



مقاله پژوهشی

مدل سازی تأثیر کاربرد هم زمان ماشین اره زنجیری و سیم برش الماسه بر روی بهره وری معادن سنگ ساختمانی با رویکرد شبیه سازی رویداد گسسته

عباس عمو^۱، مجید عطایی پور^۱، ستار مهدوری^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت: فروردین ۱۴۰۳، پذیرش: دی ۱۴۰۳)

چکیده

سنگ های ساختمانی برای تأمین مصالح مورد نیاز پروژه های عمرانی و صنعتی از جایگاه ویژه ای برخوردار هستند. مدیریت فرآیند استخراج و برنامه ریزی تولید باهدف افزایش تولید و بهره وری نقش کلیدی در بهره برداری بهینه از معادن سنگ ساختمانی دارد. معمولاً برای استخراج معادن سنگ ساختمانی از سیم برش الماسه و یا ماشین اره زنجیری (هاواژ) استفاده می شود. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر کاربرد هم زمان ماشین اره زنجیری و سیم برش الماسه بر روی بهره وری از رویکرد شبیه سازی رویداد گسسته استفاده شده است. به این ترتیب که در ابتدا داده های زمانی مربوط به نرخ پیشروی هاواژ، متراژ حفاری راسول و سطح برش حاصل از سیم برش الماسه در هر شیفت در دو حالت قائم و افقی در معدن شایان جمع آوری شد و مناسب ترین تابع چگالی احتمال برای هر سری داده تعیین شد. سپس چهار سناریو از حالت های مختلف استخراج معدن با استفاده از سیم برش الماسه و هاواژ با فرض وجود یک سینه کار فعال شبیه سازی شده است. در سناریوی اول برای برش هر سه وجه بلوک از سیم برش الماسه و به تنهایی استفاده شد. در سناریوی دوم در کنار سیم برش الماسه، یک ماشین اره زنجیری برای برش وجه پشت بلوک سنگ به فرآیند استخراج اضافه شد. در سناریوی سوم نیز در کنار سیم برش الماسه، یک ماشین اره زنجیری برای برش وجه کف بلوک سنگ به فرآیند استخراج اضافه شد. در سناریوی چهارم برای برش هر دو وجه پشت و کف بلوک از ماشین اره زنجیری استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل، میزان تولید برای سناریوهای اول تا چهارم، به ترتیب ۳۶، ۹۵، ۵۶/۵ و ۵۰ هزار تن در ۳۰۰ روز کاری به دست آمده است. به این ترتیب سناریوی دوم با بیشترین میزان تولید و حداکثر بهره وری به عنوان بهترین سناریو برای استخراج معدن شایان پیشنهاد می شود.

کلمات کلیدی

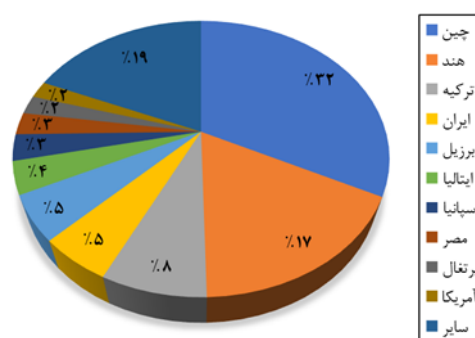
شبیه سازی رویداد گسسته، سیم برش الماسه، ماشین اره زنجیری، معدن سنگ ساختمانی شایان، نرم افزار Arena.

*عهده دار مکاتبات: satar.mahdevari@aut.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2024.21484.1633

۱- مقدمه

کشور ایران از نظر منابع و ذخایر سنگ ساختمانی و نیز تنوع سنگ‌های تزئینی یکی از کشورهای مهم در این حوزه است (شکل ۱). با توجه به پتانسیل اقتصادی صنعت سنگ‌های ساختمانی، یکی از چالش‌های این صنعت، پایین بودن بهره‌وری و بالا بودن هزینه‌های تولید است [۱]. از طرفی با توجه به افزایش روزافزون ساخت‌وساز، تقاضا برای انواع سنگ‌های ساختمانی رو به افزایش است [۲]؛ بنابراین افزایش بهره‌وری در کنار افزایش تولید معادن سنگ ساختمانی امری اجتناب‌ناپذیر است [۳].



شکل ۱: آمار تولید سنگ‌های ساختمانی در سال ۲۰۲۰ [۱].

در حال حاضر برای استخراج معادن سنگ ساختمانی معمولاً از سیم‌برش الماسه و ماشین اره‌زنجیری (هاواژ) استفاده می‌شود [۴]. در صورت کاربرد هم‌زمان و صحیح سیم‌برش الماسه و ماشین اره‌زنجیری می‌توان به تولید بیشتر و بهره‌وری بالاتری دست یافت. به‌طور کلی در صورت استفاده هم‌زمان از ماشین اره‌زنجیری در کنار سیم‌برش الماسه، تعداد چال‌های موردنیاز برای استخراج بلوک به‌طور چشم‌گیری کاهش‌یافته که کاهش زمان اجرای عملیات و کاهش نیروی کار را به همراه دارد؛ بنابراین مشکلات همپوشانی چال‌ها در معادن سنگ ساختمانی به حداقل می‌رسد که این امر باعث افزایش تولید و کاهش زمان استخراج می‌شود [۵-۷]. در سال ۲۰۰۶ کاپور و همکاران نشان دادند که کاربرد هم‌زمان ماشین اره‌زنجیری و سیم‌برش الماسه در معدن سنگ تراورتن باسارآنلار^۱ ترکیه عملکرد کلی معدن را حدود ۲۰ درصد بهبود داده است [۵]. در سال ۲۰۱۰ نیز مطالعه‌ای در دو معدن کالکلیک^۲ و کوکابا^۳ در ترکیه انجام شد که بر اساس نتایج آن، با افزودن ماشین اره‌زنجیری، بهره‌وری معدن از ۷-۱۴ درصد به ۶۵-۸۰ درصد افزایش یافته است [۸].

در مطالعات پیشین، نتایج مربوط به قبل و بعد از افزودن ماشین اره‌زنجیری مقایسه شده است. همچنین، در مورد نحوه ترکیب هاواژ و سیم‌برش الماسه مطالعه‌ای انجام نشده است. در صورتی که افزودن هاواژ به معدن نتیجه مثبتی نداشته باشد و یا به‌صورت صحیح استفاده نشود، باعث اتلاف هزینه و زمان می‌شود. به‌این‌ترتیب در این پژوهش برای بررسی تأثیر افزودن هاواژ بر روی بهره‌وری عملیات استخراج معدن، از رویکرد شبیه‌سازی رویداد گسسته برای مقایسه سناریوهای مختلف حاصل از کاربرد هم‌زمان سیم‌برش الماسه و هاواژ استفاده شده است.

۲- شبیه‌سازی

به فرآیند ساختن مدل‌هایی از سیستم واقعی موجود و یا سیستم‌های فرضی آینده و اجرای این مدل‌ها به‌منظور توضیح رفتار سیستم، بهبود عملکرد سیستم یا طراحی سیستم‌های جدید شبیه‌سازی گفته می‌شود [۹]. شبیه‌سازی، روشی برای برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی باهدف تصمیم‌گیری و طراحی سیستم‌های پیچیده است. همچنین با شبیه‌سازی امکان ارزیابی ریسک‌ها، هزینه‌ها و موانع اجرایی سیستم فراهم می‌شود [۱۰]. ارزیابی سیستم‌ها با استفاده از شبیه‌سازی، ایمن‌تر، ارزان‌تر و سریع‌تر است. شبیه‌سازی نه‌تنها نحوه عملکرد سیستم را به تصویر می‌کشد بلکه با اجرای سناریوهای مختلف، امکان شناسایی بهترین سناریو بدون اجرای فیزیکی آن وجود دارد [۱۱].

شبیه‌سازی به انواع مختلفی از جمله شبیه‌سازی فیزیکی، شبیه‌سازی تعاملی، شبیه‌سازی مداوم، شبیه‌سازی رویداد گسسته و ... تقسیم‌بندی می‌شود. شبیه‌سازی رویداد گسسته تکنیکی است که عملکرد یک سیستم را به‌عنوان یک توالی گسسته از رویدادها در زمان معین مدل‌سازی می‌کند؛ بنابراین در این رویکرد هر رویداد در یک لحظه خاص از زمان رخ می‌دهد که باعث تغییر حالت سیستم می‌شود. همچنین بین رویدادهای متوالی، هیچ تغییری در نظر گرفته نمی‌شود؛ بنابراین شبیه‌سازی می‌تواند بی‌درنگ از یک رویداد به رویداد بعدی پرش کند [۱۲]. مراحل انجام شبیه‌سازی رویداد گسسته در شکل ۲ نشان داده شده است.

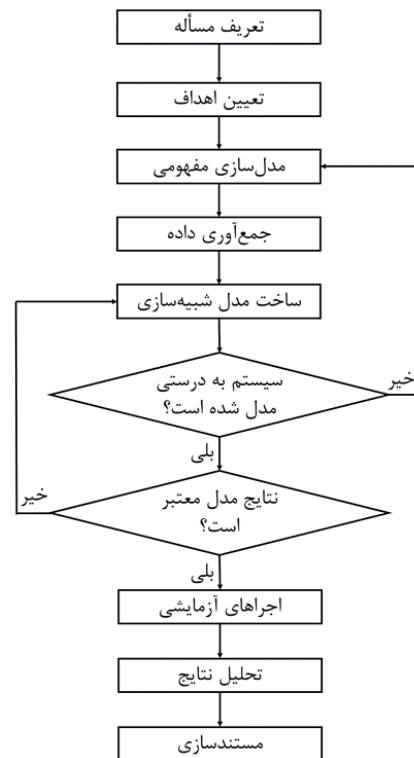
$$A \subset D_f, \quad P_x(A) = \int_{x \in A} f(x) dx \quad (2)$$

$$f(x) = 0, \quad \forall x \notin D_f$$

مطالعه سابقه پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد شبیه‌سازی برای بررسی اثر پارامترهای مختلف در معدن یک روش کاربردی و متداول است. برای نمونه در سال ۲۰۱۴ فیورونی و همکاران باهدف دستیابی به تولید مورد نیاز با حداقل تعداد کامیون، سیستم ترابری یک معدن طلای زیرزمینی را شبیه‌سازی کرده‌اند [۱۶]. در سال ۲۰۱۶ مطالعاتی دیگر باهدف تعیین تعداد کامیون مورد نیاز برای رسیدن به تولید مورد نظر در یک معدن که با روش تخریب در طبقات فرعی استخراج می‌شود، انجام شده است [۱۷]. در سال ۲۰۲۰ برناردی و همکاران با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی Arena مطالعاتی برای مقایسه سیستم‌های سنگ‌شکن داخل پیت^۵ (IPCC) ثابت و نیمه‌متحرک انجام داده‌اند [۱۸]. در سال ۲۰۲۰ نیز مطالعاتی باهدف بررسی تأثیر تأخیرهای عملیاتی و عدم قطعیت بر NPV یک سیستم سنگ‌شکن داخل پیت نیمه‌متحرک^۶ (SM-IPCC) انجام شده است [۱۹]. در سال ۲۰۲۰ نیز مطالعاتی باهدف تعیین اندازه بهینه بونکرها و به حداقل رساندن تأخیرها در سیستم ترابری یک معدن زیرزمینی از شبیه‌سازی استفاده شده است [۲۰]. در سال ۲۰۲۱ مطالعاتی برای تعیین تعداد بهینه کامیون به منظور حذف یا به حداقل رساندن بار اضافی حمل شده انجام شده است [۲۱]. با توجه به اینکه تاکنون پژوهشی مبتنی بر شبیه‌سازی در زمینه بهبود بهره‌وری در معدن سنگ ساختمانی انجام نشده است، در این پژوهش تأثیر کاربرد هم‌زمان سیم‌برش الماسه و ماشین اره زنجیری بر بهره‌وری معدن سنگ ساختمانی در سناریوهای مختلف با رویکرد شبیه‌سازی رویداد گسسته مطالعه شده است.

۳- معدن مرمیت شایان

در این پژوهش از داده‌های جمع‌آوری شده در معدن مرمیت شایان استفاده شده است. این معدن در استان فارس و در فاصله ۲۳۰ کیلومتری شمال شرق شیراز قرار دارد. موقعیت جغرافیایی محدوده فعال معدن بین طول‌های جغرافیایی "۵۶° ۳۱' ۵۶،۰۹" و "۵۳° ۳۲' ۲۷،۹۳" و عرض‌های جغرافیایی "۵۹° ۲۱' ۵۹،۹۸" و "۳۰° ۲۲' ۲۰" قرار دارد [۲۲]. شش پله ابتدایی معدن شایان با استفاده از



شکل ۲: مراحل مختلف شبیه‌سازی رویداد گسسته [۱۲].

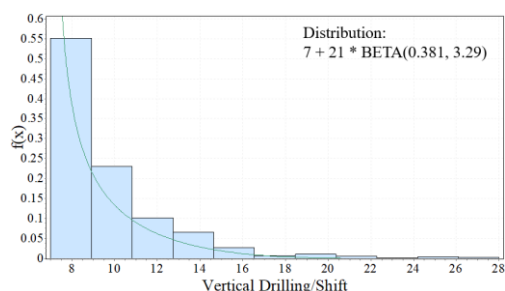
به‌طور کلی رویدادهای تصادفی در شبیه‌سازی به دو صورت رخ می‌دهند [۱۳]:

- زمان وقوع رویداد ممکن است تصادفی باشد.
- انتقال حالت رویداد ممکن است تصادفی باشد.

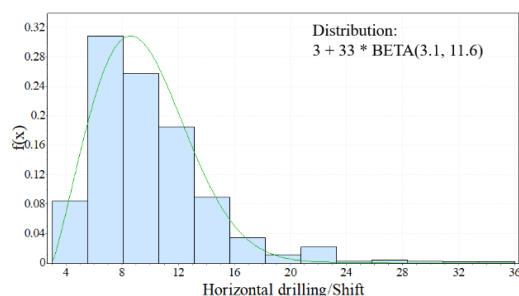
در هر حال ویژگی‌های احتمالی متغیرهای تصادفی با توابع توزیع آن‌ها مشخص می‌شود [۱۳]. در نظریه احتمال، تابع چگالی احتمال^۴ (PDF) یک متغیر تصادفی، تابعی است که مقدار آن در هر نقطه از فضای نمونه، می‌تواند احتمال نسبی آن نقطه در فضای نمونه را مشخص کند. تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی گسسته طبق رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned} f(x) &= Pr(x), \quad \forall x \in D_f \\ f(x) &= 0, \quad \forall x \notin D_f \end{aligned} \quad (1)$$

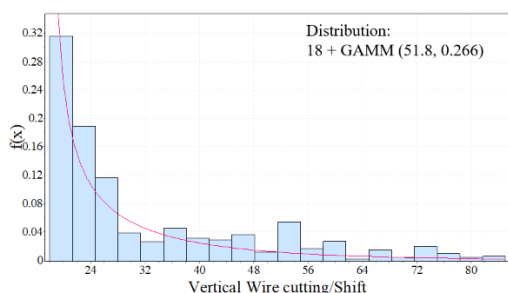
مقدار تابع چگالی احتمال در دامنه تعریف (D_f) متغیر تصادفی، احتمال x را نشان می‌دهد، درحالی که مقدار f در سایر نقاط روی محور اعداد حقیقی برابر صفر است [۱۴]. برای متغیر تصادفی پیوسته دامنه تعریف تابع، نامتناهی است و شمارش‌پذیر نیست، لذا یک تابع با مقدار غیرمنفی در بازه $-\infty$ تا $+\infty$ می‌توان تعریف کرد (رابطه ۲)؛ به‌نحوی که در هر زیرمجموعه A از دامنه تعریف (D_f) مقدار احتمال با تابع چگالی احتمال بیان می‌شود و در خارج از دامنه تعریف، مقدار احتمال برابر صفر است [۱۵].



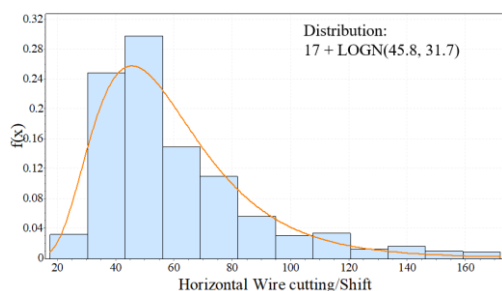
شکل ۴: تابع چگالی احتمال مترآژ حفاری قائم.



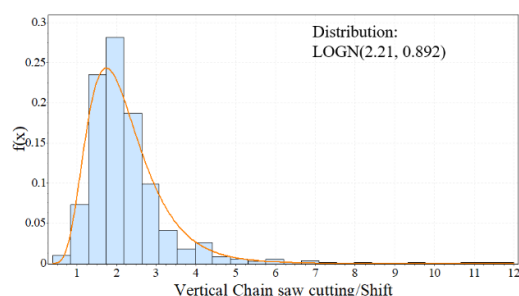
شکل ۵: تابع چگالی احتمال مترآژ حفاری افقی.



شکل ۶: تابع چگالی احتمال برش سیم‌برش قائم.

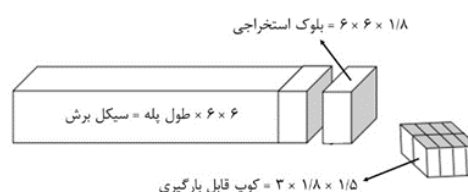


شکل ۷: تابع چگالی احتمال برش سیم‌برش افقی.



شکل ۸: تابع چگالی احتمال پیشروی هاواژ قائم.

سیم‌برش الماسه استخراج شده است. از پله هفتم به بعد، در ابتدا برش اولیه توسط ماشین اره‌زنجیری در وجه پشت بلوک در سراسر طول پله ایجاد می‌شود که به آن سیکل برش اطلاق می‌گردد. سپس توسط دستگاه‌های سیم‌برش به ابعاد $6 \times 6 \times 1.8$ (ارتفاع پله یا بلوک ۶ متر، طول بلوک ۶ متر و عرض آن ۱.۸ متر) به وزن تقریبی ۱۶۲ تن (وزن مخصوص ۲.۵ تن بر مترمکعب) برش داده‌شده و سپس بلوک حاصل حمل شده و هر بلوک در صورت سالم بودن به ۸ قسمت با ابعاد $3 \times 1.8 \times 1.5$ برش داده می‌شود (شکل ۲). در عمل با توجه به ناپیوستگی‌های سنگ، این ابعاد به‌ندرت تولید می‌گردد و بازیابی معدن حدود ۱۰ درصد است [۲۳].



شکل ۳: مراحل برش بلوک سنگ در معدن شایان [۲۳].

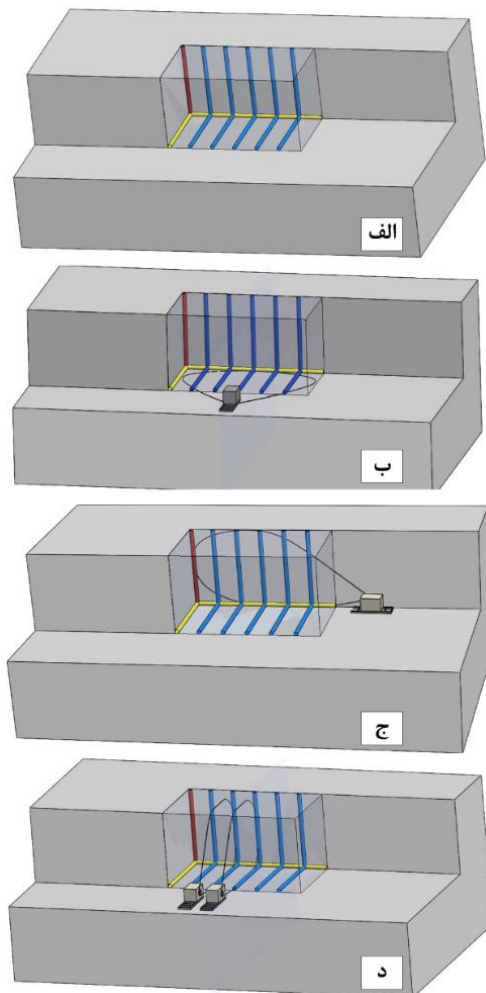
۴- شبیه‌سازی عملیات استخراج

در این پژوهش، بر اساس اطلاعات مربوط به عملیات استخراج در معدن شایان، چهار سناریو برای برش بلوک سنگ با کاربرد هم‌زمان سیم‌برش الماسه و ماشین اره‌زنجیری تعریف شده است که به ترتیب تشریح می‌شوند. ابتدا داده‌های زمانی مربوط به نرخ پیشروی هاواژ، مترآژ حفاری راسول و سطح برش حاصل از سیم‌برش الماسه در هر شیفت در دو حالت قائم و افقی در معدن شایان جمع‌آوری شد و مناسب‌ترین تابع چگالی احتمال برای هر سری داده با استفاده از نرم‌افزار EasyFit به‌دست آمده است که به ترتیب در شکل‌های ۴ تا ۸ نشان داده شده است.

چهار سناریوی ممکن برای عملیات استخراج سنگ با استفاده از سیم‌برش الماسه و ماشین اره‌زنجیری بر اساس این توابع در نرم‌افزار Arena شبیه‌سازی شده است. در این پژوهش سیم‌برش الماسه، ماشین اره زنجیری و راسول به‌عنوان منابع تعریف شده‌اند که عملیات مختلف را بر روی نهادهای (بلوک‌های سنگ) انجام می‌دهند. در شبیه‌سازی فرض شده است که برای هر چهار سناریو تنها یک سینه‌کار فعال وجود دارد و ماشین‌آلات امکان جابجایی بین دو یا چند سینه‌کار را ندارند. همچنین زمان تمام شبیه‌سازی‌ها ۳۰۰ روز کاری در نظر گرفته شده است.

۴-۱- شبیه سازی سناریوی اول

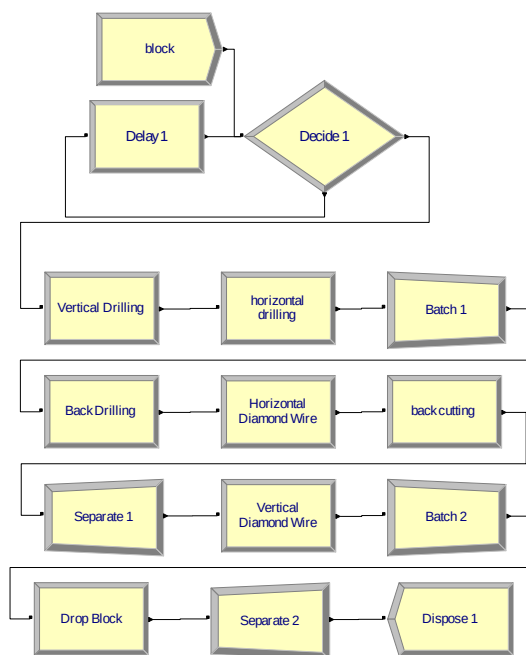
در این سناریو برای برش هر سه وجه بلوک سنگ از سیم برش الماسه استفاده شده است. نمایی از این روش در شکل ۹ نمایش داده شده است. در این سناریو به دلیل انحراف بیشتر چال قائم نسبت به چال افقی در حین حفاری ابتدا چال های قائم حفر شده و سپس چال افقی در وجه پشت بلوک به موازات سینه کار و در آخر چال های افقی عمود بر سینه کار حفر می شوند (شکل ۹- الف). در مرحله بعد کف بلوک (شکل ۹- ب) و پس از آن پشت بلوک (شکل ۹- ج) با سیم برش الماسه بریده شده و در انتها عملیات رشته بری (برش هایی با فاصله ۱/۸ متر برای دستیابی به ابعاد نهایی مورد نظر) (شکل ۹- د) انجام می شود. پس از پایان برش ها، بلوک های واژگون شده حمل می گردد تا سینه کار برای برش جدید آماده شود.



شکل ۹: مراحل برش بلوک سنگ در سناریوی اول.

در شکل ۱۰ مدل سناریوی اول در نرم افزار Arena نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در مدل

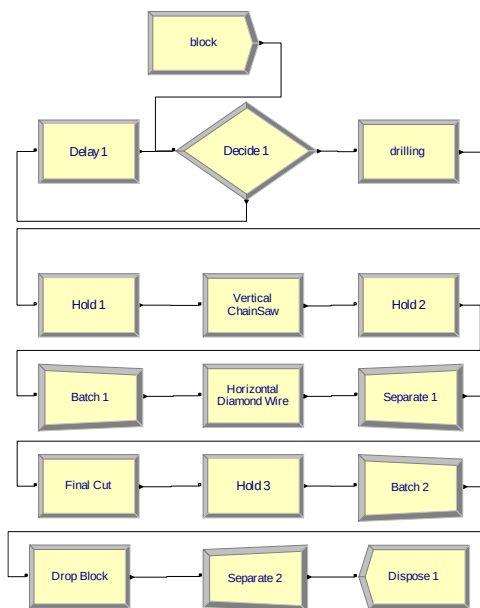
سناریوی اول ابتدا ۲۰۰۰ بلوک (نهاد) توسط ماژول block به فرآیند شبیه سازی وارد می شود. در ادامه توسط ماژول Decide1 آزاد بودن سینه کار بررسی می گردد. اگر بلوک های برش قبلی حمل نشده باشند، توسط ماژول Delay1، تأخیری در حرکت نهادها ایجاد می شود؛ اما اگر سینه کار آزاد شده باشد عملیات حفاری قائم و سپس حفاری افقی آغاز می گردد. عملیات های حفاری در وجه پشت بلوک، برش کف و برش پشت بلوک همزمان بر روی ۶ بلوک انجام می شود. به این منظور توسط ماژول Batch1 هر شش نهاد به یک نهاد نماینده تبدیل می گردد. پس از انجام فعالیت های ذکر شده، نهاد نماینده توسط ماژول Separate1 به شش نهاد مجزا تقسیم می شود. در نهایت برش های قائم به فواصل ۱/۸ متر انجام می شود تا ابعاد نهایی برش حاصل گردد. در هر دوره از عملیات شش بلوک حاصل می شود که این شش بلوک طی یک روز کاری حمل می گردد. به این منظور قبل و بعد از عملیات حمل بلوک، از ماژول های Batch2 و Separate2 استفاده شده است.



شکل ۱۰: مدل سناریوی اول در نرم افزار Arena.

۴-۲- شبیه سازی سناریوی دوم

در این سناریو از ماشین اره زنجیری برای برش وجه پشت بلوک و از سیم برش الماسه برای برش کف و رشته بری (برش های به فاصله ۱/۸ متر برای تبدیل سیکل برش به

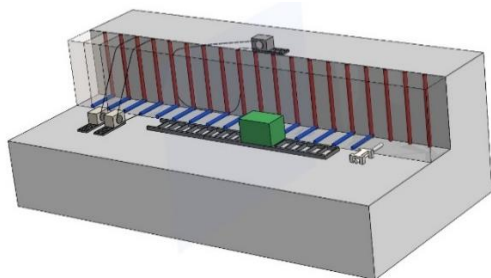


شکل ۱۲: مدل سناریوی دوم در نرم‌افزار Arena.

در این سناریو، برش کف بلوک هم‌زمان برای پنج بلوک انجام شده است که برای این منظور از ماژول‌های Batch1 و Separate1 استفاده شده است. در ماژول Final cut برش‌های نهایی به عرض $1/8$ متر انجام می‌شود و در نهایت بلوک‌ها حمل می‌گردند. در هر دوره ۵ بلوک حمل می‌شود که برای تحقق این امر از ماژول‌های Batch2 و Separate2 استفاده شده است.

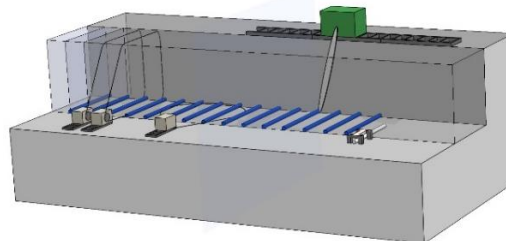
۳-۴- شبیه‌سازی سناریوی سوم

در این سناریو از ماشین اره‌زنجیری برای برش کف بلوک و از سیم‌برش الماسه برای برش پشت بلوک و نیز رشته‌بری استفاده شده است. نمایی از این روش در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این روش با حفاری چال‌های قائم آغاز و پس از حفر چند چال قائم، فرآیند حفاری افقی آغاز می‌گردد. در ادامه هاواژ برش کف بلوک را آغاز کرده و زمانی که هاواژ ۹ متر (به‌اندازه پنج چال متوالی) پیشروی کرد، برش پشت بلوک و پس‌از آن برش‌های قائم (رشته‌بری) آغاز می‌گردد و در نهایت بلوک‌ها حمل می‌شوند.



شکل ۱۳: مراحل برش بلوک سنگ در سناریوی سوم.

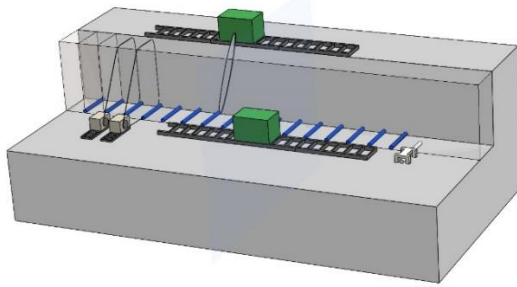
ابعاد نهایی) استفاده شده است. نمایی از این روش در شکل ۱۱ آورده شده است.



شکل ۱۱: مراحل برش بلوک سنگ در سناریوی دوم.

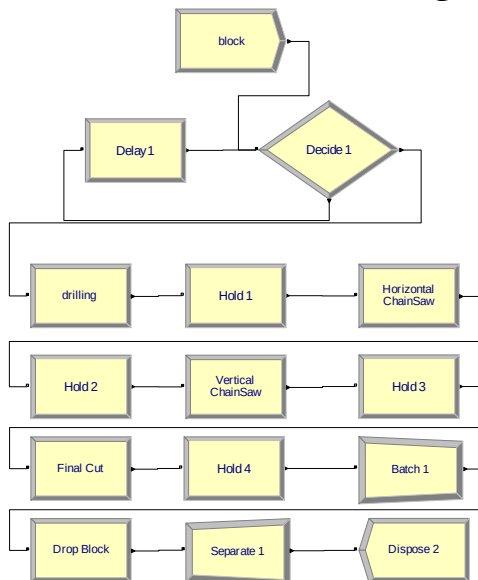
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این سناریو از یک راسول، یک هاواژ قائم، یک سیم‌برش الماسه در حالت افقی و دو سیم‌برش الماسه در حالت قائم استفاده شده است. روند کار به این صورت است که ابتدا به فاصله‌های $1/8$ متر چال‌های افقی به طول ۶ متر حفر شده و پس‌از آن هاواژ در پله‌ی بالایی قرار گرفته و عملیات برش قائم آغاز می‌گردد، به‌گونه‌ای که سر تیغه هاواژ با انتهای چال‌های حفر شده تقاطع داشته باشد. پس‌از آن که هاواژ به طول ۹ متر (به‌اندازه‌ای که پنج چال افقی را قطع کند) پیشروی کرد، سیم‌برش افقی برش کف بلوک را آغاز کرده و پس‌از آن سیم‌برش‌های قائم رشته‌بری را آغاز می‌کنند و در نهایت بلوک‌ها حمل می‌شوند.

در شکل ۱۲ مدل سناریوی دوم در نرم‌افزار Arena نشان داده شده است. در این مدل، ابتدا ۲۰۰۰ بلوک (نهاد) توسط ماژول block وارد فرآیند شبیه‌سازی می‌شود. در این سناریو طول پله ۴۵ متر در نظر گرفته شده است که برابر با ۲۵ بلوک است. در ماژول Decide1 در صورتی که دوره‌ی اول برش پله باشد، ۲۵ بلوک به ماژول حفاری وارد می‌شود و در غیر این صورت اگر ۱۰ بلوک ابتدایی حاصل از برش قبلی حمل شده باشد و سینه‌کار برای انجام حفاری افقی آزاد باشد، حفاری آغاز می‌گردد. اگر امکان حفاری نباشد، توسط ماژول Delay1 در حرکت نهادها تأخیر ایجاد می‌گردد. لازم به ذکر است که از ماژول Hold در تمام فرآیند شبیه‌سازی برای ایجاد فاصله ایمنی بین دو فرآیند استفاده شده است. به‌عنوان مثال ماژول Hold1 فاصله‌ای به‌اندازه ۳ بلوک بین دو عملیات حفاری و برش با ماشین اره‌زنجیری ایجاد می‌کند. پس از حفر چال‌ها، برش وجه پشت بلوک با ماشین اره زنجیری آغاز می‌گردد و سپس برش کف انجام می‌گیرد.



شکل ۱۵: مراحل برش بلوک سنگ در سناریوی چهارم.

در شکل ۱۶ مدل این سناریو در نرم افزار Arena نشان داده شده است. در این مدل نیز سه ماژول ابتدایی و ماژول های Hold کاربردی مشابه با دو سناریوی قبل دارند. در ادامه برش افقی و پس از آن برش قائم با ماشین اره زنجیری در سرتاسر پله انجام می گیرد. پس از آن توسط سیم برش الماسه برش نهایی انجام شده و بلوک هایی با ابعاد $۶ \times ۳ \times ۱/۸$ حاصل می گردد.

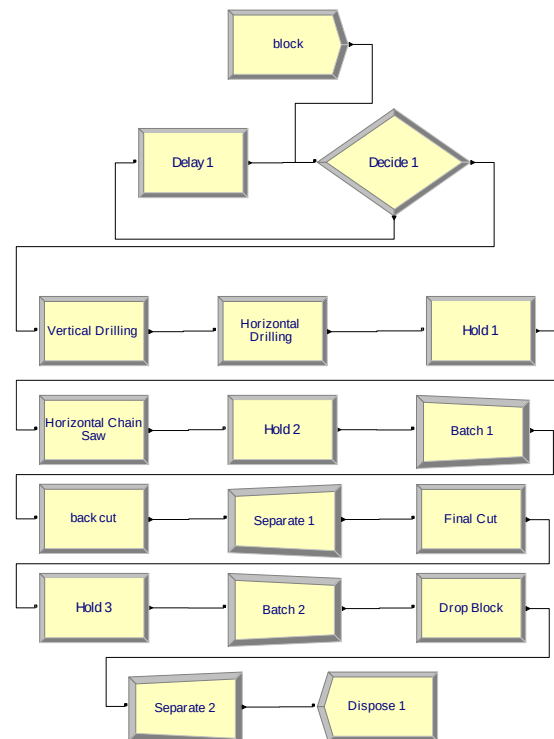


شکل ۱۶: مدل سناریوی چهارم در نرم افزار Arena.

۵- بحث و نتایج

از آنجاکه چهار سینه کار در معدن شایان مشابه سناریوی دوم استخراج می شود؛ بنابراین سناریوی دوم برای اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی استفاده شده است. مجموع تناژ استخراجی چهار سینه کار ۳۸۰ هزار تن در سال بوده است؛ یعنی به طور میانگین از هر سینه کار حدود ۹۵ هزار تن سنگ استخراج می شود. همچنین تناژ دقیق استخراجی این سناریو بر اساس نتایج شبیه سازی ۹۴۷۷۰ تن بوده است. تناژ استخراجی واقعی و نتایج شبیه سازی به ازای یک سال استخراج، ۲۳۰ تن تفاوت داشته است. در نتیجه با توجه به

در شکل ۱۴ مدل سناریوی سوم در نرم افزار Arena نمایش داده شده است. در این سناریو، عملکرد سه ماژول ابتدایی و ماژول های Hold همانند سناریوی دوم است، با این تفاوت که ابعاد بلوک در این روش $۶ \times ۳ \times ۱/۸$ است. در ادامه عملیات های حفاری چال های قائم و افقی انجام می شود. پس از آن که حفر ۵ چال ابتدایی خاتمه یافت، ماشین اره زنجیری برش افقی را آغاز می کند. در ادامه، برش وجه پشت برای ۵ بلوک به صورت یک برش واحد انجام می گیرد. به این منظور از ماژول های Batch1 و Separate1 استفاده شده است.



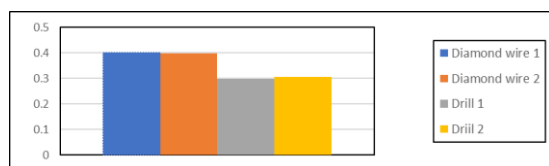
شکل ۱۴: مدل سناریوی سوم در نرم افزار Arena.

۴-۴- شبیه سازی سناریوی چهارم

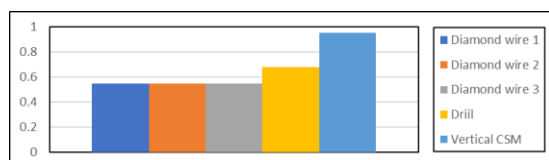
در این سناریو برای برش هر دو وجه کف و پشت بلوک از ماشین اره زنجیری و برای عملیات رشته بری از سیم برش الماسه استفاده شده است. نمایی از این روش در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این روش ابتدا چال های افقی حفر می شود، در ادامه هاواژ افقی برش کف بلوک و پس از آن هاواژ قائم برش پشت بلوک را آغاز می کند و سپس به وسیله سیم برش ها رشته بری انجام می شود. در نهایت بلوک های استخراجی واژگون و حمل می شوند.

۶۵-۸۰ درصد افزایش یافته است. در این پژوهش نیز در سناریوی اول که تنها از سیم‌برش الماسه استفاده شده است مقدار شاخص بهره‌وری سرمایه ۳۷ درصد است؛ درحالی‌که در سناریوهای دوم تا چهارم پس از افزودن هاواژ، بهره‌وری به ۹۲-۶۷ درصد افزایش یافته است.

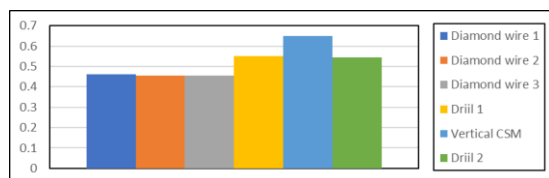
بر اساس نتایج حاصل از کاربرد هم‌زمان ماشین‌آلات در سناریوهای مختلف، مدت‌زمان انتظار ماشین‌آلات برای انجام عملیات پیش‌نیاز متفاوت است. به‌عنوان مثال در سناریوی اول تا زمانی که همه چال‌ها حفر نشده باشد، امکان برش افقی وجود ندارد. در نتیجه نحوه ترتیب عملیات‌های مختلف بر بهره‌وری^۷ ماشین‌آلات تأثیرگذار است. همچنین با افزایش یا کاهش تعداد ماشین‌آلات در شبیه‌سازی‌ها، تعداد بهینه ماشین‌آلات در هر سناریو تعیین شده است. تعداد ماشین‌آلات بهینه و بهره‌وری هر ماشین برای هر سناریو در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورت افزودن هر یک از ماشین‌آلات، میزان تولید افزایش قابل‌توجهی نخواهد داشت، اما ماشین‌آلات کمتر از این تعداد، تولید را به مقدار زیادی کاهش خواهد داد.



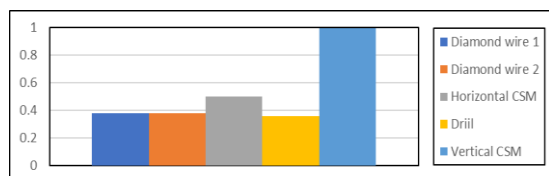
شکل ۱۷: بهره‌وری ماشین‌آلات در سناریوی اول.



شکل ۱۸: بهره‌وری ماشین‌آلات در سناریوی دوم.



شکل ۱۹: بهره‌وری ماشین‌آلات در سناریوی سوم.



شکل ۲۰: بهره‌وری ماشین‌آلات در سناریوی چهارم.

مقدار خطا می‌توان به نتایج شبیه‌سازی برای سایر سناریوها اعتماد کرد. در ادامه نتایج شبیه‌سازی برای هر چهار سناریو آورده شده است.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی تعداد بلوک استخراج‌شده در سناریوی اول ۲۲۴ بلوک و در سناریوی دوم ۵۸۵ بلوک با ابعاد $6 \times 6 \times 1/8$ متر بوده است. همچنین در سناریوی سوم و چهارم به ترتیب ۶۹۸ و ۶۱۷ بلوک با ابعاد $6 \times 3 \times 1/8$ استخراج شده است. از آنجاکه میانگین وزن مخصوص سنگ معدن شایان ۲/۵ تن بر مترمکعب است، تناژ استخراجی در سناریوهای اول تا چهارم به ترتیب تقریباً معادل ۳۶، ۹۵، ۵۶/۵ و ۵۰ هزار تن بوده است.

روش سیم‌برش الماسه (سناریوی اول)، نیاز به حفر چال در وجه پشت بلوک دارد. حفر این چال تا زمانی که بلوک‌های حاصل از برش قبل حمل نشده باشد، ممکن نیست. این امر باعث کاهش نرخ تولید و بهره‌وری شده است.

از طرف دیگر مساحت سطح برش داده‌شده توسط سیم‌برش الماسه نسبت به هاواژ در زمان مشابه بیشتر است (تقریباً ۳ برابر)؛ اما مهم‌ترین عامل که پس از افزودن هاواژ باعث افزایش تولید شده است، کاهش متراژ حفاری چال است. علت اصلی کاهش متراژ حفاری پس از افزودن هاواژ، ضخامت مناسب برش اره هاواژ است (۵ تا ۷ سانتی‌متر) که فضای لازم برای عبور سیم را فراهم می‌کند؛ اما در سناریوی سوم و چهارم پس از برش کف و پشت بلوک، بلوک نشست کرده و همچنان برای عبور دادن سیم، حفر چال‌های افقی نیاز است. در نتیجه، هر چه مقدار حفاری ویژه و سطح برش موردنیاز با هاواژ برای جداسازی بلوک کمتر باشد، میزان تولید بیشتری حاصل خواهد شد. در جدول ۱ متراژ حفاری ویژه (حفاری لازم به ازای یک مترمکعب استخراج) و سطح برش داده‌شده با هاواژ نسبت به سطح کل برش موردنیاز برای جداسازی بلوک برای سناریوهای دوم تا چهارم ارائه شده است.

جدول ۱: متراژ حفاری ویژه و نسبت سطح برش با هاواژ

سناریو	نسبت سطح برش با هاواژ (%)	حفاری ویژه (m^3)
دوم	۱۸/۷۵	۰/۰۳۷
سوم	۱۵/۷۹	۰/۱۱۱
چهارم	۴۷/۳۷	۰/۰۳۷

طبق مطالعات انجام‌شده در معادن تراورتن ترکیه [۸]، بهره‌وری پس از افزودن یک دستگاه هاواژ از ۷-۱۴ درصد به

سناریوی دوم که از هاواژ برای برش پشت استفاده می شود، ترتیب مراحل استخراج به صورتی است که همزمان تمام ماشین آلات فعال هستند به نحوی که بهره‌وری ماشین آلات نسبت به روش سیم برش الماسه از ۳۷/۵ به ۹۲/۴ افزایش یافته است.

مراجع

- [1] Jalalian, M.H., Bagherpour, R. and Khoshouei, M. (2021). Wastes production in dimension stones industry: resources, factors, and solutions to reduce them. *Environmental Earth Sciences*. 80(17): 560-573.
- [2] Mohammadi, J., Ataei, M., Kakaie, R.K., Mikaeil, R. and Haghshenas, S.S. (2018). Prediction of the production rate of chain saw machine using the multilayer perceptron (MLP) neural network. *Civil Engineering Journal*. 4(7): 1575-1583.
- [3] Mohammadi, J., Ataei, M., Kakaie, R., Mikaeil, R. and Haghshenas, S.S. (2019). Performance evaluation of chain saw machines for dimensional stones using feasibility of neural network models. *Journal of Mining and Environment*. 10(4): 1105-1119.
- [4] Mohammadi, J., Ataei, M., Kakaie, R. and Mikaeil, R. (2018). Predicting the performance of the chain saw machine in the process of cutting dimensional stones (case study: Dehbid and Shayan mines), *Proc, second national Conference on Civil Engineering Architecture Emphasizing job creation in the construction* (In Persian).
- [5] Copur, H., Balci, C., Bilgin, N., Tumac, D., Feridunoglu, C., Dincer, T. and Serter, A. (2006). Cutting performance of chain saws in quarries and laboratory, *Proc, 15th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, MPES, Torino, Italy*.
- [6] Copur, H., Balci, C., Bilgin, N., Tumac, D. and Düzyol, İ. (2007). Full-scale linear cutting tests towards performance prediction of chain saw machines, *Proc, Aperta*.
- [7] Copur, H., Balci, C., Bilgin, N. and Tumac, D. (2008). Laboratory cutting tests for performance prediction of chain saw machines, *Proc, 21st World Mining Congress & Expo*.
- [8] Sariisik, A. and Sariisik, G. (2010). Efficiency analysis of armed-chained cutting machines in block production in travertine quarries. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 110(8), 473-480.
- [9] Shannon, R., & Johannes, J. D. (1976). *Systems simulation: the art and science*, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics.

در صورتی که شاخصی با عنوان بهره‌وری از سرمایه ماشین آلات تعریف شود؛ می توان بهره‌وری سرمایه برای هر سناریو را بر اساس رابطه (۳) به دست آورد.

$$R_T = \frac{\sum C_i R_i}{\sum C_i} \quad (3)$$

که در آن C_i قیمت و R_i درصد بهره‌وری ماشین i می باشد. با توجه به قیمت نسبتاً زیاد ماشین هاواژ (۱۲۰ میلیارد ریال)، سیم برش الماسه (۸ میلیارد ریال) و راسول (۱ میلیارد ریال)، بهره‌وری سناریوهای ۱ تا ۴ به ترتیب ۳۷/۵، ۹۲/۴، ۶۳/۶، ۷۳/۸ درصد بوده است.

۶- نتیجه گیری

نرخ تولید ماشین آلات برش در معادن سنگ ساختمانی با در نظر گرفتن هزینه های نهایی استخراج یک بلوک، نقش کلیدی در بهره‌وری عملیات استخراج ایفا می کند. لذا اتخاذ اقدامات لازم برای افزایش کارایی و بهره‌وری ماشین آلات در صنعت سنگ های ساختمانی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. بر اساس نتایج شبیه سازی، مهم ترین عامل در میزان تولید، متراژ حفاری بوده است. همچنین حفر چال پشت بلوک، بیشترین تأثیر را بر پیوستگی تولید داشته است؛ زیرا حفر این چال تا زمانی که بلوک های حاصل از برش قبلی حمل نشده باشند، امکان پذیر نیست. در مجموع نرخ برش هاواژ از سیم برش الماسه کمتر است، اما افزودن هاواژ به عملیات استخراج باعث کاهش متراژ حفاری و پیوستگی تولید شده است. در نتیجه استفاده همزمان دو ماشین سیم برش الماسه و هاواژ باید به صورتی انجام شود که با کمترین متراژ حفاری و کمترین سطح برش هاواژ، بلوک استخراج گردد. بر اساس نتایج شبیه سازی، بیشترین میزان تولید و بهره‌وری زمانی حاصل شده است که از ماشین اره زنجیری برای برش پشت بلوک و از سیم برش الماسه برای برش سایر وجه های بلوک استفاده شده است. در این روش حداقل متراژ حفاری نیاز است و تنها ۱۸/۷۵ درصد از سطح برش مورد نیاز برای جداسازی بلوک توسط هاواژ برش داده شده است؛ بنابراین با افزودن یک هاواژ برای برش وجه پشت بلوک در معدن شایان، میزان تولید ۲۶۰ درصد افزایش داشته است. در حالی که با توجه به ترتیب مراحل استخراج در برش توسط سیم برش الماسه (سناریوی اول)، هنگام انجام یک فعالیت نمی توان فعالیت دیگری را انجام داد و این امر بهره‌وری ماشین آلات را به شدت کاهش خواهد داد؛ اما در

conceptual transport methods using discrete event simulation. *Minerals*. 6(3): 65.

[18] Bernardi, L., Kumral, M. and Renaud, M. (2020). Comparison of fixed and mobile in-pit crushing and conveying and truck-shovel systems used in mineral industries through discrete-event simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 103, 102100.

[19] Villeneuve, J., Ben-Awuah, E. and Vasquez-Coronado, P. (2020). Hierarchical Mine Planning for a Semi-Mobile In-Pit Crushing and Conveying System Using Discrete-Event Simulation, *Proc, 6thUMaTBIC*.

[20] Hong, S.Y., Bal, A., Badurdeen, F., Agioutantis, Z. and Hicks, S. (2020). Evaluation of bunker size for continuous/discrete flow systems by applying discrete event simulation: A case study in mining. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 105, 102155.

[21] Djro, J. D. V. (2021). Simulation of truck haulage system: a case study. Ph.D. Thesis. University of Mines and Technology. Tarkwa, Ghana.

[22] Masoudi, F. (1400). Presenting practical solutions to optimize the size of stone blocks and waste management of Shayan dimensional stone mine (Fars province) in line with sustainable development. Shahid Beheshti University (In Persian).

[23] Shayan Mine Technical Office. (2022). Report on the amount of consumed items and its ratios in 2022 (In Persian).

[10] de Paula Ferreira, W., Armellini, F. and De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106868.

[11] Liu, Z., Rexachs, D., Epelde, F. and Luque, E. (2017). A simulation and optimization based method for calibrating agent-based emergency department models under data scarcity. *Computers & Industrial Engineering*, 103, 300-309.

[12] Goldsman, D. and Goldsman, P. (2015). Discrete-event simulation. In *Modeling and Simulation in the Systems Engineering Life Cycle: Core Concepts and Accompanying Lectures*, London: Springer London.

[13] Altioik, T. and Melamed, B. (2010). Simulation modeling and analysis with Arena, Elsevier.

[14] Mittelhammer, R. C. and Mittelhammer, R. C. (1996). *Mathematical statistics for economics and business*, Springer.

[15] Larsen, R.J. and Marx, M.L. (2013). *Introduction to Mathematical Statistics and Its Applications*.

[16] Fioroni, M.M., dos Santos, L.C.A., Franzese, L.A.G., Santana, I.R., Telles, G.D., Seixas, J.C. and Alkmim, G.M. (2014). Logistic evaluation of an underground mine using simulation, *Proc, Winter Simulation Conference 2014*.

[17] Greberg, J., Salama, A., Gustafson, A. and Skawina, B. (2016). Alternative process flow for underground mining operations: analysis of

⁵ In-Pit Crushing and Conveying

⁶ Semi-Mobile In-Pit Crushing and Conveying

⁷ Utilization

¹ Basaranlar

² Kaklik

³ Kocaba

⁴ Probability density function