نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

سال دوازدهم، شماره بیست و چهارم، بهار و تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۳۵-۴۷
www.ier.basu.ac.ir

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS

ISSN: 2345-2269

DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2024.29093.2163

استفاده از تکنیک گرت برای مدل‌سازی و تخمین احتمال موفقیت پروژه‌های تصادفی با فرض انجام دوباره‌کاری

شادی صدری[۱]، سید محمدتقی فاطمی‌قمی[۲*]

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲. استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۴۰۲/۱۲/۱۸
پذیرش ۱۴۰۳/۳۰/۱۳
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
زمان‌بندی پروژه
شبکه گرت
دوباره‌کاری
بهینه‌سازی تصادفی
شبیه‌سازی مونت کارلو

خلاصه

یکی از تهدیدها و چالش‌های اساسی در عملکرد پروژه‌ها دوباره‌کاری است که می‌تواند منجربه افزایش ریسک عدم تحویل به‌موقع و با صرف بودجه بیشتر شود. روش‌های کلاسیک زمان‌بندی پروژه، قابلیت مدل‌سازی دوباره‌کاری و ساختار تصادفی پروژه‌ها در فاز برنامه‌ریزی پروژه را ندارند. مطالعه حاضر، با استفاده از تکنیک گرت پروژه‌های تصادفی بافرض وجود امکان دوباره‌کاری را مدل می‌کند. هدف از این مطالعه، انتخاب بهترین حالت اجرایی برای هر فعالیت است به‌گونه‌ای که پروژه در مدت‌زمان معین با صرف منابع دردسترس محدود خاتمه یابد. در این مطالعه، محققین یک مسأله زمان‌بندی پروژه بافرض محدودیت منابع و توازن زمان-هزینه برای یافتن نتایج مطلوب پیش‌از وقوع قطعی پارامترهای تصادفی توسعه داده‌اند. مسأله موردنظر با استفاده از رویکرد تئوری گراف جریان، قانون میسون و روش شبیه‌سازی مونت کارلو حل شده است. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، یک مثال موردی عددی توسعه یافته است که نتایج حل آن، توانمندی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و افزایش رقابت، یکی از دغدغه‌های اصلی مدیران پروژه، تکمیل و تحویل به‌موقع پروژه‌ها در چارچوب زمان و هزینه موردنظر است. با این‌حال، رخداد دوباره‌کاری ازجمله تهدیدهای اصلی برای تحویل به‌موقع پروژه است. منظور از دوباره‌کاری عبارت است از تنظیم، اصلاح و در برخی مواقع انجام مجدد کارهایی که قبلاً به‌طور کامل انجام شده‌اند ولی منطبق با الزامات و کیفیت موردنظر نیستند. دوباره‌کاری می‌تواند منجربه تأخیر زمانی، افزایش هزینه و مشکلات کیفی شود که این امر سبب تغییر در بودجه و عملکرد پروژه خواهد شد [۱]. در پروژه‌های واقعی رخداد دوباره‌کاری امری طبیعی است و این موضوع می‌تواند در پروژه‌های تولیدی ([۲-۴]) پروژه‌های عمرانی [۵,۶]، پروژه‌های توسعه نرم‌افزار [۷]، پروژه‌های توسعه محصول جدید [۸] و سایر انواع پروژه‌ها رخ دهد.

در راستای کاهش تأثیر تغییرات در فاز اجرایی پروژه بر روی نتیجه پروژه، لازم است که امکان وقوع دوباره‌کاری به‌ازای برخی فعالیت‌ها در فاز برنامه‌ریزی پروژه پیش‌بینی و در زمان‌بندی پروژه لحاظ گردد. در روش‌های کلاسیک زمان‌بندی پروژه ازقبیل روش مسیر بحرانی و تکنیک بررسی برنامه و ارزیابی (پرت) فرض بر این است که احتمال رخداد دوباره‌کاری صفر است. ازآنجایی‌که این فرض در پروژه‌های عملی غیرواقعی است، لذا نیاز به توسعه روش‌هایی است که بتوانند پروژه‌ها را بافرض امکان رخداد دوباره‌کاری زمان‌بندی کنند. به‌طور کلی، هدف در مسائل زمان‌بندی، انجام به‌موقع فعالیت‌ها و بهره‌وری حداکثر منابع می‌باشد [۹]. تکنیک ارزیابی و بررسی گرافیکی (گرت) که برای اولین‌بار توسط پریتسکر [۱۰] مطرح شد، یک روش مناسب برای

* نویسنده مسئول: سید محمدتقی فاطمی قمی
تلفن: ۶۴۵۴۵۳۸۱-۰۲۱؛ پست الکترونیکی: fatemi@aut.ac.ir

درنظر گرفتن امکان رخداد حلقه در شبکه پروژه است. پریتسکر [۱۰] تکنیک گرت را بر پایه نظریه نمودار جریان سیگنال و توابع مولد گشتاور و ضرایب انتقال ارائه کرده است. ازآنجایی‌که رخداد دوباره‌کاری احتمالی است و عوامل مختلفی در وقوع آن تأثیرگذارند، درنظر گرفتن امکان دوباره‌کاری در فاز برنامه‌ریزی منجربه عدم قطعیت ساختار شبکه پروژه می‌شود. در چنین شبکه‌هایی برای هر فعالیت دو پارامتر تعریف می‌شود: ۱) احتمال رخداد فعالیت در خلال اجرای پروژه، ۲) مدت‌زمان انجام فعالیت در خلال اجرای پروژه. برخلاف روش‌های شبکه‌ای کلاسیک (روش مسیر بحرانی و پرت) که وقوع هر فعالیت قطعی است، در شبکه گرت هر فعالیت می‌تواند با احتمالی کمتر از یک وقوع یابد. علاوه‌بر این، یک فعالیت می‌تواند پس‌از پایان یافتن یکی از فعالیت‌های پیش‌نیازی آغاز شده و بیش‌از یک بار وقوع یابد. این مشخصه شبکه‌های گرت، سبب می‌شود که این شبکه‌ها برای مدل‌سازی اغلب پروژه‌های تصادفی واقعی ازجمله پروژه‌های تحقیق و توسعه [۱۱]، بازاریابی [۱۲]، توسعه نرم‌افزار [۱۳] و بسیاری دیگر از پروژه‌هایی که ساختار تصادفی و امکان دوباره‌کاری دارند، مناسب باشند.

علی‌رغم مطالعات بسیاری که در حوزه مدیریت دوباره‌کاری و بررسی علل آن انجام شده است [۱۸-۱۴]، مطالعات اندکی فرض دوباره‌کاری را در فاز برنامه‌ریزی پروژه درنظر گرفته‌اند [۸,۱۹,۲۰]. همچنین تعداد محدودی مطالعه از ابزار شبکه گرت برای مدل‌سازی زمان‌بندی پروژه بافرض دوباره‌کاری استفاده کرده‌اند [۲۴-۲۱]. کلیه مطالعات پیشین، از درنظر گرفتن ریسک کمبود منبع برای انجام عملیات دوباره‌کاری صرف‌نظر کرده‌اند. در این تحقیقات، محدودیت منابع درنظر گرفته نشده است، بنابراین استفاده از نتایج آن‌ها در پروژه‌هایی واقعی امکان‌پذیر نمی‌باشد. در اغلب پروژه‌های واقعی، مدت‌زمان انجام فعالیت به تعداد منابع تخصیص داده شده برای آن فعالیت بستگی دارد. ازاین‌رو، در مطالعه حاضر، سعی بر این بوده است که شرایط دنیای واقعی در مفروضات مسأله لحاظ شود.

در این مطالعه، محققین به بررسی مسأله زمان‌بندی یک پروژه تصادفی بافرض محدودیت منابع دردسترس و امکان دوباره‌کاری برخی فعالیت‌ها پرداخته‌اند. بدین منظور، از شبکه گرت برای مدل‌سازی پروژه استفاده شده است. پارامترهای غیرقطعی مدل عبارتند از: ۱) احتمال رخداد هر فعالیت، ۲) مدت‌زمان انجام هر فعالیت. ویژگی بارز این مطالعه درنظر گرفتن وابستگی زمان انجام هر فعالیت به‌میزان منبع تخصیص داده شده به آن فعالیت است. در این مسأله فرض می‌شود زمان انجام هر فعالیت تصادفی بوده و به‌ازای هر سطح منبع تخصیص‌یافته، از یک تابع توزیع احتمالی با پارامترهای میانگین و واریانس معلوم پیروی می‌کند. لذا، جهت حل مدل تصادفی، سناریوهای مختلفی به‌ازای رخداد ترکیب مختلفی از فعالیت‌ها و تشکیل مسیرهای گوناگون از ابتدای پروژه تا انتهای آن تعریف شده است. ازآنجایی‌که افزایش میزان دوباره‌کاری به‌ازای هر فعالیتی که نیاز به بازبینی دارد منجربه رشد تصاعدی تعداد سناریوهای مسیر انجام پروژه خواهد شد، لذا فرض بر محدود بودن تعداد عملیات دوباره‌کاری است. این فرض با شرایط دنیای واقعی نیز هم‌خوانی دارد، زیرا انجام عملیات بیش‌از تعداد معینی منجربه صرف زمان و هزینه بیهوده شده و از لحاظ اقتصادی در اغلب موارد ترک عملیات مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. هدف اصلی این مطالعه، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی فعالیت‌ها در شبکه گرت است به‌نحوی‌که مدت‌زمان تکمیل پروژه کمینه شده، محدودیت دردسترس بودن منابع برقرار بوده و پروژه پیش‌از موعد مقرر در قرارداد تکمیل و تحویل داده شود. بدین منظور، یک مسأله زمان‌بندی پروژه بافرض محدودیت منابع و توازن زمان-هزینه (MTCT-RCPSP) توسط شبکه گرت مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل از حل این مدل، مجموعه‌ای از تصمیمات پیش‌از وقوع پارامترهای تصادفی را نتیجه می‌دهد. برای حل مدل تصادفی پیشنهادی، با استفاده از تکنیک سناریوسازی، همتای قطعی این مدل توسعه یافته است. نتایج حل مدل همتای قطعی بهینه‌ترین حالت توازنی زمان-هزینه برای انجام هر فعالیت را نشان می‌دهد. ازآنجایی‌که در هر پروژه‌ای هزینه‌ها ناشی از صرف منابع هستند، در ادامه این مطالعه دو اصطلاح منبع و هزینه می‌توانند جایگزین یکدیگر باشند.

ادامه این مطالعه بدین صورت خواهد بود: در بخش ۲، مروری کوتاه بر ادبیات موضوع و مطالعات پیشین انجام شده و پس‌از نتیجه‌گیری در مورد لزوم انجام این مطالعه، در بخش ۳، فرضیات مسأله و مدل شبکه‌ای توسعه‌یافته تشریح خواهد شد. در بخش ۴، رویکرد حل پیشنهادی تشریح شده و نتایج عددی حاصل از حل مدل در بخش ۵ گزارش می‌شود. در بخش ۶، کلیات مطالعه جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهند شد.

۲. مرور ادبیات

در طول سالیان مختلف مطالعات بسیاری در حوزه مدیریت دوباره‌کاری انجام شده است [۸,۲۵,۲۶]. هدف اغلب این مطالعات، تعیین علل وقوع دوباره‌کاری و تأثیر آن بر هزینه و عملکرد پروژه بوده است [۳,۴,۱۱,۱۴,۱۷,۲۷]. در ادبیات موضوع، دوباره‌کاری در پروژه‌های ساخت مورد توجه محققین بسیاری بوده است [۳۲-۲۸,۶,۵]. علی‌رغم مطالعات زیادی که در حوزه شناسایی تأثیر دوباره‌کاری بر زمان و هزینه پروژه‌ها صورت گرفته است، هیچ ابزار و تکنیک مناسبی برای مدیریت و کاهش ریسک وقوع دوباره‌کاری توسعه نیافته است. روش-های کلاسیک زمان‌بندی پروژه ازقبیل روش مسیر بحرانی، شبکه پرت و گانت چارت سالیان طولانی به‌عنوان ابزار مناسبی برای زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، با این‌حال این روش‌ها قابلیت مدل‌سازی دوباره‌کاری و ایجاد حلقه در شبکه را ندارند. روش ماتریس ساختار طراحی که برای اولین‌بار توسط استوارد [۳۳] معرفی شد، روش قدرتمندی برای مدل‌سازی روابط دوباره‌کاری در شبکه است [۸,۱۹,۲۰]. علاوه‌بر این روش، روش‌های فراابتکاری از قبیل الگوریتم ژنتیک [۳۴] و روش جستجوی کوکو [۳۵] نیز مورد توجه بوده‌اند.

ازآنجایی‌که دوباره‌کاری فعالیتی احتمالی است، درنظر گرفتن

احتمال رخداد آن منجربه تصادفی شدن شبکه پروژه می‌شود. تکنیک گرت یک روش شماتیکی دیگر برای نمایش دوباره‌کاری و روابط پیش‌نیازی تصادفی در شبکه است. برای اولین‌بار، پریتسکر [۱۰] این روش را برای تجزیه و تحلیل شبکه‌هایی با ساختار نمایش فعالیت بر روی یال (AOA) ارائه کرد. مشخصه اصلی روش گرت مدل‌سازی حلقه بازخورد و دوباره‌کاری در شبکه است. این قابلیت روش گرت آن را به ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی پروژه‌های واقعی تبدیل کرده است. زیرا وقوع دوباره‌کاری در پروژه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. به‌عنوان مثال، راندولف و همکاران [۳۶] یک فرآیند آموزش-یادگیری را با استفاده از تکنیک گرت مدل‌سازی کرده و زمان تکمیل پروژه را با استفاده از رابطه توپولوژی محاسبه کردند. کلایتون و هوک [۳۷] از تکنیک گرت برای محاسبه تابع توزیع چندین متغیر تصادفی مستقل استفاده کردند. تیلور و داویس [۳۸] متوسط زمان و هزینه استفاده از سیستم مانند سیستم کنترل موجودی را با استفاده از گرت به‌دست آوردند. نومن و زیرمن [۳۹] با استفاده از این تکنیک، مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی بافرض تصادفی بودن مدت‌زمان اجرای فعالیت و روابط پیش‌نیازی را حل کردند. یو و ژو [۱۳] با استفاده از گرت سناریوهای مختلف احتمال رخداد دوباره‌کاری را در پروژه‌های توسعه نرم‌افزار مورد بررسی قرار دادند. ژنگ و همکاران [۴۰] نیز مورد مشابهی در توسعه محصولات با تکنولوژی بالا را مطالعه کردند. ژو و همکاران [۴۱] از ابزار گرت برای پیش‌بینی میزان نرخ محصولات بازیافتی استفاده کردند. چندین سال بعد، لیو و همکاران [۴۲] از گرت برای مدل‌سازی پروژه‌های توسعه تجهیزات پیچیده بهره گرفتند. همچنین نلسون و همکاران [۴۳] از این ابزار برای مدل‌سازی پروژه توسعه محصول جدید استفاده نمودند. طالش حسینی و همکاران [۴۴] نیز یک پروژه اکتشاف معدن را با روش گرت مدیریت کردند.

تمام مطالعات مروری در بالا، حلقه‌های بازخورد و دوباره‌کاری در پروژه‌ها را مدنظر قرار داده‌اند. ویژگی مشترک این مطالعات این است که از درنظر گرفتن تأثیر محدودیت منابع بر زمان تکمیل پروژه صرف‌نظر کرده‌اند. در واقعیت، محدودیت منابع امری بسیار مهم و تأثیرگذار در تعیین زمان هریک از مایلستون‌های پروژه است. در ادبیات موضوع، تعدادی از مطالعات را می‌توان یافت که از تکنیک‌های شبیه‌سازی برای زمان‌بندی پروژه‌های تصادفی گرت بافرض محدودیت منابع استفاده کرده‌اند [۴۸-۴۵]. آریزاوا و المغربی [۴۵] اولین کسانی بودند که فرض توازن زمان-هزینه را در شبکه‌های گرت مطرح کردند. آن‌ها در مطالعه خود برای بهینه‌سازی زمان و هزینه تکمیل پروژه در شرایطی که میان میزان پیشرفت برنامه‌ای و پیشرفت واقعی فاصله وجود دارد، زمان انجام فعالیت‌ها را ازطریق افزایش سرمایه کاهش دادند. سال‌ها بعد، تائو و همکاران [۴۸] همان مسأله را با استفاده از گرت مبتنی‌بر تابع مشخصه و الگوریتم ژنتیک حل کردند. با وجود دستاورد مهم این دو مطالعه، بایستی توجه شود که ارزیابی و برآورد صحیح و دقیق زمان و هزینه در فازهای آغازین مدیریت پروژه ازجمله مرحله انعقاد قرارداد و تعیین برنامه زمانی اجرا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عدم درنظر گرفتن احتمال رخداد دوباره‌کاری در برخی فعالیت‌ها، سبب افزایش ریسک شکست پروژه در اجرای به‌موقع و مطابق برنامه زمانی و در چارچوب هزینه خواهد شد. در اغلب پروژه‌ها، وقوع دوباره‌کاری امری اجتناب‌ناپذیر است و تیم برنامه‌ریزی بایستی هزینه و زمان دوباره‌کاری را در برنامه خود لحاظ کند.

هدف از پژوهش جاری، پوشش این شکاف تحقیقاتی بوده و محققین درصدد ارائه رویکردی برای تعیین میزان منبع مورد نیاز برای انجام هر فعالیت و برآورد زمان تکمیل پروژه پیش‌از آغاز اجرای آن هستند. در این مطالعه، محققین چندین حالت ترکیبی مختلف از زمان و منبع برای اجرای هر فعالیت درنظر گرفته‌اند، به‌طوری‌که با افزایش سطح منابع مدت‌زمان انجام فعالیت کاهش می‌یابد. باتوجه به پیچیدگی بالای مسأله موردنظر، از تکنیک شبیه‌سازی برای حل مدل استفاده شده است.

۳. مدل‌سازی مسأله

پروژه‌ای را درنظر بگیرید که به‌ازای انجام برخی فعالیت‌ها، یکی از فعالیت‌های بعدی با احتمالی معین اتفاق خواهد افتاد. به‌عبارتی دیگر، رخداد فعالیت بعدی وابسته به نتیجه انجام فعالیت فعلی است. به‌عنوان مثال، در پروژه‌های برنامه‌ریزی تحصیلی برای دانشجویان دوره کارشناسی، بسته به این‌که دانشجو بتواند درسی را در پایان ترم با موفقیت پشت سر بگذارد، بر انتخاب دروس ترم بعدی تأثیرگذار خواهد بود. همچنین، ممکن است نتیجه انجام یک فعالیت با معیارهای کیفی موردنظر مطابق نبوده و نیاز به دوباره‌کاری و یا تکرار حلقه‌ای از فعالیت‌ها باشد. برای مدل‌سازی و زمان‌بندی چنین پروژه‌ای بایستی از تکنیکی استفاده شود که قابلیت مدل‌سازی فعالیت‌های احتمالی و همچنین ایجاد حلقه و دوباره‌کاری را داشته باشد.

تکنیک گرت یک ابزار تحلیلی قدرتمند برای مدل‌سازی پروژه‌های تصادفی است تا یک چشم‌اندازی از وضعیت اجرای پروژه و زمان تحویل و مسیر اجرایی آن به مدیران مربوطه ارائه کند. یکی از قابلیت‌های اصلی این تکنیک، مدل‌سازی دوباره‌کاری در پروژه‌های تصادفی است. باتوجه به تنوع نوع گره‌ها در شبکه‌های گرت، می‌توان ترکیب مختلفی از گره‌ها را برای نمایش حالات مختلف استفاده کرد. در شبکه‌های گرت هر گره از دو قسمت ورودی و خروجی تشکیل شده است که ترکیب حالت‌های مختلفی از ورودی‌ها و خروجی‌ها انواع گره‌ها را تشکیل می‌دهند. انواع مختلف ورودی‌ها و خروجی‌ها در جدول (۱) تشریح شده‌اند [۱۰].

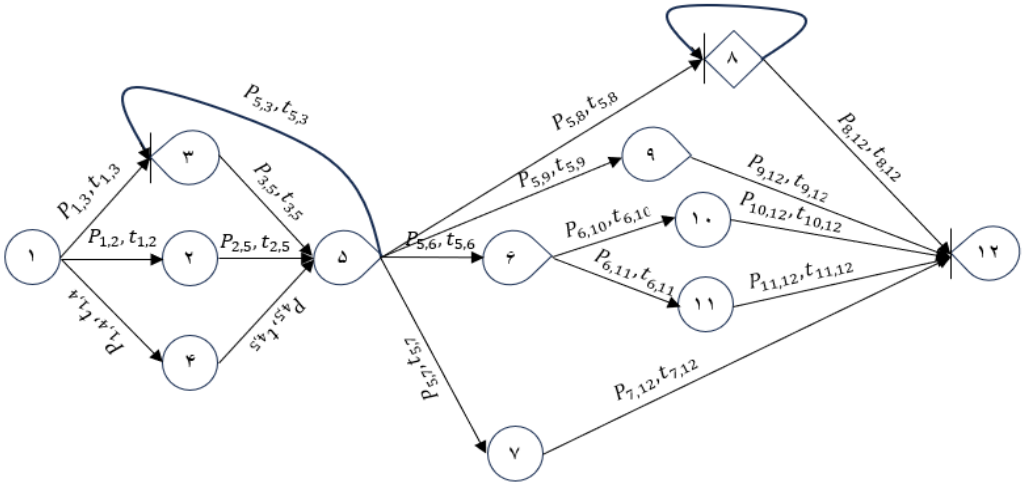
باتوجه به توضیحات مندرج در جدول (۱)، تنها گره با ورودی نوع "یای خاص" برای مدل‌سازی دوباره‌کاری و حلقه بازخوردی مناسب است. علت این امر این است که به‌ازای ورودی نوع "و"، می‌بایست کلیه یال‌های ورودی اتفاق بیفتند تا آن گره وقوع یابد. ولی بایستی توجه داشت که یال مربوط به دوباره‌کاری بعد از وقوع گره مربوطه و پایان فعالیت، فعال می‌شود. همچنین، به‌ازای ورودی نوع "یای عام"، به‌محض این‌که یکی از فعالیت‌های پیشین تکمیل شود، گره فعال

می‌شود و سایر یال‌ها (فعالیت‌ها) شانسی برای تکمیل شدن ندارند [۱۰].

براساس مفروضات این پژوهش، یک پروژه موردی برای مطالعه و مدل‌سازی انتخاب شده است. برای مدل‌سازی مسأله مفروض، از یک شبکه برداری (AOA) برای نمایش فعالیت‌ها و روابط پیش‌نیازی استفاده می‌شود. شبکه $V = (A\ , I)$ که در شکل (۱) نمایش شده است را به‌عنوان شبکه نمایش پروژه درنظر بگیرید. گره‌های این شبکه (A) نشان‌دهنده رویداد شروع یا پایان یک یا چند فعالیت متصل و یال‌های آن (I) نمایشگر فعالیت‌ها $(I = \{(i,j)|i \le j, i,j \in A\})$ و روابط پیش‌نیازی برای انجام فعالیت‌ها هستند. شبکه دارای یک رویداد شروع است که در لحظه صفر اتفاق می‌افتد و نیاز به هیچ منبعی ندارد، ازطرفی شبکه‌های گرت برخلاف روش‌های شبکه‌ای کلاسیک می‌توانند یک یا چند رویداد پایان داشته باشند، که این رویدادها نیز نیاز به منبع ندارند. باتوجه به تعاریف ارائه شده در جدول (۱)، در این شبکه الزامی به رخداد کلیه فعالیت‌ها نیست و برخی از فعالیت‌ها با احتمالی کمتر از یک اتفاق می‌افتند. احتمال وقوع هر فعالیت توسط پارامتر $P_{(i,j)}$ مشخص می‌شود. اندیس i نمایشگر رویداد شروع و اندیس j نمایشگر رویداد پایان فعالیت است. در یک شبکه گرت، هر فعالیت توسط دو پارامتر معرفی می‌شود: پارامتر احتمال رخداد فعالیت $(P_{(i,j)})$ و پارامتر مدت‌زمان انجام فعالیت به شرط وقوع آن فعالیت $(t_{(i,j)})$. چنانچه در طول اجرای پروژه، فعالیتی وقوع نیابد، مدت‌زمان انجام آن صفر درنظر گرفته می‌شود. فرض اصلی این پژوهش، درنظر گرفتن همبستگی میان زمان و منبع است. هر فعالیت $((i,j) \in I)$ می‌تواند به M حالت مختلف با صرف سطوح مختلفی از منابع انجام شود. به‌عبارتی دیگر، منظور از حالت انجام فعالیت ترکیبی از دو پارامتر زمان و منبع $(t_{i,j,m}, r_{i,j,m})$ می‌باشد. بنابراین فرض، مدت‌زمان انجام فعالیت (i,j) در حالت $m \in M$ یک متغیر تصادفی است که پارامتر میانگین آن تابعی نزولی از میزان منبع تجدیدپذیری است که برای اجرا به آن فعالیت تخصیص داده شده است. در این پژوهش، برای کاهش پیچیدگی حل مسأله، برای انجام هر فعالیت، تنها یک نوع منبع تجدیدپذیر مانند نیروی انسانی، تجهیزات و ماشین‌آلات درنظر گرفته شده است.

جدول (۱). انواع حالات ورودی و خروجی گره‌های شبکه گرت

سمت ورودی گره			سمت خروجی گره		
نماد	نام	توضیح	نماد	نام	توضیح
	یای خاص Exclusive-or	برای وقوع این گره لازم است یک و تنها یکی از یال‌های ورودی اتفاق بیفتد.		احتمالی Probabilistic	درصورت وقوع گره، تنها یکی از یال‌های خروجی با احتمال مشخص اتفاق خواهد افتاد.
	یای عام Inclusive-or	برای وقوع این گره، لازم است یکی از یال‌های ورودی اتفاق بیفتد. به‌عبارتی دیگر، هر یالی که سریع‌تر اتفاق بیفتد منجربه وقوع گره خواهد شد.		قطعی Deterministic	درصورت وقوع گره، کلیه یال‌های خروجی اتفاق خواهند افتاد.
	و And	برای وقوع این گره، لازم است کلیه یال‌های ورودی اتفاق بیفتند.			



شکل (۱) شبکه برداری پروژه

فرض دیگری که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، امکان انجام دوباره‌کاری و یا تکرار مجدد مجموعه‌ای از فعالیت‌ها است. همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، تعداد دفعات انجام دوباره‌کاری و یا تکرار مجدد محدود می‌باشد. برای کاهش پیچیدگی مسأله فرض می‌شود که در هر تکرار دوباره‌کاری تعداد منابع و زمان مصرف شده ثابت است. ازآنجایی‌که تخمین زمان و هزینه تکمیل پروژه به‌ازای پروژه‌های تصادفی امری دشوار است، در اغلب موارد احتمال تکمیل پروژه در زمان موردنظر برآورد می‌شود.

لذا در این پژوهش یک مسأله تصادفی MTCT-RCPSP با هدف تعیین احتمال تکمیل پروژه در مدت‌زمان T مدل می‌شود. پارامترهای مسأله مفروض در جدول (۲) تعریف شده‌اند. باتوجه به ماهیت تصادفی مسأله و پیچیدگی درنظر گرفتن منابع تجدیدپذیر در حل مسأله، امکان استفاده از روش‌های دقیق نیست.

جدول (۲). پارامترهای مدل MTCT-RCPSP

پارامتر	شرح
A	مجموعه رویدادها/گره‌های شبکه
I	مجموعه فعالیت‌ها/یال‌های شبکه
i	اندیس نشان‌دهنده رویداد شروع برای هر فعالیت $i \in A$
j	اندیس نشان‌دهنده رویداد پایان برای هر فعالیت $j \in A$
$U_{(i,j)}$	مجموعه فعالیت‌های پیش‌نیاز فعالیت (i,j)
$\mathcal{P}$	مجموعه مسیرهای شبکه
l	اندیس نشان‌دهنده یک مسیر در شبکه پروژه، $l \in \mathcal{P}$
M	مجموعه حالت‌های ممکن برای انجام هر فعالیت
m	اندیس نشان‌دهنده حالت انجام فعالیت $m \in M$
$P_{(i,j)}$	احتمال رخداد فعالیت (i,j)
$Es_{(i,j)}$	زمان وقوع رویداد آغاز فعالیت (i,j)
$Ef_{(i,j)}$	زمان وقوع رویداد پایان فعالیت (i,j)
$t_{(i,j,m)}$	مدت‌زمان انجام فعالیت (i,j) در حالت m
$r_{(i,j,m)}$	میزان منبع تجدیدپذیر موردنیاز برای انجام فعالیت (i,j) در حالت m
$c_{(i,j)}$	شمارنده تعداد دفعات انجام فعالیت (i,j)
R	میزان کل منبع دردسترس
T	مدت‌زمان قراردادی برای تکمیل پروژه
t_F	زمان تکمیل پروژه

بدین ترتیب محققین از رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو که ازجمله رویکردهای رایج در ادبیات موضوع است، برای حل مسأله و تعیین استراتژی بهینه جهت تخصیص منابع و بیشینه کردن احتمال تکمیل پروژه در مدت‌زمان قراردادی پروژه بهره گرفته‌اند.

۴. رویکرد حل مسأله

همان‌طور که در مطالعه [۱۰] مطرح شده است، شبکه‌های گرت دارای یک گره منبع و حداقل یک گره مقصد هستند. برای حل مسائلی که توسط این شبکه‌ها مدل‌سازی شده‌اند، تعیین دو پارامتر ضروری است: ۱) احتمال وقوع هریک از گره‌های مقصد، ۲) متوسط زمان لازم برای رخداد هر گره مقصد. بدین منظور، [۱۰] یک روش حل جدید مبتنی‌بر نظریه گراف جریان ارائه کرد. با استفاده از این روش می‌توان شبکه پروژه را فشرده کرده تا به یک یال میان نقطه مبدأ و مقصد (یال معادل شبکه) تبدیل شود و محاسبات لازم برای تخمین هریک از پارامترهای لازم را انجام داد. در این پژوهش، محققین برای تخمین احتمال وقوع گره مقصد در شبکه از روش پیشنهادی [۱۰] استفاده کرده‌اند. در ابتدا، پارامترهای معرف هر فعالیت، $P_{i,j}$ و $t_{i,j,m}$، به یک پارامتر ضرب‌پذیر تبدیل می‌شوند. ازآنجایی‌که پارامتر زمان قابلیت ضرب‌پذیری ندارد، از پارامتر تابع مولد گشتاور زمان استفاده می‌شود. ازطرف دیگر، با درنظر داشتن امکان دوباره‌کاری، یک پارامتر شمارنده تعداد دفعات انجام $(c_{i,j})$ نیز برای شناسایی هر فعالیت ضروری است. لذا، با انجام عملیات ضرب، این سه پارامتر به یک پارامتر مشخصه، $w_{(i,j,m)}$، تبدیل می‌شوند.

$$w_{(i,j,m)} = P_{(i,j)} \times M_{t_{(i,j,m)}}(s) \times M_{c_{(i,j)}}(z)$$
$$= P_{(i,j)} \times \left[\sum_{t_{(i,j,m)}} e^{s t_{(i,j,m)}} \times P\left(t_{(i,j,m)}\right)\right] \times e^{z} \quad (۱)$$

باتوجه به قانون میسون درنظریه گراف جریان [۴۷] و قوانین کاهش فشرده‌سازی شبکه که توسط [۱۰] ارائه شده است، پارامتر مشخصه برای یال معادل از رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$W_E(s,z) = \frac{\sum_{l\in\mathcal{P}} \text{Path } (l)[1 + \sum_b (-1)^b (\text{loops of order } b \text{ not touching Path } l)]}{[1 + \sum_b (-1)^b (\text{loops of order } b)]} \quad (۲)$$

در این رابطه، مسیر l، دنباله‌ای از یال‌ها است که از مبدأ آغاز شده و در گره مقصد موردنظر پایان می‌یابد، و حلقه با طول b، به ضرب b حلقه مجزا اشاره می‌کند. در مرحله بعد، باتوجه به عدم تأثیرگذاری پارامترهای زمان و تعداد دفعات انجام بر احتمال رخداد گره مقصد، پارامترهای مصنوعی s و z برابر صفر درنظر گرفته می‌شوند. بدین ترتیب، احتمال رخداد هر گره مقصد از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$P_E = W_E(0,0) \quad (۳)$$

به‌طور مشابه، به‌دلیل عدم تأثیر احتمال رخداد و زمان انجام فعالیت بر تعداد دفعات تکرار آن فعالیت، برای محاسبه متوسط تعداد دفعات انجام یک فعالیت پارامتر s معادل صفر درنظر گرفته شده و با مشتق‌گیری از رابطه $W_E(s,z)$ نسبت به پارامتر z و سپس برابر صفر درنظر گرفتن مقدار z $(\frac{\partial W_E(0,z)}{\partial z}|_{z=0})$، مقدار مطلوب به‌دست می‌آید. ازآنجایی‌که تعداد دفعات رخداد یک فعالیت مشروط به‌وقوع آن فعالیت است، مقدار دقیق متوسط تعداد دفعات انجام یک فعالیت از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$E\left(c_{(i,j)}\right) = \hat{\mu}_{(i,j)} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{W_E(0,z)}{W_E(0,0)}\right]_{z=0} \quad (۴)$$

ازآنجایی‌که در مطالعه حاضر فرض انجام دوباره‌کاری برقرار است، برای جلوگیری از رشد تصاعدی تعداد سناریوهای شبیه‌سازی فرض می‌شود که متوسط تعداد دفعات انجام هر فعالیت، حد بالای تعداد

دفعات مجاز برای انجام آن فعالیت است.

در ادامه، برای تعیین دومین پارامتر ضروری در مدل گرت از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. بنابراین براساس سناریوهای شبیه‌سازی شده و مدل MTCT-RCPSP مطرح شده در بخش ۳، می‌توان تابع توزیع و یا به‌عبارتی احتمال تکمیل پروژه در زمان معین را تخمین زد. روش شبیه‌سازی مونت کارلو ازجمله الگوریتم‌های محاسباتی است که براساس سناریوهای تصادفی تکراری می‌تواند احتمال وقوع طیف وسیعی از نتایج را محاسبه کند. به‌عبارتی دیگر، این روش یک رویکرد ریاضیاتی برای تخمین احتمال پیشامدهای یک رویداد تصادفی است. در این روش، باتوجه به تابع توزیع احتمالی هریک از پارامترهای تصادفی مدل، تعداد زیادی نمونه تصادفی تولید می‌شود که هریک ترکیب از این نمونه‌ها یک سناریو نامیده می‌شود. برای افزایش دقت نتایج حاصل، می‌بایست تعداد کثیری سناریو تولید شود. براساس نتایج حاصل از سناریوهای مختلف می‌توان نتایج مدل را تخمین زد. در مسأله مفروض این پژوهش، محدودیتی بر روی نوع تابع توزیع نیست و هریک از پارامترهای تصادفی مدل (احتمال وقوع یک فعالیت و مدت‌زمان انجام آن فعالیت) می‌توانند از هر تابع توزیعی تبعیت کنند. باتوجه به مفروضات مسأله و تنوع گره در شبکه‌های گرت، لازم است شرایط زیر در محاسبه زمان وقوع رویداد آغاز یک فعالیت درنظر گرفته شود:

۱) به‌ازای هر گره با ورودی نوع "و"، زمان وقوع آن رویداد عبارت است از:

$$Es_{(i,j)} = \max_{(k,i)\in U_{(i,j)}} \{Ef_{(k,i)}\} \quad (۵)$$

۲) به‌ازای هر گره با ورودی نوع "یای عام"، زمان وقوع آن رویداد عبارت است از:

$$Es_{(i,j)} = \min_{(k,i)\in U_{(i,j)}} \{Ef_{(k,i)}\} \quad (۶)$$

۳) به‌ازای هر گره با ورودی نوع "یای خاص"، زمان وقوع آن رویداد عبارت است از:

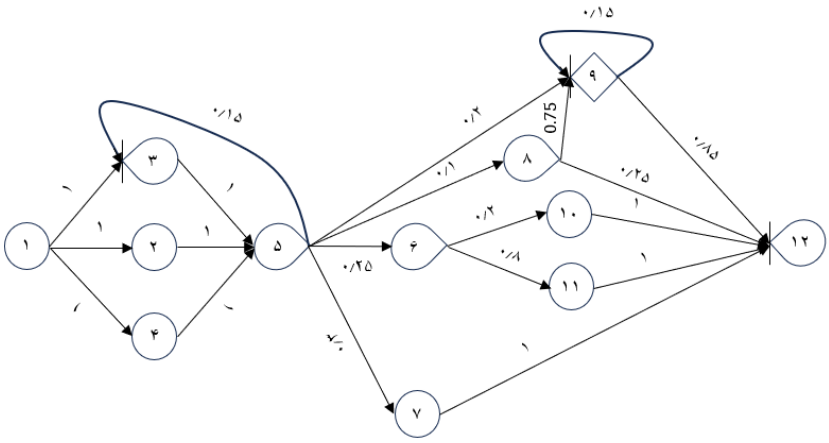
$$Es_{(i,j)} = Ef_{(k,i)}, \quad (k,i) \in U_{(i,j)} \quad (۷)$$

لازم به ذکر است که به‌ازای حالت (۳) زمان وقوع رویداد آغاز فعالیت (i,j) برابر زمان وقوع رویداد پایان آن فعالیت پیش‌نیازی است که رخ داده است. با درنظر داشتن هدف مطالعه که کمینه کردن مدت‌زمان و تخمین احتمال موفقیت پروژه در یک بازه زمانی مشخص است، زمان وقوع گره آغاز یک فعالیت برابر با زمان وقوع گره پایان فعالیت پیش‌نیاز فرض شده است. با استفاده از نتایج حاصل از پیاده‌سازی این روش می‌توان تابع توزیع زمان تکمیل پروژه را نیز برآورد کرد.

۵. مثال عددی

در این بخش، با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو به حل یک مثال عددی از تخمین احتمال تکمیل پروژه در یک زمان مشخص بافرض وابستگی زمان انجام یک فعالیت به‌میزان منبع تخصیص‌یافته به آن فعالیت پرداخته شده است. پروژه شکل (۲) را به‌عنوان مثال موردی درنظر بگیرید. نظر به این‌که مطالعه مشابهی در ادبیات موضوع انجام نشده است، ساختار و پارامترهای مسأله به‌صورت تصادفی تولید شده‌اند. در این شکل، احتمال رخداد هر فعالیت بر روی یال‌های شبکه نشان داده شده است. در این مثال فرض می‌شود برای انجام کلیه فعالیت‌های پروژه تنها به یک نوع منبع تجدیدپذیر نیاز می‌باشد. پارامترهای مربوط به انجام هر فعالیت در جدول (۳) ثبت شده است. برای کاهش پیچیدگی مسأله مفروض، فرضیات زیر درنظر گرفته شده است:

- کلیه فعالیت‌های شبکه می‌توانند در سه حالت مختلف انجام شوند.
- مدت‌زمان انجام کلیه فعالیت‌ها از تابع توزیع گسسته با احتمال یکسان پیروی می‌کند.
- فرض می‌شود به‌ازای هر حالت انتخابی یکی از مقادیر سه‌گانه با احتمال برابر $1/3$ انتخاب می‌شوند.
- مدت‌زمان و تعداد منبع موردنیاز برای هر فعالیت در هر تکرار یکسان است.



شکل (۲). مثال عددی موردی

جدول (۳). پارامترهای زمان و منبع لازم برای انجام هر فعالیت

فعالیت (i,j)	حالت	تابع توزیع زمان	میزان منبع	فعالیت (i,j)	حالت	تابع توزیع زمان	میزان منبع
	۱	{۴۴,۴۶,۴۸}	۴		۱	{۶۱،۶۳،۶۵}	۱۷
(۱،۲)	۲	{۶۰،۶۲،۶۴}	۳	(۵،۹)	۲	{۸۰،۸۲،۸۴}	۹
	۳	{۹۰،۹۲،۹۴}	۲		۳	{۱۱۶،۱۱۸،۱۲۰}	۳
	۱	{۸۶،۸۸،۹۰}	۱۱		۱	{۳۶،۳۸،۴۰}	۹
(۱،۳)	۲	{۱۰۶،۱۰۸،۱۱۰}	۹	(۸،۹)	۲	{۵۱،۵۳،۵۵}	۷
	۳	{۱۳۶،۱۳۸،۱۴۰}	۷		۳	{۶۲،۶۴،۶۶}	۳
	۱	{۲۰،۲۲،۲۴}	۲۰		۱	{۵۴،۵۶،۵۸}	۱۲
(۱،۴)	۲	{۲۵،۲۷،۲۹}	۱۶	(۹،۹)	۲	{۶۲،۶۴،۶۶}	۸
	۳	{۳۴،۳۶،۳۸}	۱۲		۳	{۶۹،۷۱،۷۳}	۴
	۱	{۴۱،۴۳،۴۵}	۱۱		۱	{۵۵،۵۷،۵۹}	۷
(۲،۵)	۲	{۵۱،۵۳،۵۵}	۹	(۶،۱۰)	۲	{۶۱،۶۳،۶۵}	۶
	۳	{۶۶،۶۸،۷۰}	۷		۳	{۷۰،۷۲،۷۴}	۴
	۱	{۳۵،۳۷،۳۹}	۹		۱	{۱۴،۱۶،۱۸}	۱۳
(۳،۵)	۲	{۴۵،۴۷،۴۹}	۷	(۶،۱۱)	۲	{۲۰،۲۲،۲۴}	۱۱
	۳	{۶۴،۶۶،۶۸}	۵		۳	{۲۸،۳۰،۳۲}	۸
	۱	{۸۷،۸۹،۹۱}	۶		۱	{۳۶،۳۸،۴۰}	۱۸
(۴،۵)	۲	{۱۰۴،۱۰۶،۱۰۸}	۵	(۷،۱۲)	۲	{۴۱،۴۳،۴۵}	۱۵
	۳	{۱۳۱،۱۳۳،۱۳۵}	۴		۳	{۵۲،۵۴،۵۶}	۱۲
	۱	{۷۹،۸۱،۸۳}	۵		۱	{۸،۱۰،۱۲}	۸
(۵،۳)	۲	{۹۹،۱۰۱،۱۰۳}	۴	(۸،۱۲)	۲	{۱۳،۱۵،۱۷}	۵
	۳	{۱۳۲،۱۳۴،۱۳۶}	۳		۳	{۲۱،۲۳،۲۵}	۲
	۱	{۵۳،۵۵،۵۷}	۸		۱	{۴۱،۴۳،۴۵}	۷
(۵،۶)	۲	{۷۰،۷۲،۷۴}	۶	(۹،۱۲)	۲	{۵۰،۵۲،۵۴}	۶
	۳	{۱۰۷،۱۰۹،۱۱۱}	۴		۳	{۶۲،۶۴،۶۶}	۵
	۱	{۲۹،۳۱،۳۳}	۱۳		۱	{۳۳،۳۵،۳۷}	۴
(۵،۷)	۲	{۳۷،۳۹،۴۱}	۱۰	(۱۰،۱۲)	۲	{۴۲،۴۶،۴۸}	۳
	۳	{۵۵،۵۷،۵۹}	۷		۳	{۵۰،۵۲،۵۴}	۲
	۱	{۲۱،۲۳،۲۵}	۲۰		۱	{۱۲،۱۴،۱۶}	۶
(۵،۸)	۲	{۲۹،۳۱،۳۳}	۱۶	(۱۱،۱۲)	۲	{۱۵،۱۷،۱۹}	۴
	۳	{۳۹،۴۱،۴۳}	۱۲		۳	{۲۰،۲۲،۲۴}	۲

باتوجه به مدل‌سازی پروژه توسط شبکه‌های گرت، در ابتدا بایستی احتمال وقوع گره‌های مقصد شبکه محاسبه شود. ازآنجایی‌که شبکه مفروض دارای یک گره مقصد است، بدیهی است که احتمال رخداد معادل ۱ است. با این‌حال با استفاده از روابط (۱)-(۳) به محاسبه این احتمال پرداخته می‌شود. براساس رابطه (۱)، پارامتر مشخصه هر فعالیت عبارت است از: $w_{(i,j,m)} = P_{(i,j)} \times M_{t_{(i,j,m)}}(s) \times M_{c_{(i,j)}}(z)$. طبق توضیحاتی که قبلاً داده شد، پارامترهای s و z معادل صفر درنظر گرفته می‌شوند. بنابراین $w_{(i,j,m)} = P_{(i,j)}$. لیست کلیه مسیرهای ساده‌ای که از مبدأ به مقصد می‌رسند، در جدول (۴) نشان داده شده‌اند.

با جای‌گذاری این مسیرها در رابطه (۲) و صفر کردن s و z، داریم:

$$P_E = W_E(0,0) = 1$$

همان‌طور که در بخش ۴ اشاره شد، برای جلوگیری از رشد تصاعدی تعداد سناریوها، متوسط تعداد دفعات انجام یک فعالیت به‌عنوان حد بالای مجاز برای تعداد دفعات تکرار در هر سناریو درنظر گرفته شده است. ازاین‌رو، طبق رابطه (۴) مقادیر متوسط تعداد دفعات

انجام یک فعالیت محاسبه شده و در جدول (۵) گزارش شده است.

جدول (۴) لیست مسیرهای شبکه

ردیف	مسیر از مبدا به مقصد	ردیف	مسیر از مبدا به مقصد
۱	{۱،۲،۵،۶،۱۰،۱۲}	۱۰	{۱،۳،۵،۸،۱۲}
۲	{۱،۲،۵،۶،۱۱،۱۲}	۱۱	{۱،۳،۵،۸،۹،۱۲}
۳	{۱،۲،۵،۷،۱۲}	۱۲	{۱،۳،۵،۹،۱۲}
۴	{۱،۲،۵،۸،۱۲}	۱۳	{۱،۴،۵،۶،۱۰،۱۲}
۵	{۱،۲،۵،۸،۹،۱۲}	۱۴	{۱،۴،۵،۶،۱۱،۱۲}
۶	{۱،۲،۵،۹،۱۲}	۱۵	{۱،۴،۵،۷،۱۲}
۷	{۱،۳،۵،۶،۱۰،۱۲}	۱۶	{۱،۴،۵،۸،۱۲}
۸	{۱،۳،۵،۶،۱۱،۱۲}	۱۷	{۱،۴،۵،۸،۹،۱۲}
۹	{۱،۳،۵،۷،۱۲}	۱۸	{۱،۴،۵،۹،۱۲}

جدول (۵). متوسط تعداد دفعات انجام هر فعالیت

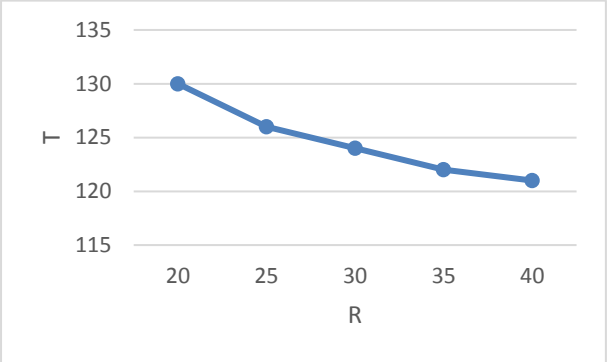
فعالیت	$c_{(i,j)}$	فعالیت	$c_{(i,j)}$
(۱،۲)	۱	(۵،۹)	۱
(۱،۳)	۱	(۸،۹)	۱
(۱،۴)	۱	(۹،۹)	۱
(۲،۵)	۱	(۶،۱۰)	۱
(۳،۵)	۱	(۶،۱۱)	۱
(۴،۵)	۱	(۷،۱۲)	۱
(۵،۳)	۱	(۸،۱۲)	۱
(۵،۶)	۱	(۹،۱۲)	۱
(۵،۷)	۱	(۱۰،۱۲)	۱
(۵،۸)	۱	(۱۱،۱۲)	۱

در این مرحله مقادیر احتمال وقوع فعالیت، تابع توزیع زمان انجام فعالیت، متوسط تعداد دفعات انجام هر فعالیت و مقدار منبع موردنیاز برای انجام هر فعالیت تحت سه حالت مختلف به‌عنوان ورودی به الگوریتم شبیه‌سازی مونت کارلو داده می‌شود. جهت اطمینان از دقت نتایج حاصله، عملیات نمونه‌گیری تصادفی ۱۰۰۰ بار تکرار شده است.در جدول (۶) احتمال تکمیل پروژه در زمان معین T به‌ازای مقادیر مختلف از میزان منبع دردسترس نشان داده شده است. براساس نتایج جدول (۶) می‌توان نتیجه گرفت با افزایش میزان منبع تجدیدپذیر دردسترس، احتمال تکمیل پروژه در مدت‌زمان معین افزایش می‌یابد. این دستاورد به مدیران سازمان کمک می‌کند تا با ارزیابی میزان افزایش احتمال موفقیت پروژه در زمان موردنظر و برآورد هزینه ناشی از افزایش سطح منبع تصمیم‌گیری نمایند. در شکل (۳) به‌ازای مقادیر مختلف میزان منبع دردسترس، زودترین زمانی‌که پروژه می‌تواند با احتمال ۱ پایان یابد نمایش داده شده است.

باتوجه به اثر منفی انجام دوباره‌کاری بر زمان و هزینه کل پروژه، مطلوب است که میزان دوباره‌کاری کمینه و در حالت ایده‌آل صفر باشد. لذا، فرض می‌شود انجام دوباره‌کاری در پروژه امکان‌پذیر نبوده و تأثیر حذف این فرض بر احتمال تکمیل پروژه در زمان مطلوب با میزان منبع دردسترس سنجیده می‌شود. نتایج حاصل از این فرض، در جدول (۷) گزارش شده است.

جدول (۶). احتمال تکمیل پروژه در مدت‌زمان قرارداد

میزان منبع دردسترس	زمان قراردادی تکمیل پروژه	$\Pr(t_F \le T)$
۳۰	۹۰	۰/۴۳۸
	۱۰۰	۰/۶۶۴
	۱۲۰	۰/۷۸۹
	۱۳۰	۱
۳۵	۹۰	۰/۴۴۷
	۱۰۰	۰/۶۷۹
	۱۲۰	۰/۷۹۳
	۱۳۰	۱
۴۰	۹۰	۰/۴۵
	۱۰۰	۰/۶۹۵
	۱۲۰	۰/۸۱
	۱۳۰	۱



شکل (۳). تحلیل حساسیت زمان تکمیل پروژه به‌ازای افزایش میزان منبع دردسترس

باتوجه به نتایج حاصله، می‌توان نتیجه گرفت درصورتی‌که هر فعالیت تنها یک‌بار امکان وقوع داشته باشد، احتمال تکمیل پروژه در موعد مقرر افزایش می‌یابد. اتجام تحلیل‌های اقتصادی و مالی مربوطه به مدیران سازمان جهت تصمیم‌گیری برای امکان یا عدم امکان دوباره‌کاری کمک می‌کنند. ازسویی دیگر، براساس داده‌های گزارش شده بابت میزان افزایش احتمال تکمیل پروژه در موعد مقرر می‌توان نتیجه گرفت با افزایش مدت‌زمان تحویل پروژه و میزان منبع دردسترس، تأثیر انجام دوباره‌کاری کمتر می‌شود. به‌عبارتی دیگر، هرچه مدت‌زمان و میزان منبع افزایش یابد، صرف بخشی از این منابع برای انجام دوباره‌کاری تأثیر کمتری بر احتمال موفقیت پروژه خواهد داشت.

جدول (۷). احتمال تکمیل پروژه در مدت‌زمان قرارداد بدون فرض دوباره‌کاری

میزان منبع دردسترس	زمان قراردادی تکمیل پروژه	$\Pr(t_F \le T)$	میزان افزایش در احتمال تکمیل پروژه در موعد مقرر
۳۰	۹۰	۰/۴۵۴	٪۴
	۱۰۰	۰/۶۷۸	٪۲
	۱۲۰	۰/۸۰۰	٪۱/۴
	۱۳۰	۱	٪۰
۳۵	۹۰	۰/۴۶۰	٪۳
	۱۰۰	۰/۶۹۱	٪۱/۸
	۱۲۰	۰/۸۰۲	٪۱/۱
	۱۳۰	۱	۰٪
۴۰	۹۰	۰/۵۴	٪۲
	۱۰۰	۰/۷۰۶	٪۱/۶
	۱۲۰	۰/۸۱۹	٪۱/۱
	۱۳۰	۱	٪۰

در برخی مواقع، ممکن است براساس سیاست‌های مدیریتی و حفظ کیفیت، تنها یک‌بار انجام دوباره‌کاری مجاز باشد. نتایج حاصل از پیاده‌سازی این فرض در جدول (۸) گزارش شده است.

نتایج حاصله نشان می‌دهد میزان افزایش احتمال تکمیل پروژه در موعد مقرر بافرض تنها یک‌بار انجام دوباره‌کاری نسبت به حالتی‌که بیشترین تعداد دوباره‌کاری ممکن درنظر گرفته شود، تفاوت اندکی دارد. به‌ازای پروژه‌های سرمایه‌گذاری با مبالغ بزرگ و یا پروژه‌هایی که الزاماً بایستی در زمان مشخصی به‌اتمام برسند، این مقادیر بهبود نیز قابل‌توجه بوده و تیم مربوطه بایستی تلاش کنند تا با حفظ کیفیت، میزان دوباره‌کاری را به حداقل برسانند.

جدول (۸). احتمال تکمیل پروژه در مدت‌زمان قرارداد بافرض یک‌بار دوباره‌کاری

میزان منبع دردسترس	زمان قراردادی تکمیل پروژه	$\Pr(t_F \le T)$	میزان افزایش در احتمال تکمیل پروژه در موعد مقرر
۳۰	۹۰	۰/۴۴۵	٪۱/۶
	۱۰۰	۰/۶۶۹	٪۱
	۱۲۰	۰/۷۹۴	٪۱
	۱۳۰	۱	٪۰
۳۵	۹۰	۰/۴۵۳	٪۱/۳
	۱۰۰	۰/۶۸۴	٪۱
	۱۲۰	۰/۷۹۹	٪۱
	۱۳۰	۱	۰٪
۴۰	۹۰	۰/۴۵۵	٪۰/۵
	۱۰۰	۰/۶۹۷	٪۰/۳
	۱۲۰	۰/۸۱۲	٪۰/۲
	۱۳۰	۱	٪۰

۶. نتیجه‌گیری

اغلب پروژه‌هایی که در واقعیت اجرا می‌شوند، از عدم قطعیت برخوردارند. در روش زمان‌بندی پرت تنها پارامتر زمان به‌عنوان عامل غیرقطعی درنظر گرفته شده است. درحالی‌که در واقعیت پروژه‌هایی را می‌توان یافت که علاوه‌بر زمان، وقوع فعالیت‌ها نیز تصادفی هستند. به‌علاوه، چنانچه فعالیتی از لحاظ کیفی به‌خوبی انجام نشده باشد، نیاز به دوباره‌کاری خواهد داشت. امکان انجام دوباره‌کاری منجربه افزایش پیچیدگی تحلیل عملکرد پروژه می‌شود. تکنیک گرت ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی و زمان‌بندی پروژه‌هایی با ساختار تصادفی است. یک ویژگی اصلی این روش، قابلیت آن در مدل‌سازی دوباره‌کاری و حلقه بازخورد است. در این تکنیک می‌توان ۶ حالت مختلف گره برای شبکه درنظر گرفت. در این پژوهش، با استفاده از تکنیک گرت و استفاده از گره‌های مختلف، به بررسی پروژه‌هایی پرداخته شده است که در آن امکان دوباره‌کاری وجود دارد و زمان هر فعالیت به‌میزان منبع تجدیدپذیر تخصیص‌یافته وابسته است. بدین منظور، یک مدل زمان‌بندی پروژه بافرض محدودیت منابع و توازن زمان-هزینه توسعه یافته است. هدف اصلی این مطالعه، درنظر گرفتن امکان وقوع دوباره‌کاری در فاز برنامه‌ریزی پروژه‌های تصادفی است تا ریسک ناشی از کمبود منابع و افزایش هزینه و زمان در فاز اجرایی پروژه‌ها کاهش یابد.

برای حل مدل گرت، می‌بایست احتمال وقوع گره مقصد و متوسط زمان تکمیل پروژه تخمین زده شود. در این پژوهش، با استفاده از تئوری گراف جریان و قانون میسون و قوانین فشرده‌سازی شبکه که در ادبیات توسعه یافته‌اند، احتمال وقوع گره مقصد محاسبه شده است. برای محاسبه متوسط زمان تکمیل پروژه، تابع توزیع تجمعی تکمیل پروژه در زمان مشخص برآورد می‌شود. در این راستا، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، احتمال تکمیل پروژه در مدت‌زمان مشخص تعیین شده است.

مطابق مرور ادبیات موضوع، مطالعه مشابهی در ادبیات وجود ندارد که بتوان نتایج حاصل از این روش را با نتایج آن مطالعه مقایسه کرد. لذا، یک مثال عددی تصادفی توسعه‌یافته و روش پیشنهادی بر روی آن بررسی شده است. تحلیل حساسیت نتایج به مدیران سازمان مجری پروژه کمک می‌کند تا در مورد میزان منبع موردنیاز برای تکمیل پروژه تصمیم‌گیری نمایند.

یکی از پیشنهادها برای توسعه مطالعات آتی، درنظر گرفتن ترکیب انواع منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در اجرای فعالیت‌های پروژه است. ازسوی دیگر، می‌توان شاخصی برای تعیین میزان بحرانی بودن فعالیت‌ها معرفی کرد تا بر این اساس ریسک ناشی از کمبود منابع و افزایش زمان را کاهش داد.

مراجع

[1] Asadi, R., Wilkinson, S., & Rotimi, J. O. B. (2020). Rework Management in Life Cycle of Project : An Outline for Construction Contracts. 6th New Zealand Built Environment Research Symposium, February, 87–96.

knowledge. International Journal of Project Management, 37(3), 501–516. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2019.02.004

[16] Safapour, E., & Kermanshachi, S. (2019). Identifying Early Indicators of Manageable Rework Causes and Selecting Mitigating Best Practices for Construction. Journal of Management in Engineering, 35(2). https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000669

[17] Yap, J. B. H., Low, P. L., & Wang, C. (2017). Rework in Malaysian building construction: impacts, causes and potential solutions. Journal of Engineering, Design and Technology, 15(5), 591–618. https://doi.org/10.1108/JEDT-01-2017-0002

[18] Zhang, D., Haas, C. T., Goodrum, P. M., Caldas, C. H., & Granger, R. (2012). Construction Small-Projects Rework Reduction for Capital Facilities. Journal of Construction Engineering and Management, 138(12), 1377–1385. https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000552

[19] Ma, G., Jiang, S., Zhu, T., & Jia, J. (2019). A novel method of developing construction projects schedule under rework scenarios. Sustainability (Switzerland), 11(20). https://doi.org/10.3390/su11205710

[20] Ma, G., Wu, M., Hao, K., & Shang, S. (2021). A DSM-Based CCPM-MPL Representation Method for Project Scheduling under Rework Scenarios. Advances in Civil Engineering, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/8878308

[21] Gomez, R. S. (1971). Application of a gert simulator to a repetitive hardware development type project. AIIE Transactions, 3(4), 271–280. https://doi.org/10.1080/05695557108974816

[22] Yang, X., Fang, Z., & Tao, L. (2018). Grey GERT network model of equipment lifetime evaluation based on small samples. Journal of Grey System, 30(1), 110–122. https://faculty.nuaa.edu.cn/fzg/en/lwcg/71139/content/15868.htm.

[23] Li, C. L., & Lu, L. (2017). Research on emergency logistics distribution in complex environment based on GERT. Proceedings of 2017 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC 2017, 1, 1–7. https://doi.org/10.1109/ICMLC.2017.8107734

[24] Tao, L., Wu, D., Liu, S., & Lambert, J. H. (2017). Schedule risk analysis for new-product development: The GERT method extended by a characteristic function. Reliability Engineering and System Safety, 167(September 2016), 464–473. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.06.010

[25] Safapour, E., & Kermanshachi, S. (2021). Uncertainty analysis of rework predictors in post-hurricane reconstruction of critical transportation infrastructure. Progress in Disaster Science, 11, 100194. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2021.100194

[26] Cho, S. H., & Eppinger, S. D. (2005). A simulation-based process model for managing complex design projects. IEEE Transactions on Engineering Management, 52(3), 316–328. https://doi.org/10.1109/TEM.2005.850722

[27] Khaksefidi, M., Raeisi Ardali, G. (2011). Cost Management of Construction Projects: Rework and its Effects. 2nd International conference on Strategic project management, 1-10. https://civilica.com/doc/242921 (In Persian)

[28] Said, M. (2009). Improved Schedule Analysis Considering Rework Impact and Optimum Delay Mitigation. 118. https://www.uwspace.uwaterloo.ca/500

[29] Hegazy, T., Said, M., & Kassab, M. (2011). Incorporating rework into construction schedule analysis. Automation in Construction, 20(8), 1051–1059. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.006

[30] Li, Y., & Taylor, T. R. B. (2014). Modeling the Impact of http://nzbers.massey.ac.nz/index.php/2020-symposium/

[2] Li, J. (2004). Performance analysis of production systems with rework loops. IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers), 36(8), 755–765. https://doi.org/10.1080/07408170490458553

[3] Flapper, S. D. P., Fransoo, J. C., Broekmeulen, R. A. C. M., & Inderfurth, K. (2002). Planning and control of rework in the process industries : A review, Production Planning and control: The Management of Operations. Production Planning & Control, 13(1), 26–34. https://doi.org/10.1080/09537280110061154

[4] Esmaeil Nejad, B., Aghababei, S., Fattahi, P., Khodakarami, V., Moradipour. H. (2013). The Study of inflation and time value of money effect in batch size production with reworking consideration, 1(2), 109-121. https://ier.basu.ac.ir/article_682.html. (In Persian)

[5] Zhang, Z., & Zhong, X. (2018). Time/resource trade-off in the robust optimization of resource-constraint project scheduling problem under uncertainty. Journal of Industrial and Production Engineering, 35(4), 243–254. https://doi.org/10.1080/21681015.2018.1451400

[6] Rezahoseini, A., Ghannadpour, S. F., & Bodaghi, M. (2019). Reducing rework and increasing the civil projects quality, through Total Quality Management (TQM), by using the concept of building information modeling (BIM). Journal of Industrial and Systems Engineering, 12(Special issue on Project Management and Control), 1–27. http://www.jise.ir/article_76543.html

[7] Khatun, M. T., Hiekata, K., Takahashi, Y., & Okada, I. (2022). Design and management of software development projects under rework uncertainty: a study using system dynamics. Journal of Decision Systems, 00(00), 1–24. https://doi.org/10.1080/12460125.2021.2023257

[8] Wen, M., Lin, J., Qian, Y., & Huang, W. (2021). Scheduling interrelated activities in complex projects under high-order rework: A DSM-based approach. Computers and Operations Research, 130, 105246. https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105246

[9] Jafari-Nodoushan, A., Dehghani Sardabadi, M. H., Bozorgi-Amiri, A. (2022). A Mathematical Model and a Branch and Bound Algorithm for the Single Machine Scheduling Problem under Linear Deterioration and Release Times, 9(19), 169-187. https://doi.org/10.22084/IER.2021.24228.2024 (In Persian)

[10] Pritsker, A. A. B. (1966). GERT: Graphical Evaluation and Review Technique (p. 152). The RAND Corporation. https://doi.org/10.4018/978-1-4666-4940-8.ch009

[11] Kosugi, T., Hayashi, A., Matsumoto, T., Akimoto, K., Tokimatsu, K., Yoshida, H., Tomoda, T., & Kaya, Y. (2004). Time to realization: Evaluation of CO2 capture technology R&Ds by GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) analyses. Energy, 29(9–10), 1297–1308. https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.088

[12] Bellas, C. (1971). The Use of GERT in the Planning and Control of Marketing Research. Journal of Marketing Research, 8(3), 335–339. https://doi.org/10.2307/3149572

[13] Yu, L., & Zuo, M. (2008). An estimating method for IT project expected duration oriented to GERT. IFIP International Federation for Information Processing, 255, 1557–1566. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76312-5_89

[14] Love, P. E. D., Irani, Z., & Edwards, D. J. (2004). A rework reduction model for construction projects. IEEE Transactions on Engineering Management, 51(4), 426–440. https://doi.org/10.1109/TEM.2004.835092

[15] Love, P. E. D., Smith, J., Ackermann, F., & Irani, Z. (2019). Making sense of rework and its unintended consequence in projects: The emergence of uncomfortable

planning. IE and EM 2009 - Proceedings 2009 IEEE 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 1022–1026. https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2009.5344254

[41] Li Zhou, Jiaping Xie and Yong Lin, "Forecasting returns in reverse logistics using GERT network theory," 5th International Conference on Responsive Manufacturing - Green Manufacturing (ICRM 2010), Ningbo, 2010, pp. 349-356, https://doi.org/10.1049/cp.2010.0456.

[42] Liu, H. Q., Zhigeng, F., Chaoqing, Y., & Tao, L. (2013). "Inverse problem" model of GERT network and its application in complex equipment development project schedule planning. Proceedings of IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, GSIS, 384–390. https://doi.org/10.1109/GSIS.2013.6714814

[43] Nelson, R. G., Azaron, A., & Aref, S. (2016). The use of a GERT based method to model concurrent product development processes. European Journal of Operational Research, 250(2), 566–578. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.040

[44] Talesh Hosseini, S., Moradzade, A., Asghari, O. (2019). Application of GERT planning network in the management structure of geostatistical simulation projects Dali copper-gold deposit in the north of the central province. Iranian Journal of Mining Engineering, 14(42), 32-46. https://www.sid.ir/paper/117075/fa (In Persian)

[45] Arisawa, S., & Elmaghraby, S. E. (1972). Optimal Time-Cost Trade-Offs in GERT Networks. Management Science, 18(11), 589–599. https://doi.org/10.1287/mnsc.18.11.589

[46] Hogg, G. L., Phillips, D. T., Maggard, M. J., & Lesso, W. G. (1975). Gerts qr: A model for multi-resource constrained queueing systems part II: An analysis of parallel-channel, dual-resource constrained queueing systems with homogeneous resources. AIIE Transactions, 7(2), 100–109. https://doi.org/10.1080/05695557508974992

[47] Kurihara, K., Seki, S., & Akashi, K. (1984). An Optimization Method for Investment in a Project Expressed by GERT Network. The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan.C, 104(3), 57–64. https://doi.org/10.11526/ieejeiss1972.104.57

[48] Tao, L., Su, X., & Javed, S. A. (2022). Time-cost trade-off model in GERT-type network with characteristic function for project management. Computers and Industrial Engineering, 169(May), 108222. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108222

Design Rework on Transportation Infrastructure Construction Project Performance. Journal of Construction Engineering and Management, 140(9), 1–8. https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000878

[31] Forcada, N., Gangolells, M., Casals, M., & Macarulla, M. (2017). Factors Affecting Rework Costs in Construction. Journal of Construction Engineering and Management, 143(8). https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001324

[32] Taghizadeh, K., Noorzai, E., Zaman, Z., Amiri, M., & Samaee Rahnee, N. (2021). Identifying the Most Important Rework Factors in Building Projects and Providing a Solution to Reduce Their Effects. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 102(4), 1027–1043. https://doi.org/10.1007/s40030-021-00570-9

[33] Steward, D. V. (1981). Design Structure System: a Method for Managing the Design of Complex Systems. IEEE Transactions on Engineering Management, EM-28(3), 71–74. https://doi.org/10.1109/TEM.1981.6448589

[34] Arasanipalai Raghavan, V., Yoon, S. W., & Srihari, K. (2018). A modified Genetic Algorithm approach to minimize total weighted tardiness with stochastic rework and reprocessing times. Computers and Industrial Engineering, 123(June), 42–53. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.002

[35] Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B., & Akhavan Niaki, S. T. (2017). Multi-skilled project scheduling with level-dependent rework risk; three multi-objective mechanisms based on cuckoo search. Applied Soft Computing Journal, 54, 46–61. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.01.024

[36] Randolph, P. H., & Rigeisen, R. D. (1974). A Network Learning Model with GERT analysis. Journal of Mathematical Psychology, 11, 59–70. https://doi.org/10.1016/0022-2496(74)90012-1

[37] Clayton, E., & Houck, E. (1978). GERT models of discret probability distributions and sums. Omega, 6(2), 191–192. https://doi.org/10.1016/0305-0483(78)90027-0

[38] Taylor, B. W., & Davis, K. R. (1978). Evaluating time/cost factors of implementation via GERT simulation. Omega, 6(3), 257–266. https://doi.org/10.1016/0305-0483(78)90083-X

[39] Neumann, K., & Zimmermann, J. (1998). Heuristic procedures for parallel-machine scheduling problems with stochastic precedence constraints. Annals of Operations Research, 83, 115–136. https://doi.org/10.1023/a:1018951828603

[40] Zheng, Y. S., Li, D., & Zhao, F. (2009). Study on A GERT based method for hi-tech product development project

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2024, Volume 12., No. 24., pp. 35-47
www.ier.basu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2024.29093.2163

Using GERT to Model and Estimate the Success Probability of Stochastic Projects Under Rework

Shadi Sadri[1], Seyyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi[2*]

[1.] Ph.D. Candidate of Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran.
[2.] Professor of Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 8 March 2024
Accepted 2 Jun 2024

***Keywords*:**

Project Scheduling
GERT Network
Rework
Stochastic Programming
Monte-Carlo Simulation

ABSTRACT

In practice, rework is a major threat to projects' performance and increases the risk of not delivering the outcomes on time and on budget. The classical project scheduling methods are incapable in considering the rework and stochastic structure for projects in planning phase. The current study models the stochastic projects through a GERT network in which occurrence of rework is allowed. The aim is to find the optimal execution mode for each activity in a way that the project completes within a desire time and the resource constraint is satisfied. We develop a multi-mode time-cost trade-off resource constraint project scheduling problem under uncertainty to find a here-and now solution to minimize project completion time. The problem is solved using a combination of flow-graph theory, Mason's rule and Monte-Carlo simulation method. To represent the efficiency of proposed solution methodology, a stochastic numerical experiment is generated and the obtained results show the capability of the solution method.

[*] Corresponding author. S.M.T. Fatemi Ghomi
Tel.:021-64545381; E-mail address: fatemi@aut.ac.ir