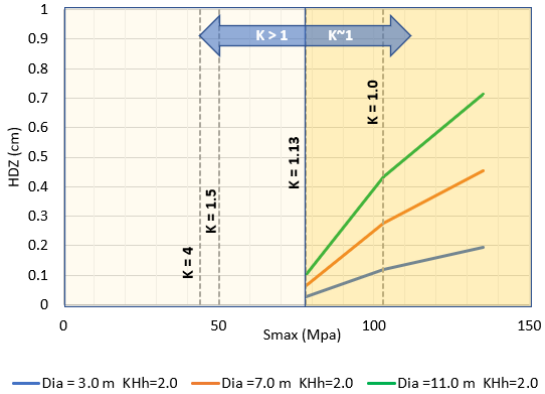
[1] EDZ
[2] EDZ (Excavation Damaged Zone)
[3] HDZ (Highly Damaged Zone)

محوری نرمالایز نمود. در این ارتباط دیدریچ در سال ۲۰۰۷ نیز حداکثر تنش مماسی را به مقدار مقاومت لازم برای شروع ترک نرمالایز نمود. بر اساس تحقیق‌های صورت گرفته، شروع تخریب بین ۰/۳ تا ۰/۵ مقاومت فشاری تک محوری در توده سنگ‌های سخت ایجاد خواهد شد [۱۳].

از سویی پراس و همکاران بر اساس تحلیل دو بعدی، مقدار ضخامت ناحیه به شدت آسیب دیده را بر اساس معادله زیر ارائه نموده‌اند.

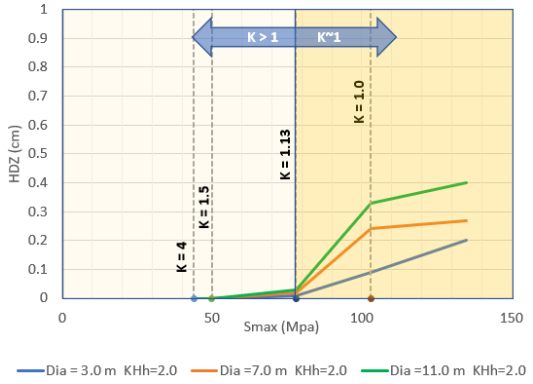
$$HDZ/R = 1 + 0.15(\sigma_{max}/CI - 1)^{0.65} \qquad (۳)$$

بر اساس نتایج تحقیق ایشان، مقدار ضخامت ناحیه به شدت آسیب دیده در شکل شماره (۸) نشان داده شده است. از سویی نتایج حاصل از این تحقیق که با استفاده از تحلیل سه‌بعدی و مدل‌سازی حفاری مکانیزه به انجام رسیده، در شکل شماره (۹) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ناحیه به‌شدت آسیب دیده برای عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متر شکل می‌گیرد و در اعماق کمتر حتی با افزایش مقدار نسبت تنش افقی به قائم تا ۴، این زون در سنگ سخت ایجاد نمی‌شود. ضخامت ناحیه به‌شدت آسیب دیده که برای دستگاه حفاری مکانیزه بسیار حائز اهمیت می‌باشد، بر اساس مطالعات پراس برای قطر ۳ متر بین ۳ تا ۱۹سانتیمتر ، قطر ۷ متر بین ۶ تا ۴۵ سانتیمتر و برای قطر ۱۱ متر بین ۱۱ تا ۷۰ سانتیمتر بدست خواهد آمد. این درحالی است که برای اساس تحقیق حاضر ضخامت این ناحیه برای قطر ۳ متر بین ۱ تا ۲۰ سانتیمتر، قطر ۷ متر بین ۲ تا ۲۷ سانتیمتر و برای قطر ۱۱ متر بین ۳ تا ۴۰ سانتیمتر در دیواره تونل و در شرایط نسبت تنش افقی حداکثر به حداقل معادل ۲ بدست آمده است.



شکل ۸- ضخامت ناحیه به شدت آسیب دیده بر اساس روابط پراس و همکاران

در مدل مورد بررسی پراس و همکاران، از تحلیل دو بعدی با در نظر گرفتن تنش حداقل و حداکثر استفاده شده است که قاعدتاً نمی‌تواند به طور کامل دربرگیرنده شرایط حفاری با دستگاه حفاری مکانیزه باشد. در تحلیل سه بعدی صورت گرفته، مقادیر هر یک از سطوح تنش اصلی بر اساس عمق قرارگیری تونل و تغییر نسبت تنش‌های افقی به قائم ناشی از عملکرد گسل‌های تراستی σ_1، σ_2 و σ_3 تعریف شده است.

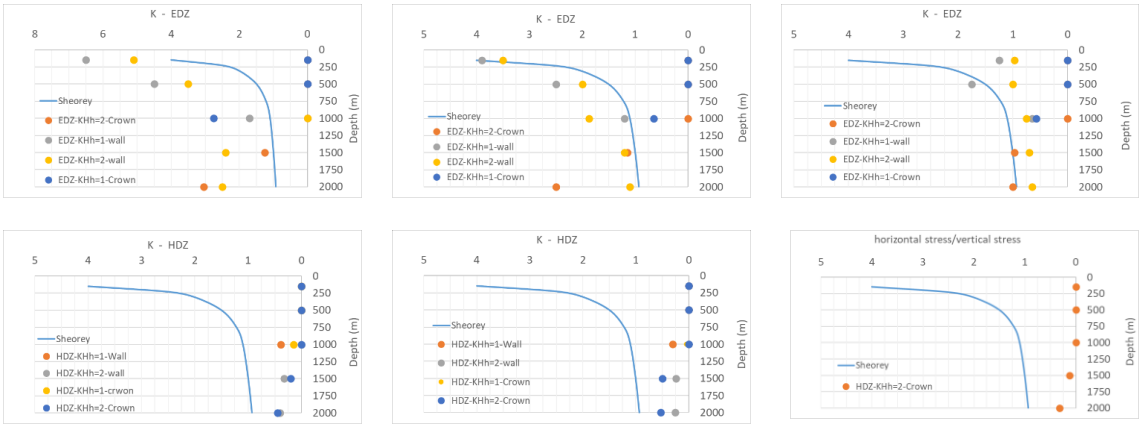


شکل ۹- ضخامت ناحیه به شدت آسیب دیده بر اساس روابط تحقیق حاضر و بکارگیری تحلیل سه بعدی

در تحقیق پراس و همکاران مقادیر سطح تنش برای نسبت تنش افقی به قائم تا ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس توضیحات بخش ۶ متناسب با عمق قرارگیری تونل، شرایط تنش با فرض عملکرد گسل‌های معکوس و همچنین روباره زیاد، تحلیل‌ها برای نسبت تنش افقی به قائم تا ۴ و همچنین روباره تا ۲۰۰۰ متر به انجام رسیده است. بر اساس نتایج تحقیق با افزایش روباره تونل و کاهش مقدار نسبت تنش افقی به قائم به سمت عدد یک، مقدار ضخامت کل ناحیه آسیب کاهش می‌یابد ولی در عوض با افزایش تا ۴ برابری نسبت تنش افقی به قائم با کاهش عمق تونل، مقدار ضخامت ناحیه آسیب افزایش می‌یابد. برای ناحیه به شدت آسیب دیده، این رفتار برعکس خواهد شد. به نحوی که با افزایش عمق تونل و کاهش مقدار نسبت تنش افقی به قائم به سمت عدد یک، مقدار ضخامت ناحیه به شدت آسیب دیده افزایش می یابد ولی با کاهش عمق و در عوض با افزایش تا ۴ برابری نسبت تنش افقی به قائم، مقدار ضخامت این ناحیه کاهش می‌یابد. این مسئله‌ای است که در تحقیق‌های صورت گرفته به آن پرداخته نشده است.

پراس و همکاران با فرض شروع ناحیه آسیب از سطح تنش معادل شروع ترک (CI) که حدوداً بین ۰/۳ تا ۰/۵ مقاومت سنگ می‌باشد، نتایج خود را ارائه نموده‌اند. لیکن همانطور که در این تحقیق مشاهده شد، در نواحی کمتر از این نسبت ولی با مقادیر بالای نسبت تنش افقی به قائم، عملاً ضخامت مجموع ناحیه آسیب افزایش می‌یابد.

منطبق بر تجارب حاصل از پروژه تونل مترو آلپاین، ضخامت ناحیه به شدت آسیب دیده بالغ بر ۵۰ سانتیمتر بدست آمده است. در این پروژه روباره تونل بالغ بر ۲۰۰۰ متر بوده است [۱۳].



شکل ۱۰- تغییرات ضخامت ناحیه آسیب – از چپ به راست به ترتیب برای قطر ۳ ، ۷ و ۱۱ متر

جدول ۶- ضخامت ناحیه آسیب و بشدت تخریب یافته به ازای قطرهای مختلف حفاری و روباره تونل

Depth	K	K_{Hh}	Pos	Dia.	HDZ	EDZ	Dia.	HDZ	EDZ	Dia.	HDZ	EDZ
m				m	m	m	m	m	m	m	m	m
150	4	1	Wall	3	0	1.25	7	0	3.9	11	0	6.5
		2	Wall		0	0.97		0	3.5		0	5.1
		1	Crown		0	0		0	0		0	0
		2	Crown		0	0		0	0		0	0
500	1.5	1	Wall		0	1.75		0	2.5		0	4.5
		2	Wall		0	1		0	2		0	3.5
		1	Crown		0	0		0	0		0	0
		2	Crown		0	0		0	0		0	0
1000	1.13	1	Wall		0.1	0.65		0.3	1.2		0.39	1.7
		2	Wall		0	0.75		0	1.87		0	2.9
		1	Crown		0.1	0.57		0.05	0.65		0.15	2.75
		2	Crown		0	0		0	0		0	0
1500	1	2	Wall		0.09	0.7		0.24	1.2		0.33	2.4
		2	Crown		0.12	0.97		0.5	1.15		0.2	1.25
2000		2	Wall		0.2	0.65		0.27	1.1		0.4	2.5
		2	Crown		0.32	1		0.5	2.5		0.5	3.05

۹- انتخاب نوع دستگاه مناسب در توده سنگ تحت پتانسیل پوسته شدگی

بر اساس نتایج حاصل از مطالعه ناحیه تخریب ناشی از حفاری مکانیزه، در این بخش معیارهای انتخاب دستگاه مناسب مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطابق توضیحات بخش ۲ عملاً بازه های کارکرد دستگاه سپر تلسکوپی (برای حفاری نیاز به جک زدن به جداره حفاری دارد) و تک سپره (برای حفاری به سگمنت های نصب شده جک می‌زند) برای حفاری در سنگ سخت در راهنمای *DAUB* مشابه می‌باشد. بررسی شرایط تشکیل ناحیه به شدت تخریب شده نشان داد که با افزایش قطر و میزان روباره، ضخامت این ناحیه در جداره حفاری افزایش می‌یابد. بنابراین لازم است که این پتانسیل به عنوان یکی از پارامترهای موثر در انتخاب دستگاه حفاری در تونل های که در توده سنگ سخت تحت روباره‌های بالاتر از ۱۰۰۰ متر اجرا می‌شوند مد نظر قرار گیرد. در این بخش سعی شده است که با انجام آنالیز چندمعیاره، در دو حالت مختلف شامل حفاری در توده سنگ سخت با ۱) روباره کمتر از ۱۰۰۰ متر و ۲) روباره بیش از ۱۰۰۰ متر، مقایسه‌ای بین امتیاز انتخاب نوع دستگاه‌هایی که برای حفاری در این نوع سنگ به کار گرفته می‌شوند، به عمل آید.

۹-۱- مقایسه بین گزینه های مختلف با روش آنالیز چند معیاره[1]

بر مبنای درخت تصمیم، امتیازدهی به سه نوع دستگاه به عنوان گزینه های قابل رقابت برای حفاری در سنگ سخت مد نظر قرار گرفت. بر این اساس سه عامل مهم زمین شناسی، هزینه و زمان به عنوان فاکتورهای موثر در انتخاب نوع دستگاه معرفی شده است. شرایط توده سنگ سخت با مقدار شاخص مقاومت زمین شناختی بالاتر از ۶۵، جهت ارزیابی نوع دستگاه‌ها لحاظ شده است. امتیازدهی برای انتخاب نوع دستگاه در دو حالت برای روباره بیشتر و کمتر از ۱۰۰۰ متر که بر مبنای تحلیل‌های صورت‌گرفته، اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متر مستعد پدیده پوسته شدگی می‌باشد، به انجام رسیده است. در جدول شماره (۷) وزن هر یک از پارامترهای تاثیرگذار ارائه شده است.

لازم به توضیح است در این جدول امتیاز عوامل هزینه‌ای و زمانی بر اساس تجربیات بدست آمده از پروژه‌های موجود و نظر سنجی از کارشناسان خبره درج شده است.

[1] MCDM

جدول۷- وزن هر یک از پارامترهای تاثیرگذار

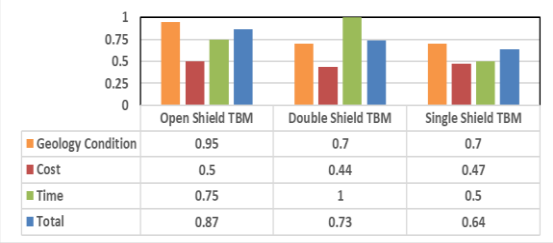
اهداف فرعی	معیارهای موثر در انتخاب TBM	وزن‌ها	توضیحات
عامل زمین‌شناسی	۱-۱-مقاومت تک محوره سنگ (UCS)	0.15	وزن‌های نسبی بر مبنای اهمیت هر معیار نسبت به آیتم اصلی تعیین شده اند.
	۱-۲-شاخص کیفی سنگ (RQD)	0.15	
	۱-۳-طبقه بندی مهندسی سنگ (RMR)	0.15	
	۱-۴-آب ورودی به تونل	0.15	
	۱-۵-ساینده‌گی زمین	0.1	
	۱-۶-رفتار آماس	0.1	
	۱-۷-فشار نگهدارنده جبهه کار	0.1	
	۱-۸-پوسته شدگی سنگ	0.1	
عامل هزینه	۲-۱-هزینه خرید و ساختTBM و تجهیزات وابسته	0.4	وزن مربوط به هزینه TBM و تاسیسات وابسته همواره ثابت هستند ولی هزینه حفاری به عوامل زیادی از جمله طول تونل وابسته است.
	۲-۲-هزینه حفاری و مصالح مصرفی حین تونلسازی	0.6	
عامل زمان	زمان حفاری و نصب سگمنت	1.0	

جدول ۸- امتیاز برای معیارهای مربوط به عامل زمین شناسی (بر اساس DAUB, 2010)

دستگاه حفاری مکانیزه		کفشک دار	سپر تلسکوپی	تک سپره
نوع سنگ		سنگ سخت (GSI > 65) & UCS = 150 Mpa		
روباره		<1000		
مقاومت تک محوری (مگاپاسکال)	درصد وزنی	+	o	o
شاخص کیفی سنگ		+	o	o
طبقه بندی توده سنگ		+	o	o
هجوم آب در ۱۰ متر از تونل (لیتر بر دقیقه)		+	+	+
ساینده‌گی (*CAI*)		o	o	o
رفتار آماس		+	+	+
فشار نگهداری (بار)		+	+	+
مجموع		**۰.۹۵**	**۰/۷۰**	**۰/۷۰**

در شکل شماره (۱۱) امتیاز عوامل زمین‌شناسی، هزینه‌ای و زمانی برای سه ماشین مختلف پس از ضرب در وزن هر معیار ارائه شده است. امتیازدهی برای شرایط روباره کمتر از ۱۰۰۰ متر با فرض عدم برخورد به شرایط پوسته‌شدگی توده سنگ به انجام رسید که نتیجتاً دستگاه‌های کفشک دار، سپر تلسکوپی و تک سپره به ترتیب صاحب بیشترین امتیاز شده‌اند. دستگاه‌های کفشک دار و سپر تلسکوپی در امتیاز زمان نسبت به دستگاه تک سپره برتری خواهند یافت و از طرفی در توده سنگ سخت، دستگاه کفشک دار امتیاز

بهتری نسبت به نوع سپر تلسکوپی و تک سپره دریافت خواهد نمود. نتیجتاً در شرایطی که در توده سنگ سخت با پدیده پوسته شدگی مواجه نباشیم، انتخاب دستگاه سپر تلسکوپی نسبت به تک سپره ارجحیت خواهد داشت.



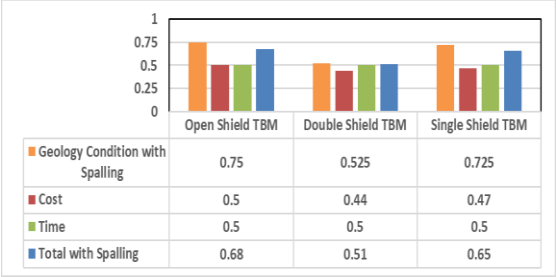
شکل ۱۱- نمودار مربوط به نتایج امتیازدهی به دستگاه‌های حفاری مکانیزه

همچنین برای بررسی اثر پدیده پوسته‌شدگی در انتخاب نوع دستگاه، امتیازدهی به شرایط زمین‌شناسی پیشنهاد گردید که به شرح جدول شماره (۹) می‌باشد.

جدول ۹- پیشنهاد امتیاز برای معیارهای مربوط به عامل زمین شناسی در شرایط بروز پدیده پوسته‌شدگی

دستگاه حفاری مکانیزه		کفشک دار	سپر تلسکوپی	تک سپره
نوع سنگ		سنگ سخت (GSI > 65) & UCS = 150 Mpa		
روباره		>>1000		
مقاومت تک محوری (مگاپاسکال)	درصد وزنی	+	o	o
شاخص کیفی سنگ		+	o	o
طبقه بندی توده سنگ		+	o	o
هجوم آب در ۱۰ متر از تونل (لیتر بر دقیقه)		+	+	+
ساینده‌گی (CAI)		o	o	o
رفتار آماس		+	+	+
فشار نگهداری (بار)		+	+	+
پوسته شدگی	0.2	0	0	1
مجموع		0.75	0.53	0.73

این امتیازدهی مجدداً بر مبنای شکل‌گیری شرایط پوسته شدگی توده سنگ به انجام رسیده است. برای نشان دادن بهتر این امتیازدهی، شکل شماره (۱۲) ترسیم شده است.



شکل ۱۲- نمودار مربوط به نتایج امتیازدهی به دستگاه‌های حفاری مکانیزه

همانطور که مشاهده می‌شود در شرایطی که با پدیده پوسته‌شدگی مواجه باشیم، عملاً انتخاب دستگاه‌های سپر تلسکوپی در اولویت پایین‌تری نسبت به دستگاه‌های تک سپره قرار می‌گیرد. چراکه در شرایط رویارویی با پدیده پوسته‌شدگی، عملاً دستگاه سپر تلسکوپی قادر به بکارگیری جک‌های کفشک برای حفاری همزمان با نصب سگمنت نخواهد بود و مشابه دستگاه‌های تک سپره، جهت حفاری و پیش‌روی نیازمند جک‌های تراست (جک زدن به سگمنت‌های بتنی) می‌باشند و بدلیل هزینه‌های بیشتر این نوع دستگاه ها، عملاً در ارزیابی صورت‌گرفته در جایگاه پایین‌تری قرار خواهند گرفت.

۱۰- نتیجه‌گیری

تغییر سطح تنش ناشی از حفاری مکانیزه در توده سنگ سخت تحت تنش بالا به عنوان نوعی از آسیب و تخریب توده سنگ شناسایی شده است. بروز این پدیده در هنگام استفاده از دستگاه حفاری تونل *(TBM)*، به‌خصوص از نوع کفشک دار، مشکلاتی ایجاد خواهد نمود. دستگاه کفشک دار و سپر تلسکوپی برای حفاری باید به دیواره تونل جک بزنند. بنابراین بروز پدیده پوسته شدگی، شرایط استقرار و جک زدن دستگاه به جداره تونل را با مشکل مواجه می‌سازد و از پیشروی آن جلوگیری می کند. بنابراین لازم است ضمن شناسایی شرایط تشکیل این ناحیه در پیرامون فضای حفاری مکانیزه در توده سنگ سخت، معیاری برای انتخاب نوع دستگاه از این منظر تعریف شود.

دیدریچ در سال ۲۰۰۷ روش *DISL* را برای بررسی پوسته‌شدگی سنگ و تخریب پیرامون فضای حفاری مبتنی بر بکارگیری از معادله شکست تغییریافته هوک و براون[1] ارائه نمود. این روش مبتنی بر معادله شکست تغییریافته هوک و براون می‌باشد. با ارائه این روش امکان مدل‌سازی پروسه تخریب پیرامون فضای حفاری با نرم افزارهای مهندسی فراهم شد. این روش تمایل سنگ سخت برای پوسته شدگی تحت تنش را نشان می‌دهد و از دو بخش شامل شروع تخریب[2] با بالابودن میزان چسبندگی و اصطکاک حداقل و انتقال به حد پوسته شدگی[3] با از دست دادن چسبندگی و افزایش

[1] Generalized Hoek-Brown
[2] Damage Initiation
[3] Spalling Limit

اصطکاک تشکیل یافته است.

در پژوهش حاضر تلاش شد تا بر اساس پارامترهای اصلی حفاری مکانیزه شامل نوع سپر و نحوه پیشروی (با کفشک یا اتکا به سگمنت)، گام حفاری، طول شیلد (فاصله مابین آخرین سگمنت نسبت به جبهه کار)، موقعیت اجرای تزریق تماسی و وزن شیلد دستگاه، شکل‌گیری زون آسیب به صورت پارامتریک برای شرایط مختلف از قطر تونل، عمق و کیفیت سنگ با بکارگیری تحلیل عددی با نرم افزار *MIDAS GTS NX* مورد بررسی قرار گیرد. در خصوص سطح تنش نیز برای تونل‌های با عمق کم ولی با شرایط تکتونیکی فعال ناشی از عملکرد گسل‌های تراستی، مقادیر بالای نسبت تنش افقی به قائم مد نظر قرار گرفت. نسبت تنش افقی به قائم بر اساس عمق قرارگیری تونل و مدول تغییر شکل توده سنگ نیز مطابق با رابطه شئوری[1] تعیین گردید. مقادیر مختلف قطر حفاری به ازای تنش‌های مختلف اعم از روباره کم با تکتونیک فعال و روباره زیاد تا ۲۰۰۰ متر مورد بررسی قرار گرفته است.

بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته و بر اساس آنچه که در بخش‌های قبلی ارائه شد، نتایج زیر حاصل شده است:

۱- حداکثر ضخامت ناحیه تخریب برای قطر ۳ متر و در محدوده عمق ۵۰۰ متری با نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۱٫۵، معادل ۱/۷۵ متر بدست خواهد آمد. بعد از آن بیشترین ضخامت ناحیه آسیب در این قطر با افزایش مقدار نسبت تنش افقی به قائم (معادل ۴) و کاهش عمق تا ۱۵۰ متر معادل ۱/۲۵ متر بدست آمده است. با کاهش مقدار نسبت تنش افقی به قائم و افزایش عمق تونل، ضخامت ناحیه تخریب کاهش یافت. بدین معنا که شکل‌گیری ناحیه تخریب وابستگی زیادی به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم دارد و شرایطی که با منطقه تکتونیزه ناشی از عملکرد گسل‌های معکوس مواجه هستیم، عملاً در عمق‌های کمتر از ۵۰۰ متر، حفاری تونل مکانیزه می‌تواند منجر به شکل‌گیری بیشترین ضخامت ناحیه تخریب گردد. در طرف مقابل ضخامت ناحیه بشدت آسیب دیده وابستگی زیادی به سطح تنش‌های فشاری متناسب با افزایش عمق دارد. به نحوی که بیشترین ضخامت این ناحیه در عمق ۲۰۰۰ متری از سطح زمین شکل گرفته است. این ناحیه منجر به جلوگیری از عملکرد مناسب جک‌های کفشک خواهد شد. در این عمق حداکثر ضخامت ناحیه بشدت آسیب دیده، ۳۲ سانتیمتر بدست آمده است. در دیواره تونل که موقعیت قرارگیری جک‌های کفشک خواهد بود ضخامت ناحیه بشدت آسیب دیده معادل ۲۰ سانتیمتر خواهد بود. با کاهش عمق قرارگیری تونل، از میزان ضخامت این ناحیه نیز کاسته شده است. در عمق‌های کمتر از ۱۰۰۰ متر، عملاً در شرایطی که با مقادیر حتی زیاد نسبت تنش افقی به قائم نیز مواجه باشیم، ناحیه بشدت آسیب دیده تشکیل نخواهد شد.

۲- تحلیل شرایط تشکیل ناحیه تخریب در پیرامون حفاری توده سنگ سخت به روش مکانیزه با قطر ۷ متر، نشان می‌دهد ناحیه بشدت آسیب دیده در جداره تونل بعد از حفاری، برای عمق‌های بالاتر از ۱۰۰۰ متر به میزان حداکثر ۵۳ سانتیمتر شکل می‌گیرد. از طرفی ضخامت کل ناحیه تخریب وابستگی زیادی به نسبت تنش افقی به قائم دارد و در مناطقی که تحت تکتونیک بالا نظیر گسلش از نوع تراستی قرار دارند، و نسبت تنش افقی به قائم بالاتر از ۱ می‌باشد، ضخامت این ناحیه افزایش می‌یابد و حتی در اعماق کم (۱۵۰ متری از سطح زمین)، ضخامت این ناحیه حداکثر معادل ۳/۹ متر بدست آمده است.

۳- حداکثر ضخامت ناحیه تخریب برای قطر ۱۱ متر و در محدوده عمق ۱۵۰ متری با نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۴، معادل ۶/۵ متر بدست خواهد آمد. بعد از آن بیشترین ضخامت ناحیه آسیب در عمق ۱۵۰ متری و با نسبت تنش افقی حداکثر به حداقل ($K_{Hh}=2$) معادل ۵/۱ متر بدست آمده است. با کاهش مقدار نسبت تنش افقی به قائم و افزایش عمق تونل، ضخامت ناحیه تخریب کاهش یافت. در عمق ۵۰۰ متری و با کاهش نسبت تنش افقی به قائم معادل ۱/۵، ضخامت ناحیه تخریب ۴/۵ متر بدست آمده است. در طرف مقابل ضخامت ناحیه بشدت آسیب دیده وابستگی زیادی به سطح تنش‌های فشاری متناسب با افزایش عمق دارد. به نحوی که بیشترین ضخامت این ناحیه در عمق ۲۰۰۰ متری از سطح زمین شکل گرفته است. این ناحیه منجر به جلوگیری از عملکرد مناسب جک‌های کفشک خواهد شد. در این عمق مقدار ضخامت ناحیه بشدت آسیب دیده ۴۵ سانتیمتر بدست آمده است. در دیواره تونل که موقعیت قرارگیری جک‌های کفشک خواهد بود ضخامت ناحیه بشدت آسیب دیده معادل ۴۰ سانتیمتر خواهد بود. با کاهش عمق قرارگیری تونل، از میزان ضخامت این ناحیه نیز کاسته شده است. در عمق‌های کمتر از ۱۰۰۰ متر، عملاً در شرایطی که با مقادیر حتی زیاد نسبت تنش افقی به قائم نیز مواجه باشیم، ناحیه بشدت آسیب دیده تشکیل نخواهد شد.

۴- در صورت بروز پدیده پوسته شدگی، عملاً جک زدن دستگاه سپر تلسکوپی به جداره تونل بدلیل شرایط پوسته شدگی میسر نمی‌باشد و این نوع دستگاه مشابه شرایط کارکرد دستگاه تک سپره می‌بایست با جک زدن به سگمنت های نصب شده حفاری و پیشروی نماید که در صورت بروز پدیده پوسته شدگی، این امکان از دستگاه سپر تلسکوپی صلب می‌شود و با توجه به اینکه دستگاه تک سپره هزینه‌های به مراتب کمتری نسبت به سپر تلسکوپی دارد، لذا انتخاب دستگاه تک سپره در اولویت قرار می‌گیرد.

۵- منطبق بر نتایج این تحقیق، شرایط نفوذپذیری توده سنگ و مشخصات ابزار دقیق (به‌ویژه طول کشش‌سنج بر اساس ضخامت

[1] Sheorey

ناحیه تخریب[1]) به واسطه ضخامت هر یک از زون‌های آسیب در اطراف تونل تغییر خواهد کرد. بر اساس ضخامت تشکیل ناحیه آسیب، در صورت استفاده از ابزار کشیدگی‌سنج، قرارگیری نقطه مبنا برای نصب ابزار تعیین کننده خواهد بود. در توده سنگ سخت تحت تنش بالا و در اقطار ۳ الی ۱۱ متری، ضخامت ناحیه تخریب در مقادیر بالای نسبت تنش افقی به قائم و در روباره‌های کمتر از ۵۰۰ متر، افزایش خواهد یافت. با افزایش عمق و کاهش نسبت تنش افقی به قائم و میل به سمت عدد ۱، مقدار ضخامت این ناحیه کاهش می‌یابد. برای تعیین عمق قرارگیری نقاط مبنا در ابزار کشیدگی‌سنج، برای قطر حفاری ۳ متر، حداقل طول کشیدگی سنج در نقطه مبنا، معادل ۱/۷۵ متر خواهد بود. در قطر ۷ متر حداقل طول کشیدگی‌سنج در نقطه مبنا، معادل ۳/۹ متر است و نهایتاً در قطر ۱۱ متر، حداقل طول کشیدگی‌سنج برای نقطه مبنا معادل ۶/۵ متر خواهد بود.

۱۱- منبع‌ها

[1] Maarefvand, P., Afifipour, M. (2016). Guideline for Numerical Methods in Mining Geomechanical Design (No. 656), Management and Planning Organization of Iran (In Persian).

[2] Diederichs, M.S., Kaiser, P.K., & Eberhardt, E. (2004). Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(5), 785-812. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.02.003

[3] Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2014). DAUB Recommendations for the Selection of Tunnelling Machines. Handbook of Tunnel Engineering II: Basics and Additional Services for Design and Construction, 363-409. DOI: 10.1002/9783433603536.ch11

[4] Harrison, J. P., Hudson, J. A., & Popescu, M. E. (2002). Engineering rock mechanics: Part 2. Illustrative worked examples. Appl. Mech. Rev., 55(2), B30-B31. ISBN: 978-0-08-043010-2

[5] 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 and Mining Sciences, 73, 165-174. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.11.001

[6] Martin, C. D., Kaiser, P. K., & McCreath, D. R. (1999). Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. Canadian Geotechnical Journal, 36(1), 136-151. DOI: 10.1139/t98-072

[7] Martin, C. D. (1997). Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength. Canadian Geotechnical Journal, 34(5), 698-725. DOI: 10.1139/cgj-34-5-698

[8] Perras, M. A., & Diederichs, M. S. (2016). Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(1), 60-74. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.11.004

[9] Blümling, P., Bernier, F., Lebon, P., & Martin, C. D. (2007). The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32(8-14), 588-599. DOI: 10.1016/j.pce.2006.04.034

[10] Tsang, C. F., Bernier, F., & Davies, C. (2005). Geohydromechanical processes in the 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(1), 109-125. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.08.003

[11] Bäckblom, G. (2008). Excavation damage and disturbance in crystalline rock-Results from experiments and analyses. SKB Technical Report TR-08-08. Swedish Nuclear fuel and Waste Management Co.

[12] Jakubick, A. T., & Franz, T. (1993). Vacuum testing of the permeability of the excavation damaged zone. Rock mechanics and Rock engineering, 26(2), 165-182. DOI: 10.1007/BF01023621

[13] Diederichs, M. S. (2007). The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. Canadian Geotechnical Journal, 44(9), 1082-1116. DOI: 10.1139/T07-033

[14] Zoback, M. L., Zoback, M. D., Watts, A., & Schubert, G. (2009). Lithosphere stress and deformation. Crust and lithosphere dynamics: Elsevier, 253-273. DOI: 10.1029/RG025i006p01245

[15] Hoek, E. (2001). Big tunnels in bad rock. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(9), 726-740. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:9(726)

[16] Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2000). Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. Tunnelling and underground space technology, 15(2), 187-213. DOI: 10.1016/S0886-7798(00)00046-8

[17] Tatiya, R. (2005). Civil excavations and tunnelling: A practical guide. Thomas Telford. DOI: 10.1680/ceatapg.61538.bm

[18] Hajiabdolmajid, V. (2017). Modeling brittle failure of rock. In Rock Mechanics and Engineering; 1st revision, CRC Press. ISBN: 9781315364261

[19] Kaiser, P. K., Diederichs, M. S., Martin, C. D., Sharp, J., & Steiner, W. (2000, November). Underground works in hard rock tunnelling and mining.

[1] EDZ

Paper presented at the Geo-Eng2000, Melbourne, Australia, pp. 841-926.
[20] Kaiser, P.K., Diederichs, M.S., Martin, C.D., Sharp, J., Steiner, W., 2000. Underground Works in Hard Rock Tunnelling and Mining. Paper presented at the Geo-Eng2000, Melbourne, Australia, pp. 841-926.
[21] Schmertmann, J. H. (1962). An experimental study of the development of cohesion and friction with axial strain in saturated cohesive soils. Northwestern University.
[22] Sheorey, P. R. (1994). A Theory for in–Situ Stress in Isotropic and Transversely Isotropic Rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 31(1). 23–34.
[23] Nemat-Nasser, S., & Horii, H. (1982). Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 87(B8), 6805-6821. DOI: 10.1029/JB087iB08p06805
[24] Bieniawski, Z. T. (1967, October). Mechanism of brittle fracture of rock: part I—theory of the fracture process. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 4(4), 395-406. DOI: 10.1016/0148-9062(67)90030-7
[25] Brace, W. F., Paulding Jr, B. W., & Scholz, C. H. (1966). Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. Journal of Geophysical Research, 71(16), 3939-3953. DOI: 10.1029/JZ071i016p03939
[26] Schock, R. N., Heard, H. C., & Stephens, D. R. (1973). Stress-strain behavior of a granodiorite and two graywackes on compression to 20 kilobars. Journal of Geophysical Research, 78(26), 5922-5941. DOI: 10.1029/JB078i026p05922
[27]