

مدل سازی پویا و تحلیل حساسیت سیستم حفاری مکانیزه تمام مقطع جهت مدیریت پروژه های تونلی

پژوهشی

محمود جهانبانی^{۱*}؛ کیانوش پیکری^۲؛ محمد ستوده پور^۳

۱- مدیر برنامه ریزی و کنترل پروژه؛ پروژه خط ۲ و ۳ قطار شهری شیراز، jahanban.mahmood@gmail.com

۲- مسوول فنی؛ پروژه خط ۲ قطار شهری شیراز، kianoush.peykari@gmail.com

۳- مسوول پیمان و رسیدگی؛ پروژه خط ۲ قطار شهری شیراز، mohammad.setodeh@gmail.com

دریافت دست نوشته: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱؛ پذیرش دست نوشته: ۱۴۰۰/۱۱/۰۳

شماره صفحات: ۱۸۳ تا ۱۹۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.11226.1430

واژگان کلیدی	چکیده
دستگاه حفاری مکانیزه سگمنت قطعات پیش ساخته بتنی پویایی شناسی سیستم سیستم دینامیک شبیه سازی تونل	<p>امروزه استفاده از ماشین های حفاری مکانیزه تمام مقطع به منظور حفاری تونل های طویل و تحت شرایط زمین شناسی مختلف گسترش زیادی پیدا کرده است. از طرفی در پروژه های تونلی و بخصوص پروژه های مترویی وضعیت حفاری مکانیزه به دلیل زمان بر بودن و هزینه بالا تعیین کننده راهبرد اصلی پروژه است. در این تحقیق با بهره گیری از رویکرد سیستمی به بررسی ارتباط پویای عوامل متعدد تأثیرگذار بر حفاری مکانیزه در پروژه های تونلی پرداخته شده است. این مدل شامل سه زیرسیستم تولید قطعات بتنی پیش ساخته کارخانه سگمنت، حفاری مکانیزه توسط دستگاه حفاری مکانیزه تمام مقطع و روند تخلیه مواد حاصل از حفاری در نظر گرفته شده و از داده های به دست آمده از دو دستگاه <i>TBM</i> در یک دوره ۳ ساله استفاده شده است. نتایج کلی شبیه سازی تأثیر پذیری حفاری مکانیزه از عواملی مانند قطر حفاری، نرخ تولید قطعات پیش ساخته بتنی، نرخ تخلیه حوضچه حفاری، ظرفیت دپوی قطعات پیش ساخته بتنی و مشکلات متعدد مؤثر بر سرعت دستگاه حفار را نشان می دهند که در نهایت نیز مدل اعتبارسنجی شده و تحلیل حساسیت روی مدل صورت گرفته است. با توجه به اعداد اولیه ورودی مدل، نتایج کمی چند سناریو در این مدل بیان می کند که چنانچه نرخ تولید قطعات پیش ساخته بتنی از ۱۲ به ۷ عدد در روز کاهش یابد حفاری مکانیزه ۴۰ روز دیرتر به اتمام می رسد و در صورت تغییر تعداد شیفت کاری دستگاه حفاری مکانیزه از ۲ شیفت به یک شیفت کاری در روز، مدت زمان حفاری از ۳۹۷ روز به ۸۲۳ روز می رسد و با تغییر تعداد شیفت کاری از ۲ به ۳ شیفت حفاری مکانیزه در روز و افزایش تعداد سرویس کامیون های تخلیه گل حاصل از حفاری از ۵۵ به ۷۵ سرویس، مدت زمان مورد نیاز جهت حفاری مکانیزه از ۳۹۷ روز به ۲۷۷ روز کاهش می یابد. البته با توجه به شمول کلی مدل جهت تمامی سیستم های حفاری مکانیزه، با تغییر هر یک از متغیرهای مستقل مدل و تعریف سناریوهای مختلف می توان به بهترین نتیجه ممکن جهت مدیریت پروژه مورد نظر دست یافت و راهبردهای پروژه را بر مبنای آن تدوین کرد.</p>

۱- مقدمه

امروزه کاربرد ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل (Tunnel Boring Machine (TBM)) در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه با استقبال زیادی روبرو شده است. کاربرد موفقیت‌آمیز ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل نیازمند بررسی شرایط زمین و ویژگی‌های طراحی ماشین و سیستم پشتیبان آن است.

در یک پروژه تونل‌سازی مکانیزه، پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری برای تخمین زمان و هزینه‌های موردنیاز پروژه امری ضروری است (Amini khoshalan, et al., 2017) و تصمیم‌گیری برای انتخاب ماشین حفار مناسب یک مرحله حساس و دشوار در پروژه‌های حفاری مکانیزه و اساساً یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است (Mikayel, et al., 2017).

اجرای چنین پروژه‌هایی نیازمند سرمایه کلان اولیه و هزینه‌های جاری گزاف است، از این رو مدیریت حوزه حفاری مکانیزه و ایجاد رضایت ذینفعان کلیدی پروژه در پروژه‌های تونلی امری بسیار مهم محسوب می‌گردد.

به دلیل پیچیدگی سیستم حفاری مکانیزه و ارتباط آن با عوامل متعدد، استفاده از روش‌های معمول خطی برای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل مناسب نبوده و در نتیجه از روش مدل‌سازی دینامیکی و یا روش‌های شبیه‌سازی دیگر باید استفاده کرد.

در این تحقیق و مطابق شکل ۱، کارخانه تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی، کلیه فرآیندهای حفاری مکانیزه و سیستم تخلیه و بارگیری گل حفاری به‌عنوان یک سیستم جامع در نظر گرفته شده و عوامل متعدد تأثیرگذار بر آن مورد بررسی قرار گرفته و مدل دینامیکی آن ایجاد و تحلیل شده است.

بسیاری از تحقیقات و مقالات حوزه حفاری مکانیزه، به ویژگی‌های ماشین حفار و انواع آن، رفتار زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، نگهداری و تعمیرات و مسائل این‌چنین پرداخته‌اند و مقالات بسیار کمی از دیدگاه سیستمی و مدیریتی به مقوله حفاری مکانیزه نظر داشته‌اند.

از این میان توران و آسای (Touran & Toshiyuki, 1987) در سال ۱۹۸۷ به‌عنوان یکی از اولین تلاش‌ها در شبیه‌سازی فعالیت‌های ساخت تونل با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری، مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته را با استفاده از شبکه عملیات بازخوردی توسعه دادند. در تحقیقات آن‌ها،

تأثیر هر متغیر اصلی بر میزان پیشروی تونل با تجزیه و تحلیل حساسیت مورد مطالعه قرار گرفت. روانپورا و همکاران (Ruwanpura, et al., 2011) یک الگوی شبیه‌سازی ویژه برای عملیات تونل زنی معرفی کردند و همچنین یک روش تونل زنی دوطرفه را برای تونلی به طول دو و نیم کیلومتر پیشنهاد نمودند. لیو و همکاران (Liu, Zhou, & Jiao, 2010) یک مدل از فرآیند حفاری مکانیزه همراه با سیستم تخلیه گل حفاری به‌وسیله ماک‌کار (muck trains) ارائه نمودند که تعداد لوکوموتیو و تقاطع‌های ریلی (Rail Intersections) موردنیاز که در کارهای عمرانی تونلی با اصطلاح کالیفرنیا سوئیچ شناخته می‌شود بر اساس طول حفاری و شرایط ژئوتکنیکی تعیین شده بود.

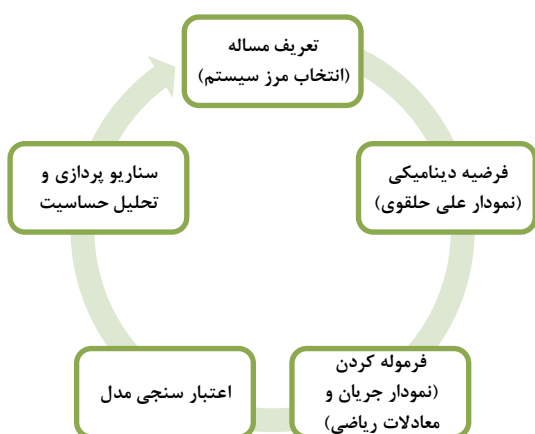


شکل ۱- سیستم حفاری مکانیزه شامل زیرسیستم‌های کارخانه تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی (کارخانه سگمنت)، زیرسیستم حفاری مکانیزه و زیرسیستم تخلیه گل حفاری

تبریزی و همکاران (Tabrizi, et al., 2007) تعداد قطارهای پشتیبان حفاری و سوئیچ‌های موردنیاز در یک پروژه موردی در تونل آب تهران- کرج با یک تونل تک خطه را مورد مطالعه قرار دادند. فرشچیان و هروی (Farshchian & Heravi, 2012) در مقاله خود با دیدگاه پویاشناسی سیستمی به بررسی زمان موردنیاز جهت حفاری مکانیزه پرداخته‌اند و در این مدل تنها عوامل طول تونل، فاصله حفاری، تعداد لوکوموتیوهای (Rolling Stock) موردنیاز و سرعت آن را مدنظر قرار داده و مدل‌سازی نموده‌اند. در این مدل با افزایش فاصله دستگاه حفاری مکانیزه از دهانه ورودی تونل نرخ حفاری با تابعی تقریباً نمایی کاهش می‌یابد که برای افزایش راندمان حفاری مکانیزه استفاده از سوئیچ کالیفرنیا را پیشنهاد داده‌اند که با بررسی مدل نشان می‌دهد

(2018).

این سه نوع متغیر با معادلات به شکل انتگرال، دیفرانسیل یا سایر انواع به یکدیگر مربوط می‌شوند (Norozian Maleki, et al., 2020).
بر اساس مراحل مدل‌سازی در روش تحلیل رویکرد پویایی سیستم، گام‌های مدل‌سازی در پژوهش حاضر به صورت شکل ۲، خواهد بود:



شکل ۲- مراحل انجام پژوهش با رویکرد سیستم پویا (Bohlooli, et al., 2020)

نمودارهای علت و معلولی ابزاری برای ترسیم ارتباطات علی میان مجموعه متغیرهای موجود در یک سیستم هستند؛ از سوی دیگر وجود بازخورد در روابط علی- معلولی موجب ایجاد حلقه‌های علی می‌شود. در نتیجه نمودار علی- حلقوی نمودارهایی هستند که ساختار ارتباطی و محتوایی و بازخوردی سیستم‌ها را در محدوده مرز تعیین شده به نمایش می‌گذارند و نمودار حالت و جریان، ساختار فیزیکی به وجود آورنده روابط محتوایی و بازخوردهای موجود در ساختار علی و معلولی خواهند بود (Mohammadi, et al., 2019).

این پژوهش بر اساس رویکرد سیستمی انجام شده و در پی تعیین روابط بین عوامل متعدد مؤثر بر سیستم حفاری مکانیزه جهت مدیریت محدوده، زمان، هزینه، کیفیت و منابع جهت پاسخ به خواسته ذینفعان کلیدی و مدیریت تدارکات موردنیاز پروژه است.

در این پژوهش ابتدا عوامل مؤثر بر سیستم حفاری مکانیزه تعیین گردیده و سپس نمودار علت و معلول اجزای سیستم طراحی شده و در ادامه نمودار جریان نحوه تعامل

که برای یک تونل به طول ۱۵۹۸۰ متر، هنگامی که طول حفاری به ۸۱۲۵ متر می‌رسد، یک سوئیچ باید در فاصله ۲۵۰۰ متری در مسیر قرار گیرد و هنگامی که میزان حفاری بیش از ۱۰۶۲۵ متر رسید، لوکوموتیو چهارم و یک سویچ دیگر در این قسمت باید اضافه شود.

با توجه به مطالعات ذکر شده، اگرچه برخی تحقیقات در زمینه شبیه‌سازی عملیات حفاری و تونل‌سازی انجام شده ولیکن تقریباً کار چندانی در رابطه با مدل‌سازی حفاری مکانیزه با رویکرد سیستمی که جوابگوی نیاز مدیریت جهت برنامه‌ریزی و تحلیل راهبردهای پروژه باشد صورت نگرفته است.

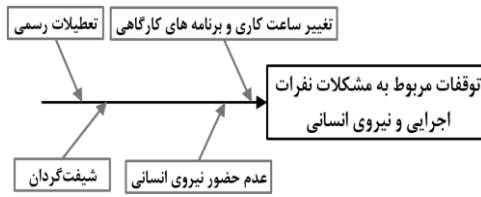
مدل ارائه شده در این تحقیق نشان‌دهنده یک دیدگاه سیستمی و پویا از عوامل مؤثر بر حفاری مکانیزه است که می‌تواند مشخص‌کننده عملکرد، زمان و هزینه پروژه باشد و برای این منظور در ادامه، روش تحقیق حاضر، معرفی متغیرهای مؤثر بر حفاری مکانیزه و مدل‌سازی پویا، اعتبارسنجی مدل، تحلیل حساسیت و نتایج تحقیق آورده شده است.

۲- روش تحقیق

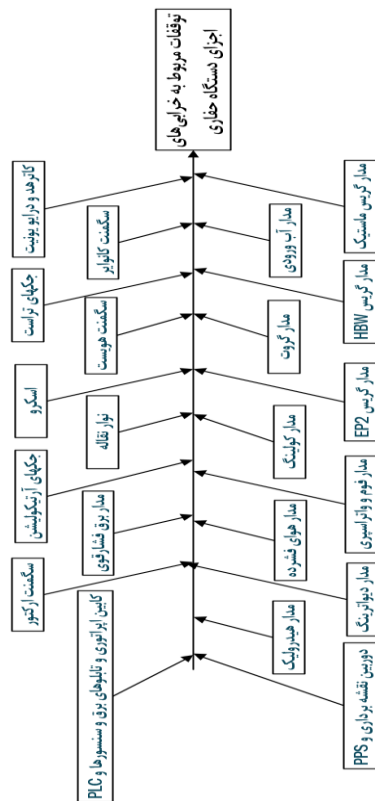
پویاشناسی سیستم‌ها به‌عنوان یک روش‌شناسی و مدل‌سازی ریاضی که رفتار سیستم‌های پیچیده را در طول زمان تعیین می‌کند، در دهه ۱۹۵۰ توسط فارستر معرفی گردید (Lang & Liang, 2021). این روش برگرفته از مکتب سیستمی است که سازمان را همچون سیستمی با متغیرهای وابسته به محیط توصیف می‌کند، در این تفکر سازمان به صورت یک منظومه واحد که متشکل از اجزای مرتبط و متعامل است در نظر گرفته شده و اصل وابستگی متقابل مهم‌ترین خاصیت آن را تشکیل می‌دهد (Alvani, 1989).

این روش عمدتاً شامل سه نوع متغیر زیر است:

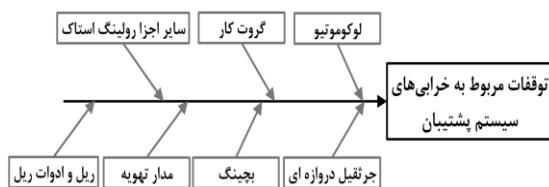
- متغیرهای نرخ که نشان‌دهنده جریان فیزیکی یا اطلاعات در سیستم است
- متغیر انباشت (سطح) که اساساً برابر با مقدار همان سطح در نقطه قبل در زمان و همچنین جریان ورودی/ خروجی خالص در دوره‌های مداوم است
- متغیرهای کمکی که عمدتاً برای جمع‌آوری اطلاعات جهت محاسبه نرخ‌ها موردنیاز است (Mashayekhi,



شکل ۳- توقفات مربوط به مشکلات نفرات اجرایی و نیروی انسانی



شکل ۴- توقفات مربوط به خرابی اجزای دستگاه حفاری



شکل ۵- توقفات مربوط به سیستم پشتیبان

تمامی عوامل مطرح شده را می‌توان طبق اطلاعات گذشته از دستگاه حفار موجود و یا اطلاعات دستگاه‌های

بین متغیرهای سیستم نشان داده شده و مدل کمی سازی شده با استفاده از نرم‌افزار *Vensim DSS 6.4E* جهت شبیه‌سازی با استفاده از نمودارهای علت و معلولی و بهینه کردن کارکرد سیستم‌ها و تحلیل مدل‌های دینامیکی است ایجاد و تا پایان زمان حفاری شبیه‌سازی شده است. در نهایت اعتبار سنجی مدل صورت گرفته و تحلیل حساسیت روی متغیرهای مدل انجام شده است.

۳- عوامل مؤثر بر سیستم حفاری مکانیزه

در روش حفاری مکانیزه مدت زمان حفر تونل را نرخ پیشروی ماشین تعیین می‌کند که در صورت پیش‌بینی قابل قبول از نرخ نفوذ و به تبع آن از نرخ پیشروی، تخمین قابل اطمینانی از زمان و بودجه لازم جهت انجام پروژه می‌تواند صورت گیرد (Eftekhari, et al., 2013).

عوامل بسیاری بر سرعت حفاری مکانیزه تأثیر می‌گذارند که از این میان نوع و وضعیت دستگاه حفار و وضعیت زمین‌شناسی از عوامل مهم مؤثر در آن‌اند که مواردی چون مشکلات نفرات اجرایی و نیروی انسانی (شکل ۳)، توقفات مربوط به خرابی اجزای دستگاه حفاری (شکل ۴)، توقفات ناشی از عوامل پشتیبانی (شکل ۵)، مشکل سگمنت در حین اجرای حفاری و مشکل ریل و ادوات ریل باعث کندی حرکت و کاهش راندمان اجرایی می‌شوند که هر کدام از این عوامل نیز دارای عوامل کوچک‌ترند که در نمودارهای علت و معلولی (*Fishbone Diagram*) زیر نشان داده شده‌اند.

این عوامل از مطالعات تجربی و نظر خبرگان حفاری مکانیزه جمع‌آوری شده است.

البته پیشرفت‌های فناوری و پیچیدگی‌های روزافزون ماشین‌آلات، ضرورت توسعه و بهبود روش‌های موجود نگهداری و تعمیرات را ایجاد می‌کند (Eskandarzade Sabet & Torkaman, 2020) که موجب کاهش چشم‌گیر توقفات مربوط به خرابی‌های دستگاه حفاری مکانیزه و در نتیجه تسریع حفاری تونل خواهد شد.

علاوه بر این عوامل، مشکلات، نرخ تولید و ظرفیت دپوی کارخانه سگمنت و ظرفیت چاله گل حفاری و نحوه و نرخ تخلیه آن نیز به‌طور مستقیم بر روند حفاری مکانیزه تأثیر خواهد گذاشت.

سیستم حفاری مکانیزه تعیین‌شده و به‌صورت مدل درآمد است و سپس جهت ریاضی‌سازی و منطقی نمودن مدل از داده‌های به‌دست‌آمده از دو دستگاه *TBM* در یک دوره ۳ ساله در پروژه خط دو قطار شهری شیراز استفاده شده است. تمامی محدودیت‌های کارخانه تولید سگمنت را می‌توان به‌راحتی در نرخ تولید آن خلاصه نمود، بدین معنی که کمبود مواد و مصالح، مشکلات دستگاه‌های قالب‌گیری و بخاردهی، جرثقیل‌ها و بچینگ‌های مورد‌استفاده، مشکلات نیروی انسانی و سایر موارد به‌صورت واضح خود را در نرخ تولید کارخانه نشان می‌دهند فلذا تنها عوامل بسیار مهم دیگر در این کارخانه ظرفیت دپوی سگمنت و مدت‌زمان موردنیاز عمل‌آوری سگمنت‌ها است که در این مدل با توجه به واقعیت، دپوی کارخانه قابلیت جای دادن ۱۱۰۰ سگمنت را داشته و دوره عمل‌آوری بتن نیز با توجه به دستورالعمل کنترل کیفی به‌صورت یک تأخیر زمانی ۲۸ روزه در نظر گرفته شده است.

برای پیش‌بینی نرخ حفاری و پیشروی دستگاه حفاری، تخمین ضریب بهره‌وری بسیار مهم است که این ضریب دستگاه حفاری تابع عواملی مانند شرایط زمین، نوع ماشین، تأسیسات پشتیبانی، مدیریت و تجربه کارکنان است (Shariat Alavi, et al., 2010).

در این مقاله ماکزیمم میزان پیشروی هر شیفت کاری دستگاه حفار طبق نظر خبرگان و متخصصان دستگاه حفاری و با توجه به عوامل مؤثر بر ضریب بهره‌وری بدون در نظر گرفتن توقفات مربوط به مشکلات نفرات اجرایی و نیروی انسانی، توقفات مربوط به خرابی اجزای دستگاه حفاری و توقفات ناشی از عوامل پشتیبانی، ۱۰ متر در هر شیفت کاری قرار داده شده که با افزایش فاصله دستگاه از دهانه ورودی تونل و شفت پشتیبان، این میزان به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد.

حفار در پروژه‌های مشابه و یا در صورت نبود اطلاعات با استفاده از نظر خبرگان در مدل وارد و محاسبه نموده و به‌عنوان ضریب کاهشی برای حفاری مکانیزه در نظر گرفت.

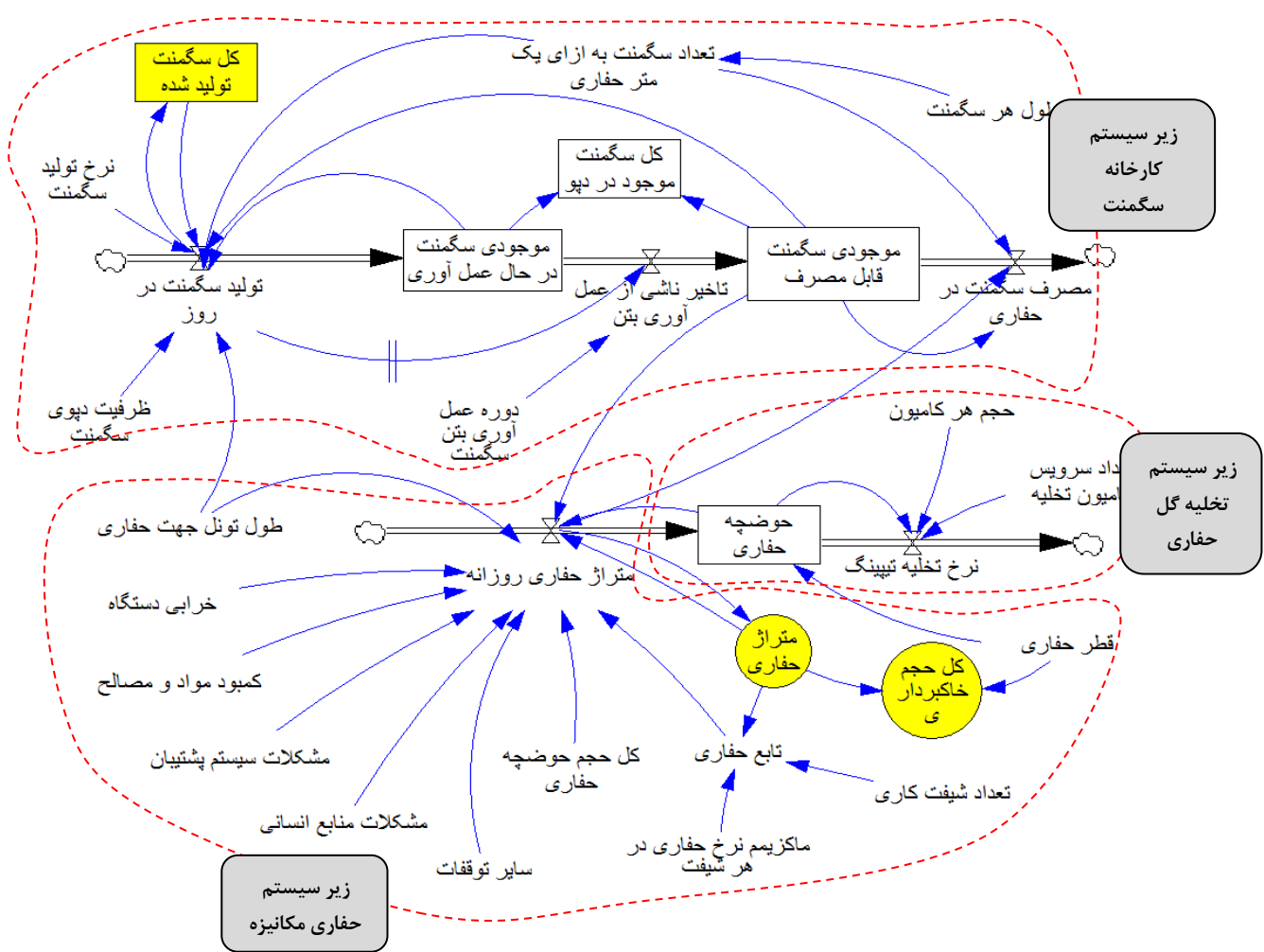
۴- فرضیات دینامیکی و مدل‌سازی پویای سیستم حفاری مکانیزه

روش حفاری مکانیزه با استفاده از دستگاه حفاری مکانیزه به این شکل است که ابتدا سگمنت موردنیاز جهت حفاری در کارخانه سگمنت تولید شده و پس از فرآوری و رسیدن به مقاومت مشخصه جهت به‌کارگیری در جداره تونل‌های حفرشده توسط دستگاه حفاری مکانیزه بارگیری می‌شود، در حین انجام حفاری مکانیزه مواد و مصالح موردنیاز به‌وسیله لوکوموتیو به دستگاه حفاری رسانده شده و درنهایت گل حاصل از حفاری به‌وسیله نوار نقاله و یا با همان لوکوموتیوها از تونل خارج و به محلی به نام چاله گل حاصل از حفاری (تیبینگ) منتقل می‌شود و از آنجا به‌وسیله کامیون بارگیری و به دپوی نهایی حمل می‌شود.

با توجه به توضیح روش حفاری مکانیزه و عوامل مؤثر تعیین‌شده در بخش ۳، مدل دینامیکی سیستم حفاری مکانیزه به‌صورت شکل ۶، خواهد بود که در آن سیستم حفاری مکانیزه به سه زیرسیستم تقسیم شده است:

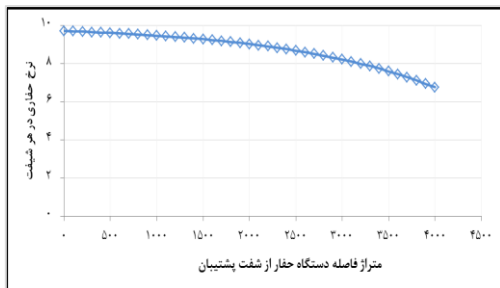
۱. زیرسیستم کارخانه تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی (کارخانه تولید سگمنت)
۲. زیرسیستم حفاری مکانیزه تمام مقطع
۳. تخلیه گل حاصل از حفاری تونل

باید توجه نمود که مبنای تولید کارخانه سگمنت و تخلیه گل حفاری روزانه بوده، ولی مبنای حفاری مکانیزه با استفاده از دستگاه حفار تمام مقطع به‌صورت شیفت‌های کاری تعریف شده و جهت مدل‌سازی ابتدا عوامل مؤثر بر



شکل ۶- مدل حالت جریان سیستم حفاری مکانیزه

مورد نیاز است که مورد اصلی در این زیرسیستم، ظرفیت و تعداد سرویس کامیون‌های مورد استفاده است.



شکل ۷- تابع حفاری مکانیزه

بدین صورت که فاصله حمل مواد حاصل از حفاری و انتقال قطعات پیش‌ساخته بتنی و مواد و مصالح مورد نیاز دستگاه حفار با افزایش فاصله، زیادتر شده و در نتیجه بر سرعت حفاری تأثیر می‌گذارد که این تأثیر با توجه به خط روند برازش شده بر حفاری‌های واقعی انجام شده دو دستگاه حفاری در طول ۳ سال، تابعی نمایی است که نشان‌دهنده کاهش نرخ حفاری به ازای فاصله بیشتر از دهانه شفت پشتیبان است (شکل ۷).

سایر عوامل مؤثر بر حفاری مکانیزه نیز به صورت متغیرهای مستقل در مدل وارد شده و اعداد آن‌ها با توجه به آمار گذشته دستگاه‌های حفاری برآورد گردیده است. جهت تخلیه چاله گل حاصل از حفاری نیز بیل مکانیکی و کامیون

در جدول ۱، متغیرهای مهم موجود در مدل جریان سیستم حفاری مکانیزه و مشخصه‌های آن‌ها نشان داده شده است:

جدول ۱- عوامل مهم مؤثر در مدل جریان سیستم حفاری مکانیزه

متغیر	توضیحات	نوع متغیر	فرمول
تولید سگمنت در روز	در صورتی که کل تعداد سگمنت تولید شده بیش از تعداد مورد نیاز جهت کل مسیر باشد و یا مقدار سگمنت در حال عمل‌آوری و قابل مصرف بیش از ظرفیت دیو سگمنت کارخانه باشد تولید سگمنت متوقف می‌گردد.	Auxiliary	$\text{کل سگمنت تولید شده (IF THEN ELSE)}$ $\geq \left(\text{طول تونل جهت حفاری} \right)$ $\times \left(\text{تعداد سگمنت به ازای یک متر حفاری} \right)$ <p>OR: (موجودی سگمنت در حال عمل‌آوری + موجودی سگمنت قابل مصرف):</p> $\geq \left(\text{نرخ تولید سگمنت}, 0, \text{ظرفیت دیو} \right)$
موجودی سگمنت قابل مصرف	برای اینکه سگمنت قابلیت مصرف در حفاری داشته باشد باید مدت‌زمان مورد نیاز جهت گیرش بتن با توجه به دستورالعمل کنترل کیفی را بگذراند.	level	(تاخیر ناشی از عمل‌آوری بتن - مصرف سگمنت در حفاری)
کل سگمنت موجود در دیو	سگمنت قابل مصرف و سگمنت در حال عمل‌آوری کل سگمنت موجود در دیو را تشکیل می‌دهد.	Auxiliary	موجودی سگمنت در حال عمل‌آوری + موجودی سگمنت قابل مصرف
مصرف سگمنت در حفاری	در صورتی که به دلیل عدم تولید و یا طی نشدن زمان عمل‌آوری سگمنت، سگمنت قابل مصرفی وجود نداشته باشد، حفاری مکانیزه متوقف می‌گردد.	Auxiliary	IF THEN ELSE $0, 0 \leq \text{موجودی سگمنت قابل مصرف}$ $\times \left(\text{مترای حفاری روزانه} \right)$
مترای حفاری مکانیزه	حفاری مکانیزه در صورتی می‌تواند انجام شود که کمتر از ۹۰ درصد حوضچه حفاری پر باشد و سگمنت قابل مصرف وجود داشته باشد و کل مترای حفاری به اتمام نرسیده باشد و از طرفی حداکثر مترای حفاری نیز به اندازه تابع حفاری منهای مشکلات و موانع و خرابی‌ها است.	Auxiliary	$\text{IF THEN ELSE (حوضچه حفاری} \leq 0.9 \times \text{کل حجم حوضچه حفاری)}$ $0 \leq \text{موجودی سگمنت قابل مصرف}$ <p>OR:</p> $0, \text{مترای حفاری} \leq \left(\text{طول تونل جهت حفاری} \right)$ <p>مشکلات سیستم پشتیبان) $\times (1 - \text{تابع حفاری خرابی دستگاه} + \text{کمبود مواد و مصالح} + \text{مشکلات منابع انسانی} + \text{سایر توقفات})$</p>
تابع حفاری	مقدار حفاری در هر شیفت کاری بدون هیچ‌گونه تاخیرات و مشکل و به صورت ایده آل مقدار ثابتی است که به دلیل افزایش فاصله دستگاه حفار از دهانه ورودی تونل مقداری با تابع نمایی از آن کسر می‌گردد.	Auxiliary	$(0.2947 - \text{تعداد شیفت کاری} \times \text{ماکزیمم نرخ حفاری در هر شیفت})$ $\times e^{(0.0006 \times \text{مترای حفاری})}$
نرخ تخلیه تیپینگ	در صورتی که حوضچه تخلیه خالی باشد، درواقع هیچ‌گونه تخلیه‌ای صورت نمی‌گیرد و در صورتی که خالی نباشد، می‌تواند بسته به تعداد و حجم هر سرویس کامیون تخلیه شود.	Auxiliary	$\text{IF THEN ELSE (حوضچه حفاری)}$ $< \left(\text{تعداد سرویس کامیون تخلیه} \right)$ <p>حوضچه حفاری, حجم هر کامیون \times</p> $\text{تعداد سرویس کامیون تخلیه}, 0, 0 \leq$ <p>(حجم هر کامیون \times)</p>

جدول ۲. محاسبه گردیده، ۳۹۷ روز خواهد بود.

۵- اعتبارسنجی مدل

پس از شبیه‌سازی مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها و پیش از سناریوسازی و اتکا به نتایج آن می‌بایست اعتبار مدل مورد بررسی قرار گیرد.

استرمن (Sterman, 2000) در کتاب پویایی‌شناسی کسب‌وکار روش‌های زیر را جهت اعتبارسنجی مدل‌ها معرفی کرده است:

الف) آزمون رفتار حدی (*Extreme Condition Test*)

ب) آزمون بازیابی رفتار مرجع (*Behavior Reproduction Test*)

ج) آزمون حساسیت پارامترها (*Parameter Sensitivity Test*)

که در این مدل از روش آزمون رفتار حدی استفاده شده است، در این روش مدل در شرایط سخت قرار می‌گیرد تا مشخص شود که رفتار آن چگونه است. در حقیقت هدف این روش این است که با تغییر زیاد در پارامترها، مدل رفتار عجیب از خود نشان ندهد یا دچار خطا نشود. به‌عنوان مثال در این تحقیق با افزایش بسیار زیاد نرخ تولید سگمنت، تغییرات حفاری مکانیزه وابستگی خود به تولید سگمنت را نشان می‌دهد و یا با افزایش ظرفیت چاله تخلیه حفاری، نرخ حفاری مکانیزه طبق روابط تعریف‌شده و طبق نتایج موردنظر عمل خواهد نمود و یا با افزایش بسیار بالای نرخ حفاری، زمان حفاری تا مرز محدودیت دسترسی به قطعات پیش‌ساخته بتنی و ظرفیت چاله حفاری کاهش می‌یابد و برای سایر متغیرهای مدل نیز چنین است.

از طرفی مدل با نظر خبرگان حفاری مکانیزه بررسی شده و صحت اطلاعات و رفتار مدل مورد تأیید قرار گرفته است.

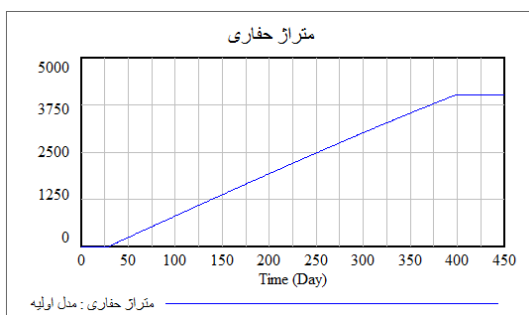
۶- تحلیل حساسیت و سناریوهای پیشنهادی

با توجه به مدل ارائه‌شده، در صورتی که طول تونل ۴۰۰۰ متر و ماکزیمم نرخ حفاری در هر شیفت ۱۰ متر و تعداد شیفت حفاری مکانیزه دو شیفت و تعداد سرویس حمل گل حاصل از حفاری ۵۵ سرویس در نظر گرفته شود مدت‌زمان اتمام حفاری با اعداد پیش‌فرض که طبق سوابق اجرایی پروژه و

جدول ۲- مقادیر پیش‌فرض متغیرهای مستقل مدل

مقدار پیش‌فرض	متغیر	مقدار پیش‌فرض	متغیر
۱۰ درصد	ضریب خرابی دستگاه	۱۲ رینگ	نرخ تولید سگمنت
۲ درصد	ضریب کمبود مواد و مصالح ضریب	۱۱۰۰ عدد	ظرفیت دپوی سگمنت
۶ درصد	مشکلات سیستم پشتیبان ضریب	۱/۴ متر	طول هر سگمنت
۱۸ درصد	مشکلات منابع انسانی	۲۸ روز	دوره عمل‌آوری بتن سگمنت
۶ درصد	ضریب سایر توقفات	۴۰۰۰ متر	طول تونل جهت حفاری
۱۶۰۰ مترمکعب	کل حجم حوضچه حفاری	۶/۸۸ متر	قطر حفاری
۵۵ سرویس کامیون	تعداد سرویس کامیون جهت تخلیه	۲ شیفت در روز	تعداد شیفت کاری حفاری مکانیزه
۸ مترمکعب	ظرفیت هر کامیون	۱۰ متر در هر شیفت	ماکزیمم نرخ حفاری در هر شیفت

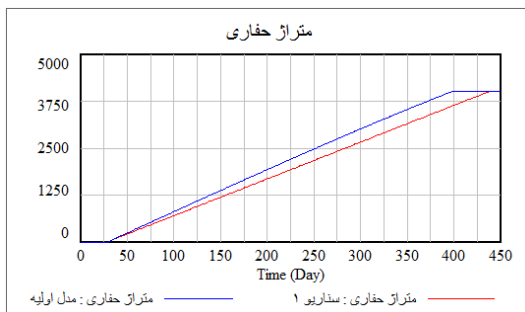
در شکل ۸ تا شکل ۱۱، مقادیر شبیه‌سازی حفاری مکانیزه و روند مهم‌ترین متغیرهای وابسته مدل نشان داده شده است.



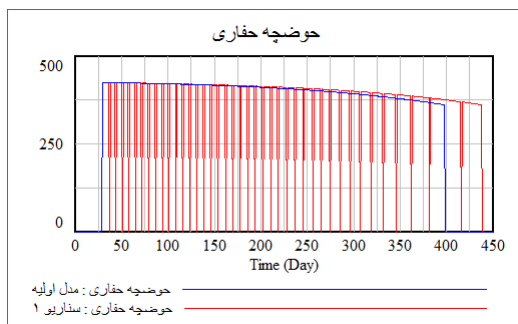
شکل ۸- حفاری مکانیزه تونل ۴۰۰۰ متری به مدت ۳۹۷ روز

سناریو ۱:

در سناریو اول با ثابت نگه داشتن سایر متغیرهای مدل اولیه به بررسی کاهش نرخ تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی از ۱۲ عدد در روز به تولید روزانه ۷ عدد پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ تا شکل ۱۴ مشاهده می‌شود با این تغییر مدت‌زمان حفاری مکانیزه از ۳۹۷ روز به ۴۳۷ روز رسیده و روند تخلیه چاله گل حفاری نیز با توجه به وجود ۵۵ سرویس کامیون با اختلال روبرو شده و در برخی از روزها کامیون‌های تخلیه گل حفاری بیکار خواهند بود و یا با ظرفیت پایین‌تر کار می‌کنند.



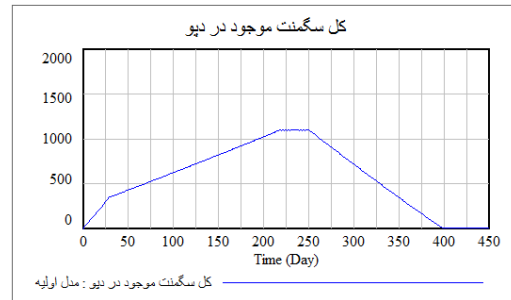
شکل ۱۲- مقایسه زمان حفاری با نرخ تولید سگمنت ۱۲ و ۷ رینگ در روز



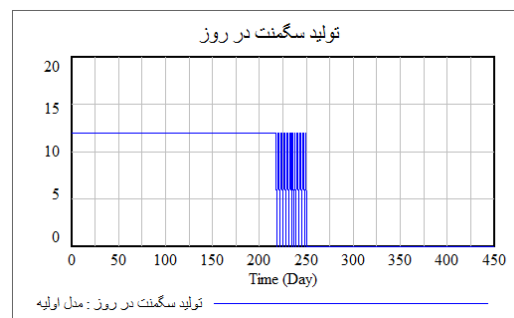
شکل ۱۳- مقایسه تخلیه گل حفاری با نرخ تولید سگمنت ۱۲ و ۷ رینگ در روز

سناریو ۲:

در سناریو دوم با ثابت نگه داشتن سایر متغیرهای مدل اولیه و تنها با تغییر تعداد شیفت کاری حفاری مکانیزه از دو شیفت به یک شیفت کاری، همان‌طور که در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نشان داده شده، مدت‌زمان حفاری از ۳۹۷ روز به

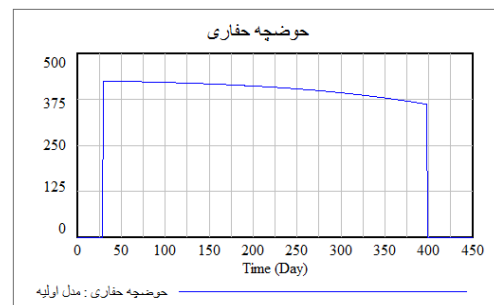


شکل ۹- کل سگمنت موجود در دیو کارخانه سگمنت



شکل ۱۰- روند تولید سگمنت

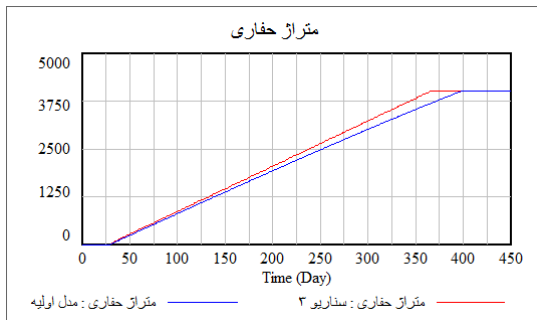
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، به دلیل بالاتر بودن نرخ تولید سگمنت نسبت به مصرف آن در سگمنت گذاری حفاری مکانیزه، میزان تولید سگمنت در برخی روزها صفر شده است.



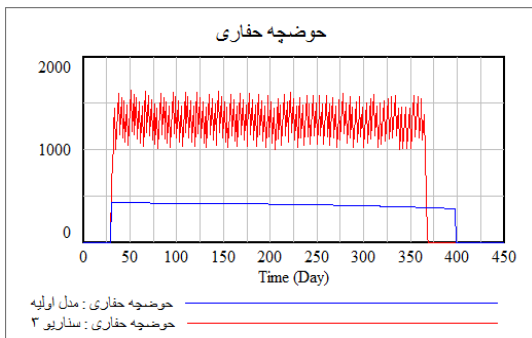
شکل ۱۱- روند تخلیه حوضچه حفاری

در ادامه با سناریوسازی و تغییر برخی از مهم‌ترین مقادیر ثابت مدل به تحلیل اثر آن‌ها بر مقادیر متغیرهای وابسته و تعیین بهترین راهبرد جهت مدیریت پروژه حفاری پرداخته شده است.

می‌شود، زمان حفاری از ۳۹۷ روز به ۳۶۵ روز کاهش خواهد یافت که با توجه به افزوده شده یک شیفت کاری تغییر چندانی در زمان اجرا مشاهده نمی‌گردد لیکن با دقت در روند تخلیه گل حفاری در شکل ۱۸، نوسانات و تغییرات شدید و گلوگاه بودن آن مشخص خواهد شد.



شکل ۱۷- اجرای حفاری در سه شیفت کاری در مقایسه با اجرای حفاری دو شیفت و با ۵۵ سرویس کامیون تخلیه گل حفاری

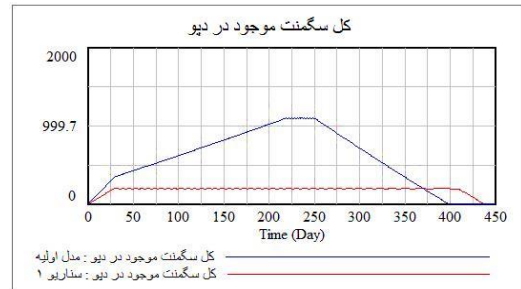


شکل ۱۸- عدم کشش حوضچه حفاری در اجرای حفاری در سه شیفت کاری و با ۵۵ سرویس کامیون تخلیه گل حفاری

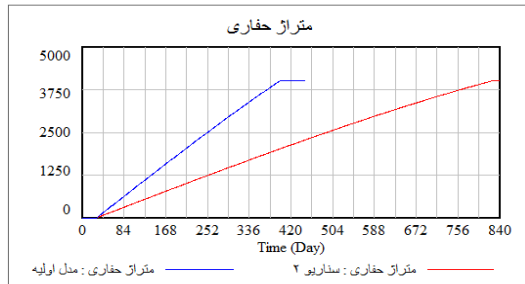
سناریو ۴:

در سناریو چهارم با ادامه دادن سناریو سوم (تغییر دو شیفت کاری حفاری مکانیزه به سه شیفت کاری در روز) و همچنین تغییر تعداد سرویس کامیون‌های موردنیاز حمل مواد حاصل از حفاری (گل حفاری) از ۵۵ به ۷۵ سرویس در روز، کاهش بسیار زیاد زمان موردنیاز حفاری مشاهده خواهد شد؛ به طوری که زمان حفاری از ۳۹۷ روز به ۲۷۷ روز کاهش خواهد یافت (شکل ۱۹) و حوضچه گل حفاری نیز فقط در برخی موارد تقریباً پر خواهد بود (شکل ۲۰).

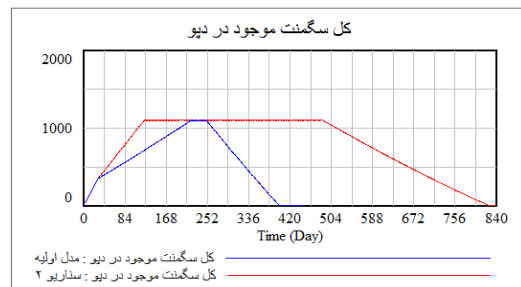
۸۲۳ روز خواهد رسید و مدت نگهداری سگمنت‌ها در کارخانه و زمان تولید کارخانه نیز به همان نسبت افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۴- مقایسه موجودی سگمنت در دیو با نرخ تولید سگمنت ۱۲ و ۷ رینگ در روز



شکل ۱۵- مقایسه زمان حفاری مکانیزه تک شیفت با دوشیفت



شکل ۱۶- مقایسه کل سگمنت موجود در دیو کارخانه سگمنت تک شیفت با دوشیفت

سناریو ۳:

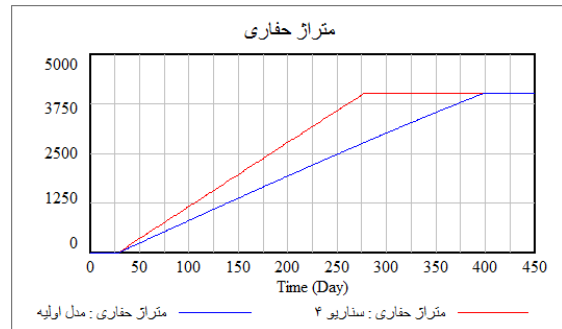
در این سناریو با ثابت نگه داشتن سایر متغیرهای مدل اولیه تعداد شیفت کاری را از دو شیفت حفاری به سه شیفت در روز تغییر داده‌ایم که همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده

کاری را به دست آورده و راهبردهای پروژه را بر اساس آن تدوین کرد.

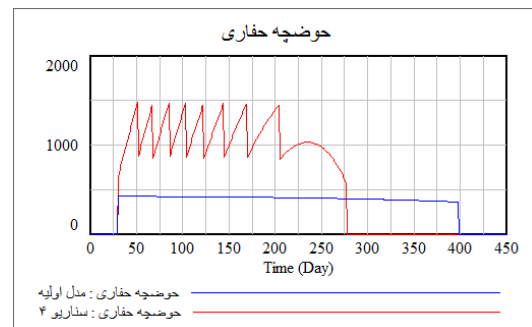
۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی بر آن شد تا با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم، موضوع حفاری مکانیزه تمام مقطع با نگاهی کل‌نگر و سیستماتیک مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، با بررسی ادبیات موضوع و داده‌های موجود و بهره‌گیری از تفکر دور بسته و بازخوردی که بیان می‌دارد ساختار مدل باید ایجادکننده رفتار مورد مطالعه باشد، مدل علی اولیه ایجاد گردید. پس‌از آن به‌منظور بررسی و تحلیل کمی، نمودار جریان و حالت سیستم ایجاد شد و این مدل در تعامل با خبرگان و کارشناسان در چندین مرحله مورد بررسی و بازبینی قرار گرفت و درنهایت اعتبار مدل مورد تأیید قرار گرفت و با ایجاد سناریوهای مختلف و تغییر برخی از مهم‌ترین مقادیر ثابت مدل، تغییرات عوامل مختلف مؤثر بر حفاری مکانیزه بررسی گردید.

باید خاطرنشان کرد که این مدل در تمامی موارد حفاری مکانیزه مثل مترو، تونل‌های زیرزمینی، تونل‌های انتقال آب به هر قطر حفاری و هر نوع مدل تخلیه شامل رولینگ استاک (*Rolling stock*) و نوار نقاله و هر نمونه قطعات پیش‌ساخته بتنی با اندازه و گام متفاوت کاربرد دارد و تنها با تغییر ضرایب و متغیرهای مستقل و بدون تغییر روابط، می‌توان تحلیل و تصمیمات مدیریتی کلان پروژه را اتخاذ کرد.



شکل ۱۹- اجرای حفاری مکانیزه به صورت سه شیفت و به کارگیری ۷۵ سرویس کامیون تخلیه گل حفاری در مقایسه با اجرای دو شیفت حفاری و به کارگیری ۵۵ سرویس کامیون تخلیه گل حفاری



شکل ۲۰- وضعیت چاله گل حفاری با وجود ۷۵ سرویس کامیون تخلیه و اجرای سه شیفت حفاری در مقایسه با اجرای دو شیفت حفاری و به کارگیری ۵۵ سرویس کامیون تخلیه گل حفاری

به همین ترتیب با تغییر سایر متغیرهای مستقل در مدل می‌توان سناریوهای متعدد ایجاد کرده و بهترین نتیجه دلخواه مدیریتی با توجه به زمان و هزینه و تعداد شیفت

۸- مراجع

Alvani, S. M. (1989). *public Management* (6 ed.). Ney.

Amini khoshalan, Hasel; Torabi, Seyed rahman; Sayf Panahi, Kiomars; Razifard, mahdi. (2017). *Modeling the reliability, accessibility, maintenance of the electrical system of the Tunnel Boring Machine. Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)*, 2(2), 1-10. Retrieved from https://jmre.journals.ikiu.ac.ir/article_1133.html & <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=346072>

Bohlooli, M. A., Mosavi Haghighi, M. H., & Mosavi, S. N. (2020). *Investigating and analyzing the trend of*

- water consumption in urban green space and the shortage of municipal water resources with a system dynamics approach. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 51(2), 553-564. doi: 10.22059/IJAEDR.2020.278023.668732
- Eftekhari, S. M., Baghban, A. R., & Bagherpour, R. (2013). Investigation of the effect of machine performance parameters on its penetration rate using artificial neural networks - Case study of Zagros long tunnel. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, 1(1), 29-42. doi: 10.22044/TUSE.2013.120
- Eskandarzade Sabet, A., & Torkaman, K. (2020). Performance and cost management of machines using key indicators. *Quarterly Journal of Construction Science and Technology*, 1(1), 23-28. Retrieved from <https://civilica.com/doc/676800> & https://journals.ihu.ac.ir/article_205654.html
- Farshchian, M. M., & Heravi, G. R. (2012). Management of Tunnel Construction Projects with TBM: A System Dynamics Approach. 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT). doi:COI: ICCE09_1262
- Lang, & Liang. (2021). A study of system dynamics modelling and optimization for food safety risk communication in China. *Alexandria Engineering Journal*, 60(60), 1917-1927. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.11.039>
- Liu, D., Zhou, Y., & Jiao, K. (2010). TBM Construction Process Simulation and Performance Optimization. *Transactions of Tianjin University*, 16(3), 701-710. doi: 10.1007/s12209-010-0035-0
- Mashayekhi, A. (2018). *Systems Dynamics Volume One: A Systemic Perspective (3 ed.)*. Ariana Ghalam.
- Mikayel, R., Jafar Shirzad, P., & Khademi Hamidi, J. (2017). Selection of a suitable Tunnel Boring Machine using the similarity method to the fuzzy ideal option (FTOPSIS), a case study: the second section of the Imamzadeh Hashem tunnel. *Journal of Rock Mechanics*, 1(2), 29-40. Retrieved from <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=468374>
- Mohammadi, A., Mosleh Shirazi, A., Abbasi, A., & Akhlaghpour, S. (2019). Scenario planning of factors affecting market capitalization of Tehran stock exchange using system dynamics approach. *Journal of Financial Management Perspective*, 26, 33-68. doi: 10.52547/JFMP.9.26.33
- Norozian Maleki, P., Ezadbakhsh, H. R., & Ghanbar Tehrani, N. (2020). Predicting the demand for sustainable urban transportation in order to manage and improve the safety of the road network using the systems dynamics approach: A case study of Tehran. *Journal of Resilient City (JRC)*, 2(8), 1-13. Retrieved from <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=526506>
- Ruwanpura, J., Abourizk, S., Er, K., & Fernando, S. (2011). Special purpose simulation templates for tunnel construction operations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(2), 222-237. doi: 10.1139/cjce-28-2-222
- Shariat Alavi, H., Kakaei, R., Zorabadi, M., Alizadeh Sori, B., & Abdollahi, M. (2010). Calculation of

efficiency coefficient and progress rate of Tunnel Boring Machine (TBM) in hard rocks, Case study: Plot 8 of Qamroud water transfer tunnel. Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME), 5(9), 79-91. doi: 20.1001.1.17357616.1389.5.9.8.0

Sterman, J. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World (4 ed.). McGraw Hill.

Tabrizi, A., Askari, M., Atayi, M., & Khaloukakayi, R. (2007). Scheduling the transportation system of single track tunnels based on the TBM penetration rate – case study of Karaj-Tehran water tunnel. 3rd Iran Rock Mechanics Conf, (pp. 1011-1016). Tehran. Retrieved from <https://civilica.com/doc/25045/>

Touran, A., & Toshiyuki, A. (1987). Simulation of Tunneling Operations. Journal of Construction Engineering and Management, 113(4), 554-568. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1987\)113:4\(554\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1987)113:4(554))

Dynamic modeling and sensitivity analysis of tunnel boring of the whole section system to manage tunnel projects

M. Jahanbani*¹; K. Peykari²; M. Setoodehpour³

1- Planning and Project Control Manager of Shiraz Urban Railway Lines 2 and 3 Projects, jahanban.mahmood@gmail.com

2- Technical Manager of Shiraz Urban Railway Line 2 Project, kianoush.peykari@gmail.com

3- Commitment Manager of Shiraz Urban Railway Line 2 Project, mohammad.setodeh@gmail.com

Received: 23 Sep 2021; Accepted: 23 Jan 2022
10.22044/TUSE.2022.11226.1430

Keywords

*Tunnel boring machine
Segment
Precast concrete parts
Dynamic system
Simulation
Tunnel*

Extended Abstract

Summary

Today, the use of tunnel boring machines to drill long tunnels under different geological conditions has become widespread. On the other hand, in tunnel projects, especially subway projects, the situation of tunnel boring due to time consuming and high cost, determines the main strategy of the project. In this research, using a systemic approach, the dynamic relationship of the

factors affected by tunnel boring machines in tunnel projects has been investigated and analyzed. The system, used in this modeling study, includes three subsystems for the production of precast concrete parts, tunnel boring machine and the process of discharging drilling materials. In this modeling study, the data obtained from two tunnel boring machines in a period of 3 years, have been used. The simulation results show the effect of tunnel boring character from the factors such as drilling diameter, production rate of precast concrete parts, discharge rate of drilling pool and various problems. Finally, the model is validated and sensitivity analysis is performed on the model.

Introduction

This research is based on a systemic approach and seeks to determine the relationships between various factors affecting the tunnel boring system to manage the scope, time, cost, quality and resources to meet the needs of key stakeholders and manage the procurement required in the project.

Methodology and Approaches

In this research, first, the effective factors on the tunnel boring system are determined, and then, the cause and effect diagram of the system components is designed. After that, the flow diagram of the interaction between system variables is shown, and finally, the quantified model is simulated using Vensim DSS 6.4E software.

Results and Conclusions

According to the initial input numbers of the model, the quantitative results of the model indicate that if the production rate of precast concrete parts is reduced from 12 to 7 per day, the tunnel boring will be completed 40 days later, and if the number of shifts of the tunnel boring machines changes from 2 shifts to one shift per day, the drilling time will increase from 397 days to 823 days.

By changing the number of shifts from 2 to 3 tunnel boring shifts per day and increasing the number of mud trucks serviced from 55 to 75 services, the time required for the tunnel boring will decreased from 397 days to 277 days.

Considering the general inclusion of the model for all tunnel boring systems, by changing each of the independent variables of the model and defining different scenarios, the best possible result can be achieved for project

management, and project strategies can be developed based on it.
