

بررسی امکان جایگزینی دینامیت با آنفو در حفاری تونل‌ها

ابوصالح دهقانی^۱، حمید منصوری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان Dehghani.Aboosaleh@gmail.com

۲- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان hmansouri@mail.uk.ac.ir

(دریافت ۱۹ دی ۸۹، پذیرش ۲۸ آبان ۹۱)

چکیده

چالزنی و انفجار بنا به دلایل مختلف پرکاربردترین روش حفر تونل در سطح جهان است، بنابراین طراحی بهینه الگوی انفجار و انتخاب نوع ماده منفجره تا حد زیادی در اقتصادی بودن و ایمن بودن حفر تونل مؤثر هستند. در این مقاله، ضمن اصلاح الگوی انفجار تونل راه حضرت ابوصالح المهدی (عج) شهرستان اقلید، امکان جایگزینی دینامیت به عنوان یک ماده منفجره گران و با انرژی ویژه بالا با آنفو به عنوان یک ماده منفجره ارزان و با انرژی ویژه پایین مورد بررسی قرار گرفته است. اصلاح الگوی انفجار فعلی، طی دو انفجار آزمایشی انجام شد. سپس به منظور جایگزینی دینامیت با آنفو ۱۰ مرحله انفجار آزمایشی طراحی و اجرا شد. در هر انفجار آزمایشی، بخشی از دینامیت با آنفو جایگزین شده و پس از انجام انفجار، با در نظر گرفتن میزان پیشروی و هزینه ماده منفجره به کار رفته در انفجار، هزینه ویژه انفجار محاسبه شد. با معیار قرار دادن هزینه ویژه، نرخ پیشروی، بیش حفاری و داغ چال، نحوه خرج گذاری بهینه انتخاب شد. هزینه ویژه در الگوی انفجار پیشنهادی که در آن قسمتی از دینامیت با آنفو جایگزین شده است، ۳۲٪ کمتر از حالتی است که در آن به طور کامل از دینامیت استفاده شده است. همچنین نرخ پیشروی بالای ۹۵٪، بیش حفاری کمتر از ۵٪ و داغ چال بیش از ۲۰٪ در الگوی پیشنهادی حاصل شد.

کلمات کلیدی

تونل، چالزنی و انفجار، جایگزینی دینامیت با آنفو

۱- مقدمه

متوسط تا ضخیم تشکیل شده که رنگ اصلی آن قهوه‌ای کم رنگ تا قهوه‌ای - خاکستری است. ساخت برگ وارگی با روند شمال غربی - جنوب شرقی در آن دیده می‌شود. در این واحد به دلیل وجود میان لایه‌های مارن سنگی، ریخت نرم فرسایي دارد. در قسمت‌هایی از مسیر تونل، توده‌هایی از سنگ‌های آذرین نفوذی که بیشتر از نوع دیاباز و گرانودیوریت هستند، رخنمون یافته‌اند. این توده‌های آذرین از طریق گسل‌ها به قسمت‌های سطحی نفوذ کرده‌اند [۲].



شکل ۱: نقشه راهنمای محل پروژه تونل راه حضرت ابالصالح المهدی (عج) که با علامت X نشان داده شده است [۲].

۳- مطالعات ژئومکانیکی مسیر تونل

برای مطالعات ژئومکانیکی مسیر تونل، برداشت ناپیوستگی‌ها انجام شد و مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی و RQD سنگ‌های مسیر تونل تعیین شدند. از آنجا که انفجار-های آزمایشی در واحد سنگی آهک مارنی انجام شدند (کیلومتر ۱/۷۰ تا ۱/۹۲)، بنابراین پارامترهای ژئومکانیکی مربوط به این واحد سنگی مد نظر هستند. مباحث مقاومت فشاری تک محوره سنگ آهک مارنی با چگالی نسبی $2/57$ برابر با 59 MPa و مباحث مقاومت کششی آن $3/75 \text{ MPa}$ است. سه دسته درزه اصلی در محدوده مورد مطالعه وجود دارد که جهت شیب و شیب آنها به ترتیب $40/56^\circ$ ، $169/34^\circ$ و $124/63^\circ$ است. مباحث RQD سنگ‌ها در محدوده مورد مطالعه برابر با 75% است. با توجه به وضعیت سنگ‌ها در مسیر مورد نظر، مباحث RMR محدوده مورد مطالعه 52 بوده که در رده سنگ‌های مباحث قرار می‌گیرد (جدول ۱)

در حال حاضر بنا به دلایل مختلف از جمله قابل دسترس بودن، قابلیت کاربرد در شرایط زمین سخت و سرمایه گذاری کمتر، چالزنی و انفجار، پرکاربردترین روش حفر تونل در سطح جهان است. دقت در انتخاب پارامترهای انفجار، تأثیر زیادی بر اقتصادی بودن و ایمن بودن حفاری دارد. نوع ماده منفجره شاید یکی از تعیین‌کننده‌ترین پارامترها در بازدهی و اقتصادی بودن انفجار باشد. دینامیت به دلیل ویژگی‌هایی نظیر سرعت انفجار نسبی بالا و مقاومت خوب در برابر رطوبت، یکی از مواد منفجره معمول در حفاری تونل است که نسبت به مواد قابل دسترس دیگر نظیر آنفو قیمت بسیار بیشتری دارد. با توجه به سهم بالای هزینه ماده منفجره در کندن یک متر مکعب سنگ و بزرگی پروژه، جایگزینی دینامیت با ماده منفجره ارزان‌تری مثل آنفو ممکن است در کل عمر اجرای پروژه باعث صرفه-جویی اقتصادی قابل توجهی شود. در این خصوص محققین جایگزینی دینامیت با آنفو را مورد بررسی قرار داده‌اند که در آن بررسی هیچ‌گونه مقایسه کمی بین نتایج الگوی انفجار با آنفو و الگوی انفجار با دینامیت انجام نشده است [۱]. در این تحقیق پس از اصلاح الگوی انفجار تونل حضرت ابالصالح المهدی (عج) شهرستان اقلید، سعی شده است طی ۱۰ مرحله انفجار آزمایشی تمام یا قسمتی از دینامیت با آنفو جایگزین شود. برای بررسی نتایج هر انفجار از اندازه‌گیری‌های کمی نظیر نرخ پیشروی (Advance Rate)، داغ چال (HCF)، بیش حفاری (Over Break) و هزینه ویژه استفاده شده است.

۲- موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین شناسی مسیر تونل

تونل راه حضرت ابالصالح المهدی (عج) در مسیر جاده اقلید - یاسوج در شمال استان فارس واقع شده است (شکل ۱). طول تونل 2610 متر، عرض حفاری 11 متر، ارتفاع حفاری $5/25$ متر، سطح مقطع حفاری 55 متر مربع و شکل مقطع نعل اسبی است. بیشتر واحدهای سنگی مسیر تونل با توجه به سازندهای تشکیل‌دهنده آن‌ها، از نوع سنگ‌های کربناته هستند. واحدهای آهک مارنی و آهک توده‌ای، بیشترین گسترش را در مسیر تونل دارند به طوری که سنگ‌های بیش از 90% مسیر تونل، از این دو نوع هستند. واحد سنگی آهک‌های توده‌ای، ضخیم لایه بوده و دارای رنگ خاکستری روشن تا نخودی است. ساختار آن دانه ریز، متراکم و کریستالیزه است و مقاومت بالایی دارد. واحد آهک‌های مارنی با رنگ هوازده زرد - قهوه‌ای، از لایه‌بندی‌های

جدول ۱: محاسبه RMR کیلومتر ۱/۷۰ تا ۱/۹۲ تونل حضرت ابا صالح المهدی (عج).

امتیاز	دامنه مقادیر یا کیفیت	پارامترهای تعیین RMR
۷	۵۹ (MPa)	مقاومت فشاری سنگ بکر
۱۷	٪۷۵	RQD
۱۰	(mm) ۲۰۰ تا (mm) ۶۰۰	فواصل درزه‌ها
۲۰	بازشدگی کمتر از ۰/۱ میلی‌متر-دیواره هوازده- سطح درزه‌ها اندکی زبر	وضعیت درزه‌ها
۱۰	تقریباً خشک	شرایط آب زیرزمینی
-۱۲	خیلی نا مساعد	راستای نسبی درزه‌ها (بحرانی ترین حالت)
۵۲	مجموع امتیازات	

جدول ۳: مشخصات الگوی انفجار فعلی تونل راه حضرت اباصالح

المهدی (عج).

توضیحات محل چال	بار سنگ (m)	فاصله چال‌ها (m)	میزان خرج هر چال (Kg)	تراکم خرج (Kg/m)	گل گذاری (m)
گوه ۱ برش	۲/۹۴	۰/۸	۲/۳۱	۱/۱۵	۱/۱
گوه ۲ برش	۱/۰۵	۰/۸	۲/۳۱	۱/۱۵	۱/۱
ردیف ۱ پیشروی	۱/۲	۰/۸	۱/۴۸	۱/۱۵	۱/۶۶
ردیف ۲ پیشروی	۱/۲	۰/۸	۱/۴۸	۱/۱۵	۱/۶۵
ردیف ۳ پیشروی	۱/۲	۰/۸	۱/۳۲	۱/۱۵	۱/۸۱
دیواره تونل	۰/۷۵	۰/۷	۰/۶۶	۱/۱۵	۲/۳۷
سقف تونل	۰/۷۵	۰/۷	۰/۷۵	۱/۱۵	۲/۲۲
کف تونل	۰/۶۵ تا ۰/۵	۰/۹	۱/۸۱	۱/۱۵	۱/۳۸
پاشنه	۱/۱	-	۲/۳۱	۱/۱۵	۰/۹۴

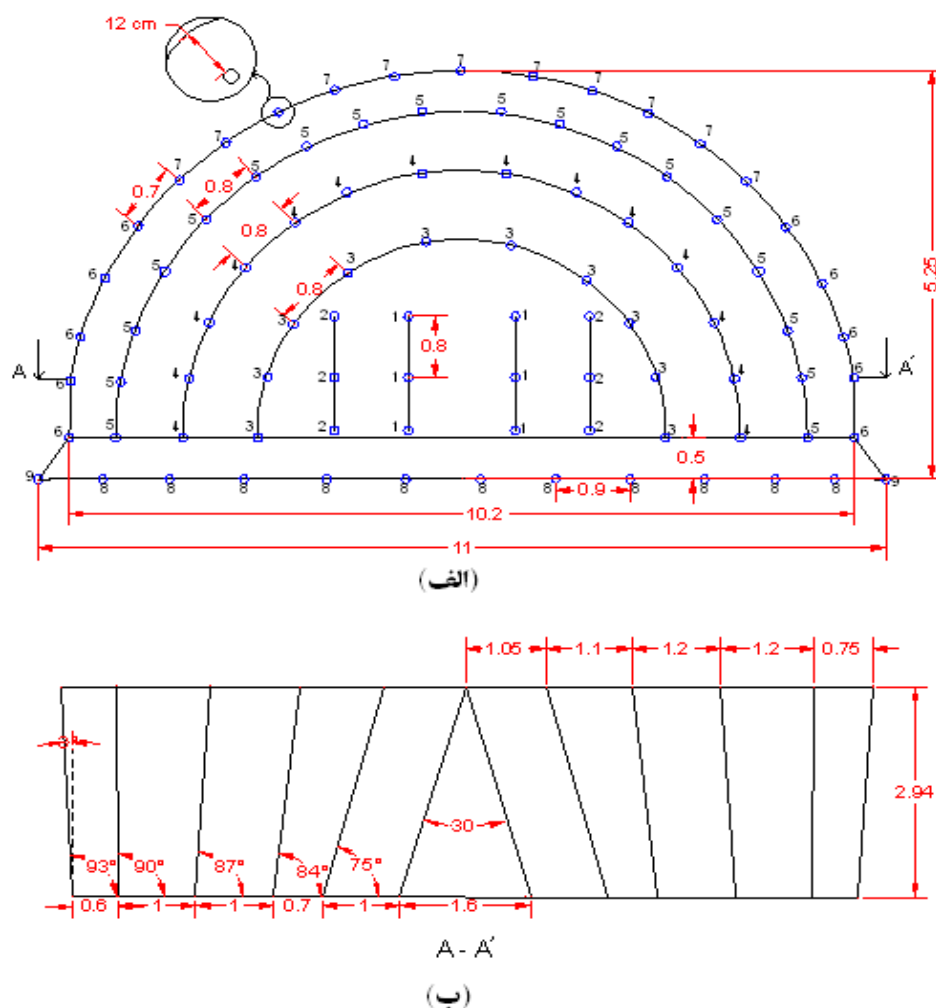
در این مقاله، هزینه ویژه به صورت "هزینه ماده منفجره برای حفاری یک متر مکعب سنگ" تعریف شده است. برای ارزیابی کیفیت نتایج انفجارهای فعلی تونل، کیفیت دو انفجار مطابق جدول ۴ بررسی شده است.

۴- بررسی الگوی انفجار فعلی

به منظور اصلاح الگوی انفجار فعلی، اولین قدم تعیین مشخصات و کیفیت نتایج انفجارها است. در الگوی انفجار فعلی، از برش زاویه ای استفاده شده است. قطر چال‌های انفجاری ۵۱mm است. اطلاعات کلی مربوط به الگوی انفجار فعلی تونل مطابق جدول ۲ و مشخصات آن مطابق جدول ۳ است. آرایش و نوبت انفجار چال‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به امکانات موجود، کیفیت نتایج انفجارهای فعلی تونل را می-توان با میزان نرخ پیشروی، بیش حفاری (نسبت سطح مقطع اضافی ایجاد شده به سطح مقطع حفاری تونل بر حسب درصد)، داغ چال (نسبت کل طول چال‌های محیطی مشاهده شده پس از انفجار به کل طول چال‌های محیطی حفر شده قبل از انفجار) و هزینه ویژه بررسی کرد.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به الگوی انفجار فعلی.

مشخصات	مقدار	واحد
قطر چال	۵۱	mm
قطر ماده منفجره (دینامیت)	۳۰	mm
تعداد چال	۹۰	عدد
مبا طول چال	۲/۹	m
حجم سنگ حفاری شده	۱۶۲	m ³
مبا پیشروی	۲/۸۲	m
مقدار خرج مصرفی کل	۱۳۳	Kg
خرج ویژه برش	۲/۱۳	Kg/m ³
خرج ویژه کل	۰/۸۳	Kg/m ³
حفاری ویژه	۱/۶۵	m/m ³



شکل ۲: آرایش چال‌ها و نوبت انفجار در الگوی انفجار فعلی تونل حضرت ابوالصالح المهدی (عج)
الف: تصویر قائم ب: تصویر افقی (طول‌ها بر حسب متر بوده و شکل بدون مقیاس است) [۳].

شده در دیواره و سقف تونل است که با اصلاح الگوی انفجار می‌توان به نتایج بهتری دست یافت.

۵- اصلاح الگوی انفجار تونل حضرت ابوالصالح المهدی (عج)

برای طراحی الگوی انفجار در یک تونل، مهم‌ترین بخش، انتخاب نوع برش است. نوع برش بر اساس بزرگی سطح مقطع و امکانات چالزنی انجام می‌گیرد. با توجه به محدودیت‌های چالزنی در برش زاویه‌ای، این نوع برش مخصوص مقاطع مباح تا بزرگ است. با توجه به عرض تونل حضرت ابوالصالح المهدی (عج) (۱۱ m)، برش زاویه‌ای انتخاب شده است. روش مورد استفاده برای طراحی روش انتقال انرژی است. عوامل مؤثر در روش انتقال انرژی، قطر چال، قطر خرج، کیفیت سنگ و کیفیت ماده منفجره هستند [۶]. که نسبت به سایر روش‌های طراحی الگوی انفجار، پارامترهای بیشتری را در نظر گرفته

جدول ۴: ارزیابی کیفیت انفجارهای فعلی برای دو انفجار.

پارامتر ارزیابی	نرخ پیشروی (%)	بیش حفاری (%)	داغ چال (%)	هزینه ویژه (*Rls/m ³)
انفجار ۱	۹۵	۱۲	۰/۵	۴۲۰۰۰
انفجار ۲	۹۶	۱۳	۰	۴۲۰۰۰

*ریال

از آنجا که حد مجاز نرخ پیشروی بالای ۹۵٪ [۴] و بیش حفاری کمتر از ۵٪ است [۵]، با توجه به جدول ۴، نرخ پیشروی قابل قبول بوده اما بیش حفاری بیش از حد مجاز است. حالت ایده‌آل داغ چال ۱۰۰٪ بوده که با توجه به جدول ۴ داغ چال تقریباً برابر با صفر است. یکی از دلایل عدم وجود داغ چال و بیش حفاری زیاد، عدم استفاده از انفجار کنترل

است. در جداول (۵) و (۶) اطلاعات مورد نیاز برای طراحی الگوی انفجار با روش انتقال انرژی آورده شده اند.

جدول ۵: مشخصات سنگ آهک مارنی، مورد نیاز برای طراحی الگوی انفجار با استفاده از روش انتقال انرژی [۶،۲].

پارامتر	مقدار	واحد
وزن مخصوص	۲۵۷۰	(Kg/m ³)
سرعت عبور موج	۳۵۰۰	(m/s)
امپدانس	9×10^{-6}	(Kg/m ² .s)
انرژی سطحی مخصوص	۱/۳	(Mj/m ²)

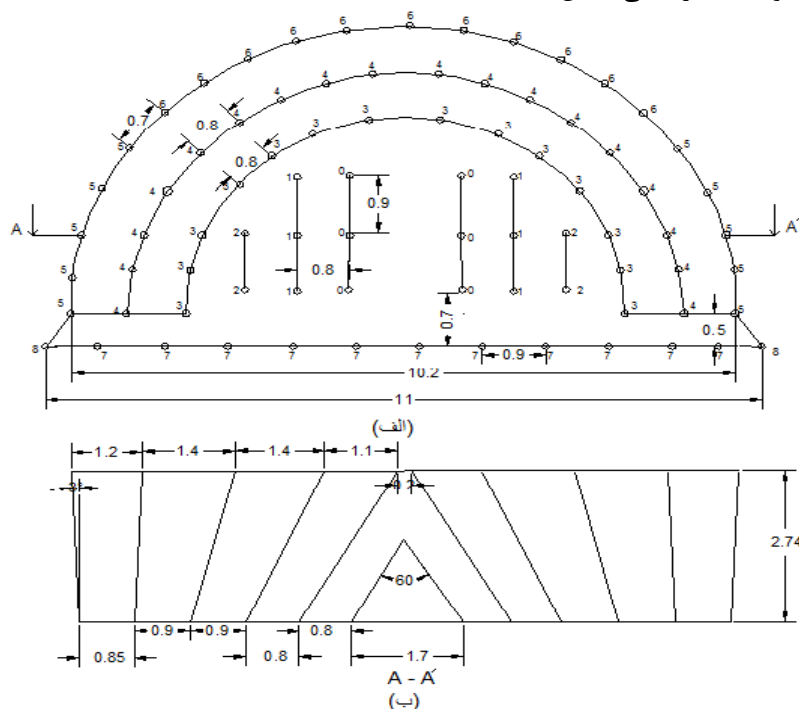
است. سیستم انفجار در چال‌های برش و پیشروی از نوع الکتریکی با چاشنی تأخیری و در چال‌های دیواره و سقف با استفاده از فتیله انفجاری است. در خرج گذاری چال‌های دیواره و سقف تونل از انفجار کنترل شده از نوع انفجار آرام (Smooth Blasting) استفاده شد. نحوه خرج گذاری در چال‌های دیواره و سقف به صورت منقطع است (شکل ۴). در جدول ۷ مشخصات الگوی انفجار شماره یک برای اصلاح الگوی انفجار فعلی و در جدول ۸ اطلاعات الگوی انفجار مذکور آورده شده است

جدول ۶: مشخصات دینامیت اخگر مورد استفاده در انفجار تونل

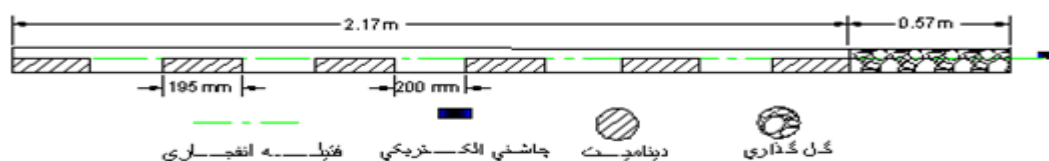
حضرت اباصالح المهدی (عج) [۷،۶].

پارامتر	سرعت انفجار (m/s)	چگالی نسبی	امپدانس (Kg/m ² . s)	انرژی مخصوص (Mj/Kg)
مقدار	۵۰۰۰	۱/۵	$7/5 \times 10^{-6}$	۴/۵۱

ماده منفجره مورد استفاده در تونل دینامیت اخگر بوده که مشخصات آن در جدول ۶ آورده شده است. اصلاح الگوی انفجار تونل حضرت اباصالح المهدی (عج) طی دو انفجار آزمایشی انجام شد. در شکل ۳، آرایش و نوبت انفجار چال‌ها در الگوی انفجار شماره یک برای اصلاح الگوی انفجار فعلی نشان داده شده



شکل ۳: آرایش و نوبت انفجار چال‌ها در اولین الگوی انفجار برای اصلاح الگوی انفجار فعلی
الف) تصویر قائم ب) تصویر افقی (شکل بدون مقیاس بوده و طول‌ها بر حسب متر هستند).



شکل ۴: نحوه خرج گذاری در چال‌های محیطی در الگوی انفجار شماره یک.

جدول ۷: مشخصات الگوی انفجار شماره یک برای اصلاح الگوی انفجار فعلی.

توضیحات محل چال	تعداد چال	طول چال (m)	بار سنگ (m)	فاصله چال‌ها (m)	میزان خرج هر چال (Kg)	تراکم خرج (Kg/m)	طول گل‌گذاری (m)	نوع تأخیر (ms)	میزان تأخیر (ms)
گوه ۱ برش	۶	۱/۷۰	۱/۴۶	۰/۹	۰/۹۹	۱/۱۵	۰/۸۵	MS ₁	۲۵
گوه ۲ برش	۶	۳/۱	۱/۲۸	۰/۹	۱/۴۲	۱/۱۵	۲/۱۵	MS ₂	۵۰
گوه ۳ برش	۶	۲/۹۳	۱/۱	۰/۹	۱/۴۲	۱/۱۵	۱/۰۵	MS ₃	۷۵
ردیف ۱ پیشروی	۱۴	۲/۸۳	۱/۴	۰/۸	۱/۶۵	۱/۱۵	۱/۳۷	HS ₁	۵۰۰
ردیف ۲ پیشروی	۱۸	۲/۷۶	۱/۴	۰/۸	۱/۴۸	۱/۱۵	۱/۴۷	HS ₂	۱۰۰۰
دیواره تونل	۱۰	۲/۷۴	۱/۲	۰/۷	۰/۹۹	۰/۴۵	۰/۵۷	HS ₃	۱۵۰۰
سقف تونل	۱۱	۲/۷۴	۱/۲	۰/۷	۰/۹۹	۰/۴۵	۰/۵۷	HS ₄	۲۰۰۰
کف تونل	۱۱	۲/۷۵	۰/۶۵ تا ۰/۸۵	۰/۹	۱/۶۵	۱/۱۵	۱/۳	HS ₅	۲۵۰۰
پاشنه	۲	۲/۷۵	۱/۱	-	۱/۹۸	۱/۱۵	۱/۰۵	HS ₆	۳۰۰۰

جدول ۸: اطلاعات الگوی انفجار شماره یک برای اصلاح الگوی انفجار فعلی.

مشخصات انفجار	مقدار	واحد
تعداد کل چال‌ها	۸۲	عدد
طول کل چال‌ها	۲۲۲	m
حجم سنگ حفاری شده	۱۵۱	m ³
پیشروی	۲/۷۴	m
مقدار خرج مصرفی کل	۱۲۰	Kg
خرج ویژه برش	۱/۹۲	Kg/m ³
خرج ویژه کل	۰/۸	Kg/m ³
حفاری ویژه	۱/۴۷	m/m ³

جدول ۹: ارزیابی کیفیت الگوی انفجار اصلاح شده شماره یک برای اصلاح الگوی انفجار فعلی به همراه نتایج مربوط به الگوی انفجار فعلی تونل.

پارامتر ارزیابی	نرخ پیشروی (%)	بیش حفاری (%)	داغ چال (%)	هزینه ویژه (Rls/m ³)
نوع انفجار				
الگوی انفجار اصلاح شده شماره ۱	۹۸	۵/۶	۱۶	۳۹۰۰۰
الگوی انفجار فعلی (۱)	۹۵	۱۲	۰/۵	۴۲۰۰۰
الگوی انفجار فعلی (۲)	۹۶	۱۳	۰	۴۲۰۰۰

با توجه به نتایج الگوی انفجار طراحی شده و مقایسه آن با الگوی انفجار فعلی، مشاهده می‌شود که مقادیر بیش حفاری و هزینه ویژه در الگوی انفجار طراحی شده به مقدار قابل توجهی کاهش و نرخ پیشروی و داغ چال افزایش یافته است. از مهمترین دلایل افزایش داغ چال و کاهش بیش حفاری، استفاده از انفجار کنترل‌شده و خرج‌گذاری منقطع در چال‌های محیطی است. از ایرادات الگوی انفجار اصلاح شده، می‌توان به وجود ته چال مربوط به گوه سه برش و بیش حفاری در آن اشاره کرد. استفاده از دو چاشنی نوع MS با تأخیر اندک (ms) ۲۵ در گوه‌های ۲ و ۳ قسمت برش می‌تواند از دلایل ایجاد ته چال در قسمت برش باشد. زیرا فاصله زمانی بین انفجار

خرج ویژه کل در این انفجار برابر با 0.8 Kg/m^3 و خرج ویژه قسمت برش برابر با 1.96 Kg/m^3 است. از آنجا که زاویه گوه‌های برش در این انفجار بیشتر از انفجارهای فعلی است، خرج ویژه قسمت برش تا حد قابل توجهی کاهش یافته و در نتیجه خرج ویژه کلی نیز کاهش یافته است. زاویه گوه‌های برش نباید کمتر از ۶۰ درجه باشد زیرا خرج چال‌های قسمت برش بیش از حد محبوس شده و ماده منفجره بیشتری برای شکستن سنگ مورد نیاز است [۸]. حفاری ویژه در الگوی انفجار اصلاح شده به مقدار ۱٪ کاهش یافته است. ارزیابی کیفیت الگوی انفجار شماره یک جهت اصلاح الگوی انفجار فعلی تونل مطابق جدول ۹ است.

ایجاد نشده است.

مهمترین دلایل آن، کاهش مقدار خرج و عدم گل‌گذاری در چال‌های محیطی است. با توجه به نرخ پیشروی ۱۰۰٪ و بیش حفاری ۳٪ و از طرفی با عنایت به محدودیت‌های انجام انفجار، می‌توان این الگو را به عنوان الگوی بهینه در شرایط موجود در نظر گرفت.

۷- جایگزینی آنفو به جای دینامیت در تونل حضرت ابی‌صالح المهدی (عج)

نوع ماده منفجره یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل افزایش یا کاهش بازدهی انفجار در هر مرحله حفاری است. دینامیت اخگر، امولایت و آنفو مواد منفجره متعارف در ایران هستند که هر کدام دارای خصوصیات منحصر به فرد و عملکرد خاص خود هستند. آنچه در اینجا بدان پرداخته می‌شود، بررسی امکان جایگزینی دینامیت با آنفو در حفاری تونل حضرت ابی‌صالح المهدی (عج) است. در طراحی الگوی اصلاح شده، جایگزینی دینامیت با آنفو به صورت تدریجی صورت می‌گیرد. بدین صورت که ابتدا قسمتی از سطح مقطع تونل با آنفو و مابقی با دینامیت خرج گذاری شده و نتایج انفجار مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. با توجه به میزان نرخ پیشروی، بیش حفاری، داغ چال و هزینه ویژه، الگوی انفجار بعدی طراحی و اجرا می‌شود. در نهایت، الگوی انفجاری که مشمول کمترین هزینه ویژه بوده و نرخ پیشروی، بیش حفاری و داغ چال قابل قبولی داشته باشد، به عنوان الگوی انفجار بهینه انتخاب می‌شود. در محاسبات اقتصادی مربوط به الگوهای پیشنهادی مربوط به جایگزینی دینامیت با آنفو، برای همه این الگوها خط انتقال آتش یکسان بوده و دینامیت موجود در چال‌ها به عنوان پرایمر یا بوستر عمل می‌کند که در محاسبات اقتصادی لحاظ شده‌اند. در این تحقیق، ابتدا قسمتی از خرج بخش پیشروی که درجه درگیری (Fixation) کمتر دارد و انرژی کمتری نسبت به سایر قسمت‌های سینه کار نیاز دارد، با آنفو جایگزین می‌شود. نتایج انفجار مورد بررسی قرار گرفته و در صورت مطلوب بودن انفجار، قسمتی از خرج سایر قسمت‌های تونل از جمله برش، کف، دیواره و سقف نیز با آنفو جایگزین می‌شود. از آنجا که چال‌ها به صورت افقی در سینه کار حفر می‌شوند، امکان پر کردن چال‌ها با آنفو که به صورت دانه‌ای است، نیاز به تدابیر خاص دارد. در این تحقیق، روند کار بدین صورت بود که پلاستیک‌های لوله ای با قطر کمتر از قطر چال‌های حفاری تهیه شده و با آنفو پر شدند (شکل ۵). سپس فشنگ‌های آنفو

چال‌های دو گوه اندک بوده و فضای کافی برای انفجار گوه ۳ ۶- الگوی انفجار شماره دو برای اصلاح الگوی انفجار فعلی تونل

برای حل مشکل ته چال در الگوی انفجار اصلاح شده شماره یک می‌توان به جای استفاده از چاشنی‌های MS_1 ، MS_2 و MS_3 در گوه‌های برش، از چاشنی‌های بدون تأخیر (آنی) در گوه ۱، MS_2 در گوه ۲ و HS_1 در گوه ۳ استفاده کرد. فاصله زمانی بین دو انفجار متوالی در چاشنی‌های MS ، ۲۵ میلی‌ثانیه و در چاشنی‌های HS ، ۵۰۰ میلی‌ثانیه است. برای کاهش بیش حفاری در دومین الگوی انفجار، خرج چال‌های دیواره تونل از ۶ فشنگ دینامیت به ۵ فشنگ و خرج چال‌های سقف تونل نیز از ۶ فشنگ دینامیت به ۴/۵ فشنگ کاهش یافت. گل گذاری چال‌های محیطی نیز به‌طور کامل برداشته شد. در اینجا نیز همانند اولین الگوی انفجار اصلاح شده، خرج گذاری چال‌های محیطی به صورت منقطع انجام شد. با کاهش مقدار خرج چال‌های محیطی، تراکم خرج در چال‌های دیواره و سقف برابر با 0.45 Kg/m و خرج ویژه کل 0.77 Kg/m^3 به دست آمد. سایر پارامترها شبیه به الگوی انفجار اصلاح شده شماره یک است. کیفیت الگوی انفجار شماره دو جهت اصلاح الگوی انفجار فعلی تونل مطابق جدول ۱۰ است.

جدول ۱۰: ارزیابی کیفیت الگوی انفجار شماره دو برای اصلاح الگوی انفجار فعلی به همراه نتایج مربوط به الگوهای انفجار شماره یک اصلاح شده و فعلی تونل.

پارامتر ارزیابی	نرخ پیشروی (٪)	بیش حفاری (٪)	داغ چال (٪)	هزینه ویژه (Rls/m^3)
الگوی انفجار اصلاح شده (۲)	۱۰۰	۳	۲۷	۳۸۰۰۰
الگوی انفجار اصلاح شده (۱)	۹۸	۵/۶	۱۶	۳۹۰۰۰
الگوی انفجار فعلی (۱)	۹۵	۱۲	۰/۵	۴۲۰۰۰
الگوی انفجار فعلی (۲)	۹۶	۱۳	۰	۴۲۰۰۰

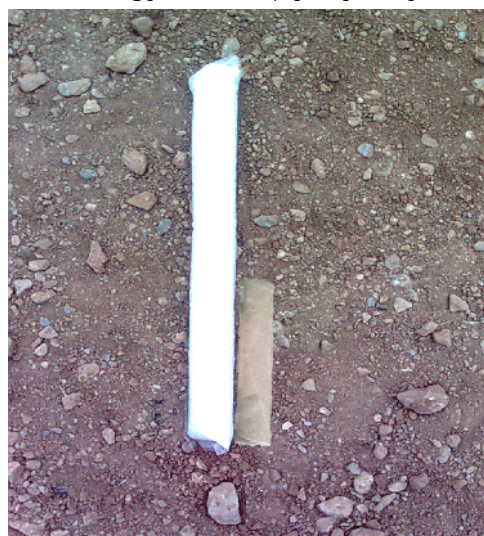
با توجه به نتایج دومین الگوی انفجار آزمایشی و مقایسه آن با اولین الگوی انفجار، مشاهده می‌شود که مقادیر بیش حفاری و هزینه ویژه در الگوی انفجار اصلاح شده شماره دو به مقدار قابل توجهی کاهش و نرخ پیشروی و داغ چال افزایش یافته است. از

در کل، عمل جایگزینی دینامیت با آنفو در ده مرحله انجام شد و در هر مرحله تغییراتی در الگوی انفجار داده شد. در ادامه مشخصات الگوی انفجار در مراحل ده گانه و ارزیابی نتایج آن‌ها شرح داده می‌شود.

۱-۷- انفجارهای یک تا چهار

در انفجارهای یک تا چهار، تنها خرج چال‌های بخش پیشروی تغییر کرده و خرج گذاری در سایر چال‌ها مطابق الگوی انفجار اصلاح شده است. آرایش و نوبت انفجار چال‌ها در کلیه انفجارها بدون تغییر بوده و مطابق شکل ۳ است. نحوه خرج گذاری در چال‌های پیشروی در انفجارهای یک تا چهار در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج ارزیابی کیفیت الگوهای انفجار شماره یک تا چهار برای جایگزینی دینامیت با آنفو مطابق جدول ۱۲ است. بیش حفاری و ته چال در انفجارهای مذکور در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. در انفجار شماره یک، مقداری از دینامیت با آنفو جایگزین شده است و نتایج مطلوب است. در انفجار شماره دو، مقدار جایگزینی دینامیت با آنفو افزایش یافته است. و نتایج نامطلوب است. در انفجار شماره سه، دوباره مقدار دینامیت افزایش یافته و مقدار آنفو با کاهش گل گذاری ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج در این انفجار برای نرخ پیشروی نا-مطلوب است. در انفجار شماره چهار، دوباره مقدار دینامیت به مقدار کمی افزایش یافته و مقدار آنفو با کاهش گل گذاری ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج این انفجار مطلوب است. در مجموع با توجه به نتایج ارزیابی، نحوه خرج گذاری در قسمت پیشروی الگوی انفجار شماره چهار به عنوان خرج گذاری بهینه انتخاب می‌شود. در این انفجارها با توجه به وجود دو نوع ماده منفجره در سینه کار، خرج ویژه به صورت معادل دینامیت (عبارتست از خرج ویژه بر حسب آنفو تقسیم بر نسبت بین قدرت دینامیت به آنفو) در نظر گرفته شده است.

تهیه شده، شبیه به فشنگ دینامیت، به کمک سنبه در چال قرار می‌گیرند. برای کاهش تراکم خرج در چال‌های محیطی، فشنگ‌های آنفو با قطر کمتر تهیه شد (جدول ۱۱).



شکل ۵: نمونه ای از فشنگ آنفو تهیه شده در کنار فشنگ دینامیت.

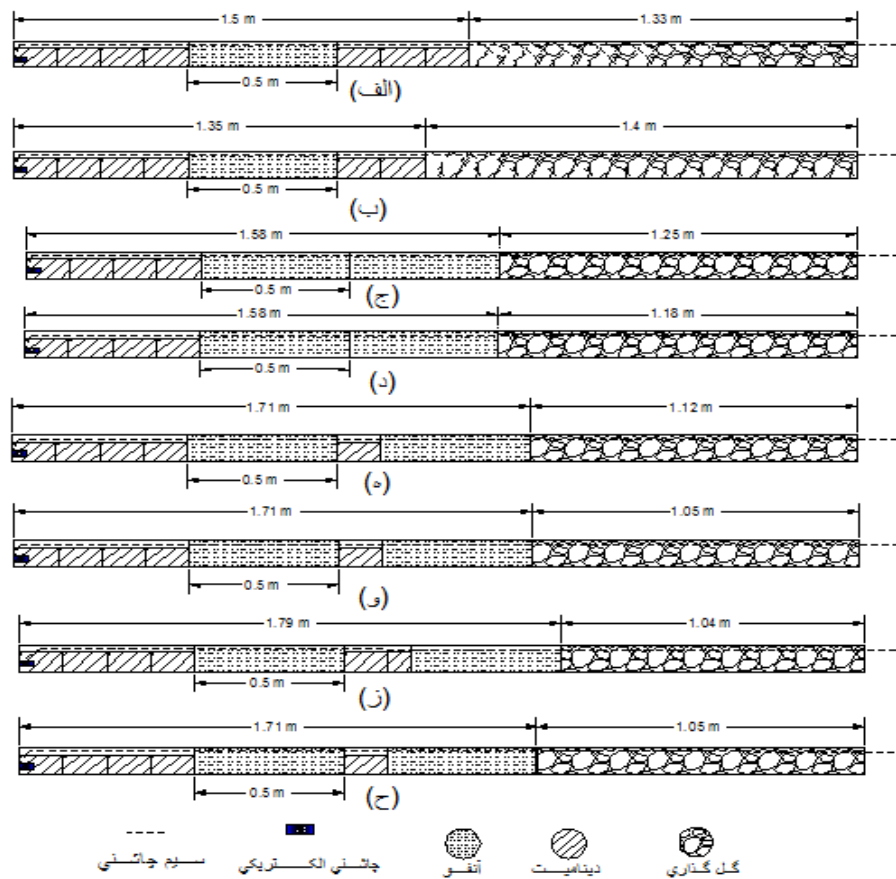
جدول ۱۱: مشخصات فشنگ‌های آنفوی تهیه شده برای جایگزینی دینامیت با آنفو.

نوع فشنگ	فشنگ نوع ۱	فشنگ نوع ۲	فشنگ نوع ۳	واحد
مشخصات				
قطر	۴۸	۴۵	۴۰	mm
طول	۵۳۰	۶۰۰	۶۰۰	mm
وزن	۶۳۰	۶۳۰	۵۰۰	gr
قیمت هر فشنگ	۳۹۰۰	۳۹۰۰	۳۱۰۰	Rls

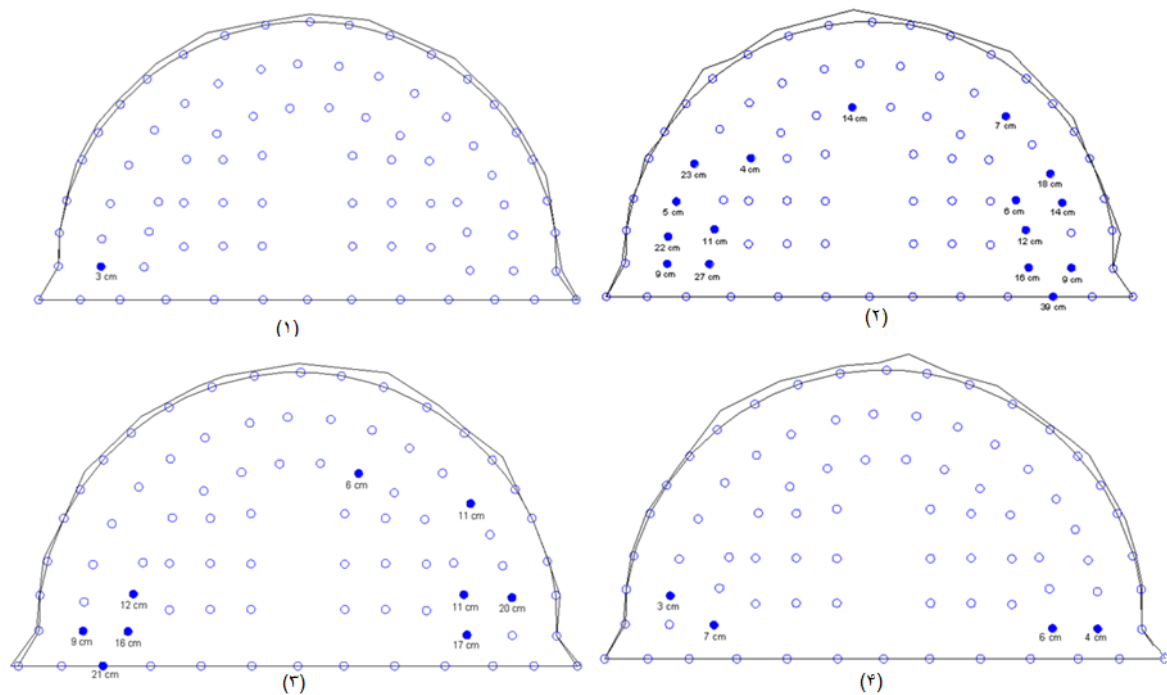
۷-۱- مشخصات و نتایج انفجارهای آزمایشی انجام شده

جدول ۱۲: ارزیابی کیفیت الگوهای انفجار شماره یک تا چهار برای جایگزینی دینامیت با آنفو در تونل.

مشخصات شماره انفجار	نوع و مقدار خرج مصرفی در قسمت پیشروی (Kg)		بیش حفاری (%)	داغ چال (%)	نرخ پیشروی (%)	خرج ویژه معادل دینامیت (Kg/m ³)	هزینه ویژه (Rls/m ³)
	دینامیت	آنفو					
۱	۳۴	۲۰/۱۶	۳	۲۳	۹۹	۰/۷۷	۳۴۰۰۰
۲	۲۱/۱۲	۴۰/۳۲	۳/۶	۱۶	۸۵	۰/۷۹	۳۵۲۰۰
۳	۲۶/۴	۴۰/۳۲	۳/۴	۲۷	۹۲	۰/۸۳	۳۴۴۰۰
۴	۲۷/۵۵	۴۰/۳۲	۳/۸	۲۳	۹۷/۴	۰/۸۴	۳۲۹۰۰



شکل ۶: نحوه خرج گذاری چال‌های بخش پیشروی در الگوی‌های انفجار یک تا چهار (الف) چال ردیف اول الگوی انفجار یک (ب) چال ردیف دوم الگوی انفجار یک (ج) چال ردیف اول الگوی انفجار دو (د) چال‌های ردیف دوم الگوی انفجار دو (ه) چال ردیف اول الگوی انفجار سه (و) چال ردیف دوم الگوی انفجار سه (ز) چال ردیف اول الگوی انفجار چهار (ح) چال ردیف دوم الگوی انفجار چهار.



شکل ۷: بیش حفاری و ته چال در انفجارهای یک تا چهار.

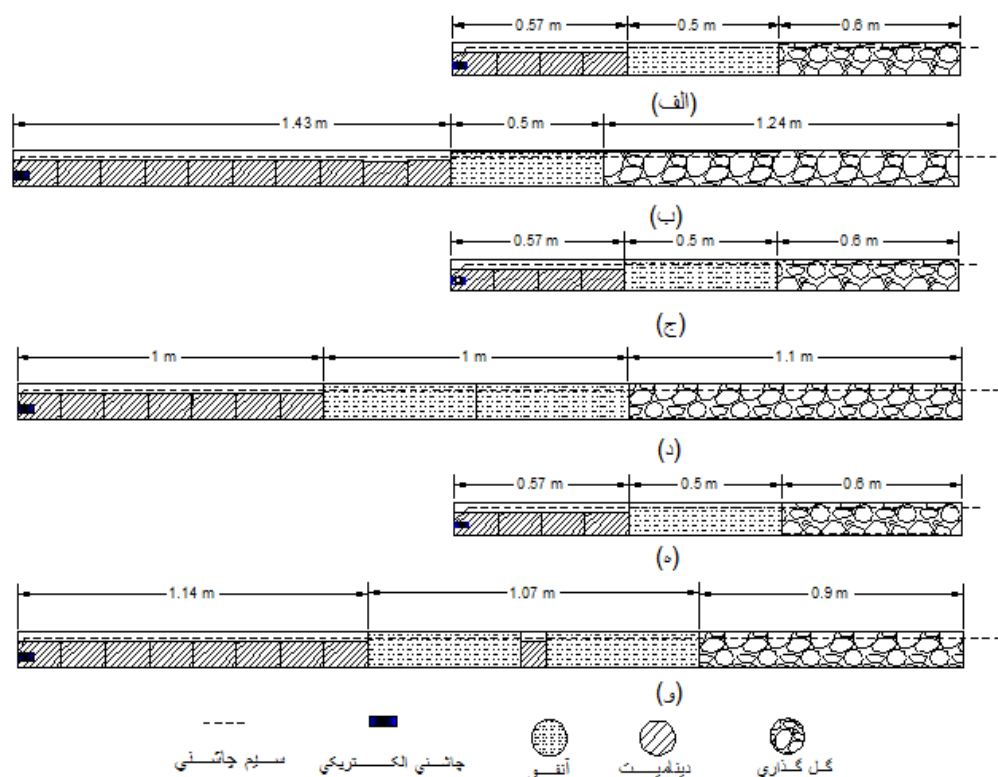
۷-۱-۲- انفجارهای پنج تا هفت

جدول ۱۳ است. نحوه خرج گذاری در چال‌های بخش برش در انفجارهای پنج تا هفت در شکل ۸ و بیش حفاری و ته چال در انفجارهای مذکور در شکل ۹ نشان داده شده اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انفجارهای پنج و هفت نتایج یکسان و بهتری نسبت به انفجار شماره شش دارند. با توجه به داغ چال در الگوی انفجار شماره هفت، این الگو به‌عنوان الگوی انفجار مناسب برای خرج گذاری در چال‌های برش انتخاب می‌شود.

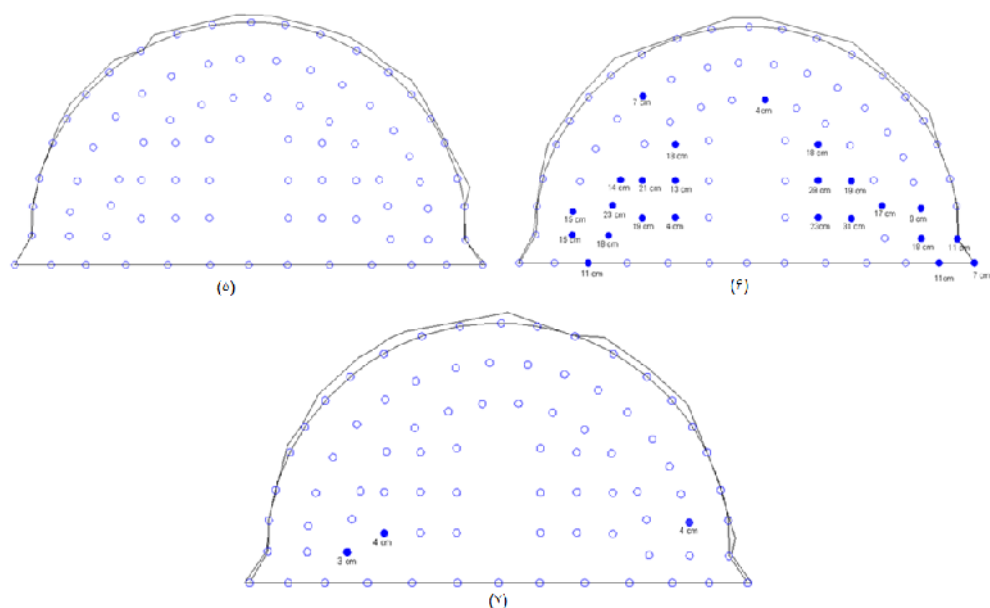
پس از جایگزینی قسمتی از دینامیت با آنفو در چال‌های پیشروی، قسمتی از خرج چال‌های برش نیز با آنفو جایگزین می‌شود. در انفجارهای پنج تا هفت، به تغییر خرج چال‌های قسمت برش پرداخته می‌شود. در انفجارهای مذکور، خرج-گذاری در قسمت پیشروی مطابق انفجار شماره چهار و خرج گذاری در چال‌های محیطی و کف، مطابق الگوی انفجار اصلاح-شده شماره دو است. نتایج ارزیابی کیفیت الگوهای انفجار شماره پنج تا هفت برای جایگزینی دینامیت با آنفو مطابق

جدول ۱۳: ارزیابی کیفیت الگوهای انفجار شماره پنج تا هفت جهت جایگزینی دینامیت با آنفو.

مشخصات شماره انفجار	نوع و مقدار خرج مصرفی در قسمت برش (Kg)		بیش حفاری (%)	داغ چال (%)	نرخ پیشروی (%)	خرج ویژه معادل دینامیت (Kg/m ³)	هزینه ویژه (Rls/m ³)
	آنفو	دینامیت					
۵	۱۰	۲۰/۴۵	۳/۶	۲۲	۱۰۰	۰/۸۵	۳۰۰۰۰
۶	۱۶/۴	۱۵/۵	۴/۴	۱۸	۸۸/۶	۰/۸۵	۳۲۵۰۰
۷	۱۶/۴	۱۸	۴	۲۹	۹۸	۰/۸۶	۳۰۰۰۰



شکل ۸: نحوه خرج گذاری چال‌های بخش برش در الگوهای انفجار پنج تا هفت (الف) چال گوه اول الگوی انفجار پنج (ب) چال گوه‌های دوم و سوم الگوی انفجار پنج (ج) چال گوه اول الگوی انفجار شش (د) چال گوه‌های دوم و سوم الگوی انفجار شش (ه) چال گوه اول الگوی انفجار هفت (و) چال گوه‌های دوم و سوم الگوی انفجار هفت.



شکل ۹: بیش حفاری و ته چال در انفجارهای پنج تا هفت.

۳-۱-۷- انفجارهای هشت تا ده

در انفجارهای هشت تا ده، به تغییر خرج چال‌های قسمت محیطی و کف پرداخته شده است. در انفجارهای مذکور، خرج-گذاری در قسمت پیشروی و برش مطابق انفجار شماره هفت بوده و بدون تغییر است. نحوه خرج‌گذاری در چال‌های بخش

محیطی و کف در انفجارهای هشت تا ده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج ارزیابی کیفیت الگوهای انفجار شماره هشت تا ده برای جایگزینی دینامیت با آنفو مطابق جدول ۱۴ است.

جدول ۱۴: ارزیابی کیفیت الگوهای انفجار شماره هشت تا ده جهت جایگزینی دینامیت با آنفو در تونل.

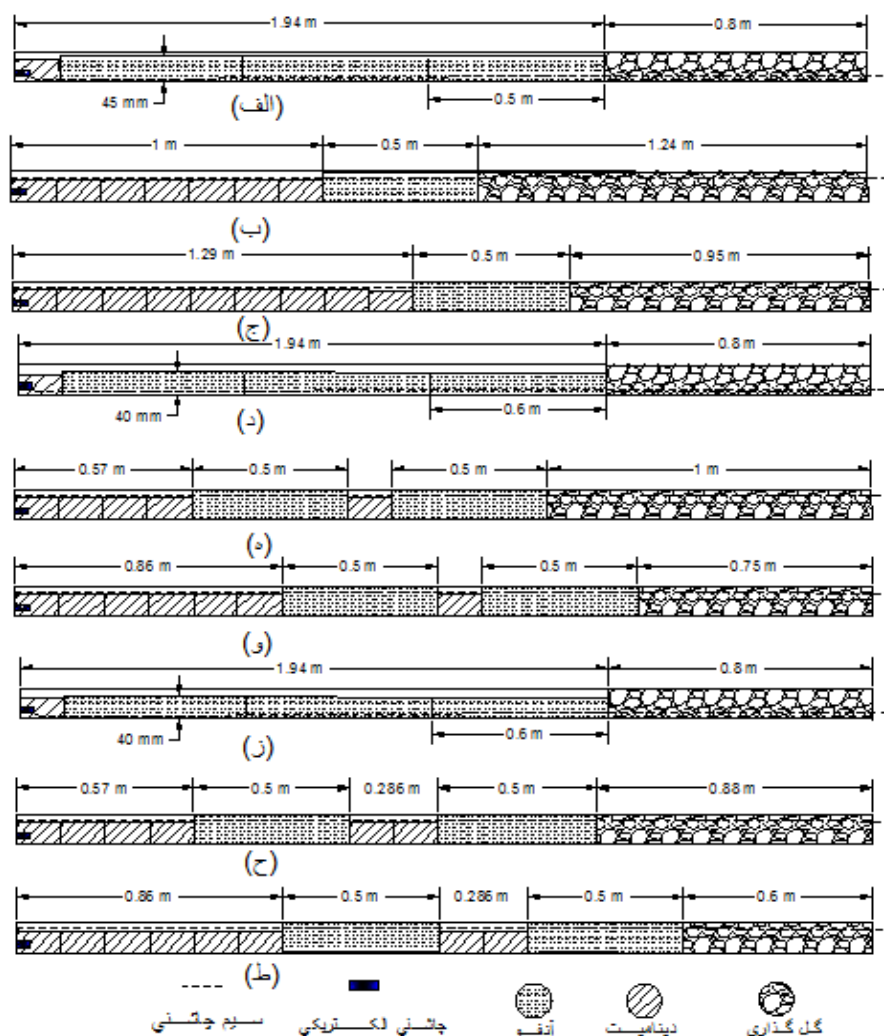
مشخصات شماره انفجار	محل چال	نوع و مقدار خرج مصرفی (Kg)		بیش حفاری (%)	داغ چال (%)	نرخ پیشروی (%)	خرج ویژه معادل دینامیت (Kg/m ³)	هزینه ویژه (Rls/m ³)
		دینامیت	آنفو					
۸	محیط	۳/۴۶	۳۹/۷	۱۲	۰	۹۶/۷	۰/۹۹	۲۶۰۰۰
	کف	۱۲/۷۰	۶/۹۴					
	پاشنه	۲/۹۷	۱/۲۶					
۹	محیط	۳/۴۶	۳۱/۵	۸	۱	۹۶	۰/۹۶	۲۵۰۰۰
	کف	۱۵/۸۲	۱۳/۸۶					
	پاشنه	۲/۳۱	۲/۵۲					
۱۰	محیط	۳/۴۶	۳۱/۵	۷/۸	۰	۹۸/۵	۰/۹۸	۲۵۰۰۰
	کف	۱۰/۸۹	۱۳/۸۶					
	پاشنه	۲/۶۴	۲/۵۲					

حفاری افزایش یافته و داغ چال نیز تقریباً صفر است که دلیل آن استفاده از آنفو بصورت غیر منقطع و جفت شده در چال‌های قسمت دیواره و سقف تونل است. به دلیل بالا بودن بیش حفاری و پایین بودن داغ چال، استفاده از آنفو در

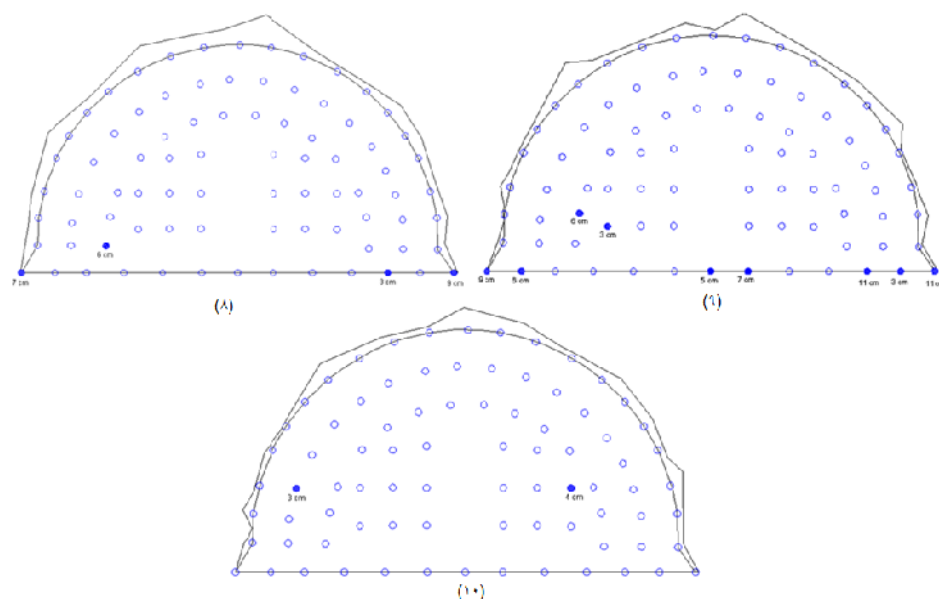
بیش حفاری و ته چال در انفجارهای مذکور در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. همان طور که ملاحظه می‌شود، هزینه ویژه در انفجارهای مذکور نسبت به سایر انفجارها کمتر است اما بیش

تونل وارد می‌کند [۹]. با توجه به نرخ پیشروی انفجارهای مذکور، خرج گذاری در بخش کف و پاشنه انفجار شماره ده، به عنوان خرج گذاری بهینه انتخاب می‌شود.

چال‌های دیواره و سقف مطلوب نبوده و خرج گذاری با دینامیت مطابق انفجار اصلاح شده شماره دو توصیه می‌شود زیرا در این الگو خرج گذاری چال‌های محیطی با دینامیت به صورت منقطع و جفت نشده است، در نتیجه آسیب کمتری به دیواره و محیط



شکل ۱۰: نحوه خرج گذاری چال‌های بخش دیواره، سقف و کف تونل در الگوهای انفجار هشت تا ده (الف) چال دیواره و سقف الگوی انفجار هشت (ب) چال کف الگوی انفجار هشت (ج) چال پاشنه الگوی انفجار هشت (د) چال دیواره و سقف الگوی انفجار نه (ه) چال کف الگوی انفجار نه (و) چال پاشنه الگوی انفجار نه (ز) چال دیواره و سقف الگوی انفجار ده (ح) چال کف الگوی انفجار ده (ط) چال پاشنه الگوی انفجار ده.



شکل ۱۱: بیش حفاری و ته چال در انفجارهای هشت تا ده.

۸- الگوی انفجار پیشنهادی

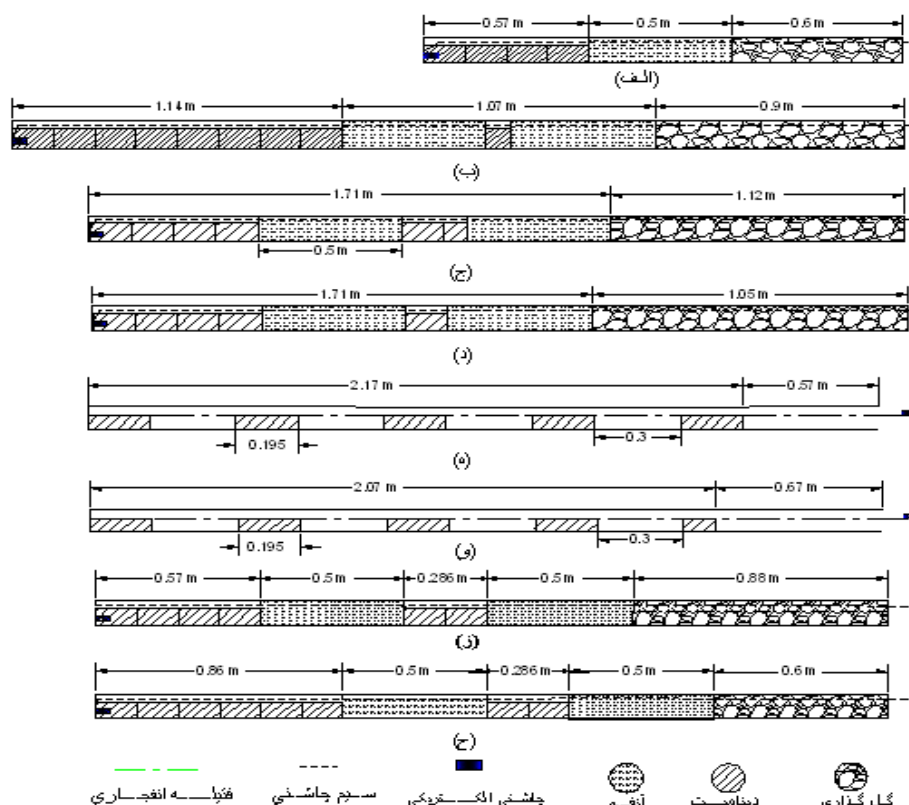
اکنون با استفاده از انفجارهای انجام شده، مناسب‌ترین روش خرج‌گذاری انتخاب می‌شود. مناسب‌ترین روش خرج‌گذاری، تلفیقی از مناسب‌ترین نحوه خرج‌گذاری در ده مرحله انفجار آزمایشی قبلی است (شکل ۱۲). آرایش و نوبت انفجار چال‌ها در الگوی انفجار پیشنهادی، مطابق شکل ۳ و مشخصات الگوی انفجار پیشنهادی مطابق جدول ۱۵ است. اجرای این الگو باعث

کاهش هزینه ویژه به میزان ۳۲٪ نسبت به الگوی فعلی می‌شود.

در مورد تهویه تونل با اجرای الگوی پیشنهادی، لازم به ذکر است که سیستم فعلی تهویه مورد استفاده در تونل به‌طور کامل جواب‌گوی تهویه بعد از انفجار بوده است و از این نقطه نظر مشکلی مشاهده نشد.

جدول ۱۵: مشخصات الگوی انفجار پیشنهادی برای جایگزین کردن دینامیت با آنفو.

توضیحات	تعداد چال	طول چال (m)	بار سنگ (m)	فاصله چال (m)	میزان خرج چال (Kg)	تراکم خرج (Kg/m)	طول گل گذاری (m)	نوع تاخیر	میزان تاخیر (ms)
محل چال									
گوه ۱ برش	۶	۱/۷۰	۱/۴۶	۰/۹	۱/۲۹	۱/۲	۰/۶	بدون تاخیر	۰
گوه ۲ برش	۶	۳/۱	۱/۲۸	۰/۹	۲/۶۶	۱/۲	۰/۹	MS ₂	۲۵
گوه ۳ برش	۶	۲/۹۳	۱/۱	۰/۹	۲/۶۶	۱/۲	۰/۹	HS ₁	۵۰۰
ردیف ۱ پیشروی	۱۴	۲/۸۳	۱/۴	۰/۸	۲/۱۶	۱/۲	۱	HS ₂	۱۰۰۰
ردیف ۲ پیشروی	۱۸	۲/۷۶	۱/۴	۰/۸	۲/۰۸	۱/۲۱	۱	HS ₃	۱۵۰۰
دیواره تونل	۱۰	۲/۷۴	۱/۲	۰/۷	۰/۸۲	۰/۳۸	۰	HS ₄	۲۰۰۰
سقف تونل	۱۱	۲/۷۴	۱/۲	۰/۷	۰/۷۴	۰/۳۶	۰	HS ₅	۲۵۰۰
کف تونل	۱۱	۲/۷۵	۰/۶۵ تا ۰/۸۵	۰/۹	۲/۲۵	۱/۲۱	۰/۹	HS ₆	۳۰۰۰
پاشنه	۲	۲/۷۵	۱/۱	-	۲/۵۸	۱/۲	۰/۶	HS ₇	۳۵۰۰



شکل ۱۲: نحوه خرج گذاری چال‌ها در الگوی انفجار پیشنهادی (الف) چال گوه اول برش (ب) چال گوه‌های دوم و سوم برش (ج) چال ردیف اول پیشروی (د) چال ردیف دوم پیشروی (ه) چال دیواره (و) چال سقف (ز) چال کف (ح) چال پاشنه.

۹- نتیجه‌گیری

- می‌توان با جایگزینی یک ماده منفجره ارزان قیمت مانند آنفو به جای دینامیت با داشتن نرخ پیشروی، داغ چال و بیش حفاری مناسب، میزان هزینه ویژه حفاری را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. میزان کاهش هزینه ویژه در این تحقیق ۳۲٪ است.
- استفاده صرف از آنفو در چال‌های دیواره و سقف به جای خرج گذاری منقطع با دینامیت، اثر نامطلوبی بر بیش حفاری و داغ چال داشته و بنابراین جایگزینی در این چال‌ها توصیه نمی‌شود.
- برای افزایش قابلیت انفجار آنفو بهتر است فشنگ‌های دینامیت بین فشنگ‌های آنفو توزیع شوند.

تشکر و قدردانی

از کلیه مسئولین و کارکنان شرکت پرلیت در کارگاه تونل حضرت اباصالح المهدی (عج) به خاطر همکاری‌شان تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- [1] V. Abdolalian, Gh. Mirahmadi, 2008, "Effective parameters in tunnel blasting and substituting dynamite with ANFO", Proceedings of the fourth national conference of civil engineering, Tehran university, Iran
- [2] A. Bagheri, 2009, "Geological reports of Abasaleh Almahdi Tunnel of Eghlid project"
- [3] Perlit Co., 2009, "Technical reports"
- [4] U. Langefors, B. Kihlstrom, 1978, "The modern technique of rock blasting", Third edition, pp. 252.
- [5] S. K. Mandal, M. M. Singh, 2009, "Evaluating extent and causes of overbreak in tunnels". Tunnelling and Underground Space Technology 24, pp. 22-36.
- [6] R. Ostevar, 1998, "Blasting in mines", vol. 2, Jahad Daneshgahi
- [7] Parchin chemical industry, 2009, "Commercial explosives"
- [8] C. L. Gimeno, E. L. Gimeno, 1995, "Drilling and blasting of rocks", pp. 227.
- [9] S. P. Singh, P. Xavier, 2004, "Causes, impact and control of overbreak in underground excavations", Tunnelling and Underground Space Technology 20, pp. 63-71.