نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۹- شماره‌ی۳/پاییز ۱۳۹۹

توسعه نرم‌افزار کاربردی طراحی الگوی آتشکاری تونل

پژوهشی

رضا اعلائی[1*]؛ جعفر خانی[2]؛ سینا رستم‌آبادی[3]؛ محمد غفوری‌مقدم[4]
۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، rezaalaei99@gmail.com
۲- دانشجوی دکتری؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، jafar.khani@modares.ac.ir
۳- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۴- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، m.ghafori.m@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶
شماره صفحات: ۲۵۳ تا ۲۶۵
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2021.9970.1396

واژگان کلیدی
الگوی آتشکاری
توسعه نرم‌افزار
سی شارپ
حفاری ویژه
خرج ویژه

چکیده

چال‌زنی و آتشکاری به‌دلیل مزایایی مانند انعطاف‌پذیری به‌عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد حفر تونل به‌شمار می‌آید. طراحی یک الگوی آتشکاری دقیق و بهینه برای دستیابی به پیشروی بالا، هزینه‌تمام‌شده کمتر و جلوگیری از پدیده‌های خارج از طرح بسیار سودمند است. طراحی الگوی آتشکاری فرایندی زمان‌بر بوده و دستیابی به الگوی بهینه آتشکاری مستلزم تکرار طراحی‌ها و انتخاب بهترین الگو است. از این‌رو، وجود ابزار رایانه‌ای می‌تواند در کاهش زمان محاسبات و طراحی‌ها مفید باشد. در تحقیق حاضر، با استفاده از زبان سی‌شارپ نرم‌افزاری گرافیکی برای طراحی الگوی آتشکاری تونل با استفاده از ۹ روش پرکاربرد شامل، روش‌های انتقال انرژی موازی و زاویه‌ای، نروژی، هلمبرگ و پرسون، گوستافسون، مدل‌های ساده‌شده لوپز و الافسون و روش‌های موازی و زاویه‌ای کونیا توسعه داده شده‌است. این نرم‌افزار با دریافت ابعاد سطح‌مقطع، خصوصیات بستر تونل و خصوصیات خرج مصرفی به‌عنوان ورودی، الگوی آتشکاری را به‌صورت خودکار با استفاده از ۹ روش اشاره‌شده طراحی نموده و پارامترهای کلیدی حاصل از طراحی را گزارش می‌دهد. برای اعتبارسنجی نرم‌افزار، نتایج حاصل از آن در شرایط ثابت با طراحی دستی مقایسه شده‌است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در سطح مقطع مورد بررسی، نرم‌افزار جانمایی مناسبی برای چال‌ها ارایه نموده و مقدار خرج ویژه و حفاری ویژه را در روش‌های مختلف با کمتر از ۱۲ درصد انحراف نسبت به طراحی دستی محاسبه می‌کند. در این نرم‌افزار قابلیت چاپ الگوها به‌صورت نسخه اجرایی فراهم شده‌است که می‌تواند به‌طور مستقیم در کارگاه‌های آتشکاری مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق ابزاری برای تهیه و انتخاب الگوی اولیه آتشکاری تونل ارایه شده‌است.

۱- پیش‌گفتار

با وجود پیشرفت‌های گسترده در زمینه ساخت و استفاده از ماشین‌آلات حفاری مکانیزه در حفر فضاهای زیرزمینی، چال زنی و آتشکاری به‌دلیل مزایایی از قبیل انعطاف‌پذیری بالا، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه پایین‌تر و نیاز کمتر به نیروی آموزش‌دیده از اهمیت بالایی برخوردار است. هزینه‌های عملیات آتشکاری بخش زیادی از هزینه‌های حفاری فضاهای زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. از طرفی در طراحی الگوی چالزنی و آتشکاری مناسب یکی از اهداف کلیدی، دستیابی به آتشکاری موفق با هزینه و پدیده‌های خارج از طرح کمتر و پیشروی بالاتر است *(Chakraborty, 1998)* و

* تهران؛ تهران ویلا؛ کوچه شهید جوادی؛ پلاک ۶۹؛ واحد ۳؛ کدپستی: ۱۴۴۴۸۴۵۱۱۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۹۳۵۸۰۱۸۵۴۰

(Yilmaz & Unlu, 2014)؛ بنابراین بهینه‌سازی پارامترهای قابل کنترل عملیات آتشکاری برای کمینه‌سازی هزینه تمام‌شده حفر فضای زیرزمینی و همچنین بهبود کیفیت حفاری امری ضروری است. طراحی الگوی آتشکاری شامل، الگوی چالزنی، خرج‌گذاری‌ها و تاخیرها، یکی از مراحل اصلی تاثیرگذار در کاهش هزینه‌ها و مطلوب بودن عملیات آتشکاری است *(Lopez, et al., 1995)*، *(Zare & Bruland, 2006)* و *(Iverson, et al., 2008)*.

طراحی الگوی آتشکاری و تکرار آن برای بهینه‌سازی پارامترهای قابل کنترل آتشکاری، فرآیندی زمان‌بر بوده و خطای انسانی در مراحل طراحی، باعث کاهش راندمان عملیات و ایجاد پدیده‌های خارج از طرح می‌شود. برای تسریع در فرآیند طراحی و بهینه‌سازی الگوی آتشکاری و همچنین حذف خطای انسانی از مرحله طراحی، استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای می‌تواند بسیار مفید باشد *(Johnsen & Matheisen, 2000)* و *(Dey & Murthy, 2006)*. تا کنون تلاش‌هایی برای توسعه ابزار رایانه‌ای طراحی الگوی آتشکاری تونل انجام گرفته‌است؛ اما به دلیل پیچیدگی جانمایی چال‌های پیشروی و همچنین وابسته بودن الگوی بهینه به شرایط زمین‌شناسی و تجهیزات هر پروژه، همچنان نیاز به نرم‌افزاری جامع، انعطاف‌پذیر و سازگار با زمین‌شناسی و شرایط کارگاه‌های کشور برای طراحی الگوی چالزنی و آتشکاری احساس می‌شود.

در تحقیق حاضر با بررسی نرم‌افزارهای موجود و مقایسه ویژگی‌های آن‌ها، یک نرم‌افزار رایانه‌ای مطابق با شرایط عملیاتی کشور، برای انجام محاسبات طراحی الگوی آتشکاری با استفاده از ۹ مدل پرکاربرد ارایه شده‌است. این نرم‌افزار به زبان سی‌شارپ (C#) و محیط گرافیکی کاربر پسند توسعه داده شده‌است.

خروجی نرم‌افزار برای هر روش علاوه بر محاسبه پارامترهای الگوی آتشکاری (شامل تعداد چال، قطر چال، طول چال، مشخصات چال خالی، حفاری ویژه و خرج ویژه) نموداری گرافیکی و رنگی از الگوی قرارگیری چال‌ها در سینه‌کار را ارایه می‌نماید. علاوه بر این، در این نرم‌افزار، ابزاری برای مقایسه نتایج حاصل از ۹ روش پرکاربرد و انتخاب الگوی بهینه با توجه به شرایط موجود فراهم شده‌است. در الگوی گرافیکی ارایه شده توسط نرم‌افزار، جزییات اجرایی شامل مختصات دهانه چال، قطر و طول چال، جزییات خرج‌گذاری و ترتیب انفجار وجود داشته و امکان ذخیره سازی و پرینت الگو فراهم شده است؛ به طوری که این الگو به طور مستقیم در کارگاه آتشکاری قابل استفاده باشد.

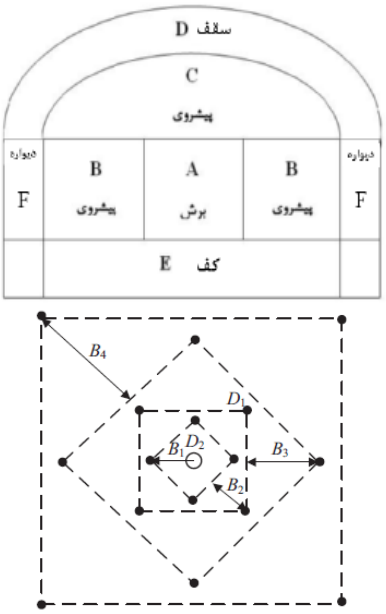
۲-خلاصه‌ای از روش‌های طراحی الگوی آتشکاری

آتشکاری در تونل‌ها نسبت به آتشکاری در سطح به دلیل وجود تنها یک سطح آزاد، از عملیات پیچیده‌تری برخوردار است. در حفر تونل‌ها، ابتدا با ایجاد یک برش، سطح آزاد مورد نیاز برای بقیه سطح مقطع تامین می‌شود. چگونگی جانمایی چال‌ها در سینه کارهای تونلی، یکی از مهم‌رین پارامترهای قابل کنترل در آتشکاری‌های زیرزمینی است. به طورکلی روش‌های مختلفی برای طراحی الگوی آتشکاری سینه کارهای تونلی وجود دارد که عموماً به دو صورت طراحی با برش موازی و برش زاویه‌ای توسعه یافته‌اند. در ادامه برخی از این روش‌ها به‌صورت خلاصه معرفی می‌شود.

۲-۱- مدل‌های سوئدی

می‌توان گفت اولین تلاش‌ها برای طراحی الگوی مناسب آتشکاری در سال ۱۹۶۳ توسط لانگفورس با ارایه روش سوئدی آغاز شد که یک روش تجربی است و پس از آن توسط افراد دیگری نظیر هولمبرگ (۱۹۸۲)، کونیا (۱۹۹۵) توسعه داده شده و کامل گردید؛ همچنین افرادی نظیر الافسون (۱۹۹۰) و لوپز (۱۹۹۵) این روابط را ساده سازی نموده‌اند. در این مدل‌ها سطح‌مقطع تونل مطابق **شکل ۱**، (بالا) به پنج بخش برش، پیشروی، کف، دیواره و سقف تقسیم می‌شود. در این مدل‌ها، برش چهارمقطعی **شکل ۱**، (پایین) به عنوان یکی از کاربردی‌ترین نوع برش‌های موازی در نظر گرفته می‌شود *(Longfors & Kihlstrom, 1978)*، *(Lopez, et al., 1995)*، *(Gustafsson, 1973)* و *(Persson & Holemberg, 1993)*. مدل‌های سوئدی برای برش‌های زاویه‌ای نیز توسعه داده شده‌اند. مزیت اصلی برش‌های زاویه‌ای، مصرف کمتر مواد منفجره به دلیل استفاده بهتر از سطح آزاد موجود و امکان جهت دادن به سمت ناپیوستگی‌های قابل مشاهده در مقطع است. با این حال به واسطه مشکلات مربوط به حفاری چال‌ها، خصوصا در تونل‌های با مقطع کوچک، روز به روز از کاربرد این

برش‌ها کاسته می‌شود (*Lopez, et al., 1995*).



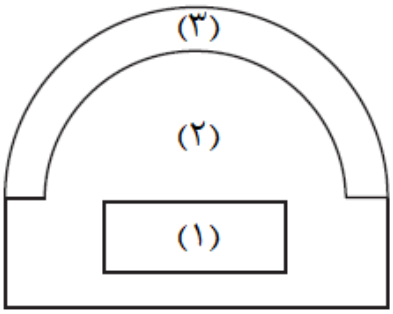
شکل ۱-تقسیم‌بندی سینه‌کار (بالا) و برش چهارمقطعی در روش سوئدی (پایین) (Ostovar, 2017)

۲-۲- مدل انتقال انرژی

مدل انتقال انرژی یک مدل تئوری است که بر اساس اصل انتقال انرژی توسعه داده شده که در آن انتقال انرژی تابعی از خصوصیات سنگ و ماده منفجره است (*Vanhatalo, 1999*). بررسی دینامیکی مواد منفجره نشان می‌دهد که انرژی تولید شده از مواد منفجره، تأثیرات متفاوتی ایجاد می کند. در ابتدا لازم است مشخص شود، چه مقدار از انرژی ماده منفجره واقعاً به سنگ انتقال می‌یابد. قانون انتقال انرژی، تابعی از کیفیت ماده منفجره و سنگ دریافت کننده انرژی (ضریب امپدانس) و کیفیت خرج گذاری (ضریب جفت‌شدگی) است. عاملی از سنگ یا ماده منفجره که کیفیت انتقال انرژی از ماده منفجره به سنگ را تعیین می کند، امپدانس نامیده می‌شود. امپدانس ماده منفجره (I_e)، به صورت حاصل‌ضرب وزن مخصوص (ρ_e) و سرعت انفجار ماده منفجره (VOD) تعریف می‌شود. امپدانس سنگ (I_r) نیز به صورت حاصل‌ضرب وزن مخصوص (ρ_r) و سرعت عبور موج (C) در سنگ تعریف می‌شود (با واحد $Kg.m^{-2}.s^{-1}$). انرژی منتقل شده توسط ضریب امپدانس یا ضریب انتقال انرژی از ماده منفجره به سنگ تعریف می‌شود که به‌صورت گزاره (۱) بیان می‌شود (*Singh, et al., 2006*):

$$\eta_1 = 1 - \frac{(I_e - I_r)^2}{(I_e + I_r)^2} \qquad (۱)$$

این رابطه نشان می‌دهد، هر چه مقدار امپدانس ماده منفجره به سنگ نزدیک‌تر باشد، ضریب امپدانس افزایش یافته و انرژی بیشتری از ماده منفجره به سنگ منتقل می شود، درحالی که هر چه با یکدیگر اختلاف داشته باشند، ضریب امپدانس کاهش می‌یابد؛ بنابراین برای هر نوع سنگ باید ماده منفجره‌ای به کار برد که امپدانس آن دو به هم نزدیک باشد تا حداکثر انرژی ممکن از ماده منفجره به سنگ منتقل شود. در این روش سطح مقطع تونل مطابق **شکل ۲**، به سه بخش (۱) بخش بازکننده یا برش (۲) پیشروی یا تولید (۳) محیط تقسیم می‌شود (*Vanhatalo, 1999*)، (*Singh, et al., 2006*).



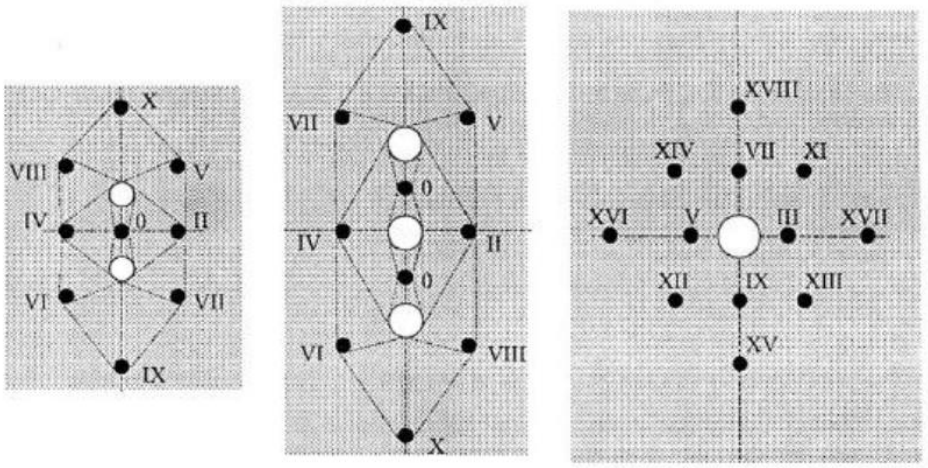
شکل ۲- تقسیم‌بندی سینه‌کار در روش انتقال انرژی (Ostovar, 2017)

۲-۳- مدل NTNU

مدل طراحی آتشکاری *NTNU* در سال ۱۹۷۵ و ۱۹۹۵ توسط بخش مهندسی عمران و حمل و نقل دانشگاه *NTNU* توسعه داده شده است که یک مدل تجربی طراحی آتشکاری با استفاده از چال‌های موازی است. اولین نسخه از این مدل در سال ۱۹۷۵ به چاپ رسید. پس از اولین انتشار، این مدل سه بار و در سال های ۱۹۷۹، ۱۹۸۳ و ۱۹۹۵ به روز شده است. در این روش سینه‌کار تونل به قسمت‌های برش، پیشروی، بلندکننده (کف)، ردیف نزدیک به محیط و محیط تقسیم‌بندی می‌شود. در این روش آتشکاری آرام با دو ردیف چال محیطی پیشنهاد شده‌است. تراکم خرج‌گذاری در چال‌های محیط و نزدیک به محیط کاهش داده می‌شود.

طراحی برای این دو بخش به نوع سنگ‌های آن قسمت و پارامترهای هندسی بستگی دارد که باید در ابتدا مشخص شود (*Zare & Bruland, 2006*)، (*Zare, 2007*).

نمونه‌هایی از برش‌های طراحی‌شده به روش *NTNU* در **شکل ۳**، قابل مشاهده است.



شکل ۳- نمونه‌هایی از برش‌های طراحی‌شده با روش NTNU (Dey & Murthy, 2006)

۳-تهیه و توسعه نرم‌افزار طراحی الگوی آتشکاری تونل

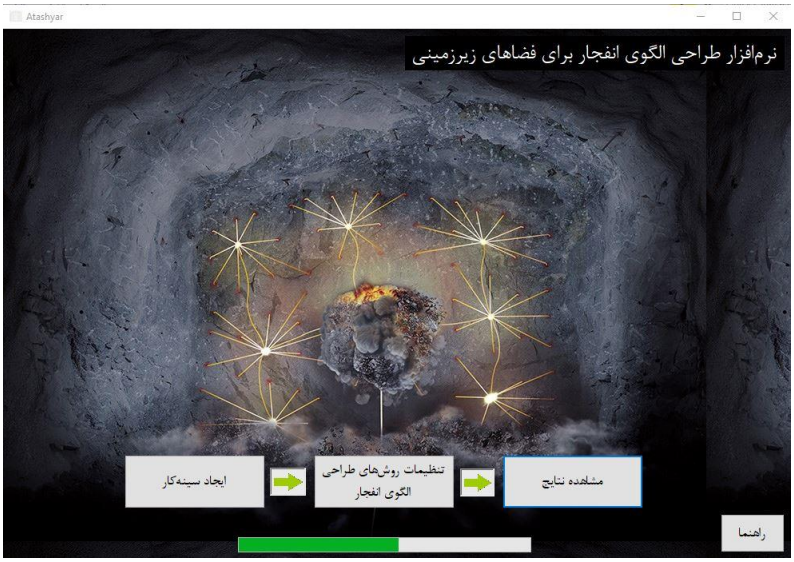
در این نرم‌افزار ابزاری خودکار برای طراحی الگوی آتشکاری تونل با استفاده از ۹ روش پرکاربرد ارایه شده‌است. نرم‌افزار ارایه‌شده، با استفاده از زبان سی‌شارپ با بیش از ۶ هزار خط توسعه داده شده‌است. چال‌های هر الگوی آتشکاری به‌صورت ماتریسی مدلسازی می‌شود که هر سطر ماتریس مربوط به یک چال بوده و در ستون‌های ماتریس اطلاعات مربوط به‌چال مانند موقعیت دهانه، زاویه، قطر، طول و خرج‌گذاری ذخیره می‌شود. در نهایت نتایج به‌دست آمده به‌صورت نمودار گرافیکی در داخل نرم‌افزار نمایش داده‌شده و جزئیات اجرایی الگوی آتشکاری در قالب فرمی همراه با نمودار گرافیکی نمایش داده می‌شود. نرم‌افزار حاضر با هدف طراحی خودکار الگوی آتشکاری تونل و قابل استفاده بودن برای کاربر با کمترین مهارت طراحی، توسعه داده شده‌است؛ از این‌رو برخی از پارامترها ثابت و برابر مقدار طراحی‌های تجربی انتخاب شده‌است.

۳-۱- محیط گرافیکی نرم‌افزار

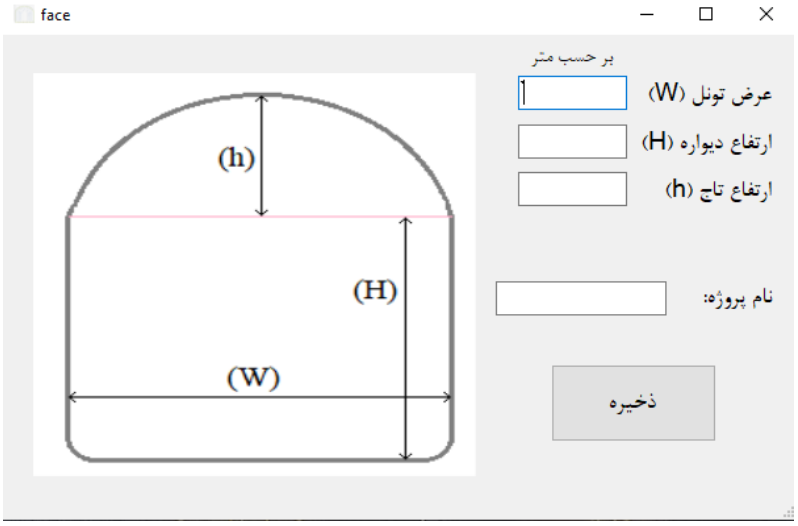
نرم‌افزار حاضر، ابعاد سطح‌مقطع، خصوصیات سنگ بستر و همچنین ماده منفجره را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و الگوی آتشکاری پروژه را با استفاده از ۹ روش پرکاربرد طراحی می‌کند. نتایج طراحی شامل، تصویر گرافیکی محل قرارگیری چال‌ها و همچنین جزئیات چالزنی و خرج‌گذاری چال‌ها است. صفحه اصلی نرم‌افزار در **شکل ۴**، نمایش داده شده‌است. این صفحه دارای دکمه‌هایی برای ورود به صفحه ایجاد سطح مقطع، تنظیمات روش‌های طراحی الگوی آتشکاری، مشاهده نتایج و راهنمای استفاده از نرم‌افزار است. امروزه به‌دلیل بهینه بودن سطح مقطع *D*- شکل برای تونل‌ها، مخصوصا تونل‌های حمل و نقل و انعطاف‌پذیری روش آتشکاری برای حفر آن، سطح مقطع *D*- شکل به‌صورت گسترده در ساخت و ساز تونل‌ها استفاده می‌شود. به‌دلیل پیچیدگی الگوریتم جانمایی چال‌ها در هندسه‌های مختلف سطح مقطع در نرم‌افزار تحقیق حاضر، الگوی آتشکاری برای تونل‌های *D*- شکل ارایه شده است. مطابق فرم **شکل ۵**، برای هر پروژه عرض تونل، ارتفاع دیواره و تاج و همچنین نام پروژه از کاربر دریافت می‌شود. با دریافت عرض تونل، ارتفاع دیواره و ارتفاع تاج تونل، سطح مقطع *D*- شکل مورد نظر قابل مدل‌سازی است.

خصوصیات ماده منفجره و سنگ مورد نیاز برای طراحی الگوی آتشکاری از طریق پنجره **شکل ۶**، قابل مدیریت است. این پارامترها برای ۲۰ نوع سنگ و ۲ نوع

ماده منفجره شامل، امولوسیون و آنفو داخل نرم‌افزار آماده شده و کاربر می‌تواند با انتخاب نوع سنگ و ماده منفجره مقدار پیش فرض پارامترهای طراحی را مشاهده و اعمال نموده و یا در صورت نیاز اعداد جدید را وارد نماید. برای سهولت استفاده از نرم‌افزار، به‌خصوص برای افراد مبتدی در طراحی الگوی آتشکاری، صفحه راهنمای استفاده از نرم‌افزار طراحی شده و با کلیک روی دکمه راهنما، صفحه راهنمای استفاده نمایش داده می‌شود.



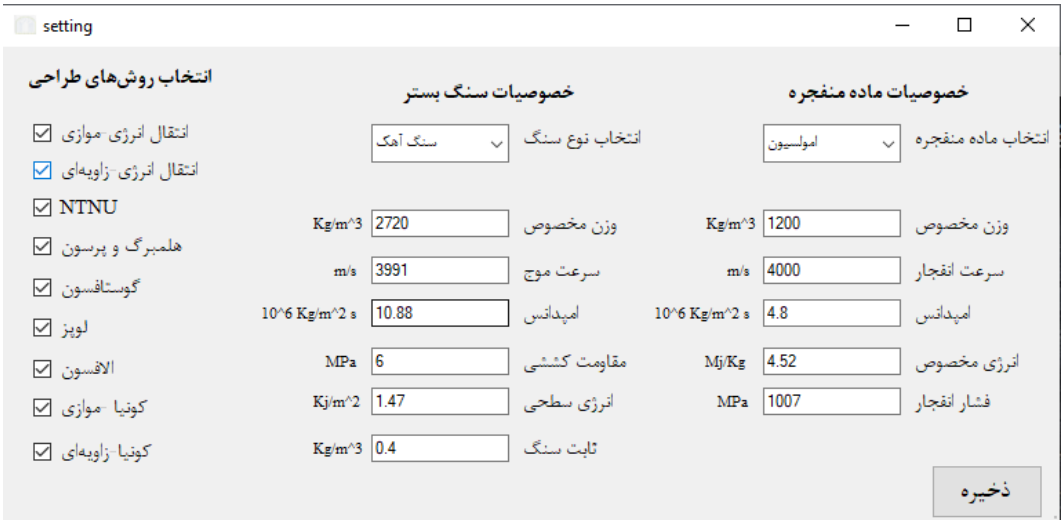
شکل ۴- صفحه اصلی نرم‌افزار



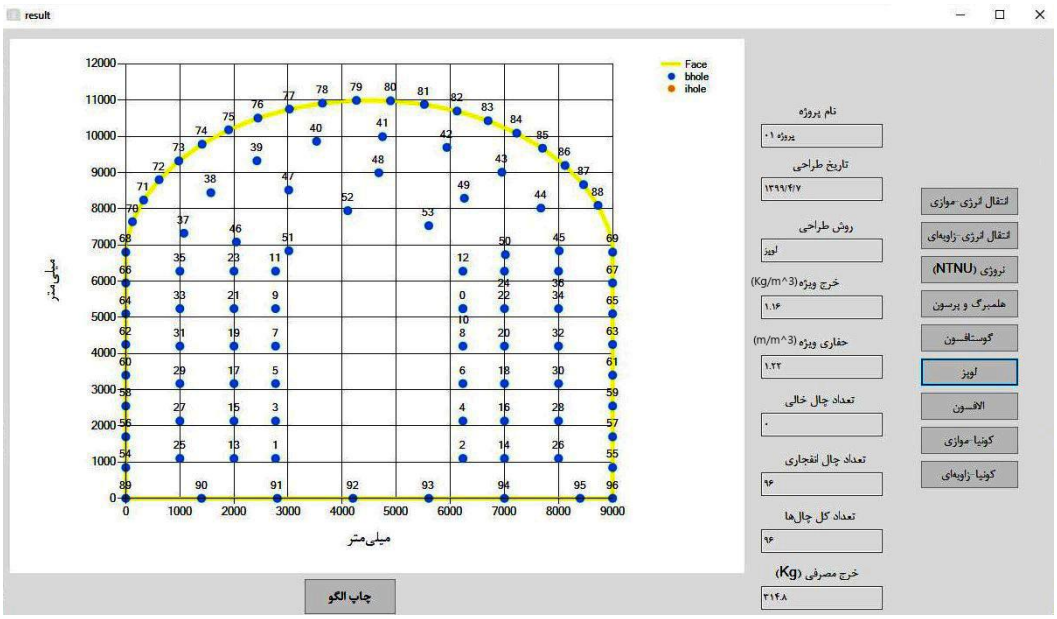
شکل ۵- صفحه ایجاد سطح‌مقطع

با تمام شدن محاسبات طراحی الگوی آتشکاری، پنجره‌ای مطابق **شکل ۷**، برای نمایش نتایج مشاهده می شود. این پنجره شامل دکمه‌هایی برای انتخاب روش طراحی برای نمایش الگوی آتشکاری است. با انتخاب هر روش، در نمودار سمت چپ پنجره، جانمایی چال‌ها بر روی سطح‌مقطع تونل نمایش داده می‌شود. در این نمودار، حاشیه سینه‌کار با خط زرد، چال خالی با نقاطی به رنگ نارنجی و چال انفجاری با نقاطی به رنگ آبی نمایش داده می‌شود. همچنین نتایج کلیدی طراحی، نام پروژه و روش طراحی نیز در کنار نمودار نمایش داده می‌شود. به این ترتیب خرج ویژه

و حفاری ویژه، تاریخ طراحی، تعداد چال‌های خالی و انفجاری و خرج مصرفی برای هر الگوی آتشکاری نیز قابل مشاهده بوده و بسته به شرایط پروژه می‌تواند کاربر را در انتخاب الگوی آتشکاری راهنمایی کند.



شکل ۶- صفحه تنظیمات روش‌های طراحی

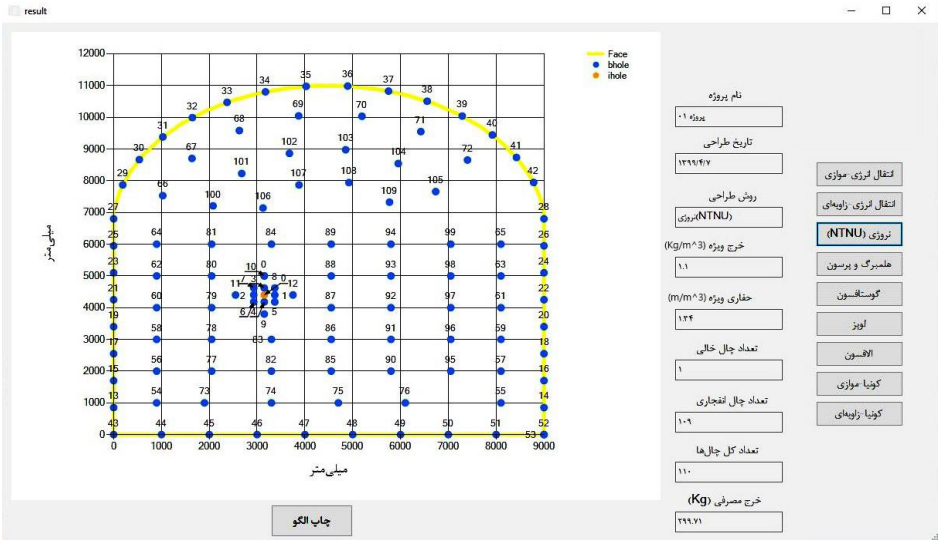


شکل ۷- نمونه‌ای از صفحه نمایش خروجی

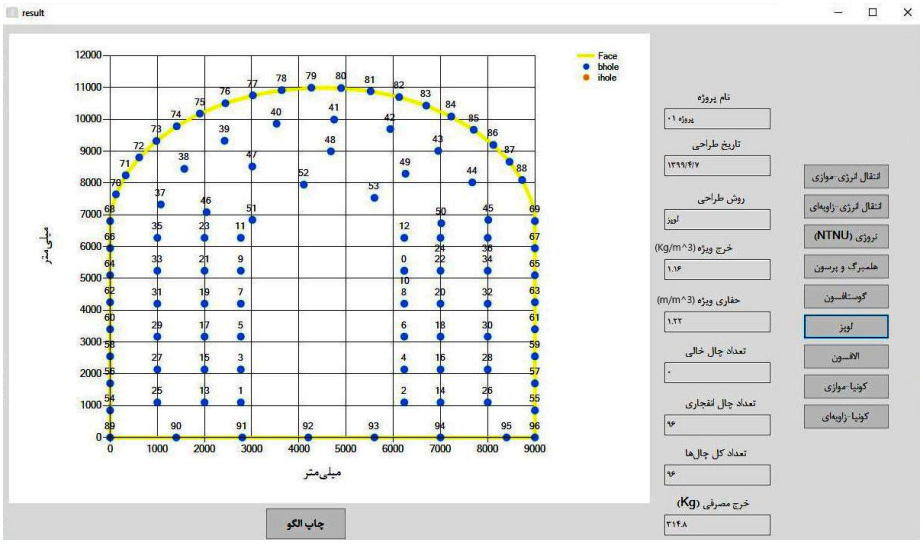
۳-۲- نتایج خروجی نرم‌افزار

نرم‌افزار حاضر قابلیت طراحی الگوی آتشکاری با ابعاد مختلف سطح‌مقطع را داشته و دو نوع برش موازی و زاویه‌ای را طراحی می‌کند. در نهایت جزئیات ورودی و خروجی هر پروژه را در فایل اکسل با نام پروژه ذخیره می‌کند؛ همچنین پس از مقایسه و انتخاب الگوی آتشکاری، جزئیات اجرایی الگوی آتشکاری شامل تصویر گرافیکی الگو روی سطح‌مقطع، مختصات دهانه، قطر، طول و زاویه چال و همچنین جزئیات خرج‌گذاری هر چال قابل دسترسی است و با درخواست کاربر در قالب فرمی آماده چاپ می‌شود. با افزایش مساحت

سطح مقطع و به طبع آن تعداد چال‌ها، زمان پردازش پروژه افزایش می‌یابد. در **شکل ۸ و شکل ۹**، نمونه‌هایی از نتایج گرافیکی الگوی آتشکاری خروجی نرم‌افزار تحقیق حاضر نمایش داده شده‌است. این طراحی‌ها روی تونلی با سطح مقطع D- شکل با عرض دهانه ۹ متر، ارتفاع دیواره ۷ متر و ارتفاع تاج ۴ متر انجام گرفته است. در این سطح مقطع، نرم‌افزار در کمتر از ۵ دقیقه محاسبات را برای ۹ روش انجام داده و نتایج را نمایش می‌دهد.



شکل ۸- نتایج طراحی با مدل موازی NTNU



شکل ۹- نتایج طراحی با مدل زاویه‌ای لوپز

۳-۳- صحت‌سنجی

اعتبارسنجی نرم‌افزار با ورودی‌های مختلف و بررسی تمام شرایط ممکن امری بسیار زمان‌بر بوده و به دلیل در دسترس نبودن مرجع مشخص طراحی تقریبا ناممکن است. به‌منظور اعتبارسنجی نرم‌افزار، نتایج در شرایطی خاص و ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی نشان داد، در عرض دهانه بیشتر از ۵ متر، نرم‌افزار الگوی مناسبی برای جانمایی چال‌ها ارایه می‌دهد؛ همچنین برای صحت‌سنجی

جزئیات خروجی نرم‌افزار شامل، موقعیت و اندازه چال‌ها و خرج‌گذاری‌ها، نتایج نرم‌افزار حاضر با یک دسته از طراحی های انجام‌گرفته به‌صورت دستی مقایسه شد. این طراحی‌ها برای سطح مقطع نعل‌اسبی با عرض ۶/۸، ارتفاع دیواره ۴/۵ و ارتفاع تاج ۱/۶۵ متر انجام شده‌است. سنگ بستر تونل سنگ آهک و ماده منفجره امولسیون به‌عنوان خرج مصرفی در نظر گرفته شده‌است. در **جدول ۱ و جدول ۲**، به‌ترتیب خصوصیات سنگ بستر و ماده منفجره استفاده شده در این پروژه ارایه شده‌است.

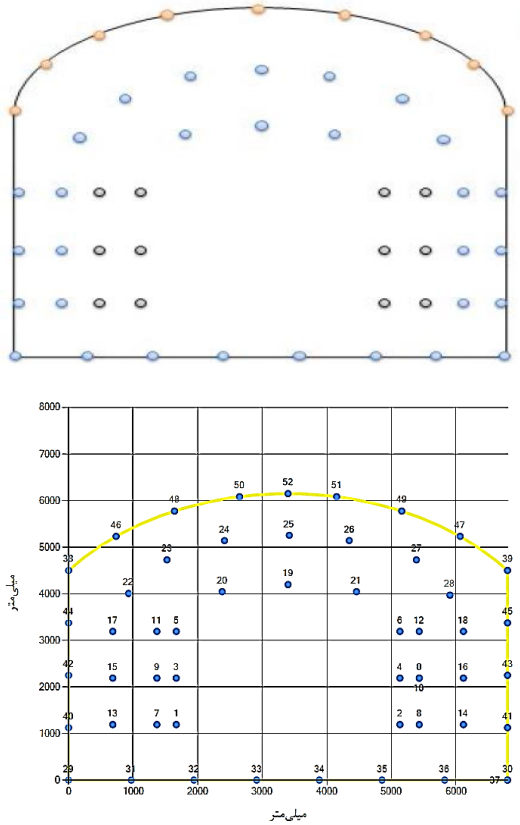
جدول ۱-خصوصیات ژئومکانیکی سنگ بستر (Zou , 2017)

پارامتر	مقدار	واحد
جرم مخصوص	۲۷۲۰	kg/m^3
سرعت موج	۳۹۹۱	m/S
امپدانس	۱۰/۸۶	$10^6\ kg/m^2S$
انرژی سطحی	۱/۴۷	kj/m^2
مقاومت کششی	۶	MPa
ثابت سنگ	۰/۴	kg/m^3

جدول ۲- خصوصیات ماده منفجره مصرفی (Parchin, 2016)

پارامتر	مقدار	واحد
جرم مخصوص	۱۲۰۰	kg/m^3
سرعت انفجار	۴۰۰۰	m/S
امپدانس	۴/۸	$10^6\ kg/m^2S$
انرژی مخصوص	۱/۴۷	Mj/kg
فشار انفجار	۱۰۰۷	MPa

مقایسه نتایج خروجی نرم‌افزار و طراحی دستی در روش‌های مختلف نشان داد، در سطح مقطع فوق‌الذکر، نرم‌افزار جانمایی مشابهی با طراحی دستی و با همان تعداد چال ارایه می‌دهد. در **شکل ۱۰**، نمونه‌ای از الگوهای آتشکاری طراحی شده به روش انتقال انرژی زاویه‌ای نمایش داده شده‌است. الگوی **شکل ۱۰** (بالا) به‌صورت دستی طراحی شده و الگوی **شکل ۱۰** (پایین)، خروجی نرم‌افزار است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نرم‌افزار جانمایی مشابهی با همان تعداد چال نسبت به طراحی دستی ارایه می‌کند. برای بررسی کلی صحت الگوهای آتشکاری در این سطح مقطع، نتایج کلیدی طراحی شامل حفاری ویژه و خرج ویژه محاسبه شده با نرم‌افزار با نتایج طراحی دستی با روش‌های مختلف مقایسه شد. خلاصه این مقایسه برای روش‌های مختلف در **جدول ۳**، ارایه شده است.



شکل ۱۰- الگوی آتشکاری به روش انتقال انرژی زاویه‌ای؛ طراحی دستی (بالا) و خروجی نرم‌افزار (پایین)

با توجه به این جدول مشاهده می‌شود، در روش‌های مختلف، خرج ویژه و حفاری ویژه محاسبه‌شده با نرم‌افزار با مقدار حاصل از طراحی دستی، کمتر از ۱۲ درصد انحراف دارد. بیشترین انحراف مربوط به روش گوستافسون است و در بقیه روش‌ها، این انحراف کمتر و در برخی روش‌ها نیز حدود ۱ درصد محاسبه شده‌است. می‌توان نتیجه گرفت، با استفاده از نرم‌افزار حاضر می‌توان در این سطح مقطع حفاری ویژه و خرج ویژه را برای روش‌های مختلف به‌طور میانگین با ۴/۵۶ و ۴/۷۸ درصد انحراف نسبت به طراحی دستی محاسبه کرد. اختلاف جزئی خروجی نرم‌افزار با نتایج طراحی

دستی می‌تواند ناشی از گرد کردن مقادیر، اعمال محدودیت ابعاد فشنگ خرج مصرفی و خطای انسانی طی طراحی دستی باشد. با این‌حال، با توجه به اختلاف چشم‌گیر زمان صرف‌شده برای طراحی با استفاده از نرم‌افزار نسبت به طراحی دستی، این روش می‌تواند برای کاهش زمان طراحی و جلوگیری از بروز خطای طراح مورد استفاده قرار گیرد.

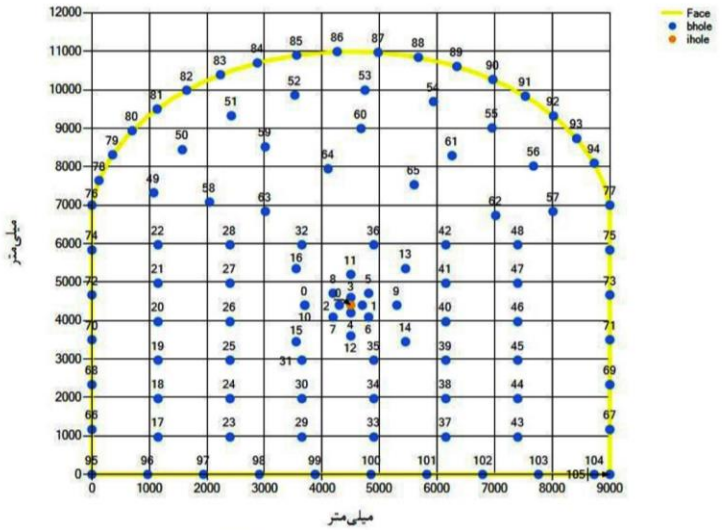
جدول ۳- مقایسه نتایج طراحی الگوی آتشکاری نرم‌افزار و طراحی دستی

روش طراحی الگوی آتشکاری	خرج ویژه (kg/m^3)			حفاری ویژه (m/m^3)		
	طراحی نرم‌افزار	طراحی دستی	انحراف (٪)	طراحی نرم‌افزار	طراحی دستی	انحراف (٪)
انتقال انرژی- موازی	۱/۵۷	۱/۵۱	۴	۱/۶۹	۱/۷۵	۳
انتقال انرژی- زاویه‌ای	۱/۲۷	۱/۱۹	۷	۱/۳۵	۱/۴۲	۵
نروژی (*NTNU*)	۱/۴۷	۱/۴۵	۱	۱/۷۸	۱/۷۵	۲
هلمبرگ و پرسون	۱/۵۹	۱/۵	۶	۱/۶۹	۱/۷۲	۲
گوستافسون	۰/۹۹	۱/۰۹	۹	۱/۱۴	۱/۳	۱۲
مدل ساده‌شده لوپز	۱/۲۷	۱/۲	۶	۱/۴۴	۱/۴۵	۱
مدل ساده‌شده الافسون	۱/۰۳	۱/۰۴	۱	۱/۴۳	۱/۴۴	۱
مدل کونیا- موازی	۱/۱۵	۱/۰۸	۶	۱/۳۵	۱/۴۴	۶
مدل کونیا- زاویه‌ای	۱/۱	۱/۰۷	۳	۱/۰۴	۱/۱۴	۹

۴- بحث و جمع‌بندی

چال‌زنی و آتشکاری به‌دلیل انعطاف‌پذیری و مزایای دیگر به‌صورت گسترده در پروژه‌های تونل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستیابی به الگوی انفجار بهینه، یکی از نتایج کلیدی در بهره‌وری و موفقیت پروژه‌های تونل‌سازی به روش چالزنی و آتشکاری به‌شمار می‌آید. طراحی الگوی آتشکاری فرآیندی زمان‌بر بوده و معمولا به‌دلیل وابستگی به نظر طراح، نتایج متغیری به‌دست می‌آید. از طرف دیگر، رسیدن به الگوی آتشکاری بهینه، مستلزم تکرار طراحی‌ها به منظور مقایسه و انتخاب بهترین الگو است. استفاده از سیستم‌های رایانه‌ای برای انجام محاسبات طراحی الگوی آتشکاری زمان محاسبات و احتمال خطا طی محاسبات را کاهش می‌دهد. در این میان با توسعه نرم‌افزار گرافیکی خودکار برای طراحی الگوی آتشکاری، این کار سریع‌تر، دقیق‌تر و با هزینه کمتر انجام می‌شود.

در این تحقیق نرم‌افزاری مبتنی بر سی شارپ برای طراحی الگوی آتشکاری تونل‌های با مقطع D- شکل ارایه شده که ابتدا سطح مقطع و پارامترهای موردنیاز طراحی را از کاربر دریافت کرده و نتایج طراحی الگوی آتشکاری به ۹ روش را بصورت گرافیکی نمایش می‌دهد؛ همچنین در کنار هر الگوی آتشکاری، نتایج کلیدی آتشکاری شامل، خرج ویژه، حفاری ویژه، تعداد چال‌ها، طول حفاری و مقدار خرج مصرفی مربوط به هر روش را در کنار هر الگو نمایش می دهد. بدین‌ترتیب، کاربر با وارد کردن اطلاعات مربوط به پروژه می‌تواند الگوهای آتشکاری به روش‌های مختلف را مشاهده کرده و با در نظر گرفتن شرایط کارگاهی پروژه و بررسی‌های اقتصادی، الگوی مناسب را انتخاب کند. در این نرم‌افزار ابزاری برای دریافت خروجی، فراهم شده‌است و با درخواست کاربر، نسخه چاپی الگوی آتشکاری آماده می‌شود. این نسخه شامل تصویر گرافیکی و مقیاس‌دار الگوی انتخابی و جزئیات اجرایی الگو است. این جزئیات شامل، قطر، طول و زاویه انحراف چال‌ها، محل نسبی دهانه چال‌ها، شماره تأخیر، قطر و طول خرج و طول گل‌گذاری است. نمونه‌ای از نسخه چاپی الگوی آتشکاری طراحی‌شده با نرم‌افزار در **شکل ۱۱**، قابل مشاهده است. این فرم، تمام اطلاعات لازم برای اجرای الگوی آتشکاری را در بر داشته و می‌تواند در کارگاه مورد استفاده قرار گیرد.



شماره چال	قطر چال	طول چال	فاصله افقی	فاصله عمودی	انحراف چال	شماره تاخیر	قطر خرج	طول خرج	طول گل‌گذاری
0	102	3158	4500	4400	0	0	0	0	0
1	45	3158	4700	4400	0	1	40	2858	300
2	45	3158	4300	4400	0	1	40	2858	300
3	45	3158	4500	4600	0	1	40	2858	300
4	45	3158	4500	4200	0	1	40	2858	300
5	45	3158	4810	4710	0	2	38	2858	300
6	45	3158	4810	4090	0	2	38	2858	300
7	45	3158	4190	4090	0	2	38	2858	300
8	45	3158	4190	4710	0	2	38	2858	300
9	45	3158	5300	4400	0	3	38	2758	400
10	45	3158	3700	4400	0	3	38	2758	400
11	45	3158	4500	5200	0	3	38	2758	400
12	45	3158	4500	3600	0	3	38	2758	400
13	45	3158	5450	5350	0	4	38	2658	500
14	45	3158	5450	3450	0	4	38	2658	500

شکل ۱۱- نسخه چاپی الگوی آتشکاری

۵- نتیجه‌گیری

با توسعه نرم‌افزار تحقیق حاضر، بستر لازم برای دریافت اطلاعات ورودی یک پروژه تونل به‌منظور طراحی الگوی آتشکاری با استفاده از رایانه فراهم شده و الگوهای آتشکاری به ۹ روش به‌صورت خودکار طراحی می‌شود. این الگوها به‌صورت گرافیکی در محیط نرم‌افزار نمایش داده شده و پارامترهای کلیدی هر الگو شامل، خرج‌ویژه و حفاری ویژه مربوط به آن الگو را گزارش می‌کند. با انتخاب و تأیید الگو توسط کاربر، الگوی انتخابی به‌صورت نسخه اجرایی چاپ می شود. برتری نرم‌افزار حاضر نسبت به نرم‌افزارهای قبلی، تنوع روش‌های طراحی، جانمایی خودکار و ارایه نمودار گرافیکی محل دهانه چال‌ها، گزارش خرج ویژه و حفاری ویژه و همچنین چاپ نسخه اجرایی الگوی آتشکاری طراحی شده است؛ بنابراین نرم‌افزار ارایه‌شده می‌تواند در کارگاه‌های تونل سازی به روش چالزنی و آتشکاری به‌منظور طراحی سریع و بهینه کردن الگوهای آتشکاری، مورد استفاده قرار گیرد؛ همچنین علاوه‌بر کاربرد اجرایی نرم‌افزار، با توسعه کدهای رایانه‌ای روش‌های مختلف طراحی الگوی آتشکاری، امکان تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی پارامترهای آتشکاری فراهم شده‌است. با استفاده از این کدها و بررسی حالات مختلف و همچنین مقایسه با شرایط اجرایی می‌توان الگوی بهینه پروژه را به‌دست آورد؛ بنابراین نرم‌افزار ارایه شده می‌تواند ابزاری کارامد برای ارایه الگوی بهینه آتشکاری و به طبع آن کاهش چالزنی، خرج مصرفی و به‌طور کلی کاهش هزینه‌های چالزنی و آتشکاری باشد. دستیابی به الگوی بهینه در چالزنی و آتشکاری تونل‌ها به‌دلیل عدم قطعیت موجود در خصوصیات بستر حفاری، نیازمند آزمایش طراحی‌های اولیه و بهینه‌سازی الگو در زمین حفاری و با شرایط واقعی موجود است؛ بنابراین با در نظر گرفتن شرایط فنی و اقتصادی،

الگوی اولیه با استفاده از نرم‌افزار تهیه شده و پس از اجرای الگو در سیکل‌های اولیه تونل و بررسی نتایج می‌توان الگو را برای سیکل‌های بعدی بهینه کرد.

۶-پیشنهادات

با توجه به نتایج و تجربه کسب شده از تحقیق حاضر، موضوعات زیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:

توسعه روابط و الگوریتم‌هایی برای پیش‌بینی نتایج انفجار از قبیل، پیشروی، خردایش، لرزش و پس‌شکست

- توسعه الگوریتم‌های جانمایی چال‌ها برای انواع هندسه سطح مقطع مانند نعل‌اسبی
- توسعه ابزاری برای تحلیل و بهینه‌سازی الگوی طراحی شده.

۷- مراجع

Chakraborty, A. K.& P. Pal Roy & J. L. Jethwa & R. N. Gupta. (1998). "*Blast performance in small tunnels-a critical evaluation in underground metal mines"*. Tunnelling and Underground Space Technology 13, no. 3: 331-339.

Dey, K. & V. Murthy. (2006). Development of a tunnel blast design software (ITBlade-1.0) - an aid for efficient blasting. 54: p. 402-410.

Gustafsson R. (1973). Swedish blasting technique. Sweden: Gothenberg.

Iverson, S &, C. Kerkering, & W. Hustrulid.(2008). *"Application of the NIOSH-Modified Holmberg-Persson Approach to Perimeter Blast Design"*. In Proceedings Of The 34th Conference On Explosives And Blasting Technique.

Johnsen, J. & Matheisen, C.F.(2000). Modern Trends in Tunnelling and Blast Design, A.A.Balkema.

Longfors &, Kihlstrom B.(1978) . The modern technique of rock blasting. Stockholm: Almqvist & Wiksell Forlag AB.

Lopez Jimeno & Carlos, E & F. J. A. Carcedo. (1995). Drilling and blasting of rocks, AA Balkema.

Ostovar, R. (2017). Blasting in mines. (*J. D. Industrial unit) Amirkabir*

Parchin Chemical industry. (2015). Catalog of explosive materials.

Persson P & Holemberg R & Lee J. (1993). Rock blasting and explosive engineering. Florida: CRC Press.

Singh Tatla Dar & Bhawani Singh. (2006). Elsevier Geo-Engineering Book 5: Tunnelling In Weak Rocks. Vol. 5. Elsevier.

Vanhatalo L.K.. (1999) . Rock Excavation Handbook : Sandvik Tamrock.

Yilmaz, O. & T. Unlu. (2014). "An application of the modified Holmberg–Persson approach for tunnel blasting design". Tunnelling and Underground Space Technology. 43: p. 113-122.

Zare Shokrollah. (2007). "*Drill and Blast Tunneling Blast Design.*" Doctoral thesis at NTNU University.

Zare Shokrollah, & Amund Bruland. (2006). *"Comparison of tunnel blast design models"*. Tunnelling and underground space technology 21, no. 5: 533-541.

Zou, D. (2017). *Theory and technology of rock excavation for civil engineering*. Springer Singapore.

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering

(TUSE)

Volume 9-Issue 3\ Autumn2020

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Development of Application for Designing Tunnel Blasting Patterns

R. Alaei[1*]; J. Khani [2]; S. RostamAbadi[3]; M. GhafouriMoghadam[4]

1- MSc Graduate; Mining Department, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University,rezaalaei99@gmail.com

2- PhD Student; Mining Department, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, jafar.khani@modares.ac.ir

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

4- MSc Graduate; Faculty of Engineering, Mining Department, Tarbiat Modares University, m.ghafori.m@gmail.com

Received: 28 Aug 2020; Accepted: 5 Jan 2021

DOI: 10.22044/tuse.2021.9970.1396

Keywords

Blasting pattern
Software development
C#
Powder factor
Drilling factor
Blasting pattern
Software development

Final English Extended Abstract

Summary

Drilling and blasting are considered to be one of the most widely used tunnel excavations due to their advantages such as flexibility. It is very useful to design an accurate and optimal blasting pattern to achieve high progress, lower cost and also to prevent out-of-plan phenomena.

Introduction

Blasting pattern design is a time-consuming process, and achieving an optimal blasting pattern requires repetition of designs and selection of the best pattern. Therefore, the existence of a computer tool can be useful in reducing the time of calculations and designs.

Methodology and Approaches

In the present study, a software has been developed to design the blasting pattern of tunnels using 9 widely used methods including parallel and angular energy transfer methods, Norwegian, Holmberg and Persson, Gustafson, Lopez and Olofsson simplified models and Konya parallel and angular methods. In this software, project input including face dimension, substrate and explosive properties are taken from the user using forms. After entering the input and executing the project, the design results of the blasting pattern are calculated and provided to the user in two ways: It is displayed both graphically in the software and its details are stored in the user's system along with the project inputs. Moreover, the key parameters of blast pattern design, including powder factor and drilling factor, are calculated and displayed along with the results of blast pattern design, and the user can select the appropriate pattern according to the existing conditions. Finally, manual designs are used to validate the software results. Comparison of the results has shown that the software provides a suitable layout for the holes in different methods and calculates the amount of powder factor and drilling factor with less than 12% deviation. Among them, the results of software design with manual design in Norwegian and Olofsson methods have the least deviation in terms of powder factor and drilling factor. Minor differences in the results with the manual design results can be due to the rounding of numbers and the layout of product holes.

Results and Conclusions

With the development of the present software in this research, the platform for receiving input information of a tunnel project in order to automatically design the blasting patterns is provided, and blasting patterns are designed using 9 methods automatically. These patterns are displayed graphically in the software environment and the key parameters of each pattern including powder factor and drilling factor associated with that pattern are reported. When the template is selected and approved by the user, the selected template is printed as an executable copy.