



Using event method for Tochastic scheduling construction project; A case study on Dalak's dam earth moving operation

VahidReza NadAlizadeh Ghanad^{۱*}, Ebrahim Alamatian^۲

^{۱*}-M.Sc. Student, *Project Management and Construction, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran*
Email: civil_vahid@yahoo.com

^۲-Assistant Professor, *Department of Civil Engineering, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran*
Email: e.alamatian@profs.khi.ac.ir

ABSTRACT

Realistic project planning is an essence for project success. Despite its simplicity, in such method, some metrics like schedule bottleneck points, work production and, resource utilization remains vague which in turn can lead to project cost and time overruns. Besides, since project stochastic scheduling is a kind of NP-hard problems, previous project planning literature suggests metaheuristics method and optimization algorithms like genetic algorithm and ant colony optimization algorithm. This study proposed using discrete event simulation for project stochastic scheduling as an innovative method, since: firstly, construction process has kind of discreteness identically resulting from different resourced interactions. Secondly, whole of construction project concepts can be modeled by discrete event simulation modeling elements and, thirdly, the logic of simulation models for each type of project would be same, i.e., it is required just to modify activities duration and the number of available resources. This study investigates a part of the total earth-moving operation of Dalaki dam as a case study. Having modeled the operations, it is observed that they used the best resource combination regarding project cost and time. Moreover, planning performance metrics such as schedule bottleneck points, various cycle productivity and resource utilization were calculated and discussed in depth.

Keywords: *scheduling, stochastic planning, discrete event simulation, earth-moving operation, productivity, symphony.*



www.cpjournals.com

نشریه عمران و پروژه

Civil & Project Journal (CPJ)

استفاده از روش پیشامد برای زمانبندی غیر قطعی پروژه های ساخت

نمونه موردی: پروژه عملیات خاکی سد دالکی

وحیدرضا نادعلی زاده قناد^{۱*}، ابراهیم علامتیان^۲

^{۱*} - دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت پروژه و ساخت، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران

پست الکترونیکی: civil_vahid@yahoo.com

^۲ - استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران

پست الکترونیکی: e.alamatian@profs.khi.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸

چکیده

برنامه‌ریزی‌های واقع‌بینانه برای هر پروژه‌ای از ملزومات موفقیت آن پروژه است. علیرغم سهولت، در روش‌های برنامه‌ریزی پروژه که تحلیل شبکه فعالیت‌های پروژه در آن‌ها بصورت متعین و مبتنی بر روش مسیر بحرانی است، عمدتاً تعیین نقاط گلوگاهی، بهره‌وری کار و میزان بهره‌برداری از منابع مبهم بوده که می‌تواند منجر به افزایش زمان و هزینه گردد. همچنین، مطالعات پیشین در این حوزه استفاده از روش‌های فرا ابتکاری و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچگان را بدلیل اینکه مسائل برنامه‌ریزی احتمالاتی پروژه در زمره مسائل NP-hard قرار می‌گیرند، برای برنامه‌ریزی احتمالاتی پروژه توصیه می‌کنند. این پژوهش، به عنوان یک راه‌حل نوین، استفاده از شبیه‌سازی گسسته پیشامد را برای برنامه‌ریزی احتمالاتی پروژه به سه دلیل توصیه می‌کند. اولاً، فرآیند ساخت در هر پروژه، یک فرآیند گسسته است که از تعامل میان منابع مختلف پروژه عینیت می‌یابد. ثانیاً، تمامی مفاهیم موجود در پروژه‌های ساخت قابلیت مدل‌سازی شدن توسط الگوریتم‌های مدل‌سازی شبیه‌سازی گسسته پیشامد را دارا هستند. ثالثاً، منطق مدل شبیه‌سازی ساخته شده برای هر تیپ پروژه می‌تواند در مورد پروژه‌های مشابه بکار گرفته شود و تنها نیاز است تا مدت زمان فعالیت‌ها و تعداد منابع اصلاح شود. مطالعه موردی این پژوهش بخشی از عملیات خاکی سد دالکی بود که مشاهده گردید با استفاده از شبیه‌سازی گسسته پیشامد، ترکیب منابع مورد استفاده بهینه‌ترین ترکیب است. همچنین، نقاط گلوگاهی برنامه تعیین گردید و بهره‌وری کار در چرخه‌های مختلف کاری و میزان بهره‌برداری از منابع محاسبه شد و به تفصیل مورد بحث قرار گرفت.

کلمات کلیدی: زمان بندی، برنامه‌ریزی احتمالاتی، شبیه‌سازی گسسته پیشامد، عملیات خاکی، بهره‌وری، سیمفونی

۱- مقدمه

هر ساله حجم قابل توجهی از بودجه کشور برای سرمایه‌گذاری در پروژه‌های بزرگ عمرانی و زیر بنایی خرج می‌شود. یکی از مهمترین شاخص موفقیت این نوع از پروژه‌ها دستیابی به اهداف زمانی و هزینه‌ای است. همچنین، یکی از بزرگترین معضلات حاضر در پروژه‌های عمرانی خواه در کشورهای توسعه یافته، خواه در کشورهای در حال توسعه بحث تأخیر و انحراف از زمان‌بندی پروژه‌ها است که در پی آن افزایش مدت زمان پیمان و هزینه‌های پروژه اجتناب ناپذیر خواهد بود.

بر اساس مطالعات صورت پذیرفته در اقصی نقاط جهان، انحراف زمانی عملکرد از برنامه خود سهم عمده‌ای در انحراف مالی از برنامه را داراست و این قانون مختص یک محدوده جغرافیایی نبوده و در سراسر دنیا وضعیت تقریباً یکسانی از این دست وجود دارد؛ بطوریکه در آمریکای شمالی، بطور میانگین، پروژه‌های عمرانی زیرساختی ۳۳ ماه دیرتر از برنامه و با صرف ۳۸ درصد بیشتر از بودجه پیش‌بینی شده تحویل داده می‌شوند (Guida & Sacco, ۲۰۱۹). این رقم در اروپا ۱۷ ماه و ۲۹ درصد اضافه هزینه است (Ran, ۲۰۱۷) در حالیکه در خاورمیانه و شمال آفریقا این اعداد به ۲۲ ماه و ۳۶ درصد اضافه هزینه (Vick & Brilakis, ۲۰۱۸) و در ناحیه آسیا و اقیانوسیه به ۳۱ ماه و ۳۱ درصد اضافه هزینه می‌رسند (Guida & Sacco, ۲۰۱۹). با توجه به تعداد پروژه‌های فعال در این چهار حوزه، بدیهی است هر ساله مقدار زیادی از منابع مالی به پای انحراف عملکرد از برنامه ضایع می‌شود. بعلاوه، با توجه به تعداد رو به رشد پروژه‌های عمرانی در دنیا، زنگ خطری برای اقدامی فوری در جهت حداقل‌سازی انحراف عملکرد از برنامه را به صدا در می‌آورد. در مورد کشور ایران متأسفانه آمار رسمی از بابت تأخیرات پروژه‌های عمرانی منتشر نشده است، اما بصورت سرانگشتی می‌توان تخمینی حداقل برابر شرایط خاورمیانه برای ایران در نظر گرفت. انحراف عملکرد از برنامه ناشی از دلایل مختلفی است که یکی از مسائلی که منجر به انحراف عملکرد از برنامه‌ریزی می‌شود، غیرواقع‌بینانه بودن برنامه‌ریزی‌هاست.

امروزه تجربه متداولی که در برنامه‌ریزی پروژه‌ها وجود دارد مبتنی بر استفاده از مقادیر پیش‌فرضی برای مدت زمان فعالیت‌ها، تعداد منابع و ظرفیت هر یک از آنهاست. این مقادیر پیش‌فرض، عموماً از تجارب قبلی بدست می‌آیند که در مورد پروژه‌های ماهیتاً مشابه ممکن است کارگشا باشند؛ اما شایان ذکر است که چنین رویکردی بسیار کلی‌نگر بوده و تقریب‌های زیادی را در برنامه‌ریزی پروژه اعمال می‌نماید که نهایتاً منجر به افزایش احتمال غیرواقع‌بینانه بودن برنامه می‌شود. یکی از راهکارهای ارائه زمان‌بندی‌های قابل اطمینان، کم کردن مفروضات موجود برای پروژه است. به بیان دیگر، چنانچه پروژه‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در فعالیت‌ها و منابع مدل‌سازی شود، انتظار می‌رود عملکرد واقعی پروژه تطابق بیشتری با آنچه که برنامه‌ریزی شده است، داشته باشد.

پراکاربردترین روش‌های برنامه‌ریزی که در تجارب مدیریت پروژه کلاسیک مورد استفاده هستند شامل نمودارهای میله‌ای، نمودار گانت، روش مسیر بحرانی و روش ارزیابی و بازنگری برنامه می‌شود (Eastman, ۲۰۱۸). ابتدایی‌ترین روش برنامه‌ریزی پروژه‌ها، نمودارهای گانت و میله‌ای است؛ نقایص و عدم کارایی این روش‌ها در پروژه‌های بزرگ، جوامع کاری را بسوی روش‌های سیستماتیک دیگری مانند روش مسیر بحرانی و روش ارزیابی و بازنگری برنامه سوق داد. مبنای روش مسیر بحرانی بر اساس استفاده بهینه از روش‌های ریاضی برای تحلیل، برنامه‌ریزی، زمان‌بندی و کنترل پروژه است (Hajdu & Isaac, ۲۰۱۶). در روش مسیر بحرانی، شبکه‌ای از فعالیت‌ها تشکیل شده که به نمودارهای شبکه‌ای موسوم‌اند و با استفاده از تحلیل کمی شبکه فعالیت‌ها می‌توان تخمین نسبتاً دقیقی از زمان‌بندی هر فعالیت، میزان منابع مورد نیاز هر یک و مدیریت منابع مالی پروژه داشت که پیشتر در روش نمودار میله‌ای و گانت ممکن نبود. برای پروژه‌هایی که فاقد توالی رخداد احتمالاتی، ولی دارای مدت زمان‌های احتمالی هستند، روش ارزیابی و بازنگری برنامه مناسب است. برای پروژه‌های دارای فعالیت‌های احتمالاتی کاربرد روش دیگری که به روش ارزیابی و بازنگری گرافیکی برنامه (GERT) موسوم است، توصیه می‌شود. روشی مرکب از تئوری فلوگراف، توابع مولد گشتاور و PERT برای حل مسائل با توالی‌های رخداد احتمالی می‌باشد (Tao et al., ۲۰۱۳). از این تکنیک برای حل محاسبه زمان قطعی و تخمینی فعالیت‌ها استفاده می‌گردد.

روش‌های ذکر شده علیرغم پاسخ‌های نزدیک به واقعیتی که ارائه می‌کردند، زمان‌بر و در صورت بزرگ شدن پروژه غیرمؤثر بودند؛ لذا، روش‌های ریاضی و منطقی که بصورت ریاضی ساختار زمانی و هزینه‌ای پروژه را تحلیل می‌نمودند، بطور وسیع برای رفع نقایص روش‌های پیشین بکار بسته شدند که این مهم منجر به ظهور شبیه‌سازی گردید (Ahuja et al., ۱۹۹۴). برنولد و ابوریزک (۲۰۱۰) شبیه‌سازی پروژه‌های ساخت را دانش پیاده‌سازی سیستم حاکم در پروژه ساخت در فضای کامپیوتر تعریف کردند که به کمک آن می‌توان عملکرد چند جانبه این سیستم را درک کرد. بر اساس (Siu et al., ۲۰۱۵)، کاربردهای متنوعی را می‌توان برای شبیه‌سازی در نظر گرفت که از جمله آنها می‌توان به ساخت پذیر، مطالعات تحلیل ریسک و برنامه‌ریزی سناریو محور پروژه اشاره کرد. کما اینکه بسیاری از پیش‌قراولان این عرصه مورد اصلی کاربرد شبیه‌سازی را در مسائلی عنوان می‌کنند که شرایط پیچیده‌ای توأم با عدم قطعیت در آن وجود دارد (AbouRizk, ۲۰۱۰; Sadeghi et al., ۲۰۱۶; Halpin et al., ۲۰۱۷). شبیه‌سازی این امکان را به کاربر می‌دهد که درک بهتری از رفتار سیستم داشته باشد و تأثیر عوامل و محدودیت‌های مختلف را بسنجد. نقاط گلوگاهی را پیدا کرده و سیستم مدیریت ریسک فعالی را با تمرکز بر این نقاط پیاده‌سازی نماید که نهایتاً به بهبود عملکرد پروژه منجر خواهد شد.

در این مقاله، یک نمونه مطالعه موردی از برنامه عملیات خاکی سد دالکی بررسی شده و با استفاده از مفاهیم شبیه‌سازی گسسته پیشامد بصورت غیرقطعی مدل‌سازی و تحلیل شده است؛ همچنین، مزایا و چالش‌های موجود در مسیر برنامه‌ریزی غیرقطعی پروژه‌ها در این مقاله به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد.

همچنین در این مطالعه برای شبیه‌سازی آماری توزیع‌های احتمالاتی از روش معروف مونت کارلو استفاده می‌شود که منطق محاسباتی بسیاری از نرم‌افزارهای آماری و شبیه‌سازی تجاری سازی شده و یا آکادمیک است. شبیه‌سازی مونت کارلو بیشتر برای توصیف روشی جهت انتشار عدم قطعیت‌های موجود در ورودی مدل به عدم قطعیت‌ها در خروجی مدل، به کار می‌رود. در شبیه‌سازی مونت کارلو، کل سیستم به تعداد دفعات زیادی اجرا می‌شود (برای مثال ۱۰۰۰ بار). به هر بار شبیه‌سازی، تحقق سیستم گفته می‌شود. برای هر تحقق، تمام پارامترهای غیرقطعی نمونه‌برداری می‌شود (یعنی یک مقدار تصادفی از توزیع اختصاصی مربوط به هر پارامتر، انتخاب می‌شود) (Gameran & Lopes, ۲۰۰۶). سپس این سیستم در طول زمان شبیه‌سازی می‌شود (با معین بودن مجموعه پارامترهای ورودی) به گونه‌ای که کارایی سیستم بتواند محاسبه شود. این امر منتج به ایجاد تعداد زیادی نتیجه مستقل و جداگانه می‌شود، که هر کدام نمایشگر یک رخداد احتمالی برای سیستم هستند (یعنی یک مسیر احتمالی که سیستم احتمالاً با گذشت زمان دنبال خواهد کرد). نتایج تحقق‌های مستقل سیستم به شکل توزیع‌های احتمالی خروجی‌های ممکن در خواهند آمد. در نتیجه، خروجی‌ها به صورت مقادیر تک نیستند، بلکه توزیع احتمال هستند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- ابزار تحقیق

نرم‌افزارهای متعددی برای شبیه‌سازی گسسته پیشامد بصورت تجاری‌سازی شده وجود دارند که از جمله آنها می‌توان به Vensim و Arena اشاره نمود. جدا از محصولات تجاری فوق، نرم‌افزارهای دانشگاهی دیگری نیز وجود دارد که هنوز تجاری سازی نشده‌اند و در صورت درخواست به ایجاد کننده آنها، امکان تهیه آنها بصورت رایگان وجود دارد که یکی از مشهورترین آنها نرم‌افزار سیمفونی است که بر پایه چارچوب Net نوشته شده است. قابلیت‌های بالای نرم‌افزار سیمفونی سبب شده تا این نرم‌افزار بیشتر مورد اقبال جوامع پژوهشی قرار گیرد و مقالات متعددی از آن بعنوان ابزار بهره گیرند. بعلاوه، در میان تمامی نرم‌افزارهای تجاری و دانشگاهی، تنها نرم‌افزار سیمفونی ماهیت عمرانی داشته و توسط دپارتمان مهندسی عمران و اساتید مدیریت ساخت ابداع شده است و سایر نرم‌افزارها بیشتر توسط دپارتمان مهندسی صنایع دانشگاه‌های مختلف ابداع شده‌اند.

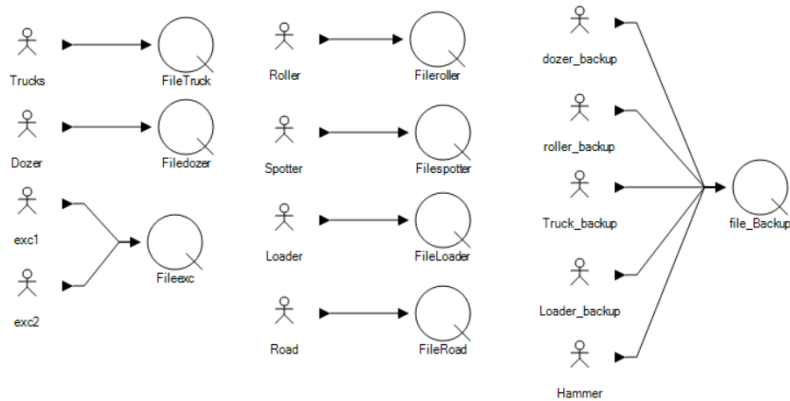
۲-۲- داده‌های مورد استفاده

کل حجم خاک و سنگدانه مورد نیاز برای اجرای هسته، ریپ‌رپ، فیلتر و سنگریزه برای کل سد حدود ۴/۵ میلیون مترمکعب برآورد شده است که سهم عملیات خاکی مربوط به فرازبند حدود ۴۹۰۰۰۰ مترمکعب است که برای بررسی و تحلیل دقیق مقادیر، این تحقیق به بخش عملیات خاکی مربوط به فرازبند سد می‌پردازد؛ چراکه اولاً، این بخش در زمان نگارش مقاله در مراحل انتهایی خود بسر می‌برد و تنها اطلاعات ماشین‌آلات که از سیستم دیسپچینگ استخراج می‌شود مربوط به این بخش است (در واقع هنوز مراحل دیگر شروع نشده و در انتظار تخصیص اعتبار هستند). ثانیاً، برنامه زمان‌بندی واقعی اجرای این قسمت تنها موجود است و می‌تواند ملاک مقایسه روش پیشنهادی این تحقیق با تجارب برنامه‌ریزی و کنترل پروژه سد باشد. مصالح مورد نیاز برای المان‌های آب‌بند فرازبند از دو منبع قرضه که در شرق دالکی (مرز استان فارس و بوشهر) واقع شده‌اند، تأمین می‌شود که یکی از آنها در فاصله ۱۵ کیلومتری سایت پروژه و با ظرفیت ۳۰۰۰۰۰ مترمکعب و دیگری در فاصله ۲۴ کیلومتری از سایت سدسازی قرار دارد که ظرفیت آن بالغ بر ۳۰۰۰۰۰ مترمکعب است اما بدلیل دورتر بودن از محل سایت در اولویت دوم قرار دارد. منبع قرضه درشت دانه که به منظور تأمین مصالح دانه‌ای لایه انتقالی بدنه سد (لایه‌های فیلتر و زهکش) و سنگدانه‌های بتن مورد نیاز سازه‌های جنبی بکار می‌رود از بستر رودخانه دالکی و همچنین محصولات حفاری سازه‌های جنبی فراهم می‌شود که این موضوع به معنای کوتاه بودن مدت زمان حمل برای این موارد است. برای تأمین مصالح سنگی مورد نیاز پوسته سنگریز سد، از معدن سنگ آهک چاه غیبی و پشتکوه در فاصله حدودی ۶ کیلومتری جنوب شرق ساختگاه مورد استفاده قرار گرفته است.

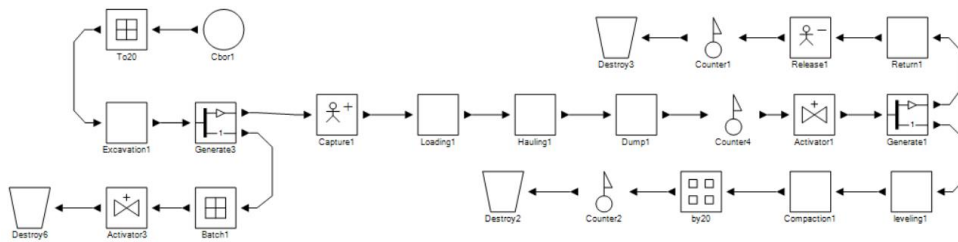
فرآیند عملیات خاکی پروژه بصورت چرخه‌ای بوده و در حقیقت یک توالی مشخصی از فعالیت‌های بصورت تکرارشونده بدنبال هم تکرار می‌شوند. منطق کار به این صورت است که حفارها (که بسته به نوع قرضه می‌توانند لودر، بیل مکانیکی یا شاول باشند) سنگدانه‌های مورد نیاز را از قرضه حفاری کرده و در کامیون‌ها بارگذاری می‌کنند. سپس کامیون‌ها از محل قرضه به سمت ساختگاه فرازبند حرکت می‌کنند و با رسیدن به محلی که توسط راهنما مشخص می‌شود محموله خود را تخلیه نموده و به محض خالی شدن رهسپار قرضه خود می‌شوند. سنگدانه‌های تخلیه شده توسط بولدوزر و گریدر پخش شده و پس از تسطیح توسط غلتک‌ها کوبیده شده و متراکم می‌شوند که این دو فعالیت نیز دارای ماهیت چرخه‌ای می‌باشند.

۳- مدل‌سازی

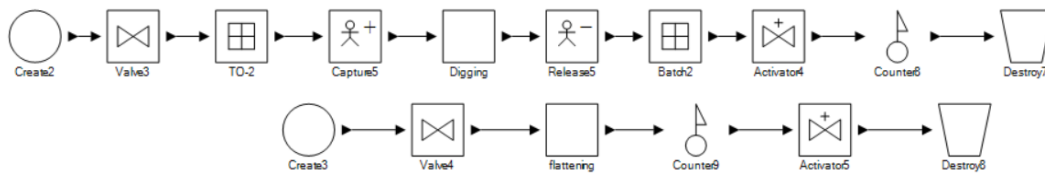
پس از بیان مفروضات، مدل شبیه‌سازی مبتنی بر واقعیت ایجاد گردید که بصورت شکل ۱ تا ۵ می‌باشد. اطلاعات ورودی مدل عبارتند از تعداد منابع کاری، شروط و پیش‌نیازهای ناشی از منطق کار و مدت زمان فعالیت‌های موجود در چرخه عملیات خاکی. تعداد منابع براساس تجارب واقعی پروژه است. همچنین، تمامی مدت زمان‌های مورد استفاده از سیستم دیسپچینگ ماشین‌آلات سد استخراج گردیده است که خود سیستم مذکور (پس از به حد نصاب رسیدن اطلاعات) قابلیت ارائه اطلاعات بصورت توزیع‌های احتمالاتی را داراست. جهت صحت‌سنجی سیستم چند نمونه آزمون کای اسکوتر جهت ارزیابی خوبی برآزش در مورد توزیع‌های آماری مختلف بصورت دستی توسط نویسندگان انجام شده است که نتایج این آزمون‌ها صحت توزیع‌های پیشنهاد شده توسط دیسپچینگ را تصدیق می‌کند. در بخش قبل اذعان شد که برای تأمین مصالح عملیات خاکی از دو قرضه استفاده می‌شود که قرضه اول ۳۰۰۰۰۰ متر مکعب و قرضه دوم بالغ بر ۳۰۰۰۰۰ متر مکعب مصالح مفید برای احداث فرازبند را شامل می‌شدند. فاصله قرضه اول تا سایت سدسازی ۱۵ کیلومتر و فاصله قرضه دوم ۲۴ کیلومتر است که بدلیل فاصله بیشتر، قرضه اول به قرضه دوم ترجیح داده شد. حین استخراج از قرضه ۱، عملیات احداث مسیر برای قرضه دوم انجام می‌شود و درحالی‌که هنوز استخراج از قرضه ۱ ادامه دارد، عملیات احداث مسیر تمام می‌شود (شکل ۳). شکل‌های ۲ و ۵ برترتیب مدل شبیه‌سازی عملیات خاکی قرضه‌های اول و دوم را نمایش می‌دهد. متناسب با اتمام قرضه یک، عملیات جابجایی کامیون‌ها از قرضه ۱ به قرضه ۲ انجام می‌گیرد (شکل ۴) تا که نهایتاً کل خاک مورد نیاز فراهم گردد. در شکل ۱ منابع مورد استفاده در مدل نمایش داده شده است.



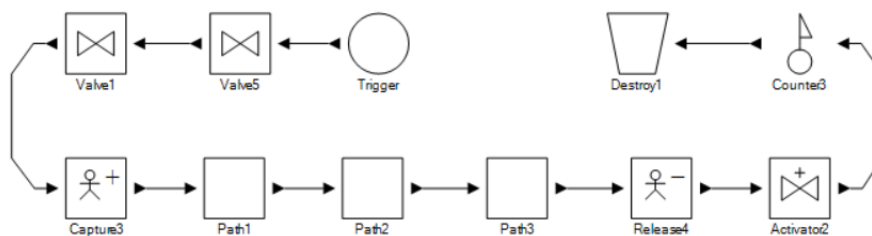
شکل ۱: منابع چرخه عملیات خاکی



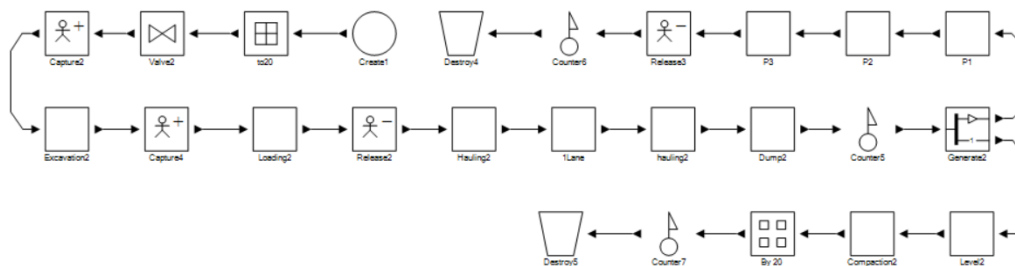
شکل ۲: قسمت اول عملیات خاکی (قرضه ۱)



شکل ۳: عملیات احداث مسیر برای قرضه ۲



شکل ۴: عملیات جابجایی کامیون‌ها بین دو قرضه



شکل ۵: ادامه عملیات خاکی (قرضه ۲)

حال که کلیات مدل توضیح داده شد، به معرفی جزئیات و پارامترهای ورودی مدل پرداخته می‌شود. جهت سهولت فهم مطالب، ابتدا به تعداد منابع پرداخته می‌شود. تعداد منابع مورد استفاده برای اجرای مدل مبتنی بر واقعیت بوده و در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، در جدول ۲ مدت زمان فعالیت‌های مختلف که در مدل شبیه‌سازی وجود دارند آورده شده است. لازم بذکر است که تعداد تمامی منابعی که در جدول فوق ذکر شده‌اند، همان کمیتی است که در برهه کاری مورد استفاده قرار می‌گرفته است.

جدول ۱: منابع مورد استفاده در مدل‌سازی عملیات خاکی

تعداد	معنی مورد اشاره	نام المان
۱۰	کامیون	Trucks
۲	بولدوزر	Dozer
۲	بیل مکانیکی قرضه ۱	exc۱
۲	بیل مکانیکی قرضه ۲	exc۲
۳	غلتک	Roller
۱	ریگر (راهنمای تخلیه)	Spotter
۱	لودر	Loader
۱	عرض معبر مسیر حمل	Road
۱	بولدوزر پشتیبان	dozer_backup
۱	غلتک پشتیبان	roller_backup
۲	کامیون پشتیبان	Truck_backup
۱	لودر پشتیبان	Loader_backup
۱	پیکور	Hammer

در جدول ۲ دو مدت زمان برای هر فعالیت ذکر شده است که یکی از آنها قطعی و دیگری بصورت احتمالاتی است. در قسمت-پیشین اشاره شد که تمامی مدت زمان‌های مورد استفاده از سیستم دیسپچینگ ماشین‌آلات سد استخراج گردیده است که خود سیستم مذکور (پس از به حد نصاب رسیدن اطلاعات) قابلیت ارائه اطلاعات بصورت توزیع‌های احتمالاتی را داراست. در این پژوهش در نظر است تا ابتدا براساس متوسط زمان مدل شبیه‌سازی اجرا شود (روشی که اکثراً در مدیریت پروژه مورد استفاده است) سپس بجای مقادیر قطعی متوسط زمان، از توزیع احتمالاتی متناظر با آن استفاده شود تا امکان مقایسه وجود داشته باشد. پیش از آنکه به بحث منطق مدل پرداخته شود.

جدول ۲: جزئیات فعالیت‌های مدلسازی شده

مرحله	نام المان	تفسیر	واحد فعالیت	متوسط مدت زمان قطعی	مدت زمان احتمالاتی	منابع
جابجایی خاک از قرضه ۱	Excavation ^۱	حفاری در قرضه ۱	۲۰ متر مکعب	۷	Uniform (۶,۸)	بیل مکانیکی ۱
	Loading ^۱	بارگیری کامیون در قرضه ۱	۱ کامیون	۴	Triangular (۲,۴,۶)	لودر-کامیون
	Hauling ^۱	حمل از قرضه ۱ به سایت	۱ کامیون	۱۸	Normal (۱۸,۲)	کامیون
	Dump ^۱	تخلیه	۱ کامیون	۲	Uniform (۱,۳)	ریگر-کامیون
	Return ^۱	بازگشت از سایت به قرضه ۱	۱ کامیون	۱۴	Triangular (۱۰,۱۴,۱۸)	کامیون
	Leveling ^۱	تسطیح	۲۰ مترمکعب	۸	Normal (۸,۱)	بولدوزر
مسیرسازی	Compaction ^۱	کوبیدن	۲۰ مترمکعب	۱۵	Uniform (۱۲,۱۸)	غلنک
	Digging	حفاری (در سنگ)	۲ مترمکعب	۳۰	Constant	پیکور
کامیون‌ها	flattening	تسطیح مسیر قرضه ۲	کل مسیر	۶۰۰	Constant	بولدوزر
	path ^۱	قرضه ۱ تا ابتدای مسیر یکطرفه	۱ کامیون	۴۵	Constant	کامیون
	path ^۲	مسیر یکطرفه	۱ کامیون	۵	Uniform (۳,۷)	کامیون-عرض معبر
جابجایی خاک از قرضه ۲	path ^۳	انتهای مسیر یکطرفه تا قرضه ۲	۱ کامیون	۱۰	Normal (۱۰,۱)	کامیون
	Excavation ^۲	حفاری در قرضه ۲	۲۰ مترمکعب	۷	Uniform (۵,۹)	بیل مکانیکی ۲
	Loading ^۲	بارگیری کامیون در قرضه ۲	۱ کامیون	۴	Triangular (۲,۴,۶)	بیل مکانیکی ۲-کامیون
	Hauling ^۲	حمل از قرضه ۲ تا مسیر یکطرفه	۱ کامیون	۳۸	Normal (۳۸,۵)	کامیون
	Lane ^۱	حمل در مسیر یکطرفه	۱ کامیون	۷	Uniform (۵,۹)	کامیون-عرض معبر
	hauling ^۲	حمل از انتهای مسیر یکطرفه تا سایت	۱ کامیون	۱۴	Normal (۱۴,۲)	کامیون
جابجایی خاک از قرضه ۲ (ادامه)	Dump ^۲	تخلیه	۱ کامیون	۲	Uniform (۱,۳)	ریگر-کامیون
	P ^۱	بازگشت از سایت تا ابتدای مسیر یکطرفه	۱ کامیون	۳۰	Normal (۳۰,۴)	کامیون
	P ^۲	مسیر یکطرفه	۱ کامیون	۵	Uniform (۳,۷)	کامیون-عرض معبر
	P ^۳	انتهای مسیر یکطرفه تا قرضه ۲	۱ کامیون	۱۰	Normal (۱۰,۱)	کامیون
	Level ^۲	تسطیح	۱ کامیون	۸	Normal (۸,۱)	بولدوزر
	Compaction ^۲	کوبیدن	۱ کامیون	۱۵	Uniform (۱۲,۱۸)	غلنک

۴- نتایج

با اجرا مدل در حالت زمان بندی قطعی که بجای استفاده از توزیع احتمالاتی از متوسط توزیع بعنوان یک عدد ثابت استفاده می شود، خروجی های مدل و تفاسیر آنها بشرح ذیل خواهد بود. در حقیقت پارامترهای ورودی مدل در این پژوهش همان اعدادی هستند که در واقعیت در پروژه رخ می دادند. ابتدا جدولی از مقاطع زمانی کلیدی در چرخه عملیات خاک ۴۹۰۰۰۰ مترمکعبی در ادامه ارائه می شود. لازم بذکر است که این مدت زمان ها توسط خود محقق با بررسی شمارشگرهای موجود در مدل بدست آمده اند.

با توجه به جدول ۳، در صورت بکارگیری تعداد گفته شده از انواع ماشین آلات مختلف، کل عملیات ۲۹۸۱ ساعت کاری بطول خواهد انجامید. با توجه به اینکه هر سال از ۵۲ هفته تشکیل شده است و با احتساب ۶ روز کاری در هر هفته و هر روز ۸ ساعت کار، جمع کل ساعات کاری در یک سال برابر ۲۴۹۶ ساعت کاری است. با این اوصاف ۲۹۸۱ ساعت کاری پروژه با اندکی اغماض معادل یک سال و سه ماه کاری (۱۵ ماهه) است. این در شرایطی است که در برنامه ریزی های انجام شده کل کار را ۱۸ ماهه برآورد کرده بودند که در عمل ظرف ۲۰ ماه کار خاتمه یافت. با مقایسه ۲۰ ماه با ۱۵ ماه می توان دریافت که کاری که در عمل باید ۱۵ ماهه تمام می شد بنابه دلایلی ۲۰ ماه طول کشیده است که علت این اختلاف ۵ ماهه می تواند ناشی از بهره وری پایین کار برخی ماشین آلات، تخصیص نامناسب منابع، وجود نقاط گلوگاهی پنهان در کار و بحث های اخلاقی اشاره نمود.

برای اجرای مدل با زمان های احتمالاتی، کافی است تا بجای زمان بندی قطعی در فیلد مدت زمان المان ها از زمان بندی احتمالاتی متناظر (جدول ۲) که از سیستم دیسپچینگ أخذ شده است، استفاده گردد. پس از این تغییر مدل آماده اجرا شدن است. نکته ای که بعنوان یک پارامتر مهم باید در نظر گرفته شود، تعداد دفعات اجرا است. در حالت زمان بندی احتمالاتی با توجه به آنکه در هر توزیع احتمالاتی برای هر اجرا یک عدد تصادفی تولید می شود، ضروری است تا دفعات اجرا را افزایش داده تا متوسط مقادیر به یک عدد همگرا شود و تحلیل ها قابلیت اطمینان بالاتری بیابند. معمولاً در شبیه سازی توصیه می شود که حداقل ۱۰۰۰ بار می بایست مدل های احتمالاتی اجرا شوند تا به همگرایی مناسبی دست یابند (Sobol, 2018). لازم بذکر است که تعداد دفعات بالاتر علیرغم همگرایی بهتر هزینه پردازشی زیادی به پردازنده تحمیل می نماید و مدت زمان بیشتری نیز طول می کشد؛ لذا با توجه به سخت افزار موجود برای ۱۰۰۰ مرتبه مدل شبیه سازی اجرا شد که اجرای مدل برای این تعداد حدود ۸۳۵ دقیقه (معادل ۱۴ ساعت) طول کشید.

جدول ۳: جزئیات فعالیت های مدلسازی شده

فعالیت	شروع (دقیقه)	پایان (دقیقه)	مدت (دقیقه)	مدت زمان (ساعت)
حفاری قرضه ۱	۰	۵۲۵۰۰	۵۲۵۰۰	۸۷۵
تخلیه قرضه ۱ در سایت	۲۹	۶۰۰۶۳	۶۰۰۳۴	۱۰۰۱
کوبیدن خاک کل قرضه ۱	۳۹	۷۵۰۴۷	۷۵۰۱۶	۱۲۵۰
آغاز مسیرسازی	۱۷۵۰	-	-	-
فرآیند حفاری در سنگ (مسیرسازی)	۱۷۵۰	۵۵۰۰	۳۷۵۰	۶۲/۵
تسطیح مسیر	۵۵۰۰	۶۱۰۰	۶۰۰	۱۰
جابجایی کامیون ها	۵۹۳۰۷	۶۰۱۴۰	۸۳۳	۱۴
آغاز حفاری از قرضه ۲	۵۹۳۶۷	-	-	-
حفاری قرضه ۲	۵۹۳۶۷	۱۷۸۷۲۰	۱۱۹۳۵۳	۱۹۹۰
تخلیه قرضه ۲ در سایت	۶۰۱۰۴	۱۷۸۸۳۰	۱۱۸۷۲۶	۱۹۷۹
کوبیدن خاک مورد نیاز	۶۰۱۰۶	۱۷۸۸۵۳	۱۱۸۷۴۷	۱۹۷۹
اتمام عملیات	۰	۱۷۸۸۵۳	۱۷۸۸۵۳	۲۹۸۱

همانگونه که در جدول ۴ قابل ملاحظه است با ۱۰۰۰ مرتبه اجرا، مدت زمان کل عملیات بصورت متوسط برابر ۳۰۳۹ دقیقه است که اختلاف چشمگیری با حالت قطعی آن ندارد اما همین اختلاف ناچیز سبب واقع بینانه تر شدن برنامه ریزی ها و برآوردهای بعدی می گردد. شاید یکی از دلایل این موضوع استفاده از میانگین مدت زمان های احتمالاتی بعنوان ورودی مدل قطعی باشد. با این حال مشاهده می شود که به لحاظ زمانی میان مدل قطعی و مدل احتمالاتی تنها ۵۸ ساعت کاری اختلاف وجود دارد که معادل حدود ۷ روز کاری است.

جدول ۴: مدت زمان فعالیت های اصلی در مدل احتمالاتی

فعالیت	شروع (دقیقه)	پایان (دقیقه)	مدت (دقیقه)	مدت زمان (ساعت)
حفاری قرضه ۱	۰	۵۲۵۲۴	۵۲۵۲۴	۸۷۶
تخلیه قرضه ۱ در سایت	۲۹	۶۲۹۱۴	۶۲۸۸۵	۱۰۴۸
کوبیدن خاک کل قرضه ۱	۴۰	۷۵۱۲۳	۷۵۰۸۳	۱۲۵۲
آغاز مسیرسازی	۱۷۵۷	-	-	-
فرآیند حفاری در سنگ (مسیرسازی)	۱۷۵۷	۵۵۰۹	۳۷۵۲	۶۳
تسطیح مسیر	۵۵۰۹	۶۱۰۹	۶۰۰	۱۰
جابجایی کامیون ها	۶۲۱۰۰	۶۲۹۹۶	۸۹۶	۱۵
آغاز حفاری از قرضه ۲	۶۲۱۵۹	-	-	-
حفاری قرضه ۲	۶۲۱۵۹	۱۸۲۲۳۴	۱۲۰۰۷۵	۲۰۰۲
تخلیه قرضه ۲ در سایت	۶۲۹۳۸	۱۸۲۳۱۶	۱۱۹۳۷۸	۱۹۹۰
کوبیدن خاک مورد نیاز	۷۵۰۱۲	۱۸۲۳۳۸	۱۰۷۳۲۶	۱۷۸۹
اتمام عملیات	۰	۱۸۲۳۳۸	۱۸۲۳۳۸	۳۰۳۹

این مدل برای حالتی که تمامی فعالیت ها دارای توزیع PERT نیز باشند، اجرا شد که نتایج آن بشرح جدول ۵ است.

جدول ۵: مدت زمان فعالیت های اصلی در مدل احتمالاتی

فعالیت	شروع (دقیقه)	پایان (دقیقه)	مدت (دقیقه)	مدت زمان (ساعت)
حفاری قرضه ۱	۰	۵۲۴۸۶	۵۲۴۸۶	۸۷۵
تخلیه قرضه ۱ در سایت	۲۸	۶۲۴۲۷	۶۲۳۹۹	۱۰۴۰
کوبیدن خاک کل قرضه ۱	۳۹	۷۵۰۴۵	۷۵۰۰۶	۱۲۵۰
آغاز مسیرسازی	۱۷۵۰	-	-	-
فرآیند حفاری در سنگ (مسیرسازی)	۱۷۵۰	۵۵۰۳	۳۷۵۳	۶۳
تسطیح مسیر	۵۵۰۳	۶۱۰۳	۶۰۰	۱۰
جابجایی کامیون ها	۶۱۶۶۶	۶۲۵۰۴	۸۳۸	۱۴
آغاز حفاری از قرضه ۲	۶۱۷۰۶	-	-	-
حفاری قرضه ۲	۶۱۷۰۶	۱۸۰۷۰۴	۱۱۸۹۹۸	۱۹۸۴
تخلیه قرضه ۲ در سایت	۶۲۴۷۹	۱۸۰۷۸۱	۱۱۸۳۰۲	۱۹۷۲
کوبیدن خاک مورد نیاز	۷۵۰۵۶	۱۸۰۸۰۴	۱۰۵۷۴۸	۱۷۶۳
اتمام عملیات	۰	۱۸۰۸۰۴	۱۸۰۸۰۴	۳۰۱۴

همانگونه که در جدول ۵ مشاهده می شود، مدت زمان کل پروژه در توزیع پرت از حالت برنامه ریزی قطعی بیشتر و از حالت غیرقطعی کمتر است.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مطالعه عملیات خاکی فرازبند سد دالکی را مورد بررسی قرار می‌دهد و با استفاده از مفاهیم شبیه‌سازی گسسته پیشامد مدت زمان پروژه را در هر یک از روش‌های مسیریحرانی، پرت و احتمالاتی را در فضای شبیه‌سازی نرم‌افزار سیمفونی محاسبه می‌نماید. در حالیکه تیم برنامه‌ریزی پروژه ۲۰ ماه را برای اتمام عملیات خاکی فرازبند در نظر گرفته بود، اما مشخص گردید که کل این عملیات در حالت زمان-بندی قطعی اندکی بیشتر از ۱۴ ماه (که در فصل چهارم بصورت تقریبی ۱۵ ماه ذکر شد ولی مقدار دقیق آن یک سال و ۶۰ روز کاری است) و در زمان‌بندی احتمالاتی حدود ۱۵ ماه طول می‌کشد.

پس از ملاحظه نتایج مدل‌های شبیه‌سازی قطعی و غیرقطعی، نکات کلیدی بدست آمد که در ادامه مختصراً و بصورت تیتروار معرفی می‌گردند:

- ✓ مدت زمان کل پروژه در حالت قطعی و غیر قطعی تفاوت فاحشی ندارد و مدت زمان کل در حالت غیرقطعی رویکردی محافظه-کارانه‌تر دارد (حتی در مقایسه با توزیع پرت).
- ✓ رفتار مدل در حالت قطعی و غیرقطعی نسبت به محرک‌های مختلف مشابه است.
- ✓ ممکن است تمامی نقاط گلوگاهی سیستم‌های ساختمانی بدلیل وابستگی به عوامل خارجی قابل مرتفع‌سازی نباشند و به این تیپ موارد بهتر است در فرآیندهای مدیریت ریسک توجه ویژه‌ای معطوف گردد.
- ✓ تعدد منابع یک فعالیت لزوماً به معنای کاهش مدت زمان آن فعالیت نبوده و چه بسا نه تنها مدت زمان فعالیت را افزایش دهد، بلکه بهره‌برداری از منابع را نیز کاهش دهد.
- ✓ مدت زمان اجرای مدل‌های احتمالاتی بسیار طولانی بوده و این موضوع می‌تواند یکی از دلایل عدم اقبال صنعت نسبت به این روش باشد.
- ✓ بدلیل اینکه پروژه‌های ساخت ماهیتی چند وجهی دارند، برای دستیابی به بهترین برنامه‌ریزی ممکن در پروژه‌های ساخت نیاز به بهینه‌سازی‌های چند معیاره وجود دارد تا گزینه‌ای که بیشترین مطلوبیت را برای شاخص‌های مختلف به همراه دارد بعنوان راه حل اصلی پروژه انتخاب گردد.
- ✓ استفاده از برنامه‌نویسی شیء‌گرا در مدل‌های شبیه‌سازی گسسته پیشامد، علی‌الخصوص برای اعمال شروط منطقی، در خوانا بودن و کوتاهی مدل و به تبع آن کاهش زمان اجرای مدل بسیار اثربخش است.

مراجع

- AbouRizk, S. (۲۰۱۰). Role of simulation in construction engineering and management. *Journal of Construction Engineering and Management*, ۱۳۶(۱۰), ۱۱۴۰-۱۱۵۳.
- Ahuja, H. N., Dozzi, S., & AbouRizk, S. M. (۱۹۹۴). *Project management: techniques in planning and controlling construction projects*: John Wiley & Sons.
- Bernold, L. E., & AbouRizk, S. M. (۲۰۱۰). *Managing performance in construction*: John Wiley & Sons.
- Eastman, C. M. (۲۰۱۸). *Building product models: computer environments, supporting design and construction*: CRC press.
- Gamerman, D., & Lopes, H. F. (۲۰۰۶). *Markov chain Monte Carlo: stochastic simulation for Bayesian inference*: Chapman and Hall/CRC.

- Guida, P. L., & Sacco, G. (۲۰۱۹). A method for project schedule delay analysis. *Computers & Industrial Engineering*, ۱۲۸, ۳۴۶-۳۵۷.
- Hajdu, M., & Isaac, S. (۲۰۱۶). Sixty years of project planning: history and future. *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, ۸(۱), ۱۴۹۹-۱۵۱۰.
- Halpin, D. W., Lucko, G., & Senior, B. A. (۲۰۱۷). *Construction management*: John Wiley & Sons.
- Ran, Q. (۲۰۱۷). Real-Time stopped delay detecting at intersection based on image processing. *Boletin Tecnico/Technical Bulletin*, ۵۵(۵), ۳۱۵-۳۲۲.
- Sadeghi, N., Fayek, A. R., & Gerami Seresht, N. (۲۰۱۶). A fuzzy discrete event simulation framework for construction applications: Improving the simulation time advancement. *Journal of Construction Engineering and Management*, ۱۴۲(۱۲), ۰۴۰۱۶۰۷۱.
- Siu, M.-F. F., Lu, M., & AbouRizk, S. (۲۰۱۵). Resource supply-demand matching scheduling approach for construction workforce planning. *Journal of Construction Engineering and Management*, ۱۴۲(۱), ۰۴۰۱۵۰۴۸.
- Sobol, I. M. (۲۰۱۸). *A primer for the Monte Carlo method*: CRC press.
- Tao, L., Liu, S., Fang, Z., & Yuan, C. (۲۰۱۳). SIGN-GERT model on dynamic analysis for schedule risks of complex equipment development. *Journal of Grey System*, ۲۵(۲), ۱۰۰.
- Vick, S., & Brilakis, I. (۲۰۱۸). Road Design Layer Detection in Point Cloud Data for Construction Progress Monitoring. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ۳۲(۵). doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-0487.0000772