

بررسی روش‌های طراحی الگوی بهینه چال‌زنی و آتش‌کاری تونل در برش‌های موازی تحت تاثیر تغییرات شاخص‌های اقتصادی طرح

پژوهشی

- احسان صالحی^{۱*}؛ محمد غفوری مقدم^۲؛ جعفر خانی^۳؛ محسن حاجی حسنی^۴؛ سینا رستم‌آبادی^۵
- ۱- کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ehsansalehi@mi.iut.ac.ir
- ۲- کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، m.ghafori.m@gmail.com
- ۳- دانشجوی دکتری؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، jafar.khani@modares.ac.ir
- ۴- استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، m.hajihassani@urmia.ac.ir
- ۵- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان؛ واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، s.rostamabadi@srbiau.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

شماره صفحات: ۴۱۳ تا ۴۳۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2022.11927.1455

واژگان کلیدی	چکیده
الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری آنفو و امولایت روش انتقال انرژی خرج ویژه و حفاری ویژه روش نروژی و سوئدی	در این تحقیق به منظور مقایسه الگوهای چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل از دو پارامتر خرج ویژه و حفاری ویژه استفاده شده است. برای خرج‌گذاری چال‌های جانمایی شده بر روی سطح مقطع تونل‌ها از دو ماده منفجره آنفو و امولایت به منظور پیشروی سه متری استفاده شده است. در مجموع تعداد ۸۸ طرح بدون استفاده از نرم‌افزارهای طراحی برای سه نوع سنگ آهک، ماسه سنگ و مارن آماده شد. در حالت کلی از جنبه مقایسه مقادیر مشخصه‌ها، نتایج نشان داده است که مقدار تغییرات حفاری ویژه ($\frac{m}{m^3}$) و خرج ویژه ($\frac{Kg}{m^3}$) با توجه به مساحت سطح مقطع‌های انتخاب شده (۱۹ تا ۱۵۰ مترمربع) برای روش انتقال انرژی در بازه تغییرات عددی ۰/۵ تا ۲/۵ قرار می‌گیرد. همچنین برای این روش تعداد چال‌های جانمایی شده نیز از ۴۰ تا ۱۳۰ عدد بوده است. مقدار تغییرات حفاری ویژه برای روش نروژی از ۱ تا ۲/۵ متر بر مترمکعب و مقدار خرج ویژه از ۱/۲ تا ۲/۵ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. همچنین در روش سوئدی بازه تغییرات حفاری ویژه از ۰/۷ تا ۲ متر بر مترمکعب و برای خرج ویژه تغییرات از ۰/۷۵ تا ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. تغییرات تعداد چال برای دو روش نروژی و سوئدی نزدیک به هم از ۳۰ تا ۱۷۰ عدد بدست آمده است. علاوه بر مطالب بیان شده، مقدار گل‌گذاری چال‌ها در بخش‌های مختلف سینه کار تونل برای روش سوئدی کمتر از روش نروژی و روش انتقال انرژی است.

مناسب برای حمل و نقل، عدم انفجار ثانویه و غیره توجه داشت که همه‌ی این عوامل و مشکلات را می‌توان با یک الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری مناسب بهینه کرد. روش‌های گوناگونی برای طراحی الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل ارائه شده است. این روش‌ها شامل روش انتقال انرژی، روش

۱- مقدمه

در حفاری تونل به روش انفجار، باید به عواملی از قبیل میزان پیشروی، بیش‌شکست در دیواره تونل، میزان لرزش زمین و هوا، بهینه نمودن حفاری ویژه و خرج ویژه، خردایش

در مطالعه این محققین شرایط آزمایش به گونه‌ای بوده است که چال‌ها توسط صفحات فولادی در اطراف نمونه سنگ گرانیتی حبس شده‌اند. در طول انفجار از یک دوربین با سرعت بالا برای فیلمبرداری فرآیند انفجار و نظارت بر خروج گاز استفاده شده است. آزمایش‌های انجام شده، ثابت کرده‌اند که گل‌گذاری چال‌های انفجار در صورتی که فاصله‌ای بین ماده منفجره و گل‌گذاری وجود نداشته باشد (گل‌گذاری کامل)، قطعات سنگ حاصل از انفجار ریزتر از زمانی خواهد بود که یک فاصله بین ماده منفجره و گل‌گذاری در چال ایجاد شده باشد (گل‌گذاری جزئی یا بخشی). همچنین، در گل‌گذاری جزئی انجام شده در چال، خروج سریع گاز از داخل چال انفجاری مشاهده شده است. زارع و برونلند، به بررسی الگوهای چال‌زنی و آتش‌کاری تونل با توجه به روش‌های سوئدی و نروژی با برش موازی پرداخته‌اند (Zare & Bruland, 2006). در هر دو مدل، در قسمت محیطی از آتش‌کاری کنترل شده و در قسمت برش از چال خالی استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در روش سوئدی، مقدار بارسنگ در قسمت پیشروی زیاد است، به همین دلیل تعداد چال کمتری استفاده می‌شود و در مدل نروژی، مقدار خرج‌گذاری چال‌ها نسبت به مدل سوئدی کمتر گزارش شده است. ایلماز و اونلو به بررسی کاربرد روش اصلاح شده هلمبرگ-پرسون در طراحی الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری تونل پرداخته‌اند (Yilmaz & Unlu, 2014). در مطالعه این محققین نتایج تحقیق نشان می‌دهد علاوه بر اینکه از روش اصلاح شده هلمبرگ-پرسون در طراحی چال‌های محیطی در زمینه‌ی آتش‌کاری کنترل شده استفاده کرد، از این روش می‌توان برای انتخاب ترکیبات مناسب بین چال و خرج‌گذاری چال‌ها استفاده کرد. کیو و همکاران، به بررسی مدل‌سازی عددی آتش‌کاری برش موازی در تونل پرداخته‌اند (Qu, et al., 2008). در مطالعه این محققین از چال‌هایی با قطر ۴۰ میلی‌متر و عمق ۱/۸ تا ۲/۲ متری استفاده شده است. در طراحی‌های انجام شده از چال خالی نیز استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داده است که در فرآیند انفجار با برش موازی، انفجار چال‌های خرج‌گذاری شده باعث برهم‌کنش موج تنش با دیواره چال خالی می‌شود و دلیل اصلی ترک‌خوردگی و جابجایی اولیه سنگ است. همچنین،

نروژی (NTNU) و در نهایت روش سوئدی (نیترونوبل) بوده است (Soroush, et al., 2015). برای طراحی الگوهای چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل با توجه به اینکه فقط یک سطح آزاد وجود دارد، معمولاً سطح مقطع را به سه قسمت برش، محیط و پیشروی تقسیم‌بندی می‌کنند (Zare & Bruland, 2006). انفجارهای اولیه در قسمت برش به منظور ایجاد روزه‌ای در سطح مقطع تونل ایجاد می‌شود (Chen, et al., 2021; Cheng, et al., 2021; Xie, et al., 2017). محققان مختلفی به بررسی طراحی الگوی انفجار با توجه به ارتعاشات ناشی از انفجار (Bakhshandeh, Amnieh, et al., 2012; Kuzu & Guclu, 2009) کردن پارامترهای انفجار (Salmi & Sellers, 2021; Salum & Murthy, 2019; Song, et al., 2019) سنگ و خسارات ناشی از آن (Wang, et al., 2019; Zhang, et al., 2021) استفاده از چاشنی‌های الکترونیکی پیشرفته (Iwano, et al., 2020)، بررسی الگوی انفجار در قسمت محیطی برای کمترین آسیب به توده‌سنگ (Ma et al., 2020; J. Wang et al., 2018) و پس شکست‌های ایجاد شده در تونل (Chen, et al., 2021; Dey & Raitani, 2003; Mottahedi, et al., 2019; Science, 2019)؛ آرایه نرم‌افزار برای طراحی الگوهای حفاری (Alaei, R, 2020)؛ خردایش (Bahrami, et al., 2011; Persson, 1997) و غیره پرداخته‌اند. ژانگ و همکاران، به بررسی طراحی ابتکاری بخش برش موازی با استفاده از مدل‌سازی عددی و تجربی پرداخته‌اند (Zhang, et al., 2022). در مطالعه این محققین با توجه به اینکه در طراحی و جانمایی چال‌ها در بخش برش‌های معمولی بعد از انفجار، پرتاب کامل قطعات حاصل از انفجار و ایجاد سطح آزاد کافی دشوار است، به بررسی خرج‌گذاری قسمتی از چال‌های خالی به منظور جهت دادن حرکت سنگ، پرداخته شده است. در طراحی انجام شده برای برش‌های موازی از دو چال خالی استفاده شده است. نتایج طراحی‌های انجام شده نشان می‌دهد، علاوه بر اینکه تمام قطعات حاصل از انفجار به بیرون پرتاب شده است، نتایج قابل قبولی برای بهبود پیشروی و کنترل ارتعاش ناشی از انفجار به دست آمده است. ژانگ و همکاران، به بررسی آزمایشگاهی گل‌گذاری (دستی) چال‌های آتش‌کاری بر خردایش قطعات سنگی بدست آمده از انفجار پرداخته‌اند (Zhang, et al., 2021).

این معدن مورد بررسی قرار گرفته است و با تغییر تعداد چال‌ها و همچنین تغییر میزان مواد ناریه مورد استفاده در چال‌ها با آزمون سعی و خطا به بهترین الگوی ممکن و مناسب برای این معدن دست یافته‌اند. بر اساس این الگوی پیشنهاد شده، مصرف مواد منفجره (امولسیون) در تونل‌های پیشروی در هر مرحله از ۱۲ کیلوگرم به ۶/۵ کیلوگرم اصلاح شده به علاوه در بخش بونکرها که قبلاً در هر مرحله انفجار ۷/۵ کیلوگرم امولسیون مصرف شده است این رقم به ۴ کیلوگرم کاهش یافته است. اسدی و تاجی، به بررسی پیش‌بینی بیش‌شکست در تونل‌های دسترسی پردیس با توجه به عملیات آتش‌باری پرداخته‌اند (Asadi, et al, 2014). در این تحقیق پدیده بیش شکست ناشی از حفر تونل توسط انفجار در تونل‌های دسترسی پردیس مورد بررسی قرار گرفته است که با شناخت عوامل و پارامترهای موثر از جمله ویژگی‌های توده‌سنگ، خصوصیات مواد منفجره، پارامترهای طراحی انفجار و تأثیر هندسه کارگاه، روش‌های پیش‌بینی و کنترل بیش شکست را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. با توجه به نتایج آتش‌باری‌ها، نوع خرج و مقدار خرج ویژه، دقت حفاری، نحوه شارژ چال‌ها و خصوصیات توده‌سنگ از جمله فاکتورهای موثر در ایجاد بیش شکست در تونل پردیس بوده و از موثرترین راهکارها برای کاهش این پدیده در پردیس عواملی همچون ترسیم خط راهنما، استفاده از کورتکس برای چال‌های کانتور، تناسب خرج ویژه با توجه به توده‌سنگ، کاهش طول پیشروی مخصوصاً در چال‌های قائم و توقف سایر عملیات‌ها در حین شارژ چال‌ها اشاره شده است. همچنین همبستگی میزان مصرف آنفو و مقدار خرج ویژه با بیش شکست مورد بررسی قرار گرفته است که در این پروژه به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۸۵ به دست آمده است. شاه حسینی و همکاران، به بررسی تأثیر پارامترهای انفجار بر شکست دینامیکی توده‌سنگ اطراف تونل با استفاده از روش‌های عددی پرداخته‌اند (Sahhoseni, et al, 2013). در این تحقیق اشاره شده است که مقرون به صرفه‌ترین روش برای حفاری تونل در توده‌سنگ‌های سخت و مقاوم، در حالتی که مقاومت فشاری تک محوری بیش از 200 MPa باشد، روش چال‌زنی و آتش‌باری است. مهم‌ترین نگرانی در این روش، شکست ناخواسته القایی به وسیله انفجار در خارج محیط تونل

چال‌های خالی اگر به‌درستی طراحی شوند، سطح و فضای آزاد خوبی را برای انفجار چال‌های خرج‌گذاری شده مجاور فراهم می‌کنند که کمک قابل توجهی در فرآیند تشکیل بخش برش می‌کنند. از طرفی در فرایند انفجار، همپوشانی تنش ابتدا در وسط دو چال خرج‌گذاری شده مجاور هم اتفاق می‌افتد، زیرا چال‌های برش خرج‌گذاری شده به طور همزمان شروع می‌شوند. بنابراین، پیشنهاد شده است که چال‌های خالی در وسط دو چال خرج‌گذاری شده مجاور قرار گیرند. کیانی نژاد و همکاران، به بررسی ارایه الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری مناسب در پیشروی تونل‌های سنگی با هدف کاهش خسارات ناشی از حفر تونل پرداخته‌اند (Kianinejad, et al, 2017). در مطالعه صورت گرفته توسط این محققین، یک تونل سنگی دنباله لایه با نام تونل $k12$ از مجموعه معدنی زغال سنگ طزره مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به روش‌های موجود، اطلاعات زمین شناسی و پارامترهای فنی استخراج، روش ساروس برای انفجار تونل‌های کوچک مقطع انتخاب شده است که خرج ویژه در حدود ۳۵ درصد کاهش پیدا کرده است. هویدا و همکاران، به بررسی بهینه‌سازی عملیات انفجار اوکلن معدن زغال سنگ رزمجای غربی با ملاحظه کاهش هزینه پیشروی پرداخته‌اند (Hovida, et al, 2016). در تحقیق صورت گرفته، بهینه‌سازی عملیات انفجار و حفاری در جهت جلوگیری از انجام آتش‌باری ثانویه و کاهش تخریب دیواره و سقف از اهداف اصلی بوده است. در این تحقیق پس از مطالعه دقیق وضعیت فعلی طراحی و عملیات آتش‌باری در محدوده مورد مطالعه، کلیه پارامترهای موثر شامل خصوصیات سنگ، طول چال، خرج ویژه، عمق پیشروی و غیره در ۱۲ انفجار برداشت شده است. در نهایت به کمک نرم‌افزار تحلیل آماری $Spss$ عوامل کاهش مقدار راندمان پیشروی و پارامترهای موثر مشخص شده است. به کمک روش بهینه‌سازی ثانویه طول چال بهینه در کف تونل ۱/۶ متر و خرج ویژه بهینه با مقدار ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب پیشنهاد شده است. هاجری و همکاران، به بررسی سیستم آتش‌باری و بهینه‌سازی الگوی آتش‌باری معدن مس قلعه زری پرداخته‌اند (Hajari, et al., 2017). در این پروژه هدف اصلی بهینه‌سازی الگوی آتش‌باری در معدن زیرزمینی بوده است. به منظور نیل به این هدف، سیستم آتش‌باری در

آتش‌کاری در انواع سطح مقطع‌های کاربردی می‌باشد. به منظور بررسی پارامترهای اقتصادی الگوهای چالزنی و آتش‌کاری در تونل از قبیل خرج ویژه، حفاری ویژه و تعداد چال برای طراحی بهینه در روش‌های مختلف ارایه شده، نیاز به بررسی تعداد سطح مقطع‌های بیشتر با انواع مواد منفجره‌ی موجود در کشور است. در این تحقیق، به بررسی تعیین روش‌های طراحی الگوی چالزنی و آتش‌کاری تونل در برش‌های موازی با توجه به سه نوع سنگ آهک، ماسه سنگ و مارن در ۸ سطح مقطع با اشکال مختلفی برای دو ماده منفجره آنفو و امولسیون پرداخته شد. در مجموع ۸۸ طرح بدون استفاده از نرم‌افزارهای طراحی و با توجه به پیشروی ۳ متری به منظور مقایسه بین روش‌ها آماده شد. همچنین، در ارتباط با مقدار گل‌گذاری چال‌ها در بخش‌های مختلف سینه‌کار برای تمام روش‌ها بحث شده است. قطر چال برای روش نروژی ۴۸ میلی‌متر و برای دو روش انتقال انرژی و روش‌های سوئدی ۵۱ میلی‌متر بوده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- توده‌سنگ و مشخصات هندسی تونل‌ها

با توجه به جدول ۱، در این تحقیق از ۳ سنگ آهک، ماسه‌سنگ و مارن استفاده شده است. مقدار پیشروی برای تمام روش‌های طراحی الگوی چالزنی و آتش‌کاری در تونل ۳ متر به منظور مقایسه بین روش‌ها در نظر گرفته شده است. در حالت مطلوب مقدار پیشروی (L)، ۹۵ درصد طول چال (H) است. در نهایت مقدار طول چال در برش موازی برابر با $3/2$ متر در نظر گرفته شده است ($Ostovar, 2017$).

$$L = 0.95 \times H \rightarrow H = 3.2 \quad (1)$$

با توجه به جدول ۲، مشخصات هندسی تونل‌های مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب به صورت نعل اسبی، دایره‌ای و D شکل بوده است.

۲-۲- خرج‌گذاری چال‌ها

در این تحقیق از دو ماده منفجره آنفو و امولسیون کارتریجی به عنوان خرج اصلی چال‌ها استفاده شده است. طول فشنگ‌های امولسیون استفاده شده در محاسبات برابر با 0.3 متر است.

قطر خرج‌های امولسیون مورد استفاده در چال‌های

می‌باشد. هدف اصلی تحقیق، شناخت و بررسی تاثیر پارامترهای انفجار بر شکست دینامیکی در توده‌سنگ اطراف تونل می‌باشد و در راستای نیل به این هدف دو الگوی آتش‌باری (معمولی و کنترل شده) طراحی و شکست القایی در اثر این الگوها مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از نرم‌افزار $UDEC$ جهت مدل‌سازی استفاده شده است. برای این منظور دو الگوی آتش‌باری (معمولی و کنترل شده) طراحی شده و چال‌های محیطی این الگوها، با استفاده از اعمال بار دینامیکی در محل چال‌ها شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از مواد منفجره قوی و با چگالی و سرعت بالا در طراحی الگوی انفجاری چال‌های محیطی باعث ایجاد شکست و تنش القایی بیشتر در اطراف تونل می‌شود به طوری که تنش‌های القایی در اثر انفجار معمولی بیشتر تحت تاثیر موج ضربه و در مورد آتش‌باری آرام متأثر از تنش‌های القایی ناشی از توزیع مجدد تنش است. همچنین تغییرات مربوط به حداکثر سرعت ذره‌ای در توده‌سنگ اطراف تونل و کرنش‌های اعمالی و شدت و میزان بازشدگی درزه‌ها پس از انفجار نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

با توجه به بررسی تحقیقات صورت گرفته، اکثر مطالعات انجام شده در طراحی الگوی چالزنی و آتش‌کاری تونل، برای یک سطح مقطع خاص و یا بخشی از قسمت سینه‌کار تونل صورت گرفته است. در این مطالعات، انواع روش‌های ارایه شده برای طراحی الگوهای چالزنی و آتش‌کاری با توجه به پارامترهای تغییر جنس سنگ، سطح مقطع با اشکال مختلف، نوع ماده منفجره و غیره مورد بررسی قرار نگرفته است. علاوه بر مطالب بیان شده، با توجه به مشکلاتی از قبیل خردایش نامناسب، پرتاب سنگ، لرزش زمین، بیش شکست و پس شکست‌ها در قسمت محیطی تونل و غیره، بهینه کردن الگوهای چالزنی و آتش‌کاری در تونل از اهمیت بالایی برخوردار است. در طول مسیر تونل، تغییرات خواص ژئومکانیکی سنگ باعث می‌شود که در عملیات چالزنی و آتش‌کاری فقط از یک طرح برای جانمایی چال‌ها بر روی سطح مقطع تونل استفاده نشود؛ به همین دلیل انتخاب بهینه روش چالزنی و آتش‌کاری در تونل سخت و دشوار است. از اهداف مهم در این مطالعه، بررسی و مقایسه انواع روش‌های طراحی الگوی چالزنی و

۴۸ میلی‌متر و در هنگام استفاده از ماده منفجره آنفو، قطر خرج با قطر چال یکسان در نظر گرفته شده است. برای روش نروژی، بدلیل استفاده از ماده منفجره آنفو با هوای فشرده، قطر خرج مورد استفاده در چال با قطر چال انفجاری ۴۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین برای روش‌های سوئدی به دلیل متفاوت بودن تراکم خرج در ته چال و میان چال، از ماده منفجره امولایت برای خرج‌گذاری چال‌ها استفاده شده است.

تونل برابر با ۲۲، ۲۷، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ میلی‌متر بوده است (Parchin, 2015) و مطابق با رابطه (۲)، تراکم خرج در چال، متناسب با قطر خرج محاسبه می‌شود.

$$I = A \times \rho_{Explosive} \quad (2)$$

در رابطه ۲، پارامتر A سطح مقطع خرج مورد استفاده و $\rho_{Explosive}$ چگالی خرج می‌باشد. خصوصیات ماده منفجره مصرفی در جدول ۳، ارایه شده است. در روش انتقال انرژي، قطر خرج مورد استفاده در بخش پیشروی و برش با فرض فشرده شدن خرج در چال

جدول ۱- پارامترهای مربوط به جنس سنگ

جرم مخصوص (kg/m^3)	سرعت موج (m/s)	پارامترها		ثابت سنگ (kg/m^3)	نوع سنگ
		امیدانس ($10^6 kg/m^2s$)	انرژی سطحی (kJ/m^2)		
۲۶۰۰	۴۰۰۰	۱۰/۴	۱/۴۷	۰/۴	آهک
۲۲۵۰	۲۷۵۰	۶/۱۹	۱/۱۸	۰/۴	ماسه سنگ
۲۵۵۰	۲۵۰۰	۶/۳۷	۱/۱۰	۰/۴	مارن

جدول ۲- مشخصات هندسی تونل‌های انتخاب شده

سطح مقطع تونل (m^2)	پارامترها			
	شکل تونل	عرض تونل (m)	ارتفاع قوس (m)	طول قوس تونل (m)
۷۶	نعل اسبی شکل	۱۵/۸۴	۶	۲۱/۳۳
۶۵	نعل اسبی شکل	۱۲	۵/۵	۲۰/۱
۵۰	نعل اسبی شکل	۱۱	۶	۱۸
۴۸	شکل D	۸	۲/۳۸	۹/۸۵
۴۰	شکل D	۷	۱/۷	۸
۳۲	نعل اسبی شکل	۷/۵	۵/۳	۱۵
۲۸	دایره‌ای	۶	-	-
۱۹	شکل D	۴/۵	۰/۵	۴/۶۵

جدول ۳- خصوصیات ماده منفجره مصرفی (Parchin, 2015)

انرژی مخصوص (Mj/kg)	ضریب امیدانس ($10^6 kg/m^2s$)	وزن مخصوص (kg/m^3)	نوع ماده منفجره
۳/۷	۳/۰۴	۹۵۰	آنفو
۴/۵۲	۵/۴	۱۲۰۰	امولایت

۲-۳- روش‌های طراحی الگوی چالزنی و آتش‌کاری تونل با برش موازی

به طور کلی، روش‌های مختلفی برای طراحی الگوی چالزنی و آتش‌کاری سینه‌کارهای تونلی وجود دارد که عموماً به دو صورت طراحی با برش‌های موازی و برش‌های زاویه‌ای توسعه یافته‌اند. در این تحقیق از روش‌های طراحی با برش موازی استفاده شده است. از جمله روش‌هایی که به صورت برش موازی تعریف شده‌اند، می‌توان به روش انتقال انرژی، روش نروژی و از روش‌های سوئدی، روش هلمبرگ-پرسون، الافسون و روش کونیا را نام برد. روش انتقال انرژی (EBM) یک روش تئوریک بوده که بر اساس اصل انتقال انرژی انفجار به سنگ توسعه یافته است (Soroush, et al., 2015). در این روش، ابتدا لازم است مشخص شود چه مقدار از انرژی ماده منفجره به سنگ انتقال می‌یابد. قانون انتقال انرژی تابعی از کیفیت ماده منفجره، سنگ دریافت کننده انرژی (ضریب امپدانس) و کیفیت خرج‌گذاری (ضریب جفت‌شدگی) است. در روش انتقال انرژی برای بخش برش، فاصله بین چال‌های خرج‌گذاری شده تا چال خالی به صورت تابعی از قطر چال خالی محاسبه می‌شود. به‌طوریکه هر چال انفجاری باید سطح آزاد ایجاد شده توسط چال خالی را حداقل تحت زاویه ۴۵ تا ۵۰ درجه ببیند. همچنین، حجم چال خالی باید فضای لازم برای افزایش حجم سنگ‌های شکسته شده را داشته باشد. در محاسبه فاصله بین چال‌های انفجاری و چال خالی ایجاد شده، این فرض بنا شده است که سنگ‌های شکسته شده مربوط به هر چال باید قبل از انفجار چال بعدی جابجا شوند. همچنین، نظر به اینکه فضای کافی برای حرکت سنگ‌های حاصل از انفجار وجود ندارد، حداکثر ابعاد سنگ‌های حاصل شده از انفجار در قسمت برش برابر ۰/۱ متر در نظر گرفته می‌شود. در روش نروژی با توجه به پارامتر قابلیت آتش‌کاری توده‌سنگ، برای طراحی جانمایی چال‌ها در قسمت برش، در ابتدا با توجه به طول چال‌های حفاری شده در سینه‌کار، مقدار مساحت لازم برای قسمت برش به منظور انتخاب قطر چال خالی محاسبه می‌شود. و در ادامه بار سنگ برای چهار چال اول متناسب با قطر چال خالی محاسبه می‌شود. همچنین، برای جانمایی چال‌های دیگر بخش برش، بارسنگ با توجه به عرض پایه فضای آزاد تعیین می‌شود. با توجه به جدول ۱ و طبقه‌بندی SPR برای

جنس سنگ آهک قابلیت آتش‌کاری خوب و برای ماسه سنگ قابلیت آتش‌کاری ضعیف پیشنهاد شده است (Zare & Bruland, 2006). در این تحقیق، با توجه به نزدیک بودن خواص ژئومکانیکی سنگ مارن و ماسه سنگ، برای سنگ مارن هم قابلیت آتش‌کاری ضعیف در نظر گرفته شده است. در روش‌های سوئدی، از برش چهارم مقطعی با چال‌های موازی استفاده می‌شود. اگرچه چگونگی شکست سنگ و میزان خردشدگی به شدت بستگی به نوع مواد منفجره، کیفیت سنگ، شرایط خرج‌گذاری و آتش‌کاری دارد، با این حال فاصله مرکز به مرکز چال‌های انفجاری و چال خالی (بار سنگ اولین برش) می‌تواند تأثیر اساسی در نتیجه انفجار داشته باشد. در روش هلمبرگ-پرسون، مقدار بار سنگ و تراکم خطی برای چهار چال اول برش به صورت رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌شود. همچنین، برای محاسبه بار سنگ، برای چال‌های باقی مانده روش هلمبرگ از رابطه ۵ استفاده می‌شود.

$$B = 1.7D_{burn\ hole} - E_p \quad (۳)$$

$$I_1 = 55 \times D_{burn\ hole} \times \left[\frac{B}{D_{burn\ hole}} \right]^{1.5} \times \frac{1}{\left[B - \frac{D_{burn\ hole}}{2} \right] \times PRP_{ANFO}} \quad (۴)$$

$$B = 8.8 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{x \times I_1 \times PRP_{ANFO}}{D_{explosive\ hole} \times C}} \quad (۵)$$

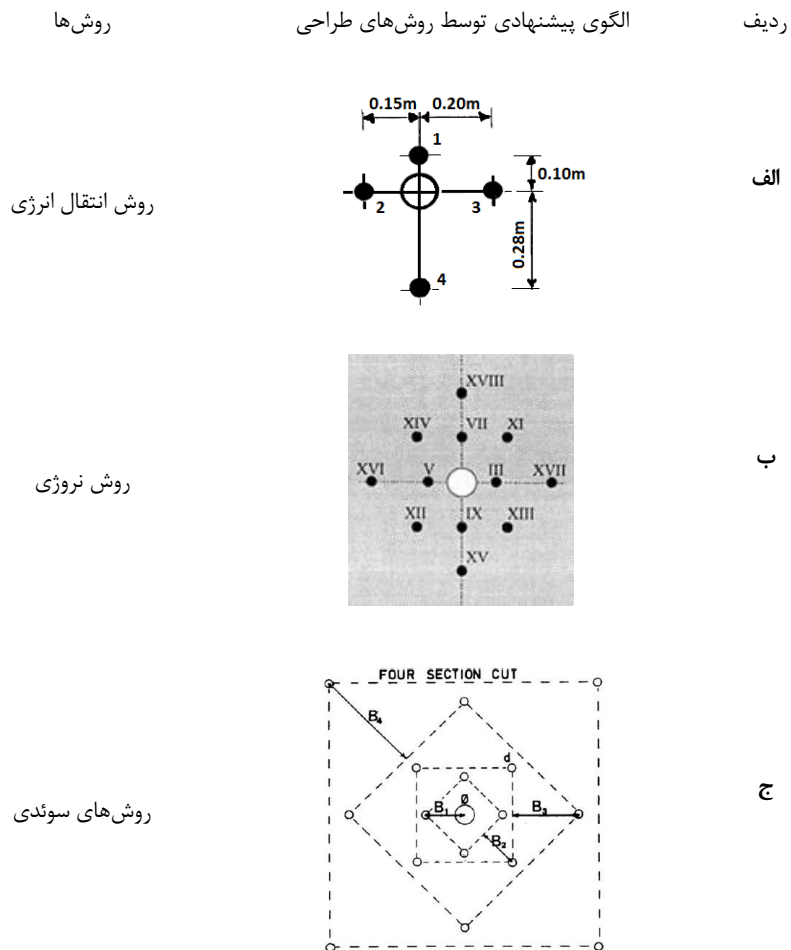
در رابطه‌های ارائه شده، I_1 تمرکز خطی خرج (kg/m) ، E_p خطای چالزنی (m) ، H عمق چال (m) ، $D_{explosive\ hole}$ قطر چال انفجاری بر حسب میلی‌متر، $D_{burn\ hole}$ قطر چال خالی بر حسب میلی‌متر، C ثابت سنگ و PRP_{ANFO} قدرت وزنی نسبی ماده منفجره نسبت به آنفو و B بار سنگ است. در ادامه، برای طراحی فاصله بین چال‌ها در قسمت برش روش الافسون، می‌توان از جدول ۴، استفاده کرد. همچنین در این روش برای محاسبه تراکم خرج چال در چهار چال اول برش، متناسب با قطر چال خالی و فاصله مرکز به مرکز چال خالی با چال‌های خرج‌گذاری شده، مقدار تراکم چال محاسبه می‌شود.

در ادامه برای محاسبه تراکم سایر چال‌های برش، متناسب با بارسنگ و فضای خالی ایجاد شده از مراحل قبل، مقدار تراکم چال محاسبه می‌شود. در روش کونیا، برای

طراحی قسمت برش، از روش الفسون استفاده می‌شود. همچنین در شکل ۱، با توجه به بار سنگ محاسبه شده در هر روش، جانمایی چال‌ها در قسمت برش انجام می‌شود.

جدول ۴- محاسبات مربوط به بخش برش در روش الفسون

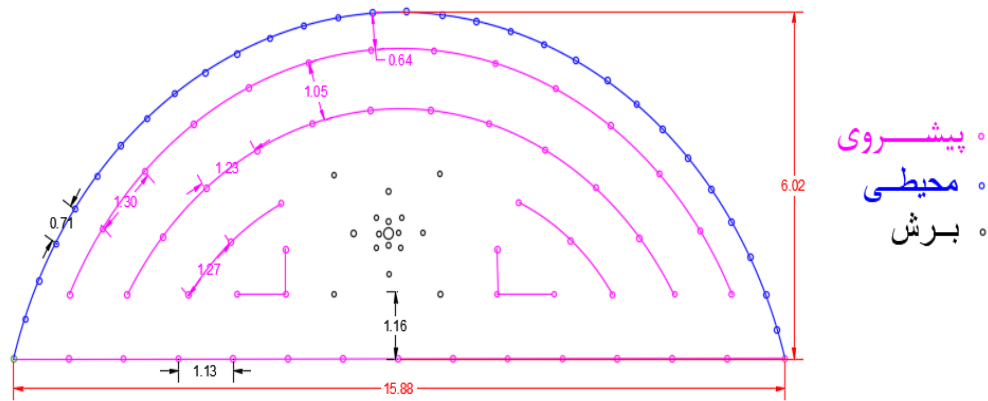
شماره مقطع	بار سنگ	عرض باز شده
۱	$B_1 = 1.5D_{burn\ hole}$	$X_1 = \sqrt{2}B_1$
۲	$B_2 = \sqrt{2}B_1$	$X_2 = \sqrt{2}B_2 \times 1.5$
۳	$B_3 = \sqrt{2}B_2 \times 1.5$	$X_3 = \sqrt{2}B_3 \times 1.5$
۴	$B_4 = 2B_3 \times 1.5$	$X_4 = \sqrt{2}B_4 \times 1.5$



شکل ۱- آرایش چال‌ها در قسمت برش برای انواع روش‌های طراحی الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل (Hopler, 2010; Zare & Bruland, 2006; Lopez, et al., 1995)

در روش انتقال انرژی مقدار بار سنگ محاسباتی در قسمت پیشروی برابر با فاصله جناحی بین چال‌ها است. در صورتی که در روش نیروی بار سنگ متناسب با قابلیت آتش‌کاری سنگ، مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود. برای روش‌های سوئدی، مقدار بار سنگ برای روش کونیا، هلمبرگ و روش الافسون به ترتیب طبق رابطه‌های ۶، ۷ و ۸ محاسبه می‌شود.

با توجه به شکل ۲، سینه‌کار تونل علاوه بر بخش برش، به دو بخش پیشروی و محیطی تقسیم می‌شود. در بخش پیشروی، به سبب اینکه در اثر انفجار چال‌های برش، سطح آزاد جدیدی به وجود آمده است و فضای تقریباً کافی برای شکستن سنگ‌ها وجود دارد، ابعاد بزرگ‌ترین قطعه سنگ حاصل از انفجار ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲- طراحی الگوی چالزنی و آتش‌کاری تونل بر سطح مقطع تونل

تمام روش‌های طراحی، از ماده منفجره امولسیون با قطر ۲۲ تا ۳۰ میلی‌متر در چال‌های انفجاری با قطر ۵۱ و ۴۸ میلی‌متر به منظور آسیب کمتر به دیواره و سقف تونل استفاده شده است. برای اجرای آتش‌کاری کننتوری در بخش محیطی، باید قطر خرج بصورت ۵۰ درصد قطر چال و یا کمتر از ۵۰ درصد در نظر گرفته شود. همچنین، نسبت بین فاصله جناحی چال‌ها به بار سنگ باید برابر با ۰/۸ متر در نظر گرفته شود. معمولاً در روش‌های سوئدی، با توجه به فرض خرج‌گذاری کل چال، در یک چال با عمق ۳/۲ متری به مقدار ۲/۷ متر چال خرج‌گذاری می‌شود. برای روش انتقال انرژی با توجه به جدول ۱ و جنس سنگ، مقدار خرج‌گذاری چال‌های محیطی بر حسب متر محاسبه می‌شود. در روش نیروی تراکم خرج‌گذاری در چال‌های محیطی، ۲۰ تا ۲۵ درصد تراکم خرج‌های معمولی در نظر گرفته می‌شود (Zare & Bruland, 2006).

$$B = 0.012 \left[\frac{2\rho_e}{\rho_r} + 1.5 \right] \times D_{charge \ diameter} \quad (۶)$$

$$B_{max} = 0.9 \sqrt{\frac{q_1 \times PRP_{ANFO}}{\bar{C} \times f(S/B)}} \quad (۷)$$

$$B = 0.88 \times I^{0.35} \quad (۸)$$

پارامترهای ρ_e به عنوان جرم مخصوص ماده منفجره (g/cm^3) ، ρ_r جرم مخصوص سنگ (g/cm^3) ، $D_{charge \ diameter}$ قطر ماده منفجره (mm) ، f ضریب تصحیح، (S/B) به عنوان نسبت فاصله جناحی به بار سنگ، C ثابت سنگ، I تراکم خرج ته‌چال در نظر گرفته می‌شود. در بخش محیطی، به دلیل وجود سطح آزاد نسبتاً بزرگ ناشی از انفجار چال‌های برش و چال‌های پیشروی، بزرگ‌ترین بعد قطعه سنگ‌های حاصل از انفجار چال‌های محیطی ۴۰ سانتی‌متر یا بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شود. برای

۲-۴- خرج ویژه و حفاری ویژه

دو پارامتری که اغلب در محاسبات مربوط به الگوی آتش‌کاری محاسبه می‌شود، ضریب پودر یا خرج ویژه و حفاری ویژه است. این دو پارامتر، شاخص‌های اقتصادی کلی آتش‌کاری بوده و امکان مقایسه آسان بین الگوهای مختلف را فراهم می‌کند. مقدار ماده منفجره لازم برای شکستن یک مترمکعب یا یک تن سنگ، پارامتری است که تحت عنوان فاکتور پودر یا خرج ویژه نامیده می‌شود. طول کل چال‌های حفاری شده در سینه‌کار تونل بر حسب متر به حجم سنگ‌های حاصل از آتش‌کاری بر حسب مترمکعب، حفاری ویژه نامیده می‌شود و واحد آن متر بر مترمکعب می‌باشد. خرج ویژه با توجه به شرایط مختلف، تغییرات زیادی می‌کند و در شرایط محصورشدگی بیشتر، سنگ سخت‌تر و سطح مقطع تونل کوچک-مقیاس، مقدار آن بیشتر می‌شود. خرج ویژه و حفاری ویژه با سطح مقطع تونل رابطه معکوس دارد. سطح مقطع‌های کوچک در محدوده ۱۰ الی ۵۰ متر مربع دارای خرج ویژه نسبتاً بالایی هستند، زیرا ناحیه برش که در آن خرج‌گذاری با چگالی زیادتری انجام می‌گیرد، درصد بیشتری از کل سطح مقطع را تشکیل می‌دهد.

۳- تحلیل نتایج

محاسبه و طراحی الگوی بهینه چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل، امری وقت‌گیر است و مرجعی که مهندسین طراح با رجوع به آن بتوانند به یک الگوی اولیه مناسب برای آن تونل دست یابند موجود نیست. در این تحقیق، با توجه به

طراحی‌های انجام شده بر روی سطح مقطع‌های مختلف با دو ماده منفجره آنفو و امولایت، پیشروی ۳ متری و قطر چال ۵۱ میلی‌متری، تعداد ۸۸ طرح آماده شد. نتایج حاصل از طراحی‌های انجام شده در جدول ۵، جدول ۶ و جدول ۷، جمع‌آوری شده است. در این جداول خرج ویژه براساس کیلوگرم بر متر مکعب و حفاری ویژه بر اساس متر بر مترمکعب محاسبه شده است. همچنین به منظور سهولت در تحلیل نتایج، برای تمام روش‌های طراحی پارامترهای حفاری ویژه، خرج ویژه و تعداد چال براساس سطح مقطع تونل‌های انتخابی در شکل ۳، شکل ۴ و شکل ۶، رسم شده است.

۳-۱- روش انتقال انرژی

در شکل ۳، نمودارهای روش انتقال انرژی براساس سطح مقطع تونل‌های انتخابی برای برش موازی با دو ماده منفجره آنفو و امولایت رسم شده است. در تمام سطح مقطع‌های انتخابی شرایط یکسان خرج‌گذاری چال در بخش‌های مختلف سینه‌کار تونل، قطر چال، طول چال به منظور مقایسه بین حالت‌های مختلف در روش انتقال انرژی رعایت شده است. در تمام نمودارهای رسم شده در شکل ۳، مقادیر آنفو با برش موازی برای سنگ آهک، دارای بیشترین مقدار خرج ویژه، حفاری ویژه و تعداد چال است. با توجه به پارامترهای جدول ۱ در شکل ۳ قسمت الف، نمودارهای رسم شده برای سنگ مارن و ماسه سنگ نزدیک به هم بوده و نمودارهای مربوط به سنگ آهک دارای مقادیر بیشتری از دو سنگ دیگر است.

جدول ۵- جدول خرج ویژه براساس سطح مقطع برای روش نروژی، سوئدی و انتقال انرژی

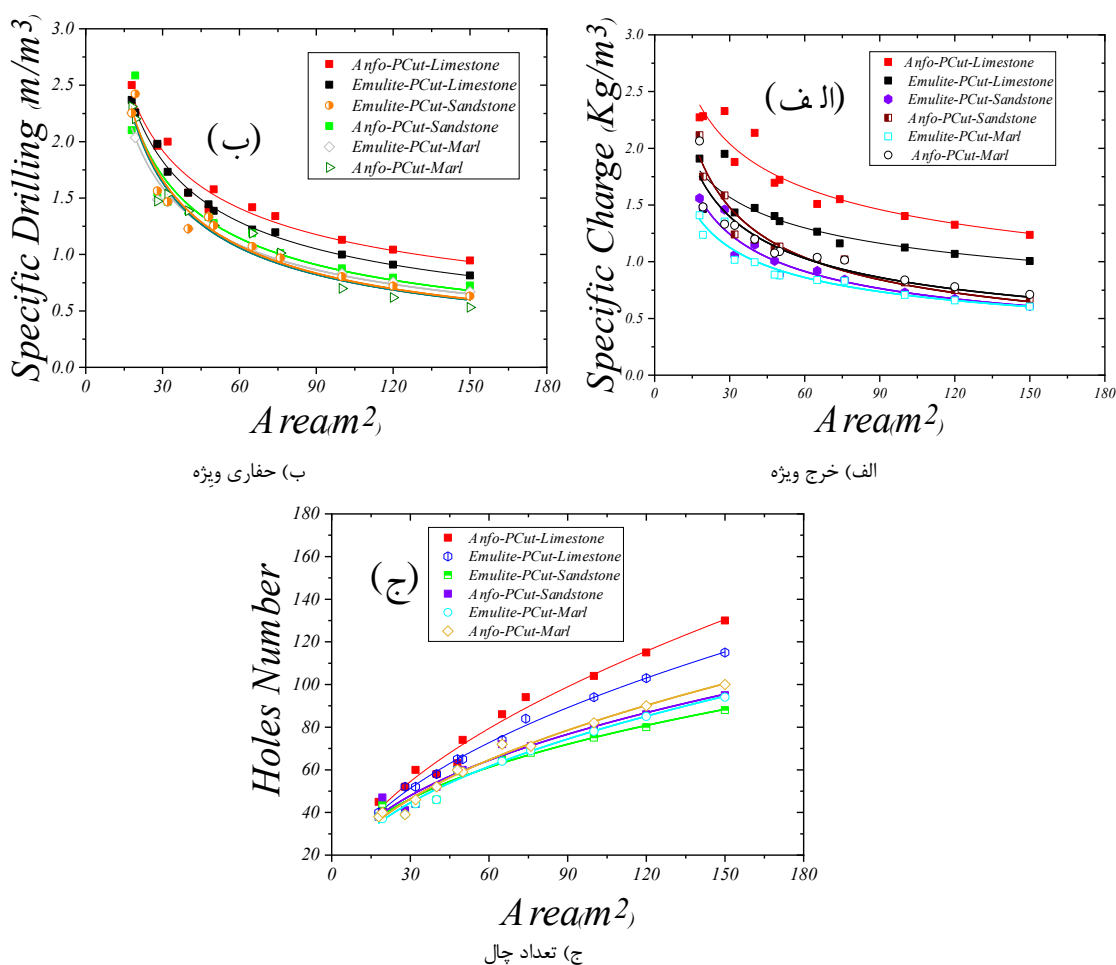
روش‌های طراحی	جنس سنگ	نوع برش	ماده منفجره	سطح مقطع‌های تونل							
				۷۶	۶۵	۵۰	۴۸	۴۰	۳۲	۲۸	۱۹
روش نروژی	آهک	موازی	آنفو	۱/۱۵۲	۱/۶۴	۱/۹۲	۱/۸۸	۱/۹	۲/۱۱	۱/۸	۲/۳۷
روش نروژی	ماسه سنگ	موازی	آنفو	۱/۷۸	۱/۸۵	۱/۹۱	۱/۹۵	۲/۰۳	۲/۱۶	۱/۶۴	۳
روش سوئدی-الافسون	-	موازی	امولایت	۱/۳۱	۱/۳۲	۱/۴۸	۱/۲۶	۱/۱۴	۱/۳۸	۱/۳۸	۱/۴۸
روش سوئدی-هولمبرگ	-	موازی	امولایت	۰/۹۵	۱/۱۱	۱/۱۳	۱/۲۲	۱/۱۶	۱/۴۸	۱/۵	۱/۳۶
روش سوئدی-کونیا	-	موازی	امولایت	۱/۲۴	۱/۴۲	۱/۴۳	۱/۲۴	۱/۴۰	۱/۴۸	۱/۴۰	۱/۴۰
روش انتقال انرژی	آهک	موازی	امولایت	۱/۱۶	۱/۲۶	۱/۳۵	۱/۴۰	۱/۴۷	۱/۴۳	۱/۹۵	۱/۴۶
روش انتقال انرژی	آهک	موازی	آنفو	۱/۵۵	۱/۵۰	۱/۷۲	۱/۶۹	۲/۱۳	۱/۸۷	۲/۳۲	۲/۲۸
روش انتقال انرژی	ماسه سنگ	موازی	امولایت	۰/۸۴	۰/۹۱	۰/۸۸	۱	۱/۱۵	۱/۰۵	۱/۴۶	۱/۴۷
روش انتقال انرژی	ماسه سنگ	موازی	آنفو	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۱۳	۱/۱۲	۱/۱۹	۱/۲۳	۱/۵۸	۱/۷۵
روش انتقال انرژی	مارن	موازی	امولایت	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۹۹	۱/۰۱	۱/۳۵	۱/۲۳
روش انتقال انرژی	مارن	موازی	آنفو	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۰۸	۱/۰۷	۱/۱۹	۱/۳۲	۱/۳۳	۱/۴۸

جدول ۶- جدول حفاری ویژه براساس سطح مقطع برای روش نروژی، سوئدی و انتقال انرژی

روش‌های طراحی	جنس سنگ	نوع برش	ماده منفجره	سطح مقطع‌های تونل							
				۷۶	۶۵	۵۰	۴۸	۴۰	۳۲	۲۸	۱۹
روش نروژی	آهک	موازی	آنفو	۱/۲۶	۱/۴۵	۱/۶۱	۱/۷۱	۱/۶۸	۱/۹۱	۱/۷۷	۲/۳۲
روش نروژی	ماسه سنگ	موازی	آنفو	۱/۴۹	۱/۵۹	۱/۶۱	۱/۷۱	۱/۸۱	۱/۹۳	۱/۸۲	۲/۳۲
روش سوئدی-الافسون	-	موازی	امولایت	۱/۲۱	۱/۲۴	۱/۴۲	۱/۲۸	۱/۲۲	۱/۴۶	۱/۶۷	۱/۷۹
روش سوئدی-هولمبرگ	-	موازی	امولایت	۱/۰۱	۱/۱۴	۱/۲۳	۱/۳۵	۱/۳۳	۱/۶۶	۲/۰۵	۱/۹۹
روش سوئدی-کونیا	-	موازی	امولایت	۱/۳۹	۱/۵۹	۱/۶۱	۱/۵۳	۱/۶۸	۱/۷۳	۲/۰۵	۲/۰۲
روش انتقال انرژی	آهک	موازی	امولایت	۱/۱۹	۱/۲۲	۱/۳۸	۱/۴۴	۱/۵۴	۱/۷۳	۱/۹۸	۲/۲۵
روش انتقال انرژی	آهک	موازی	آنفو	۱/۳۴	۱/۴۱	۱/۵۷	۱/۴	۱/۵۴	۲	۱/۹۶	۲/۲۵
روش انتقال انرژی	ماسه سنگ	موازی	امولایت	۰/۹۶	۱/۰۷	۱/۲۵	۱/۳۳	۱/۲۲	۱/۴۶	۱/۵۶	۲/۴۲
روش انتقال انرژی	ماسه سنگ	موازی	آنفو	۱/۰۱	۱/۱۸	۱/۲۷	۱/۳۳	۱/۳۸	۱/۴۶	۱/۵۴	۲/۵۸
روش انتقال انرژی	مارن	موازی	امولایت	۰/۹۶	۱/۰۱	۱/۲۵	۱/۳۳	۱/۲۲	۱/۴۶	۱/۴۸	۲/۰۳
روش انتقال انرژی	مارن	موازی	آنفو	۱/۰۱	۱/۱۸	۱/۲۵	۱/۳۳	۱/۳۸	۱/۵۳	۱/۴۷	۲/۲۰

جدول ۷- جدول تعداد چال براساس سطح مقطع برای روش نروژی، سوئدی و انتقال انرژی

روش‌های طراحی	جنس سنگ	نوع برش	ماده منفجره	سطح مقطع‌های تونل							
				۷۶	۶۵	۵۰	۴۸	۴۰	۳۲	۲۸	۱۹
روش نروژی	آهک	موازی	آنفو	۸۹	۸۸	۷۶	۷۷	۶۳	۵۷	۴۸	۴۲
روش نروژی	ماسه سنگ	موازی	آنفو	۱۰۵	۹۷	۷۶	۷۷	۶۸	۵۸	۴۸	۴۲
روش سوئدی-الافسون	-	موازی	امولایت	۸۵	۷۶	۶۷	۵۸	۴۶	۴۴	۴۴	۳۲
روش سوئدی-هولمبرگ	-	موازی	امولایت	۷۱	۶۹	۵۸	۶۱	۵۰	۵۰	۵۴	۳۶
روش سوئدی-کونیا	-	موازی	امولایت	۹۸	۹۷	۷۶	۶۹	۶۳	۵۳	۵۴	۳۶
روش انتقال انرژی	آهک	موازی	امولایت	۸۴	۷۴	۶۵	۶۵	۵۸	۵۲	۵۲	۴۱
روش انتقال انرژی	آهک	موازی	آنفو	۹۴	۸۶	۷۴	۶۳	۵۸	۶۰	۵۲	۴۱
روش انتقال انرژی	ماسه سنگ	موازی	امولایت	۶۸	۶۵	۵۹	۶۰	۴۶	۴۴	۴۱	۴۴
روش انتقال انرژی	ماسه سنگ	موازی	آنفو	۷۱	۷۲	۶۰	۶۰	۵۲	۴۴	۴۱	۴۷
روش انتقال انرژی	مارن	موازی	امولایت	۶۹	۶۴	۵۹	۶۰	۴۶	۴۴	۳۹	۳۷
روش انتقال انرژی	مارن	موازی	آنفو	۷۱	۷۲	۵۹	۶۰	۵۲	۴۶	۳۹	۴۰



شکل ۳- نمودارهای روش انتقال انرژی با برش موازی براساس سطح مقطع تونل (منظور از *PCut* همان بخش برش موازی *Parallel Cut* است)

موازی با دو ماده منفجره آنفو و امولایت، کاملاً نزدیک به هم بوده است. دلیل این امر بدین صورت است که در سطح مقطع‌های تونلی کوچک با انواع شکل‌های مختلف تونل، مقادیر مربوط به بار سنگ و فاصله جناحی در روش انتقال انرژی، تغییرات قابل توجهی را ندارد، در نتیجه تعداد چال‌های جانمایی شده در سطح مقطع تونل تقریباً برای تمام حالت‌های این روش یکسان است. همچنین برای سطح مقطع‌های بیشتر از ۵۰ مترمربع، مقدار بارسنگ و فاصله جناحی بین چال‌ها برای سنگ آهک نسبت به دو سنگ مارن و ماسه سنگ کمتر است. به همین خاطر تعداد چال بیشتری بر سطح مقطع‌های دارای جنس سنگ آهک جانمایی می‌شود.

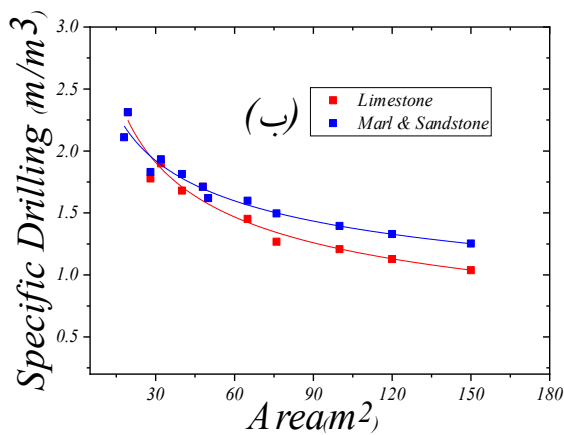
همچنین در قسمت ب، روند نزولی پارامتر حفاری ویژه براساس سطح مقطع برای انواع مختلف سنگ‌ها نشان داده شده است. بیشترین و کمترین مقادیر حفاری ویژه برای ماده منفجره آنفو به ترتیب برای سنگ آهک و سنگ مارن با برش موازی بدست آمده است. از آنجایی که پارامترهای انرژی سطحی و ضریب امپدانس سنگ آهک نسبت به دو سنگ مارن و ماسه سنگ بیشتر است (جدول ۱)، به همین خاطر می‌توان گفت که در محاسبات روش انتقال انرژی خرج ویژه، حفاری ویژه و تعداد چال برای سنگ آهک در نمودارهای رسم شده بیشتر خواهد بود. در نمودار شکل ۳، قسمت ج، برای سطح مقطع تونلی در محدوده ۱۵ تا ۵۰ مترمربع، نتایج مربوط به روش انتقال انرژی برای برش

۳-۲- روش نروژی

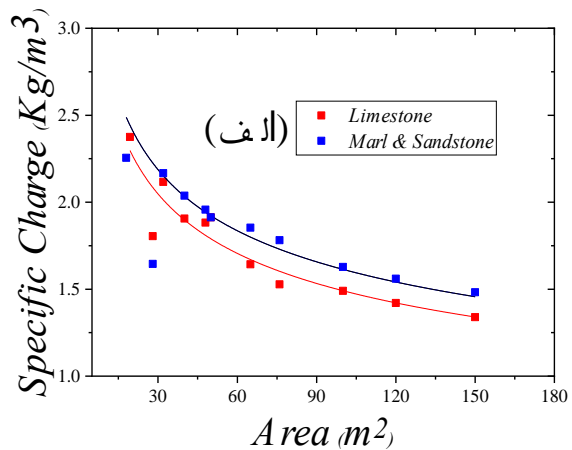
با توجه به شکل ۴، مقادیر حفاری ویژه، خرج ویژه و تعداد چال براساس روش نروژی با برش موازی برای سنگ آهک کمتر از سنگ‌های مارن و ماسه سنگ است.

با توجه به اینکه در این روش از قابلیت آتش‌کاری سنگ برای محاسبه بار سنگ و فاصله جناحی چال‌ها استفاده می‌شود، برای سنگ آهک با قابلیت آتش‌کاری خوب، تعداد چال کمتری در سطح مقطع تونل جانمایی می‌شود، به همین دلیل نتایج حاصل از روش نروژی کاملاً عکس روش انتقال انرژی است. همچنین، اندیس انفجارپذیری سنگ، براساس آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی

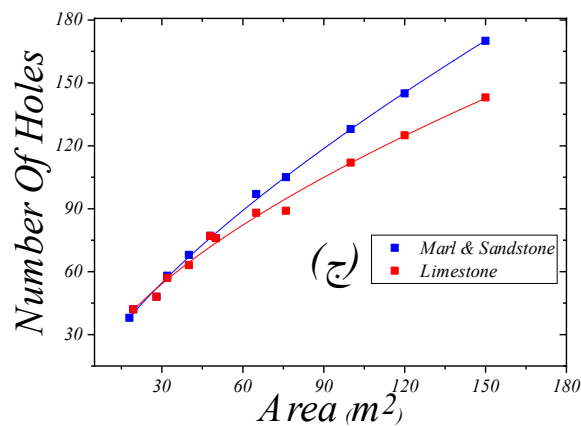
نمونه‌های سنگی در مقیاس کوچک انجام شده است. این آزمایش‌ها ممکن است در سنگ‌های فاقد درزه مانند گرانیت‌های توده‌ای که اغلب در اسکاندیناوی مشاهده می‌شود، قابل قبول باشد؛ اما آزمون‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک، نمایانگر ویژگی‌های توده‌سنگ درزه‌دار و غیرهمگن نخواهد بود (Zare & Bruland, 2006). به همین دلیل زارع در سال ۲۰۰۷ پیشنهاد کرد هنگامی که درجه شکستگی بسیار زیاد است و یا شکستگی باز است، انتظار می‌رود انفجارپذیری ضعیف‌تر باشد. همچنین در یک تونل، زمانی که جهت‌داری درزه‌ها موازی یا نزدیک به موازی محور تونل است، انفجارپذیری توده‌سنگ کاهش می‌یابد (Zare & Bruland, 2006).



(ب) حفاری ویژه



(الف) خرج ویژه



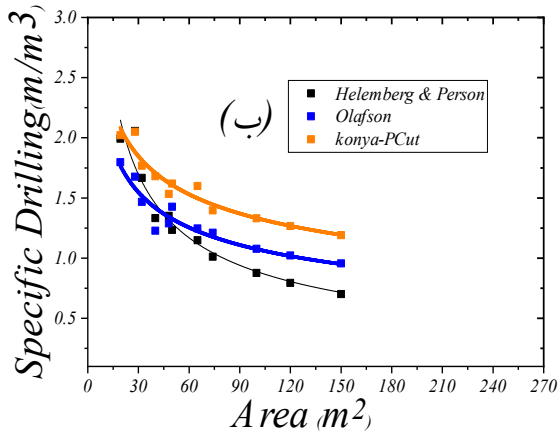
(ج) تعداد چال

شکل ۴- نمودارهای روش نروژی براساس سطح مقطع تونل

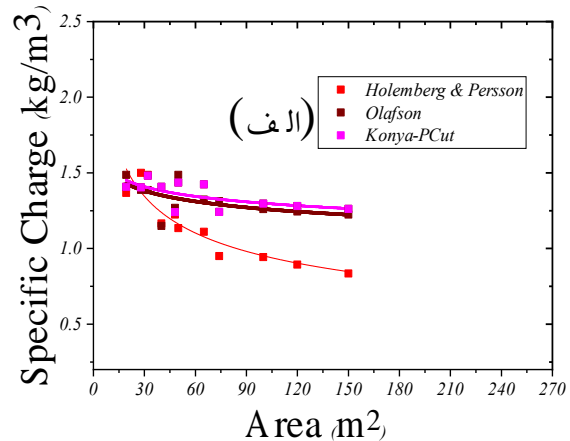
۳-۳- روش سوئدی

در شکل ۶، نمودارهای روش سوئدی براساس سطح مقطع تونل برای ماده منفجره امولسیون رسم شده است. در این روش به دلیل اینکه تراکم خرج ته‌چال و میان‌چال متفاوت است، خرج‌گذاری در این روش فقط با ماده منفجره امولایت انجام شده است.

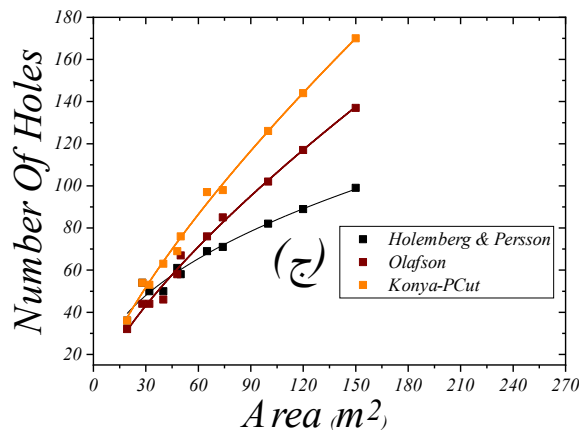
در شکل ۶-الف، خرج ویژه روش کونیا با برش موازی و روش الافسون نزدیک به هم بوده و دارای بیشترین مقدار است. همچنین خرج مصرفی روش هلمبرگ-پرسون نیز دارای کمترین مقدار است. مطابق با بخش الف در قسمت ب و ج بیشترین و کمترین مقدار حفاری ویژه و تعداد چال به ترتیب برای روش کونیا و روش هلمبرگ-پرسون بدست آمده است.



(ب) حفاری ویژه



(الف) خرج ویژه



(ج) تعداد چال

شکل ۵- نمودارهای روش سوئدی براساس سطح مقطع تونل (منظور از PCut همان بخش برش موازی Parallel Cut است)

۴- گل‌گذاری

یکی از مهم‌ترین پارامترهای اجرایی در انواع مختلف روش‌های طراحی چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل، محاسبه مقدار گل‌گذاری در چال‌های جانمایی شده در بخش‌های مختلف سینه کار تونلی است. در روش نروژی مقدار گل‌گذاری در بخش‌های مختلف سینه کار تونل، به صورت تابعی از طول چال بیان شده است (Zare & Bruland,

2006). بدین صورت که برای بخش برش و کف، مقدار گل‌گذاری برابر با ۱۰ درصد طول چال و برای سایر بخش‌ها، مقدار گل‌گذاری به صورت ۳۰ درصد طول چال تعریف شده است. همچنین، مقدار گل‌گذاری در بیشتر روش‌های ارایه شده در روش سوئدی، بصورت ۱۰ برابر قطر چال انفجاری گزارش شده است. برای روش انتقال انرژی با برش موازی متناسب با جانمایی تعداد امولایت‌ها در داخل چال، اشاره‌ای

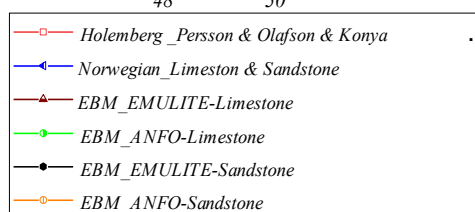
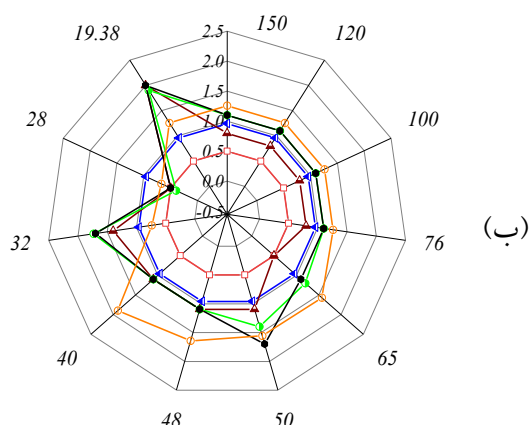
۵- مقایسه نتایج روش‌های طراحی الگوی

چالزنی و آتش‌کاری در تونل

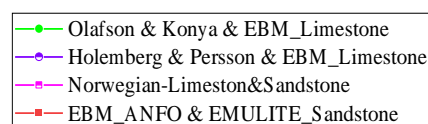
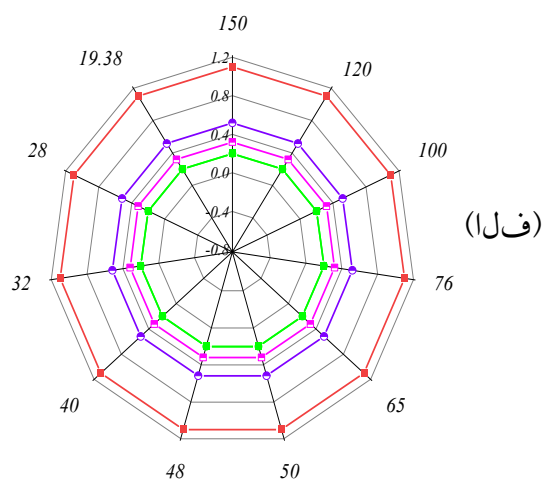
از مهم‌ترین نکات روش‌های سوئدی، خرج‌گذاری کامل طول چال است. همچنین، از طرفی در روش‌های سوئدی به جز روش کونیا، جنس سنگ مانند روش انتقال انرژی و روش نروژی در محاسبات دخیل نبوده است. به همین خاطر برای انواع مختلف سنگ‌ها برای هر سطح مقطع فقط یک طرح برای هر روش ارائه می‌شود. در صورتی که در روش انتقال انرژی برای هر سطح مقطع با جنس سنگ‌های مختلف، طراحی‌های متفاوتی با توجه به بار سنگ و فاصله جناحی سنگ‌ها ارائه می‌شود. در مقایسه خرج ویژه برای دو روش انتقال انرژی و روش سوئدی با ماده منفجره امولایت، مقادیر عددی خرج ویژه برای هر دو روش نزدیک به هم بوده است. همچنین در مقایسه دو روش نروژی و روش انتقال انرژی با ماده منفجره آنفو، مقدار خرج ویژه برای روش نروژی در تمام سطح مقطع‌های بزرگ مقیاس (سطح مقطع تونل در محدوده ۴۸ تا ۱۵۰ مترمربع)، بیشتر از روش انتقال انرژی بدست آمده است. همچنین، در مقایسه پارامتر حفاری ویژه برای دو روش انتقال انرژی و روش نروژی با ماده منفجره آنفو (جنس سنگ آهک)، مقدار حفاری ویژه برای دو روش، نزدیک به هم بوده است. و برای جنس سنگ مارن و ماسه سنگ مقدار حفاری ویژه برای روش نروژی بیشتر از روش انتقال انرژی بدست آمده است. در مقایسه دو روش انتقال انرژی و روش سوئدی، مقادیر عددی حفاری ویژه برای دو روش نیز نزدیک بوده است. از جمله موارد مشترک تاثیر گذار بر نتایج روش‌های طراحی در برش موازی، می‌توان قطر چال انفجاری، قطر خرج، قطر چال خالی، طول چال، نوع ماده منفجره را نام برد. در روش‌های طراحی الگوی چالزنی و آتش‌کاری برای بخش برش و پیشروی قطر خرج‌گذاری نزدیک به قطر چال در نظر گرفته شده است. قطر چال خالی برای روش انتقال انرژی با برش موازی برابر با ۱۰۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. از طرفی برای روش نروژی، مطابق با طول چال و قابلیت آتش‌کاری توده‌سنگ مقدار قطر و تعداد چال خالی محاسبه می‌شود. برای روش‌های سوئدی، قطر چال خالی اهمیت بسزایی در فاصله بین چال‌های برش دارد. در این تحقیق، قطر چال خالی ۱۰۲ میلی‌متر برای روش سوئدی در نظر گرفته شده است.

به مقدار گل‌گذاری در چال‌ها نشده است. در شکل ۷، مقادیر گل‌گذاری برای بخش‌های مختلف سینه کار تونلی محاسبه شده است.

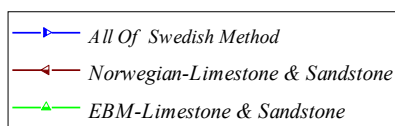
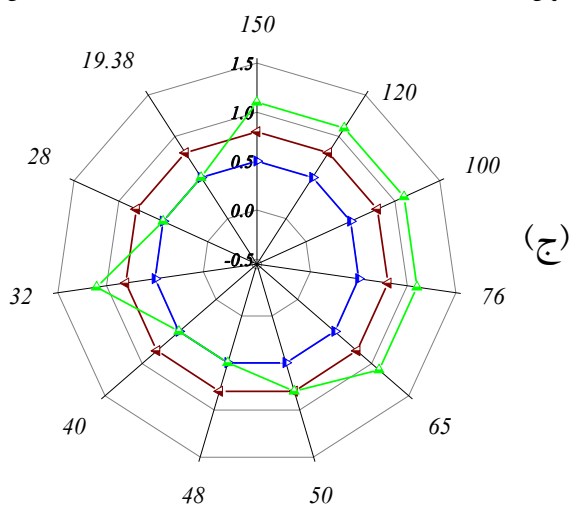
شعاع شکل‌ها برابر با مقدار گل‌گذاری و اعداد نوشته شده از ۱۹/۳۸ تا ۱۵۰ به عنوان سطح مقطع تونلی بر اساس مترمربع در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ قسمت الف، کمترین مقدار گل‌گذاری متناسب با برش موازی برای روش الافسون، کونیا و روش انتقال انرژی با ماده منفجره آنفو برای سنگ آهک بدست آمده است. همچنین بیشترین مقدار گل‌گذاری مربوط به روش انتقال انرژی با ماده منفجره آنفو و امولایت برای ماسه سنگ بدست آمده است. در ادامه، نتایج نشان می‌دهد که کمترین مقدار گل‌گذاری به ترتیب متعلق به روش نروژی، هلمبرگ و روش انتقال انرژی با ماده منفجره امولایت برای سنگ آهک است. در شکل ۷ قسمت ب، مقدار گل‌گذاری در چال‌های بخش پیشروی با برش موازی برای روش سوئدی کمتر از مقدار گل‌گذاری در روش‌های نروژی و انتقال انرژی بدست آمده است. همچنین، برای سطح مقطع‌های مختلف، نتایج متفاوتی برای مقادیر گل‌گذاری در روش نروژی و انتقال انرژی بدست آمده است. در قسمت محیطی به منظور آسیب کمتر به دیواره و سقف، از امولایت با قطرهای ۲۲ تا ۳۰ میلی‌متر در چال استفاده شده است و از ماده منفجره آنفو در قسمت محیطی استفاده نشده است. با توجه به شکل ۷ قسمت ج، مقدار گل‌گذاری برای تمام روش‌های سوئدی یکسان و به مقدار ۰/۵ متر گزارش شده است. همچنین، روش‌های سوئدی کمترین مقدار گل‌گذاری در چال‌های محیطی را نشان می‌دهند. و برای روش نروژی، مقدار گل‌گذاری بیشتری نسبت به روش‌های سوئدی بدست آمده است. در ادامه مقدار گل‌گذاری در قسمت محیطی برای روش انتقال انرژی در محدوده سطح مقطع‌های ۵۰ الی ۱۵۰ مترمربع مقدار بیشتری را نسبت به دو روش سوئدی و نروژی نشان می‌دهد. و برای محدوده سطح مقطع‌های ۲۰ الی ۵۰ متر مربع مقادیر گل‌گذاری مختلفی از روش انتقال انرژی بدست آمده است. در نهایت بیشترین و کمترین مقدار گل‌گذاری در قسمت محیطی به ترتیب مربوط به روش انتقال انرژی و روش سوئدی می‌باشد.



ب) بخش پیشروی



الف) بخش برش



ج) بخش محیط

شکل ۶- نمودار مقادیر گل‌گذاری در بخش‌های مختلف سینه کار تونلی

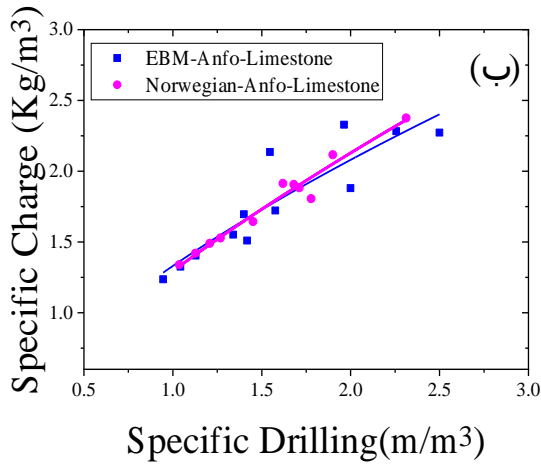
حساب می‌شود. یکی از پارامترهای مهم در انتخاب بهینه الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل، محاسبه مقدار خرج ویژه است که امکان مقایسه آسان بین الگوهای مختلف را فراهم می‌کند. از آنجایی که پارامتر خرج ویژه ارتباط

۶- انتخاب الگوی بهینه چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل

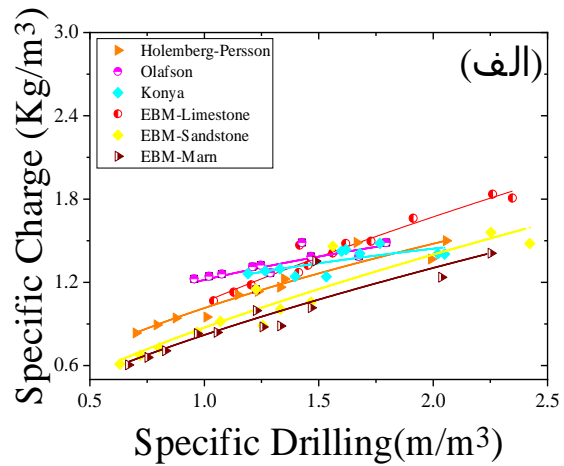
بررسی الگوهای بهینه چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل با توجه به روش‌های طراحی از مسائل چالش برانگیز مهندسی

دارد، محاسبه مقدار آن برای بهینه کردن الگوهای چالزنی و آتش‌کاری ضروری است. در شکل ۷، نمودار خرج ویژه براساس حفاری ویژه برای روش‌های مختلف رسم شده است.

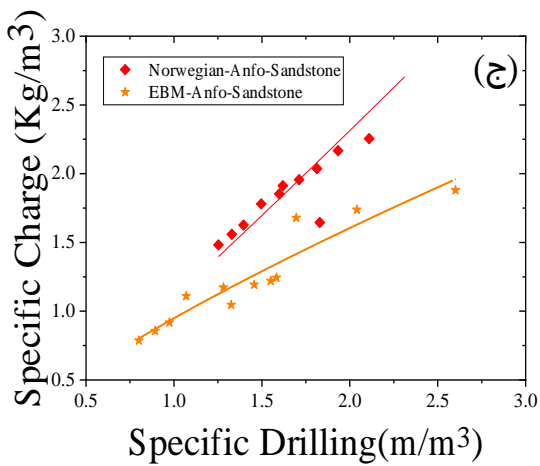
مستقیمی با لغزش زمین، آسیب به بخش محیطی، مقدار بیش شکست و پس شکست، پیشروی و مقدار خردایش



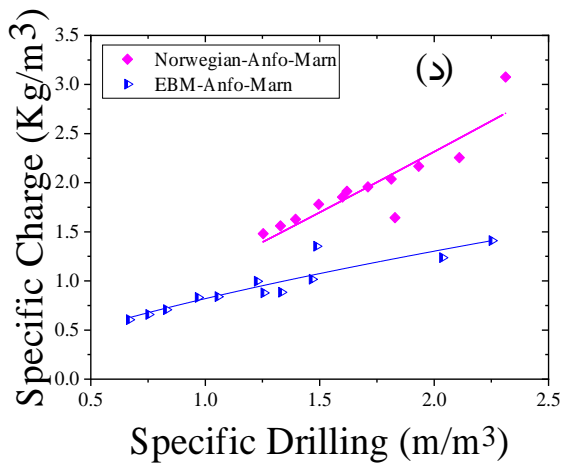
(ب) برای روش‌های انتقال انرژی و روش نروژی با ماده منفجره آنفو و سنگ آهک



(الف) برای روش‌های سوئدی و انتقال انرژی با ماده منفجره امولایت



(ج) برای روش‌های انتقال انرژی و روش نروژی با ماده منفجره آنفو و ماسه سنگ



(د) برای روش‌های انتقال انرژی و روش نروژی با ماده منفجره آنفو و سنگ مارن

شکل ۷- نمودار خرج ویژه براساس حفاری ویژه

۷- نتیجه‌گیری

در حفاری تونل به روش انفجار، بایستی به عواملی از قبیل میزان پیشروی، بیش‌شکست در دیواره تونل، میزان لرزش زمین و هوا، کاهش حفاری ویژه و خرج ویژه، خردایش مناسب برای حمل و نقل، عدم انفجار ثانویه و غیره توجه داشت، که همه‌ی این عوامل و مشکلات را می‌توان با یک الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری مناسب بهینه کرد. در این تحقیق، با توجه به روش‌های طراحی الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل، محاسبات خرج ویژه، حفاری ویژه و تعداد چال بر روی سطح مقطع‌های مختلف تونل با اشکال نعل اسبی، دایره‌ای و D شکل انجام شده است. این پارامترها، شاخص‌های اقتصادی کلی آتش‌کاری بوده و امکان مقایسه آسان بین الگوهای مختلف را فراهم می‌کند. نتایج طراحی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در روش انتقال انرژی با برش موازی مقدار خرج ویژه، تعداد چال و حفاری ویژه بیشتری برای جنس سنگ آهک نسبت به سنگ مارن و ماسه سنگ بدست آمده است. در روش انرژی با توجه به پارامتر قابلیت آتش‌کاری توده‌سنگ، نتایج برعکسی نسبت به روش انتقال انرژی برای جنس سنگ‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق، بدست آمده است. از دلایل آن می‌توان به تعداد تعداد چال‌های جانمایی شده بیشتر بر روی سطح مقطع‌های تونلی با جنس سنگ دارای قابلیت آتش‌کاری ضعیف اشاره کرد. در انتخاب روش سوئدی و انتقال انرژی با ماده منفجره مولایت برای طراحی بهینه الگوی چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل، مقدار پارامترهای انرژی سطحی و ضریب امیدانس سنگ دخالت دارد. زمانی که مقدار این دو پارامتر برای جنس سنگ بیشتر باشد (سنگ آهک)، روش هلمبرگ و پرسون برای طراحی پیشنهاد می‌گردد و در صورتی که مقدار این دو پارامتر برای جنس سنگ (مارن و ماسه سنگ) کم باشد، روش انتقال انرژی مقدم بر روش سوئدی خواهد بود. در انتخاب الگوی بهینه چال‌زنی و آتش‌کاری در تونل برای دو روش انتقال انرژی و سوئدی، روش انتقال انرژی برای طراحی الگوی بهینه پیشنهاد می‌شود. همچنین، در تمام روش‌های سوئدی مقدار گل‌گذاری چال‌ها کمتر از دو روش انرژی و انتقال انرژی بدست آمده است.

با توجه به شکل ۷، قسمت الف، در مقایسه بین روش‌های سوئدی و انتقال انرژی با ماده منفجره مولایت، متناسب با مقادیر مختلف حفاری ویژه، می‌توان گفت که هر چه مقدار انرژی سطحی و ضریب امیدانس سنگ کم باشد، روش انتقال انرژی مقدم بر روش سوئدی می‌شود و با افزایش دو پارامتر انرژی سطحی و ضریب امیدانس، روش هلمبرگ-پرسون نسبت به روش انتقال انرژی پیشنهاد می‌گردد. در شکل ۷ قسمت ب، نمودار خرج ویژه براساس حفاری ویژه برای روش‌های انتقال انرژی و انرژی با جنس سنگ آهک رسم شده است. با توجه به جدول ۱ و پارامتر قابلیت آتش‌کاری در سنگ، مقادیر محاسبه شده در هر دو روش برای جنس سنگ آهک نزدیک به هم بوده و تفاوت قابل توجهی در نمودارهای دو روش مشاهده نمی‌شود. برای نمودارهای ج و د، زمانی که جنس سنگ با توجه به روش انتقال انرژی، دارای ضریب امیدانس و انرژی سطحی کمتری نسبت به جنس سنگ آهک دارد، تفاوت قابل توجهی در مقدار خرج ویژه دو روش انتقال انرژی و انرژی مشاهده می‌شود. در روش انرژی برای جنس سنگ با قابلیت آتش‌کاری ضعیف، تعداد چال جانمایی شده بر روی سطح مقطع بیشتر از زمانی است که قابلیت آتش‌کاری سنگ خوب در نظر گرفته شود. در صورتی که برای روش انتقال انرژی متناسب با شرایط روش انرژی، تعداد چال کمتری در سطح مقطع تونل جانمایی می‌شود. با توجه به پارامتر قابلیت آتش‌کاری سنگ برای جنس سنگ مارن و ماسه سنگ احتمال اتلاف انرژی در این روش نسبت به روش انتقال انرژی بیشتر است. به همین دلیل برای طراحی الگوهای حفاری و آتش‌کاری در تونل با توجه به دو روش انتقال انرژی و انرژی با جنس سنگ‌های مختلف، روش انتقال انرژی نسبت به روش انرژی مقدم‌تر خواهد بود. در حالت کلی می‌توان گفت که در خرج‌گذاری چال‌ها با ماده منفجره مولایت، دو روش هلمبرگ-پرسون و روش انتقال انرژی پیشنهاد می‌شود. و در صورت خرج‌گذاری چال‌ها با ماده منفجره آنفو، روش انتقال انرژی نسبت به روش انرژی پیشنهاد می‌شود.

۸- مراجع

- Alaei, R., Khani, J., Rostamabadi, S. and Ghafouri Moghadam, M., 2020. Development of application for tunnel blasting patterns designing. *Tunneling & Underground Space Engineering*, 9(3), pp.253-265.
- Asadi, S, Taji, M . (2014). Prediction of over-failure in pardis access tunnels by Blast ,Islamic Azad University, Master's thesis.
- Bahrami, A., Monjezi, M., Goshtasbi, K., & Ghazvinian, A. (2011). Prediction of rock fragmentation due to blasting using artificial neural network. *Engineering with Computers*, 27(2), 177-181. <https://doi.org/10.1007/s00366-010-0187-5>.
- Bakhshandeh Amnieh, H., Siamaki, A., & Soltani, S. (2012). Design of blasting pattern in proportion to the peak particle velocity (PPV): Artificial neural networks approach. *Safety Science*, 50(9), 1913-1916. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.05.008>.
- Chen, J., Qiu, W., Zhao, X., Rai, P., Ai, X., & Wang, H. (2021). Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research Experimental and numerical investigation on overbreak control considering the influence of initial support in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 115(May), 104017. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104017>.
- Cheng, B., Wang, H., Zong, Q., Xu, Y., Wang, M., & Zheng, Q. (2021). Study of the Double Wedge Cut Technique in Medium-Depth Hole Blasting of Rock Roadways. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(5), 4895-4909. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05279-8>.
- Dey, K., & Raitani, R. (2003). PREDICTION OF OVERBREAK BLASTING A CASE STUDY IN UNDERGROUND.
- Hajari, H , Javanshir Giv , M, Aria Far, A.(2018). Investigating the firefighting system and optimizing the firefighting pattern of Qala-e-Zari copper mine, University of Birjand ,Master's thesis.
- Hopler, R. B. (2010). *Fragblast : International Journal Literature on Explosives and Blasting*. November 2012, 37-41.
- Hovida, M , Taji, M , Parsaee, M .(2016). Rzmja coal mine explosion in West Oakland optimize operations to reduce costs significantly advance, Islamic Azad University ,Master's thesis.
- Iwano, K., Hashiba, K., Nagae, J., & Fukui, K. (2020). Reduction of tunnel blasting induced ground vibrations using advanced electronic detonators. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 105(July), 103556. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103556>.
- Kianinejad, M, Farhang, S, Mohammad, A. (2017). Development an appropriate drilling and blasting pattern in advanced rock tunnels in order to reduce damages caused by tunneling Case study: Alborz sharghi coal mine- Tazare, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University ofTechnology, M.Sc. Thesis.
- Kuzu, C., & Guclu, E. (2009). The problem of human response to blast induced vibrations in tunnel construction and mitigation of vibration effects using cautious blasting in half-face blasting rounds. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.02.001>.

- Lopez Jimeno, C., López Jimeno, E. and Carcedo, F.J.A., 1995. *Drilling and blasting of rocks*. AA Balkema.
- Ma, C., Xie, W., Liu, Z., Li, Q., Xu, J., & Tan, G. (2020). *applied sciences A New Technology for Smooth Blasting without Detonating Cord for Rock Tunnel Excavation*.
- Mottahedi, A., Sereshki, F., & Ataei, M. (2017). *Development of overbreak prediction models in drill and blast tunneling using soft computing methods*. *Engineering with Computers*. <https://doi.org/10.1007/s00366-017-0520-3>.
- Olofsson, S.O. *Applications Explosive Technology for Construction and Mining*, Applex Publisher, 1988.
- Ostovar, R. (2017). *Blasting in mines*. (J. D. Industrial unit) Amirkabir
- Parchin Chemical industry. (2015). *Catalog of explosive materials*.
- Persson, P. A. (1997). *Relationship between strain energy, rock damage, fragmentation, and throw in rock blasting*. *Fragblast*, 1(1), 99–110. <https://doi.org/10.1080/13855149709408392>.
- Qu, S., Zheng, X., Fan, L., & Fan, L. (2008). *4-2008-Numerical simulation of parallel hole cut blasting with uncharged holes.pdf*.
- Sahhoseni, A., Bagherpor, R., Baghbanan, A. (2013). *The effect of blast parameters on the dynamic failure of the rock mass around the tunnel using numerical methods*, Isfahan University of Technology, Master's thesis.
- Salmi, E. F., & Sellers, E. J. (2021). *A review of the methods to incorporate the geological and geotechnical characteristics of rock masses in blastability assessments for selective blast design*. *Engineering Geology*, 281(December 2020), 105970. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105970>.
- Salum, A. H., & Murthy, V. M. S. R. (2019). *Optimising blast pulls and controlling blast-induced excavation damage zone in tunnelling through varied rock classes*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85(July 2017), 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.11.029>.
- Science, E. (2019). *Comparative analysis of ANFO and emulsion application on overbreak and underbreak at blasting development activity in underground Deep Mill Level Zone (DMLZ) PT Freeport Indonesia Comparative analysis of ANFO and emulsion application on overbreak and un*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/279/1/012001>.
- Song, Z., Mao, J., Tian, X., Zhang, Y., & Wang, J. (2019). *Optimization analysis of controlled blasting for passing through houses at close range in super-large section tunnels*. *Shock and Vibration*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1941436>.
- Soroush, K., Yavary, M., & Ebrahimabadi, A. (2015). *29-Trend analysis and comparison of basic parameters for tunnel blast.pdf*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/279/1/012001> *International Journal of Mining Science and Technology* 25 (2015) 595–599 Contents.
- Wang, J., Yin, Y., & Luo, C. (2018). *Johnson-Holmquist-II(JH-2) constitutive model for rock materials: Parameter determination and application in tunnel smooth blasting*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/app8091675>.

- Wang, Z., Gu, X., Zhang, W., Xie, Q., Xu, X., & Wang, Q. (2019). *Analysis of the Cavity Formation Mechanism of Wedge Cut Blasting in Hard Rock*. *Shock and Vibration*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1828313>.
- Xie, L. X., Lu, W. B., Zhang, Q. B., Jiang, Q. H., Chen, M., & Zhao, J. (2017). *Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 66(March), 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.03.009>
- Yilmaz, O., & Unlu, T. (2008). *11-Re-2014-An application of the modified Holmberg–Persson approach for tunnel.pdf*.
- Zare, S., & Bruland, A. (2006). *Comparison of tunnel blast design models*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(5), 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.09.001>.
- Zhang, H., Li, T., Du, Y., Zhu, Q., & Zhang, X. (2021). *Theoretical and numerical investigation of deep-hole cut blasting based on cavity cutting and fragment throwing*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111(June 2020), 103854. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103854>.
- Zhang, H., Li, T., Wu, S., Zhang, X., Gao, W., & Shi, Q. (2022). *2022.pdf*.
- Zhang, Z.-X., Qiao, Y., Chi, L. Y., & Hou, D.-F. (2021). *8-Re-2021-Experimental study of rock fragmentation under different stemming.pdf*.

Investigation of optimal methods for drilling and blasting pattern of tunnels in P-Cut under the influence of economic indices variations of blasting

E, Salehi^{1}; M, GhafouriMoghadam²; J, Khani³; M, haji hasani⁴; S, Rostamabadi⁵*

1- M.Sc. Student; Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan-Iran,

ehsansalehi@mi.iut.ac.ir

2- M.Sc. Student; Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran-Iran,

m.ghafori.m@gmail.com

3- PhD Student; Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran-Iran, jafar.khani@modares.ac.ir

4- Assistant Professor; Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia-Iran,

m.hajihassani@urmia.ac.ir

5- Young Researchers and Elite Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran-Iran,

s.rostamabadi@srbiau.ac.ir

Received: 17 May 2022; Accepted: 11 Oct 2022

DOI: 10.22044/tuse.2022.11927.1455

Keywords

*Pattern of drilling and blasting
Anfo and emolite
Holemeberg-Persson method
Power factor and specific drilling
Energy balance model*

Extended Abstract

Summary

In this research, using the approaches for designing the drilling and blasting patterns in the tunnels, we have managed to calculate the parameters such as the specific charge, the specific drilling and the number of holes on the tunnel different cross sections with the shapes of horseshoe, circle and D. These parameters are the general indices of blasting that simplify the comparison of different patterns. The results show that in the Norwegian method and the energy balance model, the results obtained for the two parameters of specific charge and specific drilling for the selected rock material are completely opposite to each other. Moreover, in the Swedish method, considering emolite, the values of the calculated parameters have been close to the energy balance model.

Introduction

The selection of the optimal pattern of drilling and blasting in tunnels considering to the existing methods is one of the challenging engineering issues. The most important methods of designing the drilling and blasting pattern in tunnels are energy balance model, Norwegian method and Swedish method.

Methodology and Approaches

In this research, two explosive substance, ANFO (ammonium nitrate and fuel oil) and emolite, have been used for charging the holes located on the cross section of the selected tunnel in order to advance 3 meters. Moreover, the cross section surface area of the selected tunnel has been considered to be 19, 28, 32, 40, 48, 50, 65, 76 square meters with horseshoe, circle and D-shape types. The diameter of the explosive hole is 48 mm for the Norwegian method and 51 mm for the two energy balance model and the Swedish method in order to compare the results of the methods. Overall, 88 designs have been prepared for the three types of limestone, sandstone and marl rocks without the use of design software.

Results and Conclusions

In the Norwegian method, regarding the parameter of the rock mass blastability, the results are in contrast to the

energy balance method for the aforementioned rocks. One of the reasons we can refer to, is the higher number of the located holes on the tunnel cross section using the rocks with low blasting power. When implementing the Swedish and energy balance methods with the emolite explosive to design optimal drilling and blasting pattern in the tunnel, two parameters of the specific surface energy and impedance factor take part. When the values of these two parameters are larger for a specific rock texture (in this study, limestone), Holemeberg-Persson method is preferred for the design, and if their values are trivial for the rock (in this study, marl and sandstone), the energy balance method is preferable to the Swedish method. Amon these two methods, i.e. energy balance and Norwegian methods, the energy balance method is more acceptable than the latter. Lastly, the value of stemming in the Swedish methods is said to be lass than that in the Norwegian and energy balance methods.
