

Original Article

Robust Optimization Model for Project Scheduling Problem with Resource Constraints

Mozhdeh Moradi Goshtasb and Nasim Nahavandi *

Industrial Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract: Accurate management of projects is necessary to keep companies competitive. The resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) includes activities that must be planned according to priority and resource constraints, and minimize the project completion time. This has become a well-known standard problem in the field of project planning, and various formats of the initial RCPSP have been developed. On the other hand, due to the inherent uncertainty of the project environment, which causes uncertainty in the time and resource parameters, examining such issues considering this uncertainty at the same time as the complexity of the issue is very necessary. The purpose of this research is to provide an approach for the allocation of limited resources in the multi-project scheduling problem, with the uncertainty of the duration of the project activities. Also, in the space of this problem, the selection of the supplier of resources has been considered as the objectives of the problem. After introducing the stable model based on the scenario, the answers were analyzed using the meta-heuristic algorithm of multi-objective genetic, and the results show that with an increase in the cost of providing resources, the cost of the whole project increases, but this increase is more in the fourth scenario. This increase is not only in the cost, but also leads to an increase in the project time. On the other hand, the risk of supplier failure can affect the cost and time of the project. As the risk of supplier failure increases, the cost increases and the highest increase occurs in scenario 1, while in scenario 3, the lowest cost increase occurs due to the risk of supplier failure.

Keywords: Project scheduling with limited resources, Multi- project scheduling, Robust optimization, Genetic algorithm.

Received: Jul. 27, 2025; Revised: Oct. 07, 2025; Accepted: Oct. 08, 2023; Published Online: Dec 17, 2025.

* Corresponding Author: n_nahavandi@modares.ac.ir

How to Cite: Moradi Goshtasb Mozhdeh, Nahavandi Nasim*, Robust optimization model for project scheduling problem with resource constraints, Journal of Computational Methods in Engineering; 2025, 44(2), 127-149; DOI: 10.47176/jcme.44.1.1060





ارائه مدل بهینه‌سازی استوار برای مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع

مژده مرادی گشتاسب و نسیم نهاوندی*

دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده - مدیریت دقیق پروژه‌ها برای حفظ شرکت‌ها در عرصه رقابت امری ضروری است. مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) شامل فعالیت‌هایی می‌شود که باید با توجه به محدودیت‌های اولویت و منابع، برنامه‌ریزی شده و زمان اتمام پروژه به حداقل برسد. این مسئله به طور استاندارد به مسئله شناخته شده در زمینه برنامه‌ریزی پروژه تبدیل شده است و فرمت‌های مختلف RCPSP اولیه توسعه یافته است. از طرفی با توجه به عدم قطعیت ذاتی محیط پروژه که موجب عدم قطعیت در پارامترهای زمان و منبع می‌شود. بررسی این گونه مسائل با در نظر گرفتن این عدم قطعیت در عین پیچیدگی مسئله ضرورت زیادی دارد. هدف از این تحقیق ارائه‌ی رویکردی برای تخصیص منابع محدود مسئله زمان‌بندی چند پروژه‌ای با عدم قطعیت مدت زمان فعالیت‌های پروژه است. همچنین در فضای این مسئله انتخاب تامین‌کننده‌ی منابع هم به عنوان اهداف مسئله در نظر گرفته شده است. پس از معرفی مدل استوار مبتنی بر سناریو جواب‌ها با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک چندهدفه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد با افزایش هزینه تامین منابع هزینه کل پروژه افزایش می‌یابد. چهار سناریو در مدل تحقیق حاضر در نظر گرفته می‌شود که شامل مازاد نیروی کار و کمبود منابع؛ کمبود نیروی کار و مازاد منابع، افزایش قیمت محصولات پروژه و افزایش هزینه، عدم افزایش قیمت محصولات پروژه و عدم افزایش هزینه است. با افزایش هزینه تامین منابع بیشترین افزایش در سناریوی چهارم رخ می‌دهد. این افزایش صرفاً در هزینه نیست و منجر به افزایش زمان پروژه نیز می‌شود از سوی دیگر ریسک شکست تامین‌کننده می‌تواند بر هزینه و زمان پروژه اثرگذار باشد. با افزایش ریسک شکست تامین‌کننده هزینه افزایش یافته و بیشترین افزایش در سناریوی یک رخ می‌دهد درحالی که در سناریوی سه کمترین افزایش هزینه به دلیل ریسک شکست تامین‌کننده رخ می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع، زمان‌بندی چند پروژه‌ای، بهینه‌سازی استوار، الگوریتم ژنتیک.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶، اولین انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

*: نویسنده مسئول، رایانامه: n_nahavandi@modares.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۳

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز

است:

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

۱. مقدمه

یکی از وظایف مهم مدیریت پروژه زمان‌بندی است که به دلیل منابع محدود و روابط مسئله به یک کار دشوار تبدیل شده است. مساله زمان‌بندی پروژه توسط محققان به عنوان یکی از مسائل رایج و اساسی تبدیل شده و توسعه این موضوع از جنبه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است. پیچیدگی پروژه‌ها به دلایل مختلفی اتفاق می‌افتد از جمله محدودیت منابع در نظر گرفتن مفروضات مختلف مثل چند پروژه‌ای بودن، عدم قطعیت در اطلاعات مسئله مانند زمان اجرای فعالیت‌ها و همچنین عدم قطعیت در دسترسی به منابع محدودیت، در نظر گرفتن تامین کننده‌هایی که کمترین ریسک و هزینه را داشته باشند. از طرفی غیرقابل کنترل بودن از ویژگی ذاتی پروژه و زمان‌بندی آن است و حل چنین مسئله‌هایی دارای پیچیدگی زیادی خواهد بود. پس کاهش حساسیت پروژه نسبت با عوامل غیرقابل کنترل تصمیم‌گیری در این رابطه را سخت می‌کند. پیچیدگی این گونه مسائل منجر به تحقیقات فراوانی در این حوزه شده است [۵-۱]. مسائل برنامه‌ریزی پروژه با محدودیت منابع از آن دسته مسائل مهم و کاربردی در تحقیقات عملیاتی و موضوع بهینه‌سازی است، که به سال‌های ۱۹۵۰ برمی‌گردد و روش‌های اولیه از جمله CPM^۱ و PERT^۲ برای زمان‌بندی در دسترس بودند که در آن‌ها تنها مدت زمان اجرای پروژه (به صورت قطعی یا احتمالی) لحاظ و فرضیه‌ی اصلی این روش‌ها میزان منابع در دسترس نامحدود بود اما به دلیل اینکه این فرض در شرایط عملی غیر واقعی است به تدریج مدل‌هایی با در نظر گرفتن محدودیت منابع ایجاد شد. در یک پژوهش در سال ۱۹۸۰ [۶]، منابع را به تجدیدپذیر (استفاده‌ی کل در هر لحظه محدود است)، غیرقابل تجدید (مصرف کل در کل مدت زمان پروژه محدود است) و دو طرفه (مصرف در هر لحظه و در کل مدت زمان پروژه محدود است)، تقسیم‌بندی کرد که این سه دسته از منابع بیشترین توجه محققان را به خود جلب کرده است. همچنین مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت‌های منابع را با توجه به مفروضات مسئله نوع مدل و روش‌های حل آن می‌توان طبقه‌بندی کرد. در فرم استاندارد مسئله

زمان‌بندی پروژه منابع تنها در قالب منابع تجدیدپذیر بوده و فرض بر این است که مقدار مشخصی از منابع در طول اجرای فعالیت اشغال شده است. بنابراین در فرض مسئله می‌توان انواع دیگر از منابع را در نظر گرفت؛ پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۹ [۷]، یک مدل واقع‌گرایانه را ارائه می‌دهند که در آن محدودیت منابع تجدیدپذیر در هر دوره از زمان متفاوت است در این مقاله دو حالت افراطی؛ منابع کمی محدود و منابع بسیار محدود برای منابع تجدیدپذیر در نظر می‌گیرد. با توجه به اینکه مسئله مدیریت چند پروژه‌ای از اواخر ۱۹۶۰ میلادی [۸]، به عنوان موضوع تحقیق برای پژوهشگران مطرح شده است اما این موضوع به جامعیت مسئله مدیریت تک پروژه‌ای مورد مطالعه و بررسی واقع نشده است. در اینگونه مسائل یکی از چالش‌های مهم، تخصیص منابع محدود به پروژه‌های مختلف و در حال اجرا است در یک بررسی در سال ۲۰۱۸ [۹]، مسئله زمان‌بندی را در محیط چند پروژه‌ای با در نظر گرفتن پروژه‌هایی با وزن‌های مختلف را بررسی کرده‌اند، خط مشی به اشتراک گذاری منابع برای تقسیم منابع در میان پروژه‌ها اعمال شده و یک الگوریتم مبتنی بر سناریو منجر به راه حل‌های بهینه برای RCMPSP^۳ می‌شود هدف در واقع ساختن یک راه حل بهینه بوده که شامل همه‌ی پروژه‌ها باشد و منابع به گونه‌ای بین فعالیت‌ها انتقال پیدا کند که تاخیر وزنی پروژه‌ها و زمان اتمام پروژه حداقل گردد. همچنین در RCPSPP استاندارد فرض بر آن است که فعالیت‌های پروژه قطع یا متوقف نمی‌شوند در حالی که در عمل برخی از فعالیت‌ها باید در طول پردازش متوقف شود و می‌تواند به دلیل تخریب یا ناتوانی منابع، تعمیر تجهیزات و غیره باشد؛ چن و یانگ [۱۰] استراتژی پیشگیرانه برای مسائل برنامه‌ریزی پروژه با محدودیت منابع تحت یک محیط تصادفی فازی با تقسیم فعالیت ارائه می‌کند، یعنی فعالیت‌ها می‌توانند یک یا چند بار در فرآیند برنامه‌ریزی تقسیم شوند.

فعالیت‌های پروژه می‌تواند دارای یک یا چند حالت اجرا باشد که در آن هر حالت اجرایی ترکیبی از تعداد منابع (که هر کدام هزینه‌های متفاوتی را به پروژه تحمیل می‌کند) و مدت زمان

فعالیت است. قدوسی و همکاران [۱۱]، مدل جدیدی را برای مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چند حالتی ارائه کردند که در آن علاوه بر تبادل زمان و هزینه تخصیص منابع محدود به مسئله ترازبندی منابع نیز پرداخته شده و بهترین حالت اجرا در برنامه ریزی پروژه انتخاب می‌شود. توانا و همکاران [۱۲]، مسئله زمان‌بندی پروژه را با اهداف زمان هزینه و کیفیت را بررسی کردند که در آن فعالیت‌ها در صورت قطع شدن در یک دوره‌ی زمانی می‌تواند با حالت اجرای متفاوتی شروع شده و ادامه یابند. دلگشایی و همکاران [۱۳]، روش جدیدی را برای اصلاح تخصیص بیش از حد منابع برای RCPSPP ارائه دادند که در آن فرض شد فعالیت‌ها می‌توانند قطع شوند. که علیرغم امکان انجام فعالیت در چندین روش، اگر یک روش برای انجام فعالیت آغاز شود، باید همان شیوه مورد استفاده در اجرای فعالیت باشد. مقصودلو و همکاران [۱۴]، مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع را با حالت‌های چندگانه و منابع چند مهارته و نیز سه تابع هدف مورد بررسی قرار دادند، که اولین تابع هدف، کمینه کردن زمان اتمام پروژه، تابع هدف دوم، کمینه کردن هزینه کل تخصیص کارگران به مهارت‌ها و کیفیت فعالیت‌های پردازش با استفاده از تابع هدف سوم به حداکثر می‌رسد. مقصود لو و همکاران [۱۴]، یک نوع مسئله دوهدفه با محدودیت منابع را با هدف کمینه کردن زمان تکمیل پروژه و هزینه منابع تجدید ناپذیر مورد بررسی قرار داد. بابایی تیرکلایی و همکاران [۱۵]، به مدل‌سازی مسئله چند حالتی و چند هدفه‌ی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با اهداف به حداکثر رساندن ارزش خالص فعلی و به حداقل رساندن زمان اتمام پروژه پرداخته‌اند. علاوه بر منابع تجدید پذیر شامل نیروی انسانی، ماشین آلات و تجهیزات و منابع غیر قابل تجدید مانند منابع مصرفی و بودجه را نیز در نظر گرفتند تا این مدل را به دنیای واقعی نزدیک‌تر کنند. شریعت‌مداری و همکاران [۱۶]، یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط را برای انتخاب و برنامه‌ریزی هم زمان پروژه با تمرکز بر مدیریت منابع و با هدف حداکثر کردن منبع نقدی موجود در انتهای افق برنامه ریزی پیشنهاد کرده‌اند. بالستین و لئوس [۱۷] توابع هدف مختلف

زمان‌های تکمیل به موقع پروژه در مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و مدت زمان تصادفی را مورد بررسی قرار دادند و همچنین برای دستیابی به راه‌حل‌هایی با کیفیت بالاتر یک روش فرا ابتکاری توسعه دادند. اسیبیس و همکاران [۱۸]، یک روش جدید برای کنترل پروژه در شرایط عدم اطمینان ارائه می‌کنند و به طور خاص روش ارزش کسب شده EVM^۴ را با آنالیز ریسک پروژه ادغام می‌کند تا مشخص شود آیا انحراف پروژه از ارزش برنامه‌ریزی شده ناشی از تغییرات فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده است. برونی و همکاران [۱۹]، نمونه‌ای از مسئله‌ی زمان‌بندی با منابع تجدید پذیر و مدت زمان فعالیت تصادفی با یک تابع توزیع احتمال شناخته شده در جزئیات مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها نشان دادند که با استفاده از محدودیت‌های احتمالی مشترک، یک زمان‌بندی پایه‌ی شدنی با حداقل مدت زمان می‌توان ساخت، که قادر به تحمل درجه خاصی از عدم اطمینان و جذب تغییرات پویا در مدت فعالیت است. چن و همکاران [۲۰]، دو عامل پویا را که در مسائل واقعی اتفاق می‌افتد در نظر گرفتند و با مدت زمان تصادفی و ورود پروژه‌های جدید RCMPSP سستی را به SRCMPSP-NPA^۵ توسعه دادند و بر اساس PSPLIB مجموعه داده‌های جدیدی ساختند سپس ۲۰ قانون تقدیمی برای حل مسائل را ارزیابی کردند و در نهایت شش قانون تقدیمی که عملکرد بهتری داشتند را معرفی کرده‌اند. فوآد رحمان و همکاران [۲۱]، یک مسئله‌ی برنامه ریزی پروژه با محدودیت منابع RCPSPP را در محیط‌های پویا و همراه با مدت زمان فعالیت تصادفی را مطالعه کردند. یکی از رویکردهای توسعه داده شده جهت برخورد با عدم قطعیت پارامترهای مدل تبیین عدم قطعیت بر اساس مفهوم مجموعه‌های عدم قطعیت و در یک بازه است. سویستر [۲۲] ضرایب غیرقطعی را در برنامه‌ریزی خطی ریاضی در نظر گرفت و نشان داد که چگونه عدم قطعیت می‌تواند با یک برنامه ریزی خطی معادل به کار رود روش سویستر خیلی بدبینانه عمل می‌کند و در واقع بالاترین میزان محافظه‌کاری را در نظر می‌گیرد بنابراین جواب بدست آمده از این روش دارای انحراف نامطلوب زیادی از جواب بدست آمده از بهینه‌سازی اسمی است.

زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ارائه می‌کنند. کیو و همکاران [۳۲] یک رویکرد بهینه‌سازی استوار را برای مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با زمان آزادسازی فعالیت به صورت غیر قطعی ارائه می‌کنند.

۲. مدل‌سازی مسئله

در این بخش به تشریح مسئله غیر قطعی و رویکرد عدم قطعیت در خصوص مسئله حاضر پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه روش‌های واکنشی اثر عدم اطمینان داده‌ها را تنها روی خروجی‌های پیشنهادی مدل مورد بررسی قرار می‌دهند بنابراین باید مدل‌هایی طراحی و مدل‌سازی شوند که در مقایسه با مدل‌های برنامه‌ریزی کلاسیک (اسمی) نسبت به داده‌های مدل حساسیت‌های کمتری داشته باشد. مالوی و همکاران چارچوبی را برای بهینه‌سازی استوار و کنترل تاثیر پارامترهای غیرقطعی در بهینه‌سازی ارائه کردند که شامل دو تعریف مهم جواب استوار و مدل استوار است: به این صورت که زمانی یک جواب برای مدل بهینه‌سازی جوابی استوار نامیده می‌شود که آن جواب تحت همه سناریوها نزدیک به بهینه باقی بماند و همچنین زمانی یک مدل مدلی استوار است که تحت همه سناریوها تقریباً موجه باشد. آن‌ها با توجه به این تعاریف مدل عمومی بهینه‌سازی استوار را توسعه داده‌اند. این بهینه‌سازی مرتبط با مسائلی است که جنس داده‌های آن از یک نوع سناریو باشد به عبارت دیگر مقادیر داده‌های مسئله توسط مجموعه‌ای از سناریوها توصیف می‌شود. در حالت کلی در مواجهه با مدل‌های بهینه‌سازی؛ دو بخش مجزا وجود دارد بخش ساختاری^۶ که ثابت است و فاقد هرگونه نوسان در داده‌های ورودی آن است و بخش کنترل^۷ که تابعی دستخوش داده‌های نامطمئن و نوسانی است [۲۷]. همچنین در جدول ۱ مطالعات و بیشینه پژوهش‌های صورت گرفته در پژوهش حاضر نشان داده شده است.

مدل ارائه شده توسط بن-تال و نمیروفسکی [۲۳]، نسبت به مدل سویستر محافظه‌کاری کمتری دارد و هر جواب بدست آمده در آن در مدل سویستر نیز موجه است بن-تال و نمیروفسکی برای حل مسائل بهینه‌سازی محدب که ضرایب فنی متغیرهای تصمیم در محدودیت‌ها همراه با عدم قطعیت باشد یک مدل مخروطی درجه دوم پیشنهاد کردند که با توجه به غیرخطی بودن مدل آن‌ها برای بهینه‌سازی گسسته‌ی استوار مناسب نیست. برتسمیس و سیم [۲۴]، بر اساس مفهوم مجموعه‌های عدم قطعیت برای داده‌های غیرقطعی یک متغیر تصادفی تعریف کرد که دارای توزیع ناشناخته اما متقارن است و ضرایب غیرقطعی به صورت یک پارامتر مستقل متقارن و کراندار مدل‌سازی می‌شوند همچنین با استفاده از پارامتر بودجه‌ی عدم قطعیت در محدودیت‌ها میزان استواری در مقابل سطح محافظه‌کاری جواب را تنظیم کرده است. آدیدا و جوشی [۲۵]، یک رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مسئله زمان‌بندی پروژه و تخصیص منابع بیان کردند آن‌ها از مدل برتسمیس و سیم بهره گرفته و علاوه بر مدت زمان فعالیت‌ها ضرایب هزینه را نیز غیرقطعی در نظر گرفته و در نهایت با مثالی عددی به مقایسه و بیان مزایای رویکرد بهینه‌سازی استوار و رویکرد قطعی پرداخته و تفاوت در پاسخ حاصل از این رویکردها را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. گولد و بوئریک [۲۶]، مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و مدت زمان فعالیت نامشخص را با فرض اینکه مدت زمان فعالیت در یک مجموعه عدم قطعیت بودجه قرار دارد در نظر گرفته اند و از یک رویکرد دو مرحله‌ای استوار پیروی کردند، جایی که یک تصمیم گیرنده باید تعارضات منابع را به دلیل عدم قطعیت مشکل حل کند، اما می‌تواند زمان شروع فعالیت را پس از مشخص شدن مدت فعالیت نامشخص تعیین کند.

مرشد و همکاران [۲۹] مدلی یکپارچه را برای مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با رتبه بندی مواد ارائه می‌کنند. لطفی و همکاران [۳۰] از یادگیری ماشین با رویکرد ریسک جهت زمان‌بندی پروژه استفاده می‌کنند. مارتین و همکاران [۳۱] یک ابتکاری گسسته پیشامد تصادفی انطباقی چابک را برای مسئله

جدول ۱. مرور ادبیات

زمان	هزینه	نیاز به منابع	ریسک شکست تامین کننده	استوار	منابع محدود	زمانبندی پروژه	هدف	مجموعه
						☐	مدلی یکپارچه برای مسئله زمانبندی پروژه با منابع محدود با رتبه بندی مواد	مرشد و همکاران [۲۹]
						☐	یادگیری ماشین با رویکرد ریسک جهت زمانبندی پروژه	لطفی و همکاران [۳۰]
					☐	☐	ابتکاری گسسته پیشامد تصادفی انطباقی چابک برای مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع	مارتین و همکاران [۳۱]
☐				☐	☐	☐	یک رویکرد بهینه سازی استوار برای مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع با زمان آزاد سازی فعالیت به صورت غیر قطعی	کیو و همکاران [۳۲]
	☐			☐	☐	☐	مسئله‌ی زمانبندی پروژه با منابع محدود و مدت زمان فعالیت نامشخص	گولد و بوئریک [۲۶]
				☐	☐	☐	یک رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مسئله زمانبندی پروژه و تخصیص منابع	آدیدا و جوشی [۲۵]
	☐			☐	☐	☐	در نظر گرفتن دو عامل پویا در مسائل واقعی با مدت زمان تصادفی و ورود پروژه‌های جدید SRCMPSP-NPA1 سستی به RCMPS	چن و همکاران [۱۰]
		☐		☐	☐	☐	مسئله زمانبندی با منابع تجدید پذیر و مدت زمان فعالیت تصادفی با یک تابع توزیع احتمال	برونی و همکاران [۸]
☐			☐	☐	☐	☐	یک روش جدید برای کنترل پروژه در شرایط عدم اطمینان	اسیبیس [۱۸]
☐				☐		☐	یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط برای انتخاب و برنامه‌ریزی هم زمان پروژه با تمرکز بر مدیریت منابع و با هدف حداکثر کردن منبع نقدی موجود در انتهای افق برنامه ریزی	شریعتمداری و همکاران [۱۶]

محدودیت	هدف	زمانبندی پروژه	منابع محدود	استوار	ریسک شکست تأمین کننده	نیاز به منابع	هزینه	زمان
مدل‌سازی مسئله چند حالت و چند هدفی								
بابایی تیرکلایی و همکاران [۱۵]	زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با اهداف به حداکثر رساندن ارزش خالص فعلی و به حداقل رساندن زمان اتمام پروژه							
تحقیق حاضر	مدل بهینه‌سازی استوار برای مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع							

مدل بهینه‌سازی به صورت زیر است [۲۷].	(۶)	$st: AX = b$
$\min C^T X + d^T y$	(۱)	$B_s X + C_s y_s + \partial s = e_e \quad \forall s \in \Omega$
subject to : $AX = b$	(۲)	$X \geq 0, y_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega$
$BX + Cy = e$	(۳)	
$x, y \geq 0$	(۴)	

در این مدل؛ X بیانگر متغیرهای تصمیم پارامترهای قطعی است، Y ؛ نشان‌دهنده متغیرهای تصمیم بخش کنترل است.

محدودیت‌ها به دو بخش؛ محدودیت‌های ساختاری که ضرایب آن ثابت بوده و به اصطلاح مطمئن است، محدودیت‌های کنترل که ضرایب آن در برگیرنده حالت غیر قطعی هستند، تقسیم می‌شود.

تحقق هر مقدار برای پارامترهای غیر قطعی یک سناریو نامیده می‌شود و مجموعه‌ای محدود از سناریوها $\Omega = \{1, 2, 3, \dots, S\}$ برای پارامترهای غیر قطعی مدل فرض می‌شود که متناسب با هر سناریو $s \in \Omega$ مجموعه‌ی ضرایب غیر قطعی $\{ds, Bs, Cs, es\}$ به عنوان تحقق عملکرد هر سناریو تعریف شده است از طرفی $\sum_{s=1}^S P_s = 1$ که نشان می‌دهد که احتمال رخداد هر سناریو را نشان می‌دهد که در صورت کلی مدل بهینه‌سازی استوار مالوی و همکاران به صورت زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$\min \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega \rho(\partial 1, \dots, \partial s) \quad (۵)$$

در مدل استوار فوق مجموعه $(y_1, y_2, \dots, y_s)$ مجموعه‌ای از متغیرهای کنترل برای هر سناریو $s \in \Omega$ است و همچنین ناموجهی مجاز در محدودیت‌های کنترل تحت سناریوی s را اندازه‌گیری می‌کند. تابع هدف شامل دو قسمت است که استواری جواب و استواری مدل را تضمین می‌کند، در قسمت اول $\sigma(X, y_1, y_2, \dots, y_s)$ استواری جواب را در نظر می‌گیرد و در قسمت دوم $\omega \rho(\partial 1, \dots, \partial s)$ استواری مدل را در نظر می‌گیرد و تابع هدف $z = C^T X + d^T y$ با توجه به سناریوهای چندگانه متغیری تصادفی است که مقدار $z_s = C^T X + d_s^T y_s$ را با احتمال P_s می‌گیرد. در فرمول‌بندی برنامه‌ریزی خطی احتمالی باید از مقدار میانگین $(\sum P_s z_s)$ استفاده شود اما از آنجایی که یک پراکندگی بزرگ برای z_s به معنای بالا بودن ریسک این جواب و تصمیم خواهد بود. این تغییر یا پراکندگی بزرگ می‌تواند ناشی از تغییر کوچکی در پارامترهای غیر قطعی مدل باشد بنابراین جهت استواری جواب می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد که

استواری مدل که توسط قسمت دوم تابع هدف سنجیده می شود را محقق می سازد. همچنین می تواند تحت فرایند تصمیم گیری چند معیاره مدل شوند مقدار ω هر چقدر کمتر باشد امکان غیرموجه شدن مدل افزایش می یابد در حالی که اگر به ω مقدار نسبتاً بزرگی تخصیص یابد هزینه بیشتری را به همراه خواهد داشت مدل نهایی برنامه ریزی استوار مبتنی بر سناریو در ادامه آمده است:

$$\min \sum_{s \in 1}^S P_s z_s + \lambda \sum_{s \in 1}^S p_s (\theta_s^+ + \theta_s^-) + \omega \sum p_s \partial s \quad (14)$$

$$Ax=b \quad s.t \quad (15)$$

$$z_s - \sum_{s \in S} P_s z_s - \theta_s^+ + \theta_s^- = 0 \quad (16)$$

$$\theta_s^+, \theta_s^- \geq 0 \quad (17)$$

در خصوص سناریوها نیز باید اشاره شود که سناریوهای مورد نظر در تحقیق حاضر تحت چهار سناریوی ذیل مطرح است:

۱. مازاد نیروی کار و کمبود منابع
۲. کمبود نیروی کار و مازاد منابع
۳. افزایش قیمت محصولات پروژه و افزایش هزینه
۴. عدم افزایش قیمت محصولات پروژه و عدم افزایش هزینه

همانگونه که مشاهده می شود چهار سناریو وجود دارد که بر اساس هر سناریو مقادیر پارامترهای ورودی دچار تغییر می شود و در هر سناریو مقادیر پارامترها متفاوت است احتمال وقوع هر سناریو برابر با هم در نظر گرفته شده است بنابراین می توان احتمال وقوع هر سناریو را ۲۵ درصد دانست.

۳. حل مدل پیشنهادی و اعتبارسنجی

در این بخش مدل ارائه شده در قسمت قبل با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. در ابتدا پارامترهای ورودی به مدل تشریح شده در جدول ۲ آورده شده است و در ادامه حل مدل به صورت کلی و همچنین ابعاد و پارامترهای مورد استفاده در مدل

شامل مقدار میانگین به علاوه ی مقدار تغییر پذیری جواب است همچنین مقدار ثابت λ وزن تغییر پذیری جواب را نشان می دهد.

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s \in 1}^S P_s z_s + \lambda \sum_{s \in 1}^S p_s (z_s - \sum_{s \in 1}^S p_s z_s)^2 \quad (9)$$

از آنجایی که عبارت فوق شامل بخشی است که دارای توان دوم است و دارای ماهیت درجه دوم در مدل سازی است عبارت فوق باید به شکل غیر تواندار تبدیل شود. این کار بر اساس روش یو و لی [۲۸] انجام شده است بنابراین رابطه ۹ بر اساس این تبدیل به رابطه ۱۰ که در ذیل ارائه شده است تبدیل می شود.

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s \in 1}^S P_s z_s + \lambda \sum_{s \in 1}^S p_s |z_s - \sum_{s \in 1}^S p_s z_s| \quad (10)$$

اما این رابطه با توجه به غیرخطی بودن فرم قدر مطلق انحرافات هنوز هم غیرخطی است ولی با «رویکرد یو و لی» قابل تبدیل به تابع خطی با اضافه کردن دو متغیر انحراف غیر منفی θ_s^+ و θ_s^- است. یعنی؛ به جای حداقل کردن مرجع انحرافات مطلق از میانگین دو تابع فوق دو متغیر انحراف با توجه به محدودیتها حداقل می گردد به این صورت که [۲۸]:

$$\min \sum_{s \in 1}^S P_s z_s + \lambda \sum_{s \in 1}^S p_s (\theta_s^+ + \theta_s^-) \quad (11)$$

$$st: \quad z_s - \sum_{s \in S} P_s z_s - \theta_s^+ + \theta_s^- = 0 \quad (12)$$

$$\theta_s^+, \theta_s^- \geq 0 \quad (13)$$

عبارت ∂_0 به صورت عبارتی غیر خطی لحاظ می شود. این مدل استوار مبتنی بر سناریوی کاربردی از مدل برنامه ریزی غیر خطی احتمالی است. قسمت دوم در تابع هدف مدل $\omega p(\partial_1, \dots, \partial_s)$ یک تابع جریمه غیرموجه بودن است که به منظور جریمه کردن نقض و تخطی از محدودیت های کنترل با توجه به برخی از سناریوها مد نظر قرار می گیرد و استواری مدل را تضمین می کند. به کمک وزن ω توازن و مبادله بین استواری جواب که توسط قسمت اول تابع هدف سنجیده می شود و

جدول ۳. مدت زمان انجام فعالیت‌ها

فعالیت	پروژه یک	پروژه دو
۱	۲۲	۲۹
۲	۲۱	۲۸
۳	۱۶	۱۶
۴	۱۰	۱۱
۵	۱۹	۱۶
۶	۱۱	۲۸
۷	۲۷	۲۱
۸	۲۳	۱۷
۹	۱۴	۲۱
۱۰	۱۶	۱۲
۱۱	۲۴	۱۴
۱۲	۲۷	۱۴
۱۳	۳۰	۲۳
۱۴	۱۳	۱۰
۱۵	۲۶	۱۱
۱۶	۲۰	۲۱
۱۷	۱۵	۱۱
۱۸	۲۳	۲۳
۱۹	۱۲	۲۲
۲۰	۲۵	۲۹

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم ژنتیک در تحقیق حاضر

پارامتر	مقدار
دفعات تکرار	۱۰۰
جمعیت اولیه	۵۰
درصد تقاطع	۰٫۷
درصد جهش	۰٫۰۲

۱.۳. پارامترها

در این بخش مقادیر ورودی برخی پارامترهای مهم به صورت جدول ۴ ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که داده‌های موجود مربوط به بخشی از پروژه‌ی ساختمانی ایران‌مال است [۲۸] و با توجه به گستردگی داده‌ها؛ برخی پارامترها مانند فعالیت‌ها و منابع به صورت حدودی در نظر گرفته شده است.

۲.۳. اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل در تحقیق حاضر با استفاده از پیاده‌سازی تابع برازش^۸ در نرم افزار متلب^۹ صورت می‌گیرد. ابتدا مدل فعلی در نرم افزار متلب پیاده‌سازی شده و محدودیت‌ها کاملاً اعمال می‌شوند. در صورتی که تابع برازش در نرم افزار متلب اجرا گردد می‌توان اعتبارسنجی مدل طراحی شده را تأیید نمود. با توجه به حل تابع برازش می‌توان گفت مدل ارائه شده از اعتبار لازم

ارائه می‌شود. ضمن اینکه نتایج برخی متغیرهای تصمیم نیز تشریح می‌شود. پس از آن تحلیل حساسیت برخی پارامترهای مهم و اثر آن در سناریوهای مختلف تبیین می‌گردد. در جدول ۳ نیز فعالیت‌های در نظر گرفته شده برای پروژه‌های یک و دو نمایش داده شده است. الگوریتم NSGAII مورد نظر در تحقیق حاضر با تولید جواب اولیه به صورت یک کروموزم جایگشتی عمل می‌کند که نمونه این کروموزم در ادامه ارائه شده است.

۱۰	۴	۲	۳	۸	۶	۷	۹	۵	۱
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---

این کروموزم با استفاده از عملگرهای تقاطع و جهش دچار تغییر و بروزرسانی شود پارامترهای بهینه الگوریتم با انجام محاسبات مختلف به صورت جدول ۴ محاسبه گردید.

جدول ۴. میزان منابع مورد نیاز به تفکیک

فعالیت	میزان منبع مورد نیاز برای پروژه ۱	میزان منبع مورد نیاز برای پروژه ۲
۱	۱۳۹	۱۸۲
۲	۱۳۰	۱۶۴
۳	۱۲۵	۱۲۲
۴	۱۳۵	۱۸۴
۵	۱۱۲	۱۱۳
۶	۱۸۵	۱۶۹
۷	۱۲۸	۱۱۲
۸	۱۴۴	۱۶۸
۹	۱۲۶	۱۷۱
۱۰	۱۹۷	۱۶۲
۱۱	۱۵۷	۱۵۱
۱۲	۱۰۷	۱۹۷
۱۳	۱۲۳	۱۳۷
۱۴	۱۳۸	۱۹۴
۱۵	۱۳۷	۱۷۷
۱۶	۱۵۱	۱۴۶
۱۷	۱۱۳	۲۰۰
۱۸	۱۳۹	۱۱۰
۱۹	۱۳۳	۱۷۵
۲۰	۱۸۵	۱۸۹

برخوردار است. برای اعتبارسنجی مدل در ابعاد کوچک و متوسط مسائل زیر ارائه شده است.

همانگونه که مشاهده می شود در جدول ۵ مسئله در ابعاد کوچک حل شده و تا مسئله شماره ۸ نیز مسئله قابل حل است. اما در مسئله ۹ و ۱۰ به دلیل ابعاد بالا قابل حل نبوده و برای ابعاد بزرگ مسئله می بایست با الگوریتم های فراابتکاری حل شود. در ادامه نشان خواهیم داد الگوریتم فراابتکاری قادر به رفع نقص روش دقیق در حل مثال های ۹ و ۱۰ است و نتایج این مقایسه ارائه می شود.

بر اساس جدول ۶ مشاهده می شود که الگوریتم NSGAII زمان حل کمتری را در مقیاسه با دو حل کننده دیگر در روش دقیق دارد و نقص دو حل کننده روش دقیق در حل مسئله توسط

الگوریتم NSGAII مرتفع شده است. پیاده سازی فوق به کمک یک رایانه CORI 5 با رم ۸ گیگابایت و هارد ۱ ترابایت صورت گرفته است.

۳-۳ حل مدل

این بخش حل مدل در ابعاد کلی صورت گرفته و کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای حل مدل طراحی شده بررسی می شود. در ابتدا ۱۵ مسئله برای حل توسط الگوریتم ژنتیک بررسی می شود که در هر مسئله ابعاد پروژه تغییر می کند و می توان گفت با افزایش مسئله ابعاد نیز افزایش می یابد. در جدول ۶ این ابعاد نشان داده می شود.

همانگونه که مشاهده می شود ابعاد مسئله شامل اندیس های مدل یعنی پروژه ها، فعالیت ها، منابع، تامین کنندگان و سناریوها

جدول ۵. حداقل زمان و حداکثر زمان انجام

فعالیت	حداقل زمان انجام فعالیت برای پروژه یک	حداکثر زمان انجام فعالیت برای پروژه یک	حداقل زمان انجام فعالیت برای پروژه دو	حداکثر زمان انجام فعالیت برای پروژه دو
۱	۱۱	۳۴	۲۸	۲۹
۲	۱۸	۲۴	۲۴	۲۹
۳	۱۲	۲۲	۱۳	۱۸
۴	۸	۱۲	۹	۱۳
۵	۱۷	۲۳	۱۵	۲۱
۶	۱۰	۱۵	۱۹	۲۹
۷	۱۵	۳۰	۱۷	۲۴
۸	۲۱	۲۵	۱۵	۲۴
۹	۱۴	۱۸	۱۱	۲۱
۱۰	۱۵	۱۷	۹	۱۱
۱۱	۲۲	۲۶	۱۲	۱۶
۱۲	۲۷	۳۳	۱۱	۱۷
۱۳	۲۹	۳۸	۱۳	۲۳
۱۴	۱۲	۲۵	۸	۱۷
۱۵	۱۱	۲۷	۱۰	۱۳
۱۶	۲۹	۳۸	۱۹	۲۸
۱۷	۱۴	۲۶	۱۰	۲۷
۱۸	۱۰	۲۳	۱۲	۱۹
۱۹	۱۲	۱۹	۱۵	۲۲
۲۰	۲۳	۳۰	۱۵	۳۲

جدول ۶. ابعاد مدل در ابعاد کوچک و متوسط

مسئله	پروژه	فعالیت‌ها	منابع	تامین کننده	سناریو
۱	۲	۵	۵	۵	۳
۲	۲	۵	۵	۶	۳
۳	۲	۶	۵	۶	۳
۴	۳	۶	۵	۶	۳
۵	۳	۶	۶	۵	۳
۶	۳	۶	۶	۶	۳
۷	۲	۷	۶	۶	۴
۸	۳	۷	۷	۷	۴
۹	۲	۷	۸	۷	۵
۱۰	۳	۸	۸	۸	۵

جدول ۷. نتایج حل مدل در ابعاد کوچک

مسئله	زمان محاسبه به دقیقه
۱	۰,۲۳
۲	۰,۳۷
۳	۰,۵۶
۴	۰,۷۱
۵	۰,۸۹
۶	۱,۰۹
۷	۱,۴۴
۸	۱,۷۸
۹	Low memory
۱۰	Low memory

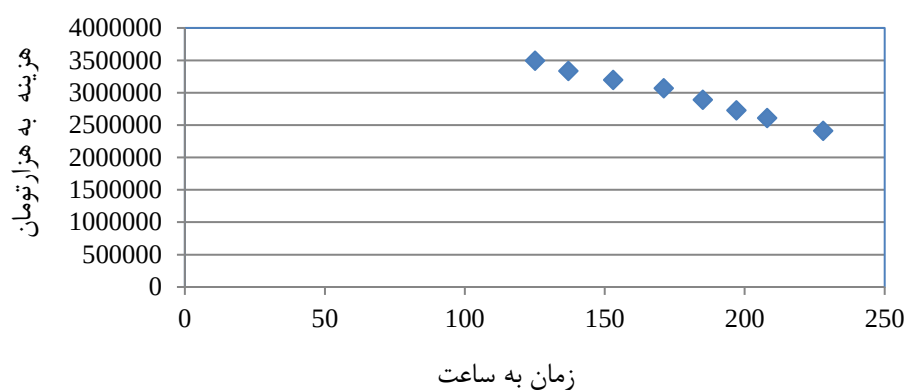
جدول ۸. مقایسه حل کننده‌های Cplex و MILP با الگوریتم NSGAII از نظر زمان محاسبه و توانایی حل

مسئله	Cplex	MILP	NSGAII
۱	۰,۲۳	۰,۱۸	۰,۱۷
۲	۰,۳۷	۰,۳۴	۰,۳۱
۳	۰,۵۶	۰,۵۱	۰,۵۱
۴	۰,۷۱	۰,۶۹	۰,۶۵
۵	۰,۸۹	۰,۸۵	۰,۸۵
۶	۱,۰۹	۱,۰۷	۱,۰۴
۷	۱,۴۴	۱,۴۳	۱,۴۳
۸	۱,۷۸	۱,۷۴	۱,۷۱
۹	Low memory	Low memory	۱,۷۴
۱۰	Low memory	Low memory	۱,۷۵

هستند. با افزایش مسائل این ابعاد نیز افزایش می‌یابند. نتیجه حل یکی از این مسائل در نمودار زیر ارائه می‌گردد.

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود نقاط پارتو که تلفیقی از تلاقی جواب‌های بهینه مسئله در وضعیت چند هدفه است که هر نقطه نشان می‌دهد که در نقطه مزبور زمان و هزینه در بهینه‌ترین حالت قرار دارند. رابطه معکوس بین نقاط بر اساس منحنی نزولی تبیین شده و نشان می‌دهد که رابطه معکوسی بین دیرکرد و هزینه وجود دارد. برای کاهش دیرکرد باید هزینه

افزایش یافته و با کاهش هزینه شاهد افزایش دیرکرد یا تاخیر پروژه خواهیم بود. در ادامه جواب‌های بهینه برای انتخاب تامین کننده برای هر منبع ارائه می‌شود. جدول ۷ و ۸ انتخاب تامین کننده برای پروژه‌های یک و دو را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود وضعیت در حالت دو پروژه‌ای در نظر گرفته شده برای تامین هر منبع صرفاً از یک تامین کننده استفاده می‌شود که به عنوان مثال مشخص شده در پروژه دوم برای تامین منبع ۵، تامین کننده ۳ بهترین تامین کننده تلقی می‌شود یا در خصوص



شکل ۱. نمودار پارتوی مسئله اول

جدول ۹. معرفی مثال‌ها و ابعاد مسئله

مسئله	پروژه	فعالیت‌ها	منابع	تامین کننده	سناریو
۱	۲	۲۰	۶	۸	۴
۲	۲	۲۰	۶	۸	۴
۳	۲	۲۰	۵	۷	۴
۴	۳	۲۱	۵	۷	۵
۵	۳	۲۲	۵	۹	۵
۶	۳	۲۲	۶	۹	۵
۷	۲	۲۳	۶	۱۰	۴
۸	۳	۲۴	۷	۱۰	۴
۹	۲	۲۴	۷	۱۰	۵
۱۰	۳	۲۵	۸	۱۱	۵
۱۱	۳	۲۶	۸	۱۱	۶
۱۲	۲	۲۵	۹	۱۲	۶
۱۳	۲	۲۴	۱۰	۱۲	۶
۱۴	۳	۲۵	۱۰	۱۳	۶
۱۵	۳	۲۶	۱۰	۱۳	۵

جدول ۱۰. انتخاب تامین کننده برای پروژه ۱

منبع	تامین کننده							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۶	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰

پارامتر هزینه تامین منابع در نظر گرفته شده و افزایش به صورت درصدی تا ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

همانگونه که دیده می‌شود در شکل ۲ با افزایش هزینه تامین منابع، افزایش هزینه کل پروژه رخ داده است. البته این افزایش هزینه در سناریوی چهارم کمتر از سایر سناریوها است.

شکل ۳ نشان می‌دهد افزایش هزینه تامین منابع منجر به افزایش زمان پروژه نیز می‌شود علت این امر می‌تواند انتخاب تامین کننده بهتر و نیاز به زمان برای یافتن یک تامین کننده مناسب باشد در شکل ۳ تحت سناریوی دوم کمترین افزایش هزینه رخ داده است در حالی که تحت سناریوی چهارم بیشترین افزایش هزینه در صورت افزایش هزینه تامین منابع شکل گرفته است.

همانگونه که در شکل ۴ دیده می‌شود چنانچه نیاز به منبع مورد نیاز افزایش یابد به طور طبیعی هزینه کل پروژه نیز در تمامی سناریوها افزایش می‌یابد و دقیقاً نمی‌توان گفت در کدام سناریو این افزایش هزینه بیشتر است.

اما در حوزه زمان نیز افزایش زمان پروژه تا حدی کمتر از هزینه مشهود است و این امر احتمالاً به دلیل نیاز به یافتن منابع بیشتر است که زمان‌بر خواهد بود. مشاهده می‌شود با افزایش میزان نیاز در سناریوی اول بدترین شرایط از نظر زمان انجام پروژه به وجود می‌آید. در شکل ۵ همانگونه که مشخص است با افزایش نیاز به منبع زمان پروژه نیاز به صورت خطی افزایش یافته است و همچنین سناریو اول بیشترین مقدار زمان را به خود اختصاص داده است اما سناریوهای دیگر به یک میزان افزایش یافته‌اند و به طور برابری دارای اندازه می‌باشند. ریسک شکست تامین کننده یکی از عواملی است که قطعاً می‌تواند بر هزینه و زمان پروژه اثرگذار باشد در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش ریسک شکست تامین کننده هزینه نیز افزایش یافته و این افزایش هزینه در سناریوی ۱ کاملاً مشهود است در حالی که در سناریوی ۳ کمترین افزایش هزینه به سبب افزایش ریسک شکست تامین کننده رخ می‌دهد علت افزایش این هزینه کاهش امکان انتخاب بین تامین کنندگان و افزایش طبیعی تامین منابع خواهد بود.

پروژه اول برای تامین منبع ۶ تامین کننده شماره ۵ بهترین تامین کننده از سوی مدل در نظر گرفته شده است. در ادامه میزان بهینه منابع انتقالی از هر فعالیت در هر پروژه به پروژه دیگر محاسبه می‌شود که در جدول ۹ میزان منابع انتقالی از فعالیت‌های پروژه ۱ به پروژه ۲ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که جدول ۹ نتیجه حل مدل همراه با قیود مربوطه است که در آن میزان انتقال منبع از هر فعالیت پروژه ۱ به پروژه ۲ حاصل گردیده است. در جدول ۱۱ منابع تامین کننده برای پروژه ۲ آورده شده است و همچنین در جدول ۱۲ میزان منابع مورد انتقال یافته از فعالیت‌های پروژه ۱ به ۲ نیز نشان داده شده است. توالی بهینه انجام فعالیت‌های پروژه در جدول ۱۳ نمایش داده شده است. مقادیر تحلیل حساسیت افزایش هزینه تامین منابع در جدول ۱۴ و تحلیل حساسیت افزایش منابع مورد نیاز در جدول ۱۵ برای هر یک از چهار سناریو نشان داده شده است. در انتهای توالی بهینه انجام فعالیت‌ها با توجه به پیش‌نیازهای آنان در جدول ۱۰ به دست آمده است.

با توجه به جدول ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که بر اساس پیش‌نیازهای هر فعالیت بهتر است ابتدا فعالیت ۱ انجام شده و سپس فعالیت ۴ و در ادامه فعالیت ۸ و به همین ترتیب فعالیت‌های پروژه با در نظر گرفتن پیش‌نیازها و البته بهینه‌سازی زمان و هزینه انجام پروژه صورت می‌گیرد. به این ترتیب شمای کلی از حل مسئله و نتایج حاصل از متغیرهای تصمیم به این صورت حاصل می‌گردد. در ادامه به تحلیل حساسیت پارامتری و واکنش مدل به تغییرات در پارامترها پرداخته می‌شود.

۵- تحلیل حساسیت

به وسیله تحلیل حساسیت می‌توان واکنش یک مدل را به تغییرات پارامتری اندازه گیری نمود و می‌توان دریافت که یک مدل نسبت به تغییر یک پارامتر چگونه تغییر می‌کند. در این بخش با توجه به رویکرد عدم قطعیت، تغییرات هزینه و زمان پروژه که به عنوان اهداف پروژه است به تفکیک هر سناریو تشریح می‌شود. در ابتدا

جدول ۱۱. انتخاب تامین کننده برای پروژه ۲

منبع	تامین کننده							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
۳	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
۵	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۶	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۲. میزان منابع انتقالی از فعالیت های پروژه ۱ به پروژه ۲

فعالیت	منبع					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۴	۲	۱	۵	۱	۱
۲	۱	۳	۵	۱	۱	۵
۳	۱	۳	۴	۱	۱	۱
۴	۲	۴	۲	۳	۱	۱
۵	۱	۲	۵	۴	۱	۱
۶	۱	۱	۵	۵	۳	۱
۷	۴	۴	۵	۱	۵	۲
۸	۱	۵	۲	۵	۱	۲
۹	۲	۱	۳	۲	۴	۴
۱۰	۲	۴	۵	۳	۴	۳
۱۱	۵	۴	۳	۳	۳	۲
۱۲	۱	۳	۲	۲	۲	۴
۱۳	۱	۳	۲	۱	۴	۳
۱۴	۴	۲	۴	۱	۵	۱
۱۵	۲	۴	۳	۴	۵	۴
۱۶	۲	۱	۵	۱	۴	۳
۱۷	۲	۴	۳	۱	۱	۳
۱۸	۴	۲	۵	۳	۴	۳
۱۹	۴	۳	۴	۱	۳	۵
۲۰	۱	۱	۳	۱	۵	۳

جدول ۱۳. توالی بهینه انجام فعالیت های پروژه

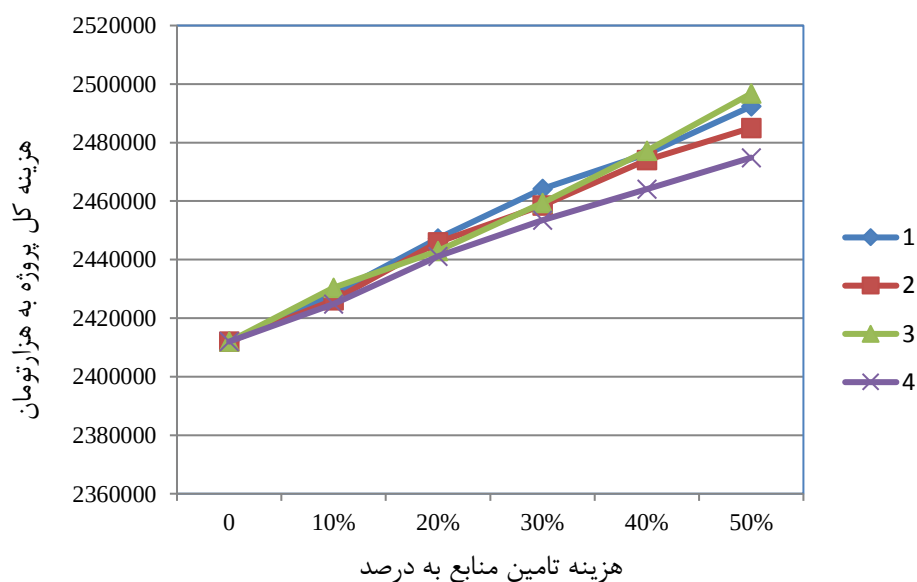
فعالیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
ترتیب	۱	۴	۸	۲	۵	۳	۶	۷	۱۰	۱۱	۹	۱۲	۱۴	۱۶	۱۳	۱۵	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰

جدول ۱۴. تحلیل حساسیت افزایش هزینه تامین منابع

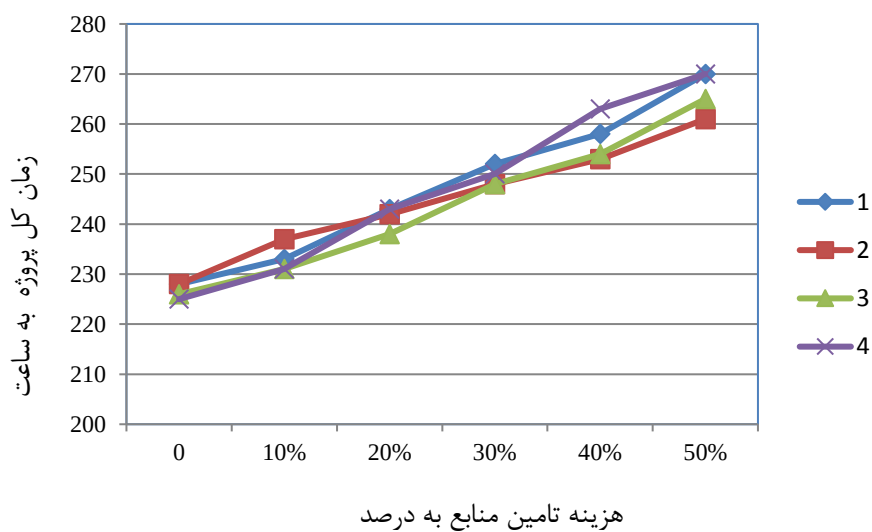
افزایش هزینه تامین منابع				هزینه				زمان
سناریو	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴
۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۲۸	۲۲۸	۲۲۶	۲۲۵
٪ ۱۰	۲۴۲۸۳۳۶	۲۴۲۶۱۶۳	۲۴۳۰۳۶۵	۲۴۲۴۸۷۴	۲۳۳	۲۳۷	۲۳۱	۲۳۱
٪ ۲۰	۲۴۴۷۲۹۴	۲۴۴۵۹۸۶	۲۴۴۲۹۹۹	۲۴۴۱۰۷۴	۲۴۳	۲۴۲	۲۳۸	۲۴۳
٪ ۳۰	۲۴۶۴۲۴۵	۲۴۵۸۵۲۸	۲۴۵۹۴۳۵	۲۴۵۳۴۵۲	۲۵۲	۲۴۸	۲۴۸	۲۵۰
٪ ۴۰	۲۴۷۶۱۲۶	۲۴۷۴۰۴۴	۲۴۷۷۱۸۰	۲۴۶۴۰۹۷	۲۵۸	۲۵۳	۲۵۴	۲۶۳
٪ ۵۰	۲۴۹۲۳۸۱	۲۴۸۵۰۴۱	۲۴۹۶۷۶۶	۲۴۷۴۸۶۱	۲۷۰	۲۶۱	۲۶۵	۲۷۰

جدول ۱۵- تحلیل حساسیت افزایش منبع مورد نیاز

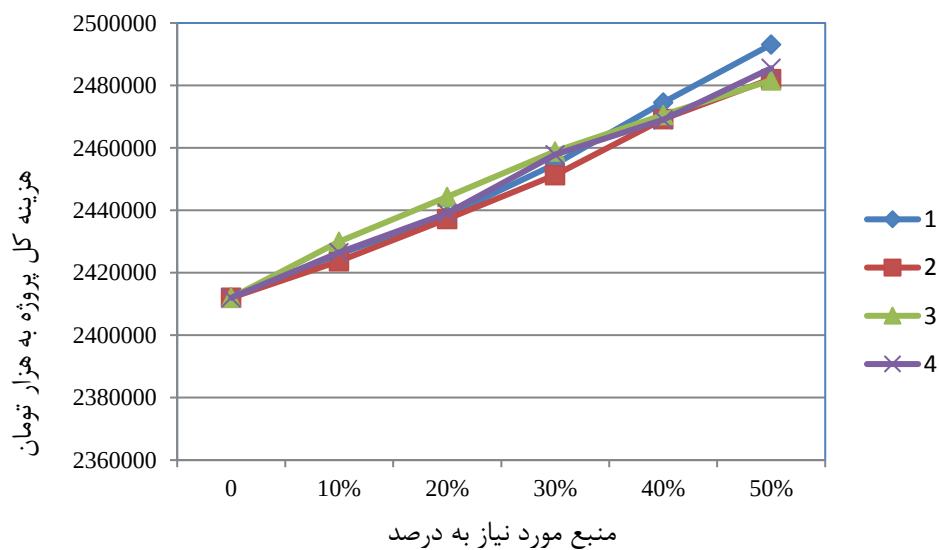
افزایش منبع مورد نیاز				هزینه				زمان
سناریو	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴
۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۲۸	۲۲۸	۲۲۶	۲۲۵
٪ ۱۰	۲۴۲۵۹۵۸	۲۴۲۳۷۵۷	۲۴۲۹۹۷۶	۲۴۲۶۵۰۹	۲۳۵	۲۴۳	۲۳۳	۲۳۵
٪ ۲۰	۲۴۳۸۳۸۲	۲۴۳۷۲۰۵	۲۴۴۲۸۸۶	۲۴۳۹۱۱۴	۲۴۱	۲۴۹	۲۴۰	۲۴۳
٪ ۳۰	۲۴۵۴۸۰۷	۲۴۵۱۳۱۵	۲۴۵۸۸۷۸	۲۴۵۷۸۵۶	۲۵۹	۲۵۷	۲۵۳	۲۴۹
٪ ۴۰	۲۴۷۴۵۶۴	۲۴۶۹۲۶۲	۲۴۷۰۵۳۵	۲۴۶۹۰۴۵	۲۷۹	۲۶۸	۲۶۵	۲۶۵
٪ ۵۰	۲۴۹۳۱۱۳	۲۴۸۲۱۰۴	۲۴۸۱۶۴۶	۲۴۸۵۵۲۱	۲۹۸	۲۷۳	۲۷۵	۲۸۴



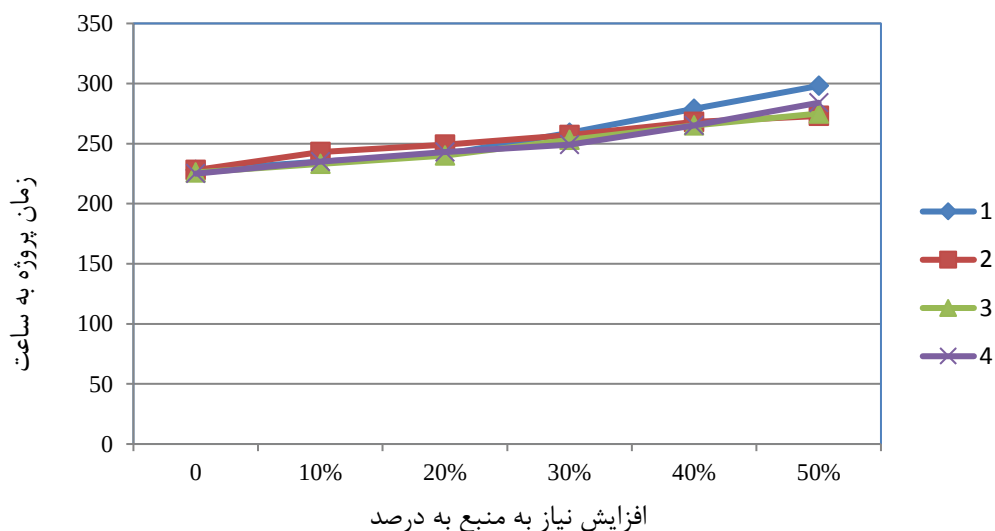
شکل ۲. تحلیل حساسیت هزینه نسبت به افزایش هزینه تامین منابع



شکل ۳. تحلیل حساسیت زمان نسبت به افزایش هزینه تامین منابع



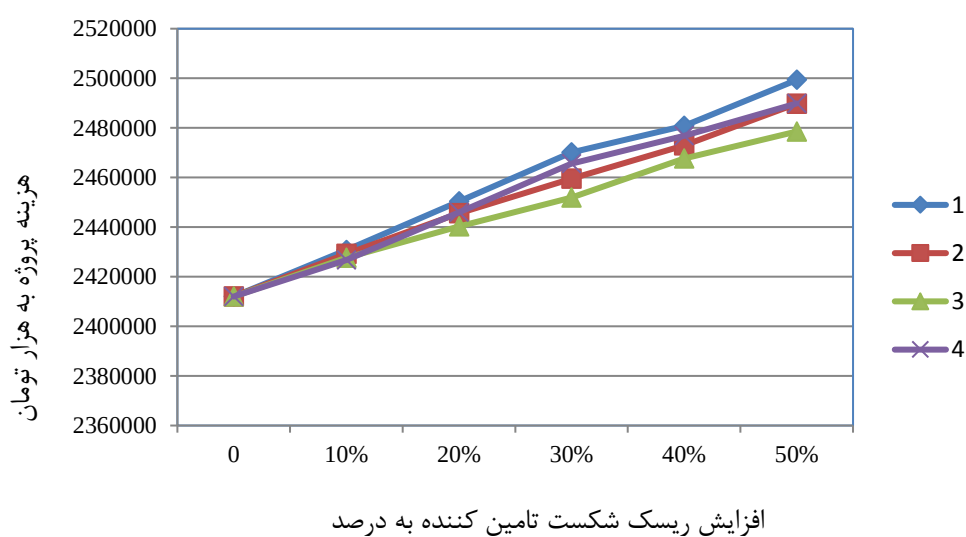
شکل ۴. تحلیل حساسیت هزینه نسبت به افزایش نیاز به منبع



شکل ۵. تحلیل حساسیت زمان نسبت به افزایش نیاز به منبع

جدول ۱۶. تحلیل حساسیت افزایش ریسک شکست تامین کننده

سناریو	افزایش ریسک شکست تامین کننده				هزینه				زمان	
	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴	۳	۴
۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۲۸	۲۲۵
۱۰٪	۲۴۳۰۶۶۸	۲۴۲۹۱۸۶	۲۴۲۷۵۹۸	۲۴۲۶۶۸۷	۲۴۳۰۶۶۸	۲۴۲۹۱۸۶	۲۴۲۷۵۹۸	۲۴۲۶۶۸۷	۲۳۹	۲۴۳
۲۰٪	۲۴۵۰۳۰۷	۲۴۴۵۶۳۳	۲۴۴۰۲۹۳	۲۴۴۵۹۷۱	۲۴۵۰۳۰۷	۲۴۴۵۶۳۳	۲۴۴۰۲۹۳	۲۴۴۵۹۷۱	۲۴۹	۲۵۱
۳۰٪	۲۴۷۰۱۳۰	۲۴۵۹۴۸۰	۲۴۵۱۹۲۲	۲۴۶۵۵۱۴	۲۴۷۰۱۳۰	۲۴۵۹۴۸۰	۲۴۵۱۹۲۲	۲۴۶۵۵۱۴	۲۶۶	۲۶۸
۴۰٪	۲۴۸۰۸۶۵	۲۴۷۲۸۹۹	۲۴۶۷۶۰۱	۲۴۷۶۸۲۵	۲۴۸۰۸۶۵	۲۴۷۲۸۹۹	۲۴۶۷۶۰۱	۲۴۷۶۸۲۵	۲۷۸	۲۸۷
۵۰٪	۲۴۹۹۳۳۳	۲۴۸۹۷۶۴	۲۴۷۸۵۴۶	۲۴۸۹۸۶۲	۲۴۹۹۳۳۳	۲۴۸۹۷۶۴	۲۴۷۸۵۴۶	۲۴۸۹۸۶۲	۲۹۷	۳۰۶



شکل ۶. تحلیل حساسیت هزینه نسبت به افزایش ریسک شکست تامین کننده

معرفی شده و سپس بحث اعتبار سنجی مطرح گردید. در ادامه مدل در ابعاد مختلف حل شد و ۱۵ مثال با توجه به ابعاد آن‌ها معرفی گردید. پس از آن مهم‌ترین بخش بهینه‌سازی یعنی تحلیل حساسیت انجام گرفت و واکنش مدل نسبت به تغییرات در پارامترها تبیین گردید. نتیجه نشان داد در اغلب تغییرات پارامتری وضعیت سناریوی اول نسبت به سایر سناریوها بهینه‌تر است. ضمن اینکه در برخی تحلیل‌ها شاهد تفاوت معنی‌دار بین سناریوها بوده و در برخی موارد دیگر هیچ تفاوتی بین سناریوها دیده نمی‌شود. اثر پارامترها به طور همزمان بر هزینه و زمان پروژه تأیید می‌شود که البته شیب این اثر بر هزینه اغلب تندتر از زمان است. در مجموع تحلیل‌های مختلف بر اساس برخی پارامترهای هزینه‌ای و زمانی مهم صورت گرفت و نتایج آن تبیین شد. در این بخش به ارائه پیشنهادات و بینش‌های مدیریتی حاصل از نتایج تحقیق حاضر پرداخته می‌شود.

۱- در جهان واقعی مدیریت چند پروژه‌ای بیش از تک پروژه مطرح است و در بسیاری از اوقات به دلیل کمبود نیروی متخصص در مدیریت پروژه چندین پروژه به یک مدیر پروژه واگذار می‌شود. بنابراین یک مدیر پروژه باید با توجه به منابع موجود و محدودی که در اختیار دارد این منابع را به گونه‌ای بین فعالیت‌های دو یا چند پروژه تخصیص دهد که هرگز با کمبود منابع مواجه نشود یا این کمبود حداقل باشد. همین امر مدیریت چند پروژه را دشوار می‌نماید چرا که یک مدیر پروژه برای هر پروژه دارای منابع مشخصی نیست بلکه دارای منابع محدودی است که می‌بایست بین فعالیت‌های مختلف یک پروژه تخصیص دهد. یک مدیر پروژه باید توجه داشته باشد که تخصیص نباید به گونه‌ای باشد که یک پروژه یا فعالیت‌های یک پروژه از منابع بیشتری نسبت به پروژه دیگر برخوردار باشد بلکه باید به گونه‌ای باشد که هر پروژه بسته به نیاز و اهمیت خود صاحب منابع مورد نیاز شود و از این جهت منابعی بیهوده اتلاف نشود.

نتایج در مورد افزایش ریسک شکست تامین کننده در شکل ۷ نشان داده شده است، همان‌طور که مشخص است هر چهار سناریو دارای مقدار یکسان بوده‌اند و مقادیر ابتدایی و انتهایی آن‌ها یکسان است و یک تابع کاملاً خطی را دنبال می‌کنند و تأثیر این فاکتور برای افزایش زمان پروژه برای هر یک از سناریوها به‌طور مساوی است. در جدول ۱۶ نیز مقادیر کمی تحلیل حساسیت افزایش ریسک شکست تامین کننده به تفکیک برای هر یک از چهار سناریو آورده شده است.

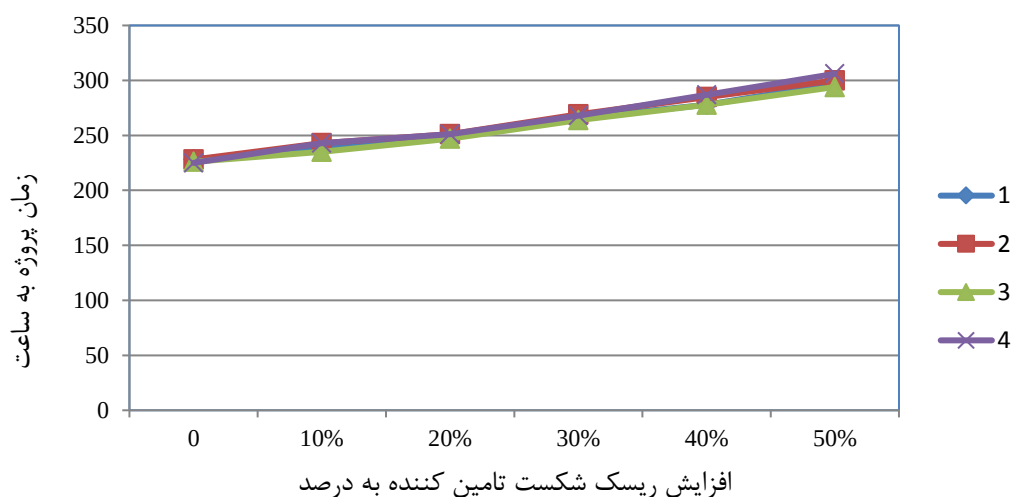
به علت افزایش ریسک شکست تامین کننده انتخاب تامین‌کننده مناسب زمان‌بر بوده و همین امر می‌تواند منجر به افزایش زمان پروژه شود ضمن اینکه تامین‌کننده انتخابی خود می‌تواند با تأخیر، زمان پروژه را افزایش دهد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که در تمامی سناریو وضعیت یکسانی مشاهده شده و تفاوتی بین ۴ سناریوی مورد بررسی نیست.

با کاهش مدت زمان تحویل پروژه‌ها به طور طبیعی هزینه انجام پروژه‌ها افزایش خواهد یافت اما در شکل ۹ مشاهده می‌شود که تحت سناریوهای مختلف این افزایش متفاوت است. سناریوی شماره ۱ نشانگر کمترین زمان افزایش است در حالی که در سناریوی دوم و چهارم بیشترین افزایش هزینه به پروژه تحمیل شده و سناریوی سوم در وضعیت تقریباً بینابینی قرار دارد. در جدول ۱۷ مقادیر عددی و کمی تحلیل حساسیت کاهش موعد تحویل پروژه‌ها نشان داده شده است.

در شکل ۹ کاهش زمان کل پروژه با توجه به کاهش زمان تحویل خواهد بود که این امر طبیعی است اما در سناریوی دوم کمترین کاهش صورت گرفته و می‌توان گفت سناریوی دوم نشانگر بدترین حالت است اما سه سناریوی دیگر وضعیت مشخصی را نشان می‌دهد و در مجموع می‌توان گفت اثر کاهش موعد تحویل پروژه‌ها بین زمان و هزینه متفاوت است.

۴. نتیجه‌گیری

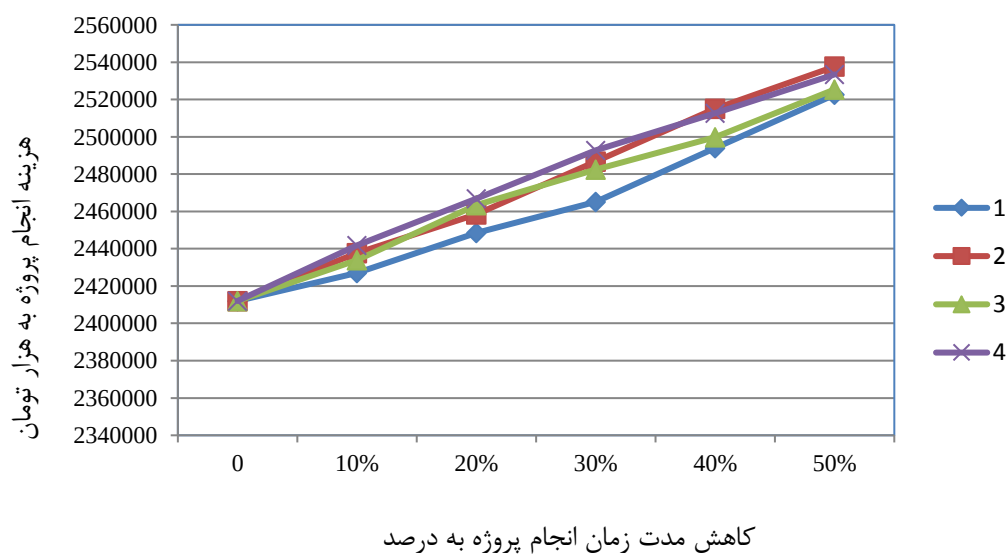
در این مقاله مدل بهینه‌سازی استوار برای مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ارائه شد. در ابتدا پارامترهای مدل



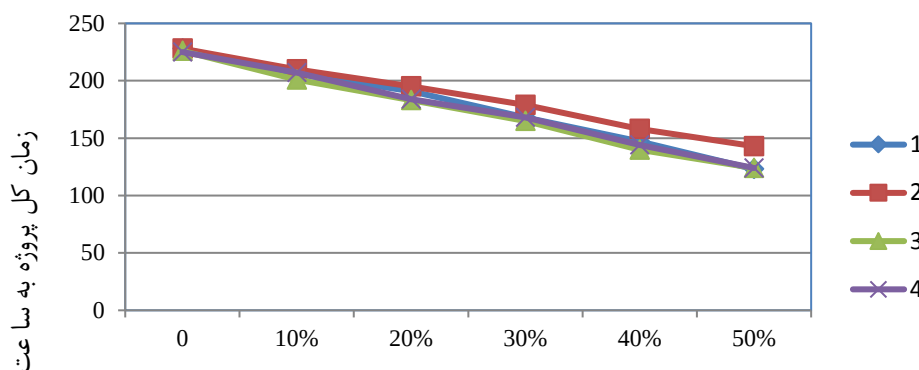
شکل ۷. تحلیل حساسیت زمان نسبت به افزایش ریسک شکست تامین کننده

جدول ۱۷. تحلیل حساسیت کاهش موعد تحویل پروژه ها

موعد تحویل پروژه ها				هزینه				زمان			
سناریو				۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴
۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۴۱۲۰۰۰	۲۲۸	۲۲۸	۲۲۶	۲۲۵
٪ ۱۰	۲۴۲۷۰۷۰	۲۴۳۷۷۰۴	۲۴۳۳۹۵۰	۲۴۴۱۷۸۶	۲۴۳۳۹۵۰	۲۴۴۱۷۸۶	۲۴۴۱۷۸۶	۲۰۶	۲۱۰	۲۰۱	۲۰۷
٪ ۲۰	۲۴۴۸۴۲۶	۲۴۵۸۴۵۰	۲۴۶۳۴۱۶	۲۴۶۶۸۴۹	۲۴۶۳۴۱۶	۲۴۶۶۸۴۹	۲۴۶۶۸۴۹	۱۹۱	۱۹۵	۱۸۳	۱۸۴
٪ ۳۰	۲۴۶۵۱۵۷	۲۴۸۶۷۸۱	۲۴۸۲۳۷۷	۲۴۹۲۷۳۹	۲۴۸۲۳۷۷	۲۴۹۲۷۳۹	۲۴۹۲۷۳۹	۱۶۸	۱۷۹	۱۶۵	۱۶۸
٪ ۴۰	۲۴۹۳۸۸۸	۲۵۱۴۹۶۷	۲۴۹۹۷۳۹	۲۵۱۲۷۱۷	۲۴۹۹۷۳۹	۲۵۱۲۷۱۷	۲۵۱۲۷۱۷	۱۴۷	۱۵۸	۱۴۰	۱۴۴
٪ ۵۰	۲۵۲۲۵۶۰	۲۵۳۷۶۲۷	۲۵۲۵۳۷۲	۲۵۳۳۴۵۳	۲۵۲۵۳۷۲	۲۵۳۳۴۵۳	۲۵۳۳۴۵۳	۱۲۳	۱۴۳	۱۲۴	۱۲۴



شکل ۸. تحلیل حساسیت هزینه نسبت به کاهش مدت زمان انجام پروژه



کاهش مدت زمان انجام پروژه به درصد
 شکل ۹. تحلیل حساسیت زمان نسبت به کاهش مدت زمان انجام پروژه

وضعیت تک پروژه‌ای چه در وضعیت چند پروژه باید بتواند سناریوهای مختلف را در خصوص انجام پروژه لحاظ نماید چرا که امکان ندارد یک پروژه در یک وضعیت قطعی اجرا شده و از عدم قطعیتی که با آن مواجه است بی‌نصیب بماند. بنابراین تعیین سناریوهای مختلف و تعیین شدت هر یک از آن‌ها از وظایف مهم یک مدیر پروژه است. ضمن اینکه چنانچه هزینه یا زمانی در نظر گرفته می‌شود این هزینه یا زمان می‌بایست تحت هر سناریو به طور منفک ثبت شده و مشخص شود که هر هزینه یا زمان انجام فعالیت مختص کدام سناریو است. سناریوسازی یا در نظر گرفتن سناریوهای مختلف می‌تواند دیدی وسیع به یک مدیر پروژه دهد به گونه‌ای که وی تمامی به تمامی شرایط مسلط بوده و نگاهی محیط به پروژه داشته باشد.

۲- بحث انتخاب تامین‌کننده موضوع مهم دیگری است که در وضعیت چند پروژه‌ای باید مد نظر قرار گیرد. باید انتخاب به گونه‌ای صورت گیرد که حداقل شکست یا اختلال در تامین منابع صورت گیرد. اگر تامین‌کننده نامناسب یا ضعیف انتخاب شود این انتخاب می‌تواند هزینه‌های بسیاری را به پروژه تحمیل کند، زمان پروژه را طولانی نموده و نتایجی از این دست به بار آورد. البته انتخاب تامین‌کننده در تحقیق حاضر بر اساس معیارهای سبز یا پایداری نیست اما این معیارها نیز در بسیاری از تحقیقات مد نظر قرار گرفته است. معیار زمان و هزینه صرفاً معیارهای مهمی هستند که همین معیارها می‌توانند تعیین‌کننده عملکرد یک پروژه یا مدیر پروژه باشند.

۳- در نظر گرفتن عدم قطعیت یا سناریوهای مختلفی که در مدیریت یک پروژه مد نظر است نیز از موارد مهمی است که در این پروژه لحاظ شده است. یک مدیر پروژه چه در

واژه نامه

1. Critical path method

4. Earned value management

7. Control Variable

2. Program Evaluation Review Technique

5. stochastic resource-constrained project scheduling problems_Net Putting Average

8. Fitness Function

3. Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem

6. Structural Variable

9. MATLAB software

مراجع

1. Taheri, M. and Bathaee, S. H. Sensitivity Analysis of peripheral parameters in three dimensional nano-manipulation by using HK model. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2019; 9(2):123-139. (In Persian) <https://doi.org/10.22044/jsfm.2019.7256.2667>
2. Khalili, M., Taheri, M., Bathaee, S. H., and Shakeri, F. Manipulation of DNA by Atomic force microscopy based on finite element method using contact mechanics theories. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022; 1(2): 155-174. (In Persian) <https://doi.org/10.52547/masm.1.2.155>
3. Bathaee, S. H., Sabzevari, M., and Moslemi Naeini, H. Investigation of hydroforming process loading paths based on experimental and improvement based on Sobol sensitivity analysis. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022; 2(1): 53-72. <https://doi.org/10.52547/masm.2.1.53>
4. Taheri, M. and Bathaee, S. H. Sensitivity analysis of peripheral parameters in three dimensional nano-manipulation by using HK model. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2019; 9(2):123-139. (In Persian) <https://doi.org/10.22044/jsfm.2019.7256.2667>
5. Bathaee, S. H., Study of basic parameters of severe extrusion plastic deformation process in torsional angled channels based on E-Fast sensitivity analysis and DOE. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2021; 1(1):88-105. <https://doi.org/10.52547/masm.1.1.88>
6. Zarei, B., Bathaee, S. H., Taheri, M., and Momeni, M. Second phase of nanomanipulation of particles by Atomic Force Microscopy using coulomb, HK, and luGre friction models. *Modares Mechanical Engineering*. (In Persian) 2019; 19(1): 181-190. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.10275940.1397.19.1.25.5>
7. Bruni, M. E., Pugliese, L. D. P., Beraldi, P., and Guerriero, F. A. Computational study of exact approaches for the adjustable robust resource-constrained project scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 2018; 99: 178-190. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.06.016>
8. Glover, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 1986; 13(5): 533-549. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1)
9. Chen, L., and Zhang, Z., Preemption resource-constrained project scheduling problems with fuzzy random duration and resource availabilities. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2016; 33(6):373-382. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1140089>
10. Ghoddousi, P., Eshtehardian, E., Jooybanpour, S., and Javanmardi, A. Multi-mode resource-constrained discrete time-cost-resource optimization in project scheduling using non-dominated sorting genetic algorithm. *Automation in Construction*, 2013; 30: 216-227.2013. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.014>
11. Tavana, M., Abtahi, A. R., and Khalili-Damghani, K. A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time-cost-quality trade-off project scheduling problems. *Expert Systems with Applications*, 2014; 41(4): 1830-1846. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.08.081>
12. Delgoshaei, A., Al-Mudhafar, A., and Ariffin, M. Developing a new method for modifying over-allocated multi-mode resource constraint schedules in the presence of preemptive resources. *Decision Science Letters*, 2016; 5(4): 85-117. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2336-8>
13. Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B., and Niaki, S. T. A. A multi-objective invasive weeds optimization algorithm for solving multi-skill multi-mode resource constrained project scheduling problem. *Computers & Chemical Engineering*. 2016; 88: 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.02.018>
14. Tirkolaee, E. B., Hadian, S., and Golpîra, H. A novel multi-objective model for two-echelon green routing problem of perishable products with intermediate depots. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*. 2019; 6(2): 196-213. <https://doi.org/10.22116/jiems.2019.94158>
15. Shariatmadari, M., Nahavandi, N., Zegordi, S. H., and Sobhiyah, M. H. Integrated resource management for simultaneous project selection and scheduling. *Computers & Industrial Engineering*. 2017; 109: 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.003>
16. Valls, V., Ballestín, F., and Quintanilla, S. A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem *European journal of operational Research*, 2008; 185(2): 495-508. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.033>
17. Ballestín, F., and Leus, R. Resource-constrained project scheduling for timely project completion with stochastic activity durations. *Production and Operations Management*. 2009; 18(4): 459-474. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2009.01023.x>
18. Bruni, M. E., Pugliese, L. D. P., Beraldi, P., and Guerriero, F. A computational study of exact approaches for the adjustable robust resource-constrained project scheduling problem", *Computers & Operations Research*, 2018; 99: 178-190. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.06.016>
19. Chen, H., Ding, G., Zhang, J., and Qin, S. Research on priority rules for the stochastic resource constrained multi-project scheduling problem with new project arrival", *Computers & Industrial Engineering*. 2019; 137: 106060. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106060>
20. Rahman, H. F., Chakraborty, R. K., and Ryan, M. J. Scheduling project with stochastic durations and time-varying resource requests: A metaheuristic approach. *Computers & Industrial Engineering*,

- 2021; 157:107363.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107363>
21. Suwa, H., and Morita, D., Reactive project scheduling method to enhance project progress under uncertainty. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2016; 10(3): JAMDSM0051.
<https://doi.org/10.1299/jamdsm.2016jamdsm0051>
22. Ben-Tal, A., and Nemirovski, A. Robust optimization—methodology and applications. *Mathematical programming*. 2002; 92(3): 453-480.
<https://doi.org/10.1007/s101070100286>
23. Bertsimas, D., and Sim, M. The price of robustness. *Operations Research*. 2004; 52(1): 35-53.
<https://doi.org/10.1287/opre.1030.0065>
24. Adida, E., and Joshi, P., "A robust optimisation approach to project scheduling and resource allocation", *International Journal of Services Operations and Informatics*, 2009; 4(2): 169-193.
<https://doi.org/10.1504/IJSOI.2009.023421>
25. Goldberg, D. E., and Holland, J. H., Genetic algorithms and machine learning. *Machine Learning*. 3; 95-99. <https://doi.org/10.1023/A:1022602019183>
26. Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., and Zenios, S. A. Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*. 1995; 43(2): 264-281.
<https://www.jstor.org/stable/171835>
27. Liu, H., Qu, S., Li, R., and Razaa, H. Bi-objective robust project scheduling with resource constraints and flexible activity execution lists. *Computers & Industrial Engineering*. 2021; 156: 107288.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107288>
28. Morshed, S. S., Shahraki, A., and Baradaran, V., A robust integrated model for resource-constrained project scheduling problem with material ordering. *Journal of China University of Geosciences*. 2025; 50(1): 200-216.
<https://zenodo.org/records/15795653>
29. Lotfi, R., Sadeghi, S., Ali, S., Ramyar, S., Ghafourian, F., Farbod, E., and Robust, E. A resilience machine learning with a risk approach for project scheduling. *Engineering Reports*. 2025; 7(6):e70161.
<https://doi.org/10.1002/eng2.70161>
30. Martin, X. A., Herrero, R., Juan, A. A., and Panadero, J. An agile adaptive biased-randomized discrete-event heuristic for the resource-constrained project scheduling problem. *Mathematics*. 2024; 12(12): 1873. <https://doi.org/10.3390/math12121873>
31. Qiua, K., Chena, L., Dauzere-Peres, S. A robust optimization approach for the resource-constrained project scheduling problem with uncertain activity release times. 2025; 184: 107215.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107215>