نشریه علمی «مهندسی معدن»
Journal of Mining Engineering (JME)

دوره ۱۵، شماره ۴۹، زمستان ۹۹، صفحه ۴۹ تا ۶۶
Vol 15, No 49, 2021, pp 49-66

مقاله "علمی-پژوهشی"

بهینه‌سازی زمان‌بندی عملیات اجرایی در حفریات بزرگ زیرزمینی

ابراهیم فرخ*

استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، e.farrokh@aut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۰ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱)

چکیده

اجرای یک پروژه زیرزمینی پیچیده با حجم حفاری زیاد ممکن است چندین سال وقت بگیرد. زمان حفاری اغلب به‌صورت تجربی و بر اساس تجربیات کارشناسان کنترل پروژه، برآورد می‌شود. در چنین پروژه‌هایی روش اجرا عموما به‌صورت متعارف یعنی روش چالزنی و آتشکاری است. برای تسریع در روند عملیات اجرا، تعدادی جبهه‌کار پیشروی به صورت همزمان وجود دارد. برآورد حداقل زمان اجرایی در چنین شرایطی با توجه به اینکه گزینه‌های مختلفی برای انتخاب جبهه‌کارهای فعال برای پیمانکار وجود دارد، بسیار مشکل است و نیاز به یک شبیه سازی کامپیوتری دارد که در آن گزینه‌های مختلف به‌صورت تصادفی انتخاب و در نهایت زمان‌های تکمیل پروژه با هم مقایسه شوند تا بتوان زمان بهینه و ترتیب حفاری بهینه را تعیین کرد. در این مقاله ویژگی‌های مهم تأثیرگذار در بهینه‌سازی عملیات اجرایی یک پروژه زیرزمینی بررسی شده است که مرتبط با دو مرحله اساسی پروژه شامل طراحی و اجرا است. مهم‌ترین این ویژگی‌ها شامل ویژگی‌های تأثیرگذار زمین‌شناسی، کلاس‌های سیستم نگهداری و احجام و تعداد اجزاء مربوطه، زمان چرخه عملیات حفاری، زمان بهینه تکمیل تمام اجزاء پروژه بر اساس پیش‌شرط‌های حفاری آن‌ها، گزینه‌های مختلف پیش رو برای حفاری آن‌ها، و بهینه‌سازی چرخه عملیات و تعداد ماشین‌آلات در حین اجرا برای کاهش تاخیرات است. در ادامه ضمن معرفی تعدادی روش و رابطه جدید برای برآورد ویژگی‌های یاد شده، کاربرد آن‌ها برای برآورد زمان کمینه اجرای پروژه و کاهش تاخیرات حین اجرا برای یک پروژه زیرزمینی بزرگ در سنگاپور به‌صورت خلاصه ارائه شده است.

کلمات کلیدی

چالزنی و آتشکاری، چرخه عملیات حفاری، تخصیص ماشین‌آلات، بهینه‌سازی عملیات.

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

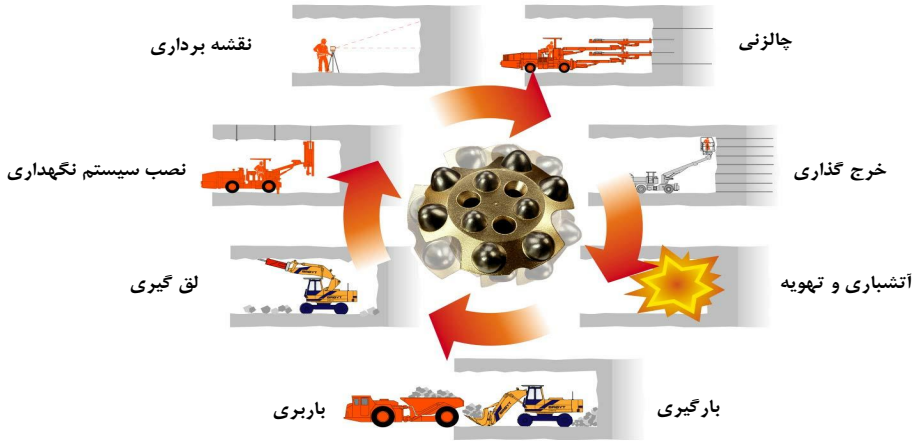
مدیریت عملیات روش حفاری چالزنی و آتشکاری شامل برآورد صحیح ویژگی‌های طراحی یک گام پیشروی، زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری این گام پیشروی، زمان کلی عملیات اجرا (علی الخصوص در یک پروژه زیرزمینی با تعداد جبهه‌کارهای پیشروی متعدد)، و مدیریت تخصیص ماشین‌آلات اجرایی است. در ارتباط با ویژگی‌های طراحی چالزنی، از جمله مهم‌ترین ویژگی‌ها، طول گام پیشروی، طرح جانمایی چال‌ها در مقطع حفاری، نوع برش مرکزی، و تعداد چال‌های مقطع حفاری است. تعدادی از این ویژگی‌ها در مدل NTNU [۱-۳] و مدل سوئدی [۴-۶] به تفصیل بررسی شده است. آخرین نسخه مدل NTNU در سال ۲۰۰۷ توسط دانشگاه علم و صنعت نروژ ارائه شده است [۷]. این مدل شامل مجموعه‌ای از روابط و چارت‌های تجربی برای ارائه جزئیات طراحی و برآورد زمان و هزینه اجرای پروژه‌های تونلی با سطح مقطع ۱۰ تا ۱۲۰ متر مربع با روش اجرای چالزنی و آتشکاری است. مدل سوئدی نیز شامل مجموعه ای از روابط تجربی برای طراحی الگوی چالزنی و آتشکاری است که توسط لنجفورس توسعه داده شده است [۵]. این روابط برای طراحی برش مرکزی، تعیین فاصله‌داری و بارسنگ چال‌ها، و برآورد خرج ویژه (میزان ماده منفجره لازم برای خردایش یک متر مکعب از سنگ برجا) به‌کار می رود. مزیت مدل نروژی در مقایسه با مدل سوئدی، در نظر گرفتن شرایط کلی سنگ در برخی از ویژگی‌های طراحی (مثل تعداد چال‌ها) است. نکته قابل توجه این است که در هیچ یک از این مدل‌ها، بهینه‌سازی زمان‌بندی عملیات اجرایی در شرایطی که تعداد جبهه‌کارهای فعال بیش از یک جبهه‌کار باشد، ارائه نشده است. این موضوع برای حفریات بزرگ زیرزمینی با زمان اجرای طولانی اهمیت زیادی دارد. در این مقاله سعی شده که با تکیه بر اطلاعات جمع‌آوری شده از تعدادی از پروژه‌های مختلف دنیا در ارتباط با ویژگی‌های طراحی ذکر شده و ویژگی‌های چرخه عملیات حفاری، تعدادی رابطه برای برآورد زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری ارائه شود. در این زمینه تأثیر شرایط توده سنگ بر طول گام پیشروی با در نظر گرفتن امتیاز توده سنگ (RMR) و موقعیت چالزنی (در تونل‌هایی که به‌صورت دو مرحله‌ای حفاری می‌شوند) بررسی می‌شود. اغلب در پروژه‌های مغارهای زیرزمینی که برای اهداف مختلف طراحی می‌شوند، تعداد اجزاء حفاری زیاد هستند و تکمیل این نوع پروژه‌ها نیازمند در نظر گرفتن یک برنامه جامع برای بهینه‌سازی زمان اجرای کلی پروژه و به‌کارگیری یک برنامه مناسب تخصیص ماشین‌آلات اجرایی در دسترس پیمانکار برای به حداقل رساندن زمان تاخیرات است. در محاسبه زمان کلی پروژه، تعداد ماشین‌آلات اجرایی در دسترس پیمانکار (به‌عنوان مثال تعداد لودر و جامبو) در مراحل مختلف پروژه و نحوه تصمیم‌گیری برای انتخاب جبهه‌کارهای فعال اهمیت زیادی دارد. با به‌کارگیری تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو برای اعمال یک تصمیم‌گیری کاملا تصادفی و تکرار این عملیات برای بهینه‌سازی فرایند انتخاب جبهه‌کارهای فعال در طول پروژه و با در نظر گرفتن حداکثر تعداد ماشین‌آلات در دسترس، امکان طراحی یک برنامه دقیق و بهینه به وجود می آید. همچنین با به‌کارگیری فرایندی مشابه، با در نظر گرفتن تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو برای اعمال یک تصمیم‌گیری کاملا تصادفی و تکرار این عملیات برای انتخاب بهینه وضعیت تخصیص ماشین‌آلات در برنامه روزانه، می توان زمان تاخیرات روزانه را به حداقل رساند. در این زمینه در این مقاله کلیات روش‌های به‌کار گرفته شده و خلاصه نتایج آن‌ها با ذکر چند مثال توضیح داده می‌شود. نکته قابل ذکر این است که بهینه‌سازی در روش‌های ارائه شده در این تحقیق تنها معطوف به نحوه تخصیص ماشین‌آلات اجرایی و انتخاب اجزاء حفاری است.

۲- عوامل کلیدی در بهینه‌سازی عملیات اجرایی

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در هر روش حفاری، شناخت دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی و ساختارهای ضعیف در محدوده عملیات اجرایی است. عموما در یک پروژه زیرزمینی در مرحله مناقصه، اطلاعات زمین‌شناسی محدود به اطلاعات کلی حاصل از مغزه‌های سنگی به‌دست آمده از گمانه‌های حفاری است. عموما در این مراحل اولیه از پروژه، اطلاعات زمین‌شناسی شامل موقعیت برداشت مغزه، تعداد ناپیوستگی‌ها و شرایط سطحی آن‌ها، مقاومت فشاری تک محوره سنگ (UCS)، شاخص کیفی سنگ (RQD)، موقعیت زون برشی، و درصد کلی بازیابی مغزه‌های سنگی بدست آمده (TCR) است. برای اجرای یک پروژه بزرگ زیرزمینی، گام اول در شناخت عوامل طراحی، به دست آوردن یک برآورد مناسب از درصد و توزیع کلاس‌های حفاری و نگهداری در نقاط مختلف پروژه است. این کاملا وابسته به شناخت سه‌بعدی شرایط توده سنگ در محدوده پروژه است که تنها با مرتبط نمودن اطلاعات گمانه‌ها به‌دست می‌آید. ساخت یک مدل سه‌بعدی

زمین‌شناسی، هر چند ساده، می تواند نقش کلیدی در برآورد صحیح ویژگی‌های طراحی و اجرایی داشته باشد.

عامل تأثیرگذار دیگر، برآورد صحیح زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری است. یک چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری در روش حفاری چالزنی و آتشکاری شامل یک سری عملیات است که عموما به‌ترتیب نشان داده شده در شکل ۱ اجرا می‌شود. این ترتیب با توجه به ملزومات اجرایی یک پروژه (به‌عنوان مثال لزوم آب‌بندی تونل در یک سطح معین که باعث اضافه شدن عملیات حفر چال شناسایی و تزریق می‌شود) و نحوه لق‌گیری می تواند دچار تغییر شود. عموما در برآورد زمان این عملیات از اطلاعات پروژه‌های مشابه استفاده می‌شود.



شکل ۱ -چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری [۸]

در این زمینه تعدادی از محققان نیز روابط تجربی‌ای را بر اساس اطلاعات در دسترس خود ارائه کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به مدل NTNU [۲] اشاره کرد. طبیعی است که زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری باید برای اجزاء مختلف حفاری و در کلاس‌های مختلف زمین‌شناسی برآورد شود و سپس نقشه گام‌های پیشروی در اجزاء مختلف حفاری (همانند تونل‌های دسترسی، تونل‌های آب‌بندی، تونل‌های ارتباطی، قطعات مختلف حفاری مغارها) ترسیم شود. پس از تعیین نقشه گام‌های پیشروی در اجزاء مختلف حفاری، زمان کلی پروژه باید به‌صورت بهینه با در نظر گرفتن حداکثر تعداد جبهه‌کارهای فعال همزمان طراحی شود. ویژگی‌های یاد شده عموما در مرحله تهیه اسناد مناقصه و قبل از واگذاری به پیمانکار انجام می‌شود. پس از واگذاری پروژه به پیمانکار، احتمال انجام عملیات شناسایی و ژئوتکنیکی تکمیلی برای کاهش خطرات ناشی از عدم شناخت کافی از گستره زون‌های زمین‌شناسی ضعیف وجود دارد که در این صورت باید تمامی ویژگی‌های ذکر شده تدقیق شوند. پس از شروع عملیات اجرایی، بهینه‌سازی عملیات اجرایی و تخصیص بهینه ماشین‌آلات باید به صورت روزانه انجام شود. جدول ۱ خلاصه عوامل مهم تأثیرگذار در بهینه‌سازی عملیات اجرایی پروژه‌های بزرگ زیرزمینی را که با روش چالزنی و آتشکاری حفر می‌شوند نشان می‌دهد. در قسمت‌های بعد صورت خلاصه موارد مهم در زمینه اقدامات مورد نیاز شرح داده می‌شود.

۳- مدل توزیع ویژگی‌های زمین‌شناسی

برای ساخت یک مدل توزیع ویژگی‌های زمین‌شناسی، باید ابتدا مختصات دهانه گمانه‌های محدوده مورد مطالعه تعیین شود و بر اساس عمق گمانه‌ها، متراژ برداشت مغزه‌های سنگی، و ویژگی‌های زمین‌شناسی در عمق‌های مختلف، مختصات دقیق اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی به‌دست آورده شود و سپس با استفاده از نرم‌افزارهای تفسیر اطلاعات بین گمhان‌های، نقشه‌های همتراز کلاس‌های حفاری را که عموما بر اساس امتیاز توده سنگ طراحی می‌شود؛ تهیه کرد. یک روش پیشنهادی، استفاده از اطلاعات گمان‌های در عمق‌هایی با فاصله‌داری معین (مثلا ۱۰ متر) و تحلیل اطلاعات در یک تراز مشخص با استفاده از نرم‌افزار Surfer است. شکل ۲ نمایی از یک نمونه خروجی این روش را نشان می‌دهد که برای یک سطح تراز معین (در این مثال ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح دریا) که تعدادی از اجزاء یک پروژه زیرزمینی مغار قرار گرفته‌اند، توسعه داده شده است. بر این اساس درصد کلاس‌های حفاری، مشخص می‌شود و ویژگی‌های مرتبط طراحی (تعداد چال‌ها،

گام پیشروی، تعداد اجزاءی سیستم‌های نگهداری و غیره برای هر کلاس به‌صورت جداگانه برآورد می‌شود و به

جدول۱ - بررسی عوامل کلیدی در بهینه‌سازی عملیات اجرایی پروژه‌های بزرگ زیرزمینی

مرحله بررسی در پروژه	عوامل کلیدی	اقدامات مورد نیاز
طراحی مقدماتی در زمان تهیه اسناد مناقصه یک پروژه	شناخت دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی و ساختارهای ضعیف	ساخت مدل توزیع ویژگی‌های زمین‌شناسی
	برآورد سیستم نگهداری مورد نیاز	استفاده از مدل Q یا RMR برای برآورد تعداد پیچ سنگ و حجم شاتکریت به ازای یک متر پیشروی در کلاس‌های نگهداری مختلف
	برآورد صحیح زمان چرخه عملیات حفاری	استفاده از اطلاعات پروژه‌های مشابه و نتایج مدل‌های برآورد زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری (به‌عنوان مثال مدل NTNU)
	برآورد زمان کلی پروژه با در نظر گرفتن حداکثر تعداد جبهه‌کارهای فعال همزمان	به‌کارگیری تکنیک شبیه سازی مونت کارلو برای اعمال یک تصمیم گیری کاملا تصادفی و تکرار این عملیات برای انتخاب بهینه وضعیت انتخاب جبهه‌کارهای فعال در طول پروژه
طراحی تفصیلی	تدقیق اطلاعات طراحی با توجه به اطلاعات تکمیلی ژئوتکنیکی	تکرار اقدامات یاد شده به‌منظور تدقیق اطلاعات
اجرای پروژه	بهینه‌سازی عملیات اجرایی و تخصیص بهینه ماشین‌آلات	تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو برای اعمال یک تصمیم-گیری کاملا تصادفی و تکرار این عملیات برای انتخاب بهینه وضعیت تخصیص ماشین‌آلات در برنامه روزانه
	بهینه‌سازی زمان عملیات خرج گذاری	به‌کارگیری مواد منفجره امولاسیون عموما باعث کاهش زمان خرج‌گذاری می‌شود، که این به دلیل به‌کارگیری خرج گذاری مکانیزه است.
	بهینه‌سازی طرح تهویه	طراحی دقیق لوله‌های تهویه و بادبزن‌های کمکی در مراحل مختلف پروژه، بر اساس تعداد پرسنل و جبهه‌کارهای فعال و احتمال رخداد آتش سوزی. به‌کار-گیری نقشه‌برداری لیزری دیواره‌های حفاری شده و مدل‌سازی دینامیکی جریان هوا برای تخمین سرعت هوا در قسمت‌های مختلف.
	به کار گیری برنامه مناسب برای آبکشی	اصلاح طرح آبکشی (اضافه کردن چاله‌های میانی جمع-آوری آب و توسعه لوله‌های انتقال آب) بر اساس افزایش طول حفاری شده در پروژه و تعداد جبهه‌کارهای فعال و به‌کارگیری یک برنامه تعمیر و نگهداری مناسب برای کاهش خطر خراب شدن ماشین‌آلات آبکشی.
	تدقیق نقشه‌های زمین‌شناسی	برداشت‌های زمین‌شناسی روزانه جبهه‌کارها به منظور تدقیق اطلاعات و اعمال اصلاحات در ویژگی‌های طراحی و اجرا

استخراج اطلاعات مرتبط با یک تراز ارتفاعی مثل Z=100 m

X	Y	Z	RMR
۲۶۸۷۳	۱۱۳۳۶	۱۰۰	۸۶
۲۶۷۲۱	۱۱۳۹۳	۱۰۰	۳۶
۲۷۵۶۳	۱۲۰۴۷	۱۰۰	۸۱
۲۷۱۷۸	۱۱۰۰۱	۱۰۰	۱۰۰
۲۶۶۱۸	۱۲۵۹۳	۱۰۰	۱۰۰
۲۵۸۳۳	۱۱۸۲۴	۱۰۰	۹۷
۲۶۰۹۹	۱۱۷۵۰	۱۰۰	۷۴
۲۶۳۴۸	۱۱۵۷۷	۱۰۰	۹۰

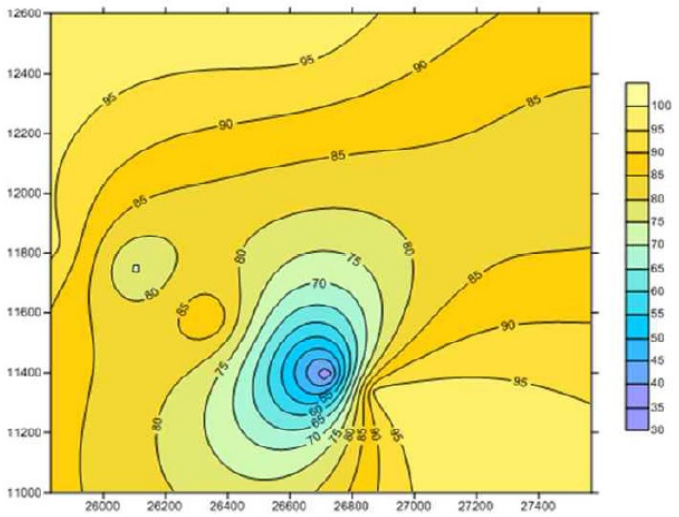
درونیابی اطلاعات با روش کریگینگ در نرم افزار Surfer

استخراج داده های RMR برای سلولهای شبکه مدل Surfur

اختصاص RMR به سلولهای جزء حفاری

محاسبه درصد کلاسهای حفاری در سطح ارتفاعی مورد نظر

کلاس حفاری	RMR	درصد
I	۰–۲۰	۰
II	۲۰–۴۰	۰
III	۴۰–۶۰	۵
IV	۶۰–۸۰	۱۵
V	۸۰–۱۰۰	۸۰



شکل ۲ – نمونه‌ای از نتایج مدل‌سازی ویژگی‌های زمین‌شناسی با استفاده از اطلاعات گمانه‌ای در یک سطح تراز مشخص به کمک نرم‌افزار Surfer

سلول‌های مختلف پروژه که بیان‌گر یک گام پیشروی در یک کلاس حفاری است، اختصاص داده می‌شود.

۴- برآورد ویژگی‌های سیستم نگهداری

به‌طور معمول روش Q برای برآورد ویژگی‌های سیستم نگهداری استفاده می‌شود شکل ۳ نحوه برآورد فاصله‌داری و طول پیچ سنگ‌ها و همچنین ضخامت شاتکریت بر اساس سیستم طبقه بندی Q را نشان می‌دهد. بر اساس فاصله‌داری پیچ سنگ‌ها، سطح تحت تأثیر هر پیچ سنگ محاسبه و تعداد پیچ سنگ‌های مورد نیاز به ازای یک متر از گام پیشروی محاسبه می‌شود. در مورد شاتکریت نیز بر اساس سطح دیواره‌ها و سقف برای یک متر از گام پیشروی و ضخامت شاتکریت تعیین شده، حجم شاتکریت مصرفی به ازای ۱ متر از طول گام پیشروی حساب می‌شود. این مقادیر برای محاسبه زمان نصب سیستم نگهداری در یک گام پیشروی مورد نیاز است.

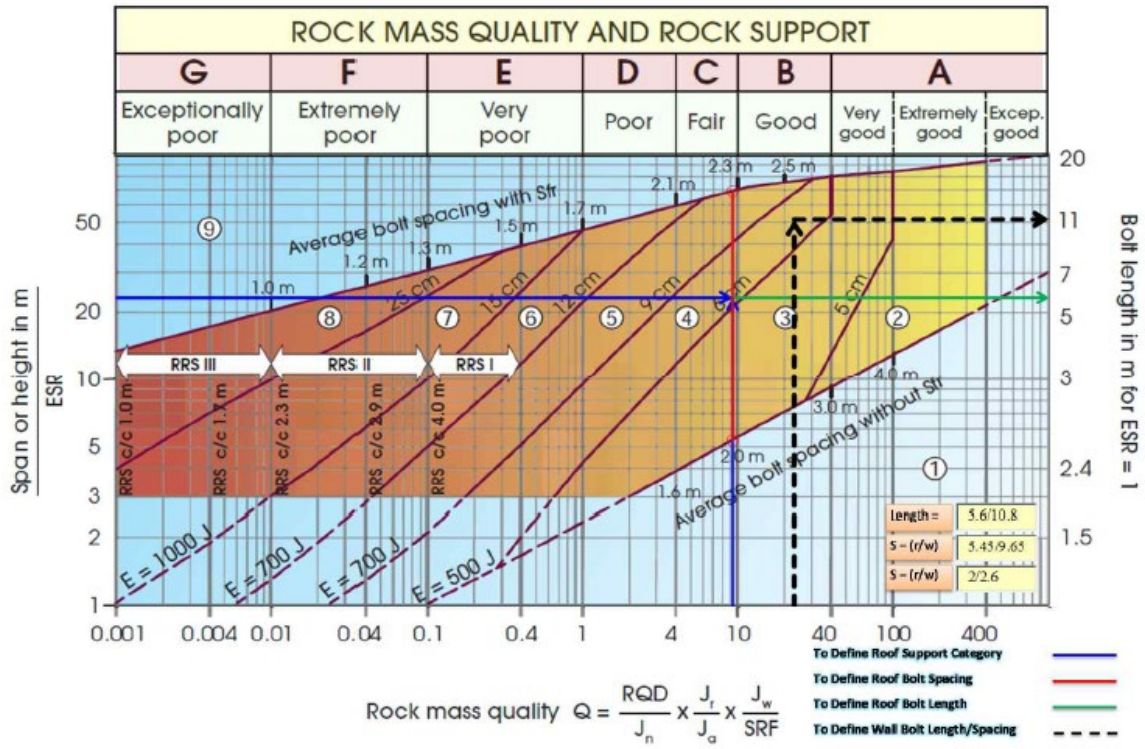
۵- برآورد زمان چرخه عملیات حفاری

به‌منظور برآورد زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری ابتدا یک بانک اطلاعاتی از ویژگی‌های طراحی و زمان اجرای عملیات یک چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری در چندین پروژه مختلف دنیا، ایجاد شد. اطلاعات این بانک اطلاعاتی از منابع مختلف شامل مقالات، پایان‌نامه‌ها، و گزارشات پیمانکاری جمع آوری شده است. این اطلاعات شامل سطح مقطع تونل، امتیاز توده سنگ (RMR)، طول گام پیشروی، تعداد چال‌های حفاری شده، زمان لازم برای اجرای اجزاء مختلف چرخه چالزنی و آتشکاری، و تعداد بوم‌های ماشین جامبوی مورد استفاده است. لازم به ذکر است، چون اطلاعاتی همانند روش انفجار، نوع خرج مصرفی، و شرایط دقیق توده‌سنگ برای تمامی پروژه‌ها قابل استحصال نبوده است، در این مقاله این اطلاعات بررسی نمی‌شود. با استفاده از اطلاعات این بانک اطلاعاتی

تعدادی روابط برای برخی از ویژگی‌های مهم مرتبط با چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری به‌دست آمده است. این روابط جدید در کنار روابط مدل NTNU به‌عنوان روابط کمک‌کننده برای کاهش خطای تخمین زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری به‌کار گرفته می‌شود. از جمله این روابط، ارتباط بسیار خوب بین طول گام پیشروی و امتیاز توده سنگ است که در شکل ۴ و روابط ۱ و ۲ نشان داده شده است.

$$RL = \frac{RMR}{19.2} \quad \text{(برای طاق تونل)} \qquad (۱)$$

$$RL = \frac{RMR}{15.7} \quad \text{(برای حفاری پایه تونل با چال‌های افقی)} \qquad (۲)$$



شکل ۳ - برآورد خصوصیات سیستم نگهداری بر اساس سیستم طبقه بندی Q [۹]

که در آن:

RL: گام پیشروی (متر)

RMR: امتیاز توده سنگ

همانگونه که مشاهده می‌شود، طول گام پیشروی، رابطه مستقیم با امتیاز توده‌سنگ دارد و عموما مقدار گام پیشروی در حفاری پایه یک تونل بیشتر از گام پیشروی در حفاری طاق تونل است. تعداد چال‌های مورد نیاز در یک مقطع حفاری، یک پارامتر بسیار تعیین‌کننده در طراحی و برآورد زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری است. شکل ۵ نشان می‌دهد که مدل NTNU [۲] و رابطه ارائه شده در [۱۰] (رابطه وسطی نشان داده شده در شکل ۵ که توسط تاتیا بر اساس تجربیات تونل‌های کشور سوئد ارائه شده است) برای پروژه‌های بانک اطلاعاتی، پیش‌بینی کمتری را ارائه می‌کند. مقایسه اطلاعات بانک اطلاعاتی با رابطه ارائه شده توسط [۱۱] (رابطه بالایی نشان داده شده در شکل ۵ که توسط ویلبر بر اساس تجربیات تونل‌های کشور آمریکا ارائه شده است)، بیان‌گر این موضوع است که نتایج این رابطه برای تونل‌هایی با سطح مقطع کمتر از ۱۰۰ متر مربع، هم خوانی بهتری دارد. البته اینکه کدام یک از این روش‌ها جواب بهتری را ارائه می‌دهد نیاز به بررسی و اطلاعات بیشتری از عملکرد آتشکاری در پروژه‌های بانک اطلاعاتی دارد که در حال حاضر در دسترس نیست.

با فرض بهینه بودن تعداد چال‌ها در این پروژه‌ها، بر اساس نتایج شکل ۱، رابطه ۳ را می‌توان برای برآورد اولیه تعداد چال‌های مورد نیاز در جبهه‌کار به‌کار گرفت.

$$N = 11.23 \cdot A^{0.5647} \quad (۳)$$

که در آن:

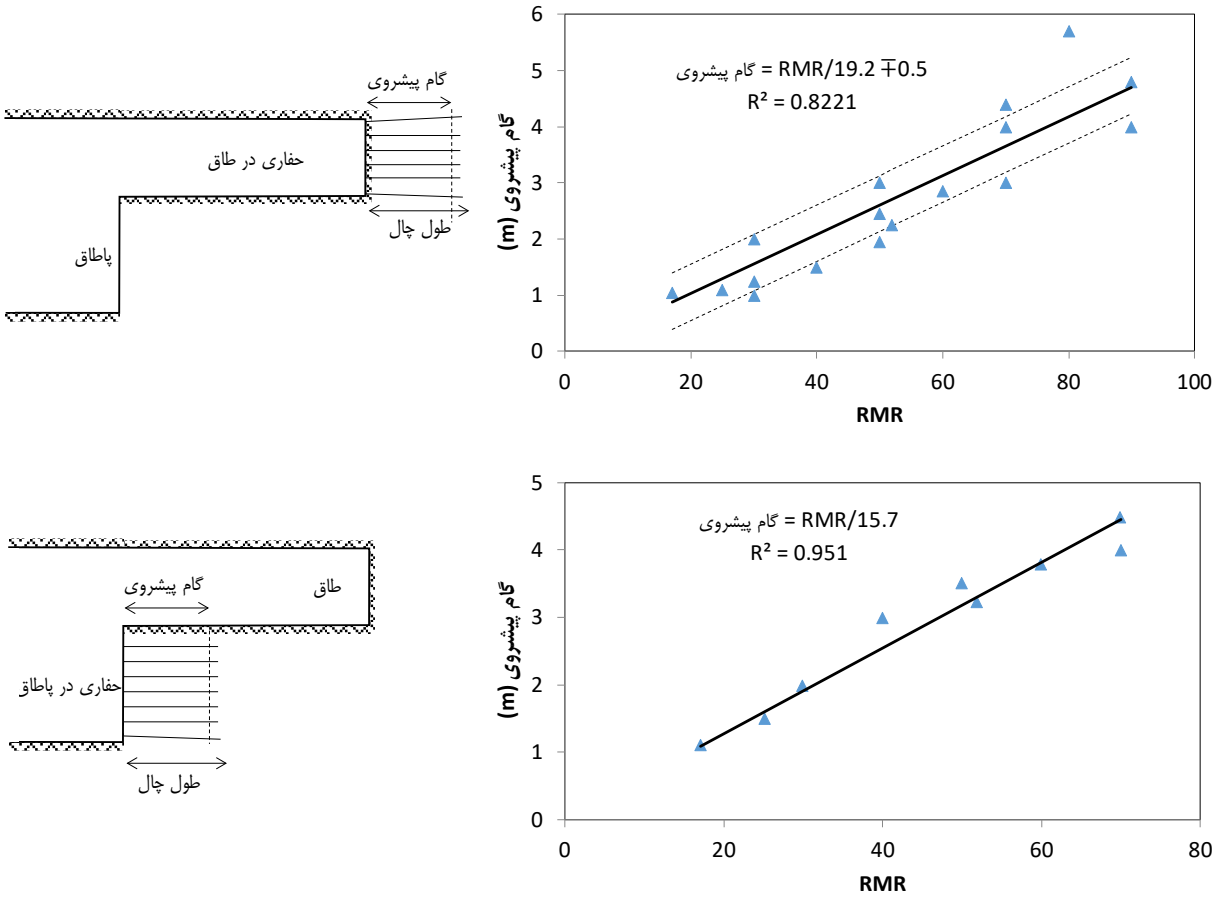
N: تعداد چال‌ها

A: سطح مقطع تونل (متر مربع)

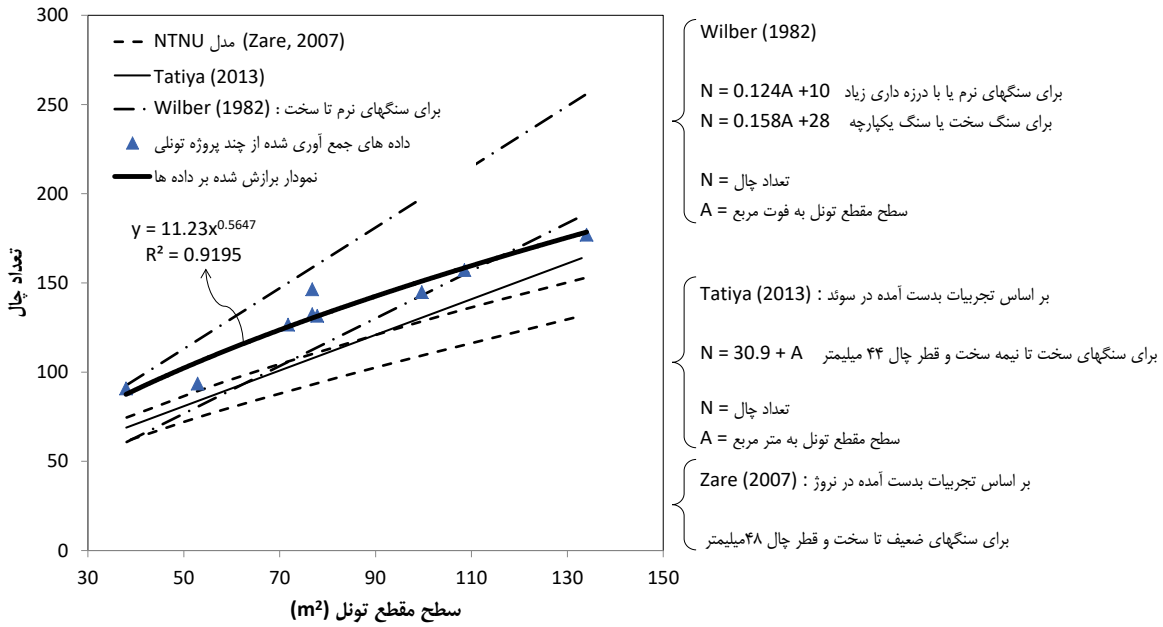
شکل‌های ۶ و ۷ روابط به‌دست آمده برای برآورد زمان چالزنی چال‌ها و زمان تهویه را بر حسب دقیقه نشان می‌دهد. جدول ۲ خلاصه ای از مراحل برآورد زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری را بر اساس مدل NTNU و نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی بانک اطلاعاتی، نشان می‌دهد.

۶- برآورد زمان کلی پروژه

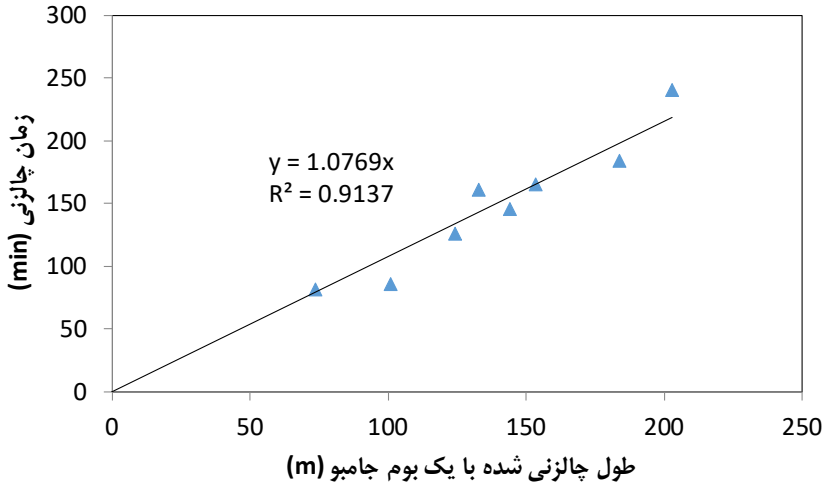
برای برآورد زمان کلی پروژه نیاز است ابتدا طول اجزاء مختلف حفاری (شامل تونل دسترسی، تونل پرده آب بند، مغار، و غیره) بر اساس کلاس‌های نگهداری مشخص شده از مدل زمین‌شناسی، تعیین شود و سپس شرایط قبل از شروع به اجرای هر جزء در یک صفحه برنامه گسترده تعریف شود. مثلا قبل از حفر پاطاق یک مغار یا تونل، باید حفاری قسمت طاق آن تمام شده باشد. یا در پروژه‌های مخزنی فرآورده‌های نفتی، قبل از حفر قسمت طاق مغار، تونل‌های پرده آب‌بند که بالاتر از تراز مغار قرار دارند باید حفاری شده باشند و عملیات تزریق آب از طریق گمانه‌های بلند در اطراف مغار انجام شده باشد.



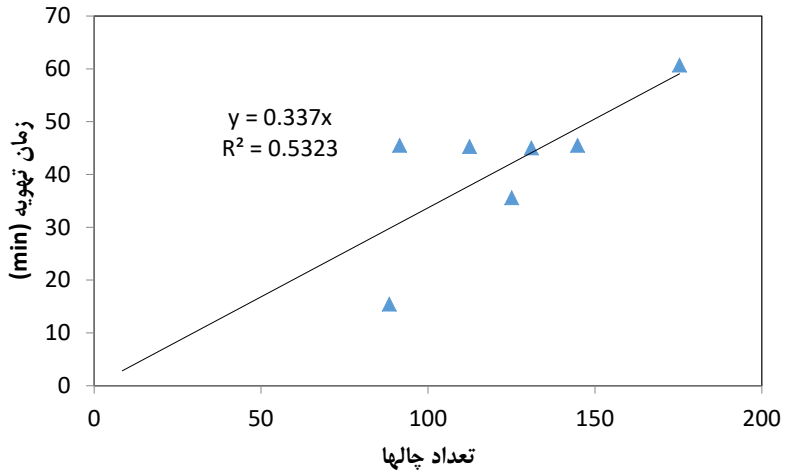
شکل ۴ - (الف) طول گام پیشروی بر حسب RMR برای قسمت طاق تونل. (ب) طول گام پیشروی بر حسب RMR برای قسمت پاطاق تونل در شرایط چال‌های افقی



شکل ۵ – مقایسه بین نتایج برآورد تعداد چال مورد نیاز برای جبهه‌کار تونل در پروژه‌های مختلف با داده‌های واقعی



شکل ۶ – زمان متوسط چالزنی چال‌ها (با در نظر گرفتن زمان استقرار بوم بین چال‌ها و سایر تأخیرات مرتبط)



شکل ۷ -زمان متوسط تهویه بر حسب تعداد چال‌های جبهه‌کار

این مسئله برای اطمینان از اشباع کامل توده‌سنگ از آب در هنگام حفاری و نصب سیستم نگهداری مغار است تا بدین وسیله مشکلی در ارتباط با نشت فرآورده‌های نفتی حین ذخیره‌سازی آن‌ها به وجود نیاید. در این برنامه صفحه گسترده تمام اجزاء پروژه و پیش‌شرط‌ها آن‌ها کدبندی می‌شوند. شکل ۸، نمای کلی از اجزاء حفاری یک پروژه زیرزمینی ذخیره فرآورده‌های نفتی در کشور سنگاپور را نشان می‌دهد. جدول ۳، نمونه‌ای از نتایج برآورد زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری را بر اساس روابط ارائه شده در جدول ۲، برای این پروژه نشان می‌دهد. در شکل ۹، اجزاء حفاری سطح ارتفاعی ۱ این پروژه، کدبندی شده است. برای ساده‌سازی توضیحات، فقط اطلاعات اجزاء سمت راست شکل ۹ (سمت چاه دسترسی شماره ۳) که درون یک کلاس نگهداری یکسان (کلاس I) هستند، بررسی می‌شود. همان‌گونه که در محدوده یاد شده در شکل ۹ مشاهده می‌شود، اولین جزء حفاری، جزء شماره ۱ است که از چاه دسترسی منشعب شده است و پس از اجرای چاه ورودی آماده اجرا است. با فرض اینکه چاه دسترسی شماره ۳ اجرا شده باشد، جزء ۱ هیچ پیش شرط اجرا ندارد و در اولین زمان ممکن آماده اجرا است. جزء ۲ زمانی قابل حفاری است که جزء ۱ به طور کامل حفاری شده باشد. در شبیه‌سازی حفاری اجزاء مختلف، برای در نظر گرفتن این موضوع، باید تکمیل اجرای جزء ۱ را به‌عنوان پیش شرط اجرا برای شروع حفاری جزء ۲ در نظر گرفت. به‌همین ترتیب، پیش شرط شروع اجرای جزء ۳، جزء ۲ است و پیش شرط اجرای اجزاء ۴ و ۱۱، جزء ۳ است. دو ردیف اول شکل ۱۰، نحوه تعیین پیش‌شرط‌های اجرای اجزاء حفاری را در محدوده یاد شده، نشان می‌دهد. در مرحله بعد، یک لیست تصادفی از کدهای اجزاء حفاری، تولید می‌شود. هدف از تولید این لیست تصادفی، شروع اجرا از یک جزء حفاری که پیش‌شرط‌های اجرای آن برآورده شده است، به‌صورت کاملا تصادفی است. به‌عنوان مثال در لیست تصادفی تولید شده برای مرحله اول (شکل ۱۰)، جزء ۳ به‌عنوان اولین جزء برای شروع حفاری تعیین شده است، اما به‌دلیل آنکه پیش شرط اجرای آن جزء ۲ است و جزء ۲ هنوز اجرا نشده است، از لیست تصادفی حذف می‌شود و دومین جزء لیست تصادفی بررسی می‌شود. دومین جزء این لیست، جزء ۱۱ است که پیش شرط اجرای آن جزء ۳ است که هنوز حفاری نشده است، بنابراین از لیست تصادفی حذف می‌شود. سومین جزء لیست تصادفی، جزء ۱ است. این جزء همان‌گونه که یاد شد، هیچ پیش شرط اجرا ندارد و آماده حفاری است. بنابر این زمان اجرای آن بر اساس زمان چرخه چالزنی و آتشکاری محاسبه می‌شود و تعداد روزهای مورد نیاز برای اجرای آن در برنامه زمانبندی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به انتخاب موفق یک جزء حفاری از لیست تصادفی مرحله اول، برای انتخاب جزء دوم حفاری که آماده اجرا است، دوباره یک لیست تصادفی از اجزاء باقیمانده تولید می‌شود (لیست تصادفی مرحله دوم در شکل ۱۰). در این مرحله، دوباره از ابتدای لیست تصادفی، کدهای اجزاء بررسی می‌شوند و عملیات یاد شده تکرار می‌شود. این مراحل تا تکمیل اجرای تمامی اجزاء ادامه پیدا می کند. در حفاری اجزاء مختلف، تعداد جبهه‌کارهای مجاز که تابعی از تعداد ماشین‌آلات در دسترس پیمانکار است، به‌عنوان یک پیش

شرط دیگر در نظر گرفته می‌شود. در صورتی‌که تعداد جبهه‌کارهای فعال کمتر از تعداد مجاز باشد، امکان حفاری همزمان جزء حفاری انتخاب شده با اجزاء قبلی (اجزائی که در مراحل قبل برای حفاری انتخاب شده اند) وجود دارد. بر این اساس در برنامه زمانبندی، زمان اجرای یک جزء آماده حفاری به‌صورت همزمان با اجزای دیگر در محدوده ای که تمامی پیش‌شرط‌های اجرا رعایت شده باشد و تعداد جبهه‌کارهای فعال کمتر از تعداد مجاز باشد، در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، یک زمان کلی برای تکمیل پروژه به دست می‌آید. فرایند تعیین زمان کل پروژه به تعداد نسبتا زیاد (۵۰ تا ۱۰۰ بار) تکرار می‌شود و در نهایت توزیع زمان تکمیل حفاری پروژه ترسیم می‌شود. بر این اساس حداقل زمان ممکن و زمان با درصد رخداد بیشتر به‌دست آورده می‌شود. نمونه‌ای از توزیع زمان تکمیل حفاری برای پروژه ذخیره سازی فرآورده‌های زیرزمینی یادشده، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تعداد حداکثر جبهه‌کارهای فعال بر اساس تعداد ماشین‌آلات در این پروژه، ۱۰ در نظر گرفته شده است. البته لازم به ذکر است که کدبندی نشان داده شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ برای ساده‌سازی توضیح فرایند تصمیم‌گیری برای حفاری است و تعداد واقعی اجزاء حفاری در این پروژه بیش از ۵۰۰ جزء در نظر گرفته شده است.

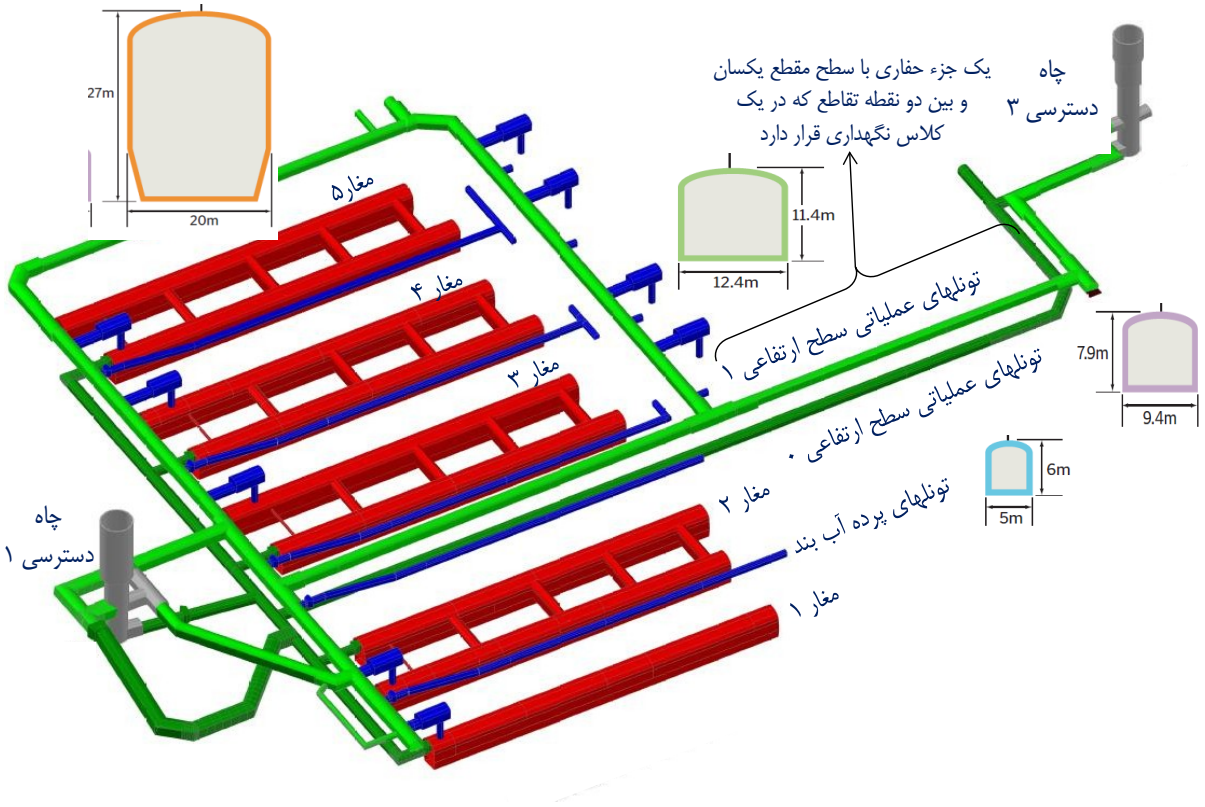
۷- بهینه‌سازی عملیات اجرایی و تخصیص بهینه ماشین‌آلات

در مرحله اجرا با توجه به اطلاعات موقعیت زمانی چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری در انتهای یک شیفت کاری، نیاز به بررسی نحوه تخصیص ماشین‌آلات به جبهه‌کارهای فعال است تا از ایجاد تاخیرات طولانی جلوگیری شود. هدف در این فرآیند، کاهش زمان تأخیرات و افزایش میزان پیشروی مقاطع حفاری است. بدین منظور چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری به سلول‌های ۱۰ دقیقه ای تقسیم بندی می‌شود (شکل ۱۲) و یک لیست تصادفی از جبهه‌کارهای فعال تولید می‌شود (شکل ۱۳). با توجه به شرایط سلول زمانی تکمیل شده در شیفت قبل، فعالیت تعدادی از ماشین‌آلات در تعدادی از جبهه‌کارها، تمام نشده است که باید در اولین سلول زمانی شیفت جدید ادامه پیدا کند (شکل ۱۳). آن دسته از ماشین‌آلات که غیر فعال هستند (به‌عبارت دیگر دارای ظرفیت خالی هستند)، بر اساس نیاز جبهه‌کارها، که از طریق چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری و وضعیت سلول زمانی جبهه‌کارها تعیین می‌شود، و بر اساس لیست تصادفی تولید شده برای جبهه‌کارها اختصاص داده می‌شوند و تا انتهای فعالیت مربوطه در همان جبهه‌کار مستقر می مانند. این فرایند برای تمامی سلول‌های ۱۰ دقیقه-ای جبهه‌کارها برای یک شیفت کاری تکرار می‌شود تا به انتهای شیفت برسیم. انتهای شیفت، تعیین‌کننده انتهای فرایند اختصاص ماشین‌آلات است. در انتهای این فرایند، زمان تاخیرات بوجود آمده بر اساس تعداد سلول‌های زمانی جبهه‌کارها که هیچگونه فعالیتی را نمی توانند انجام دهند (به دلیل کمبود ماشین‌آلات یا اختصاص نامناسب ماشین‌آلات به جبهه‌کارها)، محاسبه می‌شود. این فرایند به تعداد زیاد تکرار می‌شود و مشابه بخش قبل، توزیع زمانی تأخیرات در حالت‌های مختلف به‌دست آورده می‌شود. هدف نهایی، انتخاب حالتی است که کمترین تأخیرات را به همراه دارد. با این روش می-توان همچنین تعداد بهینه ماشین‌آلات مورد نیاز را نیز به‌دست آورد. شکل ۱۴ نتیجه نحوه تخصیص ماشین‌آلات را برای پروژه ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی (ذکر شده در بخش‌های قبل) را در حالتی که ۷ جبهه‌کار فعال وجود دارد، نشان می‌دهد. در قسمت (الف) از یک لودر و یک جامبو استفاده شده است و همین امر باعث ایجاد تاخیر در بعضی از جبهه‌کارها به‌دلیل عدم در دسترس بودن ظرفیت لودر یا جامبو شده است. در قسمت (ب)، تعداد لودر و جامبو (ماشین‌آلاتی که باعث ایجاد تاخیر شده اند) هر کدام یک عدد اضافه شده است. این امر باعث کاهش قابل ملاحظه تأخیرات شده است. با تغییر این اعداد در حالت‌های مختلف بررسی و مقایسه نتایج تأخیرات، تعداد بهینه ماشین‌آلات تعیین می‌شود. با در دست داشتن برنامه بهینه تخصیص ماشین‌آلات اجرایی، کنترل عملیات چالزنی و آتشکاری با سرعت و دقت بهتری انجام می‌گیرد و کاهش تأخیرات زمانی در کوتاه کردن زمان اجرای پروژه و هزینه‌های مربوطه اثر به سزایی دارد.

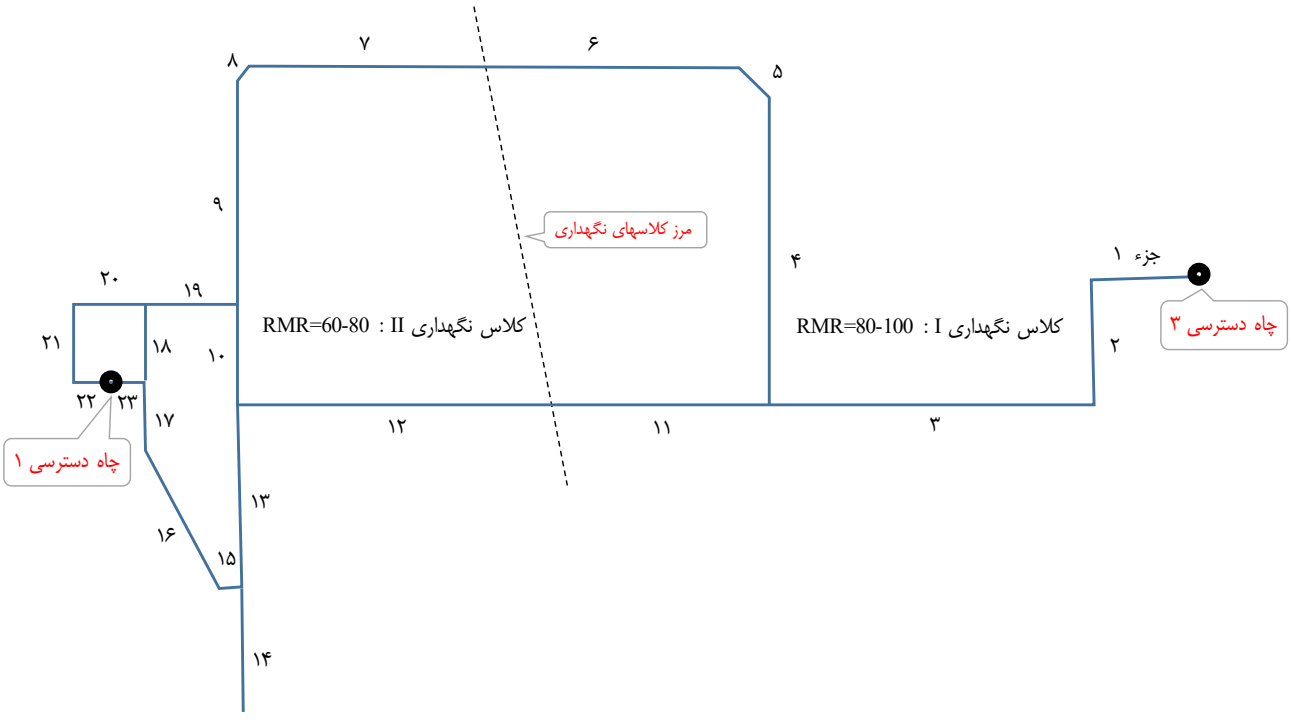
جدول۲ - خلاصه مراحل برآورد زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری

پارامتر		رابطه/مدل	توضیحات
طول گام پیشروی (متر)		RMR/20±0.5	طاق تونل
		RMR/15±0.5	پایه تونل-چال‌های افقی
زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری (دقیقه)	۱- حفر چال با جامبو		
	۱-۱- زمان استقرار جامبو و جابجایی نهایی	مدل NTNU	[۲]
	۱-۲- استقرار بوم جامبو بر روی چال	0.55+0.04*Rd	Rd= طول گام پیشروی بر حسب متر
	۱-۳- حفاری چال	مدل NTNU	نرخ نفوذ سرمته بر اساس نوع چکش، نوع سرمته و اندیس نرخ حفاری (DRI) حساب می‌شود.
	۱-۴- تعویض سرمته	مدل NTNU	نرخ تعویض هر سرمته ۱,۵ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. مصرف سرمته در هر گام پیشروی بر اساس میزان ساینده‌گی سنگ، قطر چال، و نوع سرمته تعیین می‌شود.
	۲- خرج گذاری و آتشکاری		
	۲-۱- زمان ثابت در خرج گذاری چال	0.35	زمانی که وابسته به طول چال نیست. به عنوان مثال زمان استقرار پرسنل روبری چال و زمان آماده‌سازی خرج ته چال. [۱۲]
	۲-۲- زمان وابسته به طول چال	0.25-0.35 min/m	زمان تمیز کردن طول چال و جاگذاری خرج ستونی. [۱۲]
	۲-۳- زمان گل گذاری	0.15-0.25	وابسته به نوع گل‌گذاری (لول گل‌گذاری یا مسدود کننده چتری) [۱۲]
	۳- تهویه بعد از آتشکاری	0.337 min/hole	
	۴- لق گیری	مدل NTNU	وابسته به سطح مقطع حفاری و اندیس آتشکاری سنگ[1] است.
	۵- بارگیری		
	۵-۱- زمان استقرار لودر و زمان جابجایی نهایی	مدل NTNU	
	۵-۲- زمان بارگیری	بر اساس محاسبه زمان چرخه بارگیری یک کامیون و ظرفیت بارگیری ساعتی لودر	
	۶- نقشه برداری و برداشت زمین‌شناسی	25	
	۷- نصب سیستم نگهداری		
	۷-۱- زمان استقرار اولیه جامبو و جابجایی نهایی	10	
	۷-۲- زمان استقرار بوم حفاری در برابر چال پیچ سنگ	0.75 min/hole	
	۷-۳- زمان حفر چال	مدل NTNU	نرخ نفوذ سرمته بر اساس نوع چکش، نوع سرمته و اندیس نرخ حفاری[2] حساب می‌شود.
	۷-۴- زمان نصب پیچ سنگ	1.74 min/m	

[1] SPR
[2] DRI



شکل ۸ – نمایی از اجزاء حفاری پروژه ذخیره فرآورده‌های نفتی در سنگاپور



شکل ۹ –نمایی ساده‌سازی شده از کدبندی اجزاء حفاری پروژه ذخیره فرآورده‌های نفتی در سنگاپور در سطح ارتفاعی ۱

جدول۳ - نمونه‌ای از نتایج برآورد زمان چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری برای پروژه ذخیره فرآورده‌های نفتی سنگاپور (برای جزء ۳ نشان داده شده در شکل ۹ با ارتفاع ۱۱,۴ متر و عرض ۱۲,۴ متر)

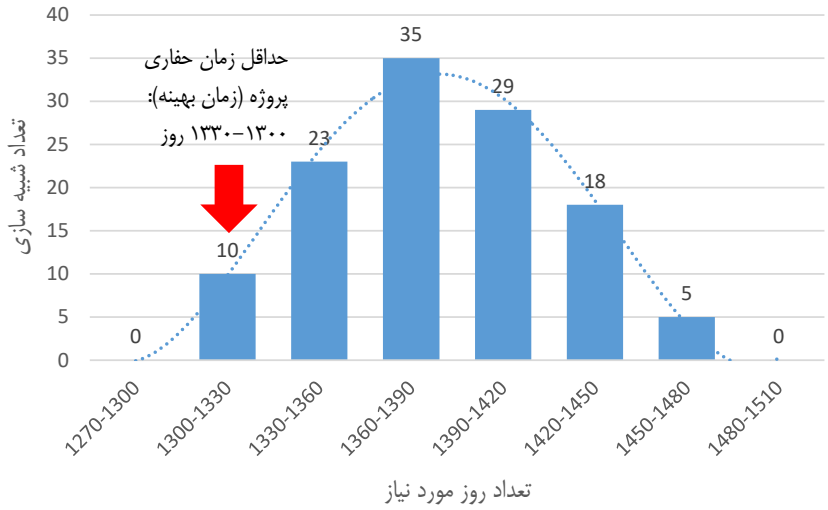
کلیات	مقدار	واحد	آتشباری	مقدار	واحد
سطح مقطع تونل	۱۳۲	m^2	خرج گذاری-زمان ثابت	۶۱	min
گام پیشروی	۵	m	خرج گذاری-زمان وابسته به طول چال	۲۸۹	min
DRI	۴۰		گل گذاری	۳۸	min
اندیس آتشباری سنگ (SPR)	متوسط		اتصال رابطها	۳۶	min
حجم شاتکریت	۱	m^3/m	تخلیه و انفجار	۵	min
تعداد پیچ سنگ	۳	bolt/m	کل زمان آتشباری	۴۲۹	min
تعداد چالها			کل زمان تهویه	۵۸	min
متوسط اضافه حفاری	۵	%	کل زمان لق گیری	۹۳	min
اضافه حفاری طول چال	۱۰	%	بارگیری		
سطح مقطع چالهای توخالی مرکزی	۲۴۷	cm^2	جایگیری اولیه لودر	۱۵	min
تعداد چالهای توخالی مرکزی	۴		بارگیری	۲۶۱	min
تعداد چالهای خرج گذاری شده	۱۷۱		سایر زمانها	۳۱	min
کل تعداد چالها	۱۷۵		کل زمان بارگیری	۳۰۷	min
لودر			کل زمان نقشه برداری	۲۵	min
فاکتور تورم سنگ حفاری شده	۱.۶		نصب پیچ سنگ		
فاکتور پرشوندگی باکت	۰.۸۵		جایگیری اولیه جامبو	۱۰	min
حجم باکت	۵	m^3	تنظیم بوم برای چالها	۶	min
تعداد لودر	۱		حفاری	۲۲	min
ظرفیت بارگیری لودر بر حسب سنگ برجا	۱۵۹.۴	m^3/hr	نصب پیچ سنگ	۵۲	min
جامبو			کل زمان نصب پیچ سنگ	۸۹	min
جایگیری اولیه	۱۵	min	کل زمان اجرای شاتکریت	۵۹	min
تنظیم بوم برای چالها	۴۴	min	مجموع زمانها	۱۳۷۱	min
حفاری	۲۳۱	min	سایر تاخیرات	۰	min
تعویض سرمته	۱۰	min	توسعه خطوط خدمات	۲۵	min
سایر زمانها	۱۰	min	**پیشروی روزانه**	**۵.۲**	**m/day**
کل زمان حفاری	۳۱۰	min			

متوسط اضافه حفاری: درصد نسبت حجم اضافه حفاری شده نسبت به حجم حفاری طراحی در یک گام پیشروی

اضافه حفاری طول چال: درصد اختلاف طول چال و گام پیشروی نسبت به طول چال

اجزاء پروژه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۱۱
پیش شرط اجرا	ندارد	۱	۲	۳	۴	۵	۴
لیست تصادفی اجزاء-مرحله ۱	۳	۱۱	۱	٦	٥	۲	٤
آیا پیش شرط اجرا برآورده می شود؟	خیر	خیر	بله				
لیست تصادفی اجزاء-مرحله ۲	۳	۱۱	٦	٥	۲	٤	
آیا پیش شرط اجرا برآورده می شود؟	خیر	خیر	خیر	خیر	بله		
لیست تصادفی اجزاء-مرحله ۳	۳	۱۱	٦	٥	٤		
آیا پیش شرط اجرا برآورده می شود؟	بله						
لیست تصادفی اجزاء-مرحله ۳	۱۱	٦	٥	٤			
آیا پیش شرط اجرا برآورده می شود؟	خیر	خیر	خیر	بله			
لیست تصادفی اجزاء-مرحله ٤	۱۱	٦	٥				
آیا پیش شرط اجرا برآورده می شود؟	بله						
لیست تصادفی اجزاء-مرحله ٥	٦	٥					
آیا پیش شرط اجرا برآورده می شود؟	خیر	بله					
لیست تصادفی اجزاء-مرحله ٦	٦						
آیا پیش شرط اجرا برآورده می شود؟	بله						
جزئی که آماده حفاری است.							

شکل ۱۰ -کدبندی اجزاء پروژه و نحوه تصمیم‌گیری برای حفاری یک جزء بر اساس یک لیست تصادفی



شکل ۱۱ – توزیع زمان کل محاسبه شده برای تکمیل یک پروژه ذخیره‌سازی فرآورده‌های زیرزمینی در کشور سنگاپور

		سلولهای زمانی و زمان (دقیقه)																							
نوع فعالیت	زمان (دقیقه)	۱۰	۲۰	۳۰	٤۰	۵۰	٦۰						۱۲۰						۱۸۰						٢٤۰
بارگیری	۴۸۰																								
لق گیری	۳۰۰																								
نقشه برداری	۱۲۰																								
شاتکریت	۱۸۰																			تاخیر به دلیل نبود تجهیزات					
حفر چال	۶۰۰																								
نصب بولت	۱۸۰																								
خرج گذاری	۱۸۰																								
تهویه	۱۲۰																								

شکل ۱۲ : نمونه‌ای از تقسیم بندی زمانی چرخه چالزنی و آتشکاری یک جبهه‌کار

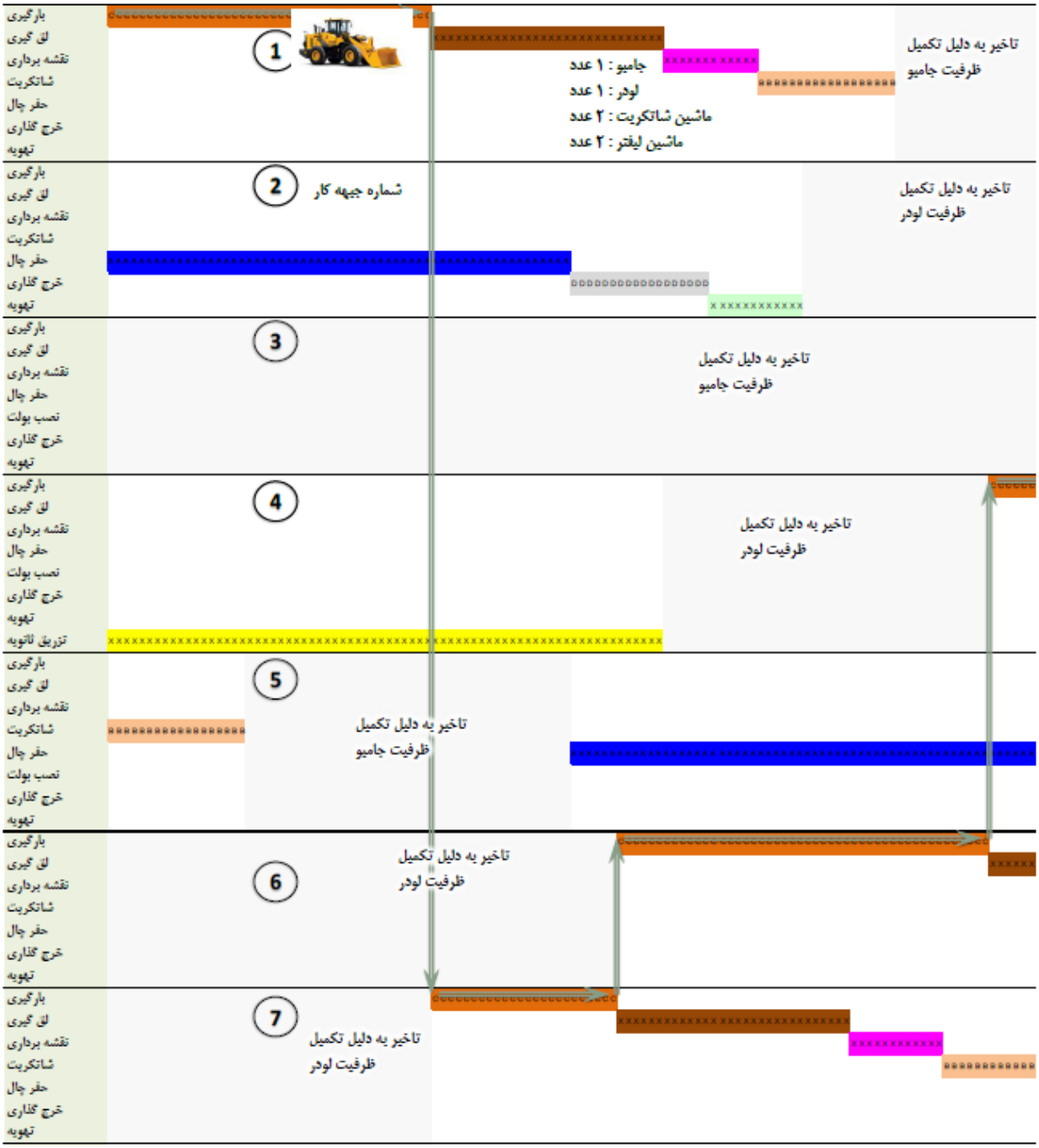
شماره جبهه کار	**۱**	**۲**	**۳**	**٤**	**۵**	**٦**	**۷**
نوع فعالیت	بارگیری	حفر چال	حفر چال	تزریق	شاتکریت	بارگیری	بارگیری
زمان مورد نیاز (دقیقه)	۴۲۰	۶۰۰	۴۸۰	۷۲۰	۱۸۰	۴۸۰	۲۴۰
ماشین آلات موجود در ابتدای شیفت کاری	لودر ۱	جامبو ۱			ماشین شاتکریت ۱		
آیا فعالیت ماشین آلات موجود در جبهه کار تمام شده؟	خیر	خیر	خیر				

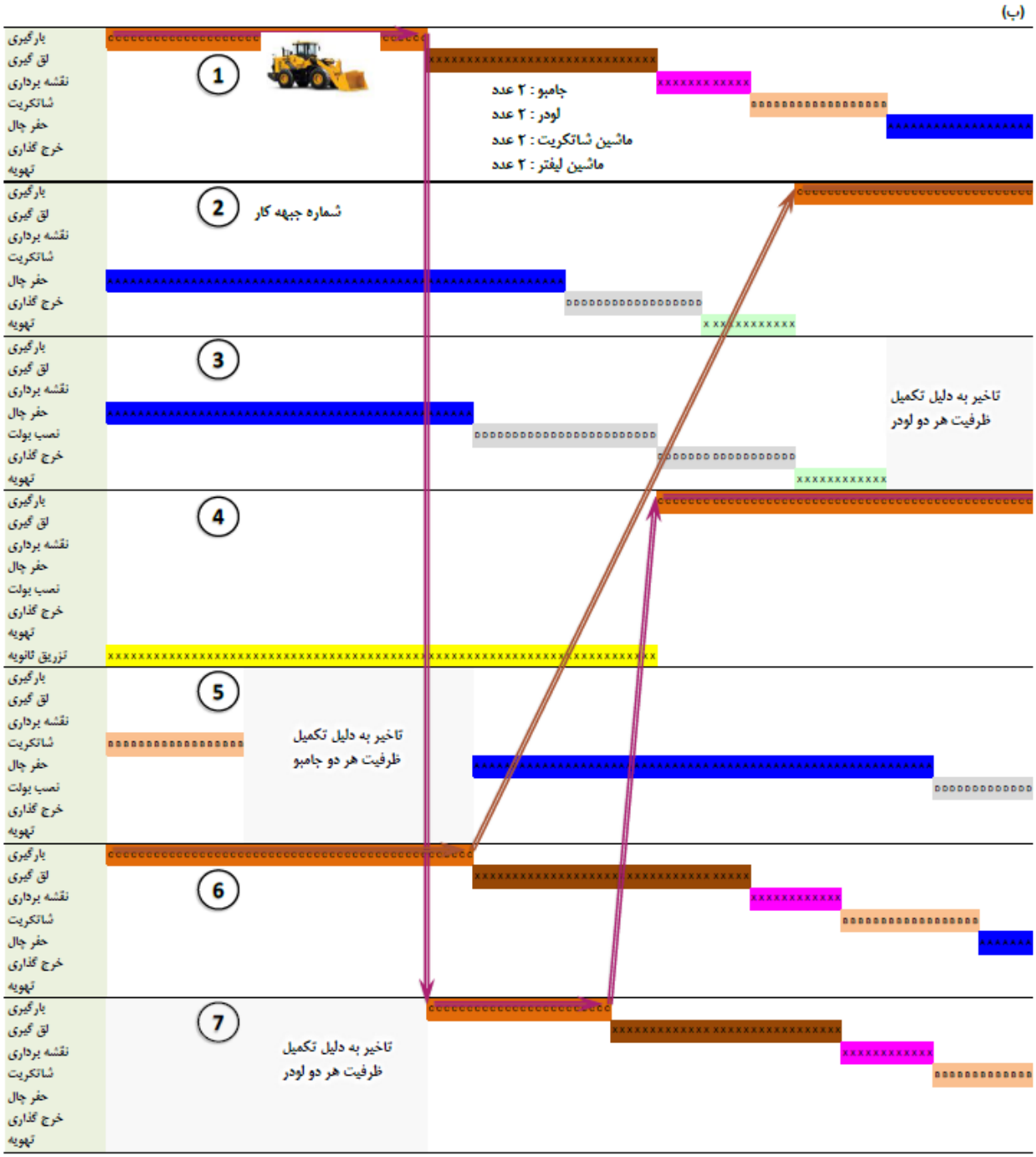
لیست تصادفی اجزاء-۱۰ دقیقه اول شیفت	**۳**	**۷**	**۱**	**٦**	**۵**	**۲**	**٤**
تخصیص ماشین آلات			لودر ۱		ماشین شاتکریت ۱	جامبو ۱	ماشین تزریق ۱
لیست تصادفی اجزاء-۱۰ دقیقه دوم شیفت	**۱**	**۵**	**۷**	**۳**	**٦**	**٤**	**۲**
تخصیص ماشین آلات	لودر ۱	ماشین شاتکریت ۱				ماشین تزریق ۱	جامبو ۱
...							
لیست تصادفی اجزاء-۱۰ دقیقه ۵۷ام شیفت	**۳**	**۵**	**۲**	**٦**	**۱**	**۷**	**٤**
تخصیص ماشین آلات			جامبو ۱		لیفتر ۱	لودر ۱	ماشین تزریق ۱
...							
تاخیر به دلیل تکمیل ظرفیت ماشین آلات							

تعداد ماشین آلات موجود		لودر: ۱		جامبو: ۱		ماشین شاتکریت : ۲		ماشین لیفتر: ۲		ماشین تزریق: ۱

شکل ۱۳ : نمونه‌ای از تخصیص ماشین‌آلات به جبهه‌کارهای مختلف بر اساس لیست‌های تصادفی تولید شده و پیش‌شرط‌های موجود (تکمیل فعالیت‌های نیمه‌کاره مانده از شیفت قبل)

(الف)


بارگیری
لق گیری
نقشه برداری
شاتکریت
حفر چال
خرج گذاری
تهویه
1
جامبو : ۱ عدد
لودر : ۱ عدد
ماشین شاتکریت : ۲ عدد
ماشین لیفتر : ۲ عدد
تاخیر به دلیل تکمیل
ظرفیت جامبو
2
شماره جبهه کار
تاخیر به دلیل تکمیل
ظرفیت لودر
3
نصب بولت
تاخیر به دلیل تکمیل
ظرفیت جامبو
4
تزریق ثانویه
تاخیر به دلیل تکمیل
ظرفیت لودر
5
تاخیر به دلیل تکمیل
ظرفیت جامبو
6
تاخیر به دلیل تکمیل
ظرفیت لودر
7
تاخیر به دلیل تکمیل
ظرفیت لودر



شکل ۱۴ : بررسی تاخیرات چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری بر اساس نحوه تخصیص ماشین‌آلات و تعداد آن‌ها برای یک پروژه ذخیره فرآورده‌های نفتی با ۷ جبهه‌کار فعال (الف) با یک لودر و یک جامبو (ب) با دو لودر و دو جامب

۸- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی عوامل تأثیرگذار در بهینه‌سازی عملیات اجرایی پروژه‌های زیرزمینی بزرگ که مستلزم داشتن جبهه‌کارهای فعال متعدد است، پرداخته شده است. برای این منظور نحوه مدلسازی ویژگی‌های زمین‌شناسی با نرم‌افزار Surfer تشریح شده است. هدف از این مدلسازی، شناخت بهتر گستره کلاس‌های مختلف نگهداری و حفاری است. برآورد ویژگی‌های چرخه عملیات چالزنی و آتشکاری با استفاده از مدل NTNU و همچنین اطلاعات تعدادی از پروژه‌های مختلف دنیا مورد بررسی قرار گرفته است که حاصل آن ارائه یک مدل ترکیبی از روابط مدل NTNU و روابط جدید حاصل از تحلیل اطلاعات بانک اطلاعاتی است. در قسمت‌های پایانی نیز خلاصه‌ای از روش‌های اعمالی برای بهینه‌سازی برآورد زمان کلی پروژه و بهینه‌سازی تخصیص ماشین‌آلات اجرایی به جبهه‌کارهای فعال ارائه شده است. مزیت روش‌های اعمالی، به دست آوردن حالت بهینه تأخیرات پروژه طی یک فرایند شبیه-سازی مونت کارلو است که خود می‌تواند منجر به برآورد مقدار کمینه ممکن برای زمان و هزینه پروژه در زمان ارائه اسناد مناقصه شود و همچنین باعث بهینه‌سازی زمان و هزینه در هنگام اجرای پروژه شود.

منابع

[1] NTNU, 2007a. Report 2A-05 *Drill and Blast Tunnelling* – Blast Design. Department of Civil and Transport Engineering, Trondheim, Norway.

[2] NTNU, 2007b. *Report 2B-05 Drill and Blast Tunnelling – Advance Rat*e. Department of Civil and Transport Engineering, Trondheim, Norway.

[3] NTNU, 2007c. *Report 2C-05 Drill and Blast Tunnelling – Costs*. Department of Civil and Transport Engineering, Trondheim, Norway.

[4] Holmberg, R., 1982. *Charge Calculations for Tunnelling*. Underground Mining Methods Handbook. Society of mining engineers, New york, pp. 1580–1589.

[5] Langefors, U., Kihlstrom, B., 1978. *The Modern Technique of Rock Blasting*. third ed. Almqvist & Wiksell Forlag AB, Stockholm.

[6] Persson, P.A., Holmberg, R., Lee, J., 2001. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. sixth printing, CRC Press, USA.

[7] Zare, S., Bruland, A., Rostami, J., 2016. "Evaluating D&B and TBM tunnelling using NTNU prediction models", Tunnelling and Underground Space, Vol. 59, pp. 55-64.

[8] Sandvik, 2009. "Benefits of computerized drilling in drill and blast tunneling", Metec Conference.

[9] Grimstad, E., Barton, N., 1993. "Updating of the Q-system for NMT". International Symposium on Sprayed Concrete. Fagernes, Proceedings, pp. 46-66.

[10] Tatiya, R. R., 2013. *Surface and underground excavations*. CRC Press, USA.

[11] Wilber, L. D., 1982. *Rock tunnels*. In Tunnel Engineering Handbook, J. O. Bichel and T. R. Kuesel (eds). Van Nostrand-Reinhold, New York, pp. 123–207.

[12] Maidl, B., Thewes, M., Maidl, U., 2013. *Handbook of Tunnel Engineering*. Volume I: Structures and Methods, Ernst and Sohn, Germany.