

تحلیل آسیب‌پذیری فعالیت‌ها و ارائه یک رویکرد دومرحله‌ای مبتنی بر خرید منابع برای مسأله زمان‌بندی پروژه چند حالتی تحت عدم قطعیت

فرناز ترابی‌یگانه^۱، سید حسام‌الدین ذگردی^{۲*}، جواد بهنامیان^۳

۱. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

خلاصه

پروژه‌ها همواره با عدم قطعیت و اختلال‌های مختلفی مواجه هستند که یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش زمان و کاهش قابلیت اطمینان برنامه زمان‌بندی اولیه است. با این حال، در محیط‌های واقعی پروژه، فعالیت‌ها به یک اندازه تحت تأثیر اختلالات قرار نمی‌گیرند و نادیده گرفتن این تفاوت‌ها می‌تواند منجر به تخصیص ناکارآمد منابع و افزایش غیرضروری هزینه‌ها شود. در این پژوهش، رویکرد جدیدی برای تعیین آسیب‌پذیری فعالیت‌ها و خرید منابع مبتنی بر آسیب‌پذیری در مسأله زمان‌بندی چند حالتی پروژه با منابع محدود و مدت‌زمان‌های تصادفی ارائه می‌شود. در مرحله اول، ۱۱ شاخص مبتنی بر شبکه، زمان و منبع استخراج و با استفاده از روش آنالیز شانون وزن‌دهی می‌شوند. سپس آسیب‌پذیری هر فعالیت با استفاده از ترکیب وزنی این شاخص‌ها محاسبه می‌گردد. بر این اساس، یک الگوریتم ابتکاری برای خرید منابع تجدیدپذیر طراحی شده است که فعالیت‌های با آسیب‌پذیری بالاتر را در اولویت قرار داده و مقدار خرید را به صورت تابعی از شاخص آسیب‌پذیری، فشردگی منبع و حداکثر نیاز منبع تعیین می‌کند. با تعیین مقادیر خرید، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MILP) پیشنهادی حل شده تا تصمیمات زمان‌بندی و تخصیص منابع تحت عدم قطعیت اتخاذ گردد. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که استراتژی خرید منابع مبتنی بر آسیب‌پذیری، در مقایسه با حالتی که این استراتژی در نظر گرفته نمی‌شود، موجب کاهش زمان تکمیل شده و در عین حال، رویکرد دومرحله‌ای ابتکاری-دقیق، زمان محاسباتی را نسبت به حل مستقیم مدل MILP به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که شناسایی فعالیت‌های آسیب‌پذیر، نقش کلیدی در افزایش تاب‌آوری برنامه زمان‌بندی پروژه ایفا می‌کند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۴/۰۹/۱۷

بازنگری ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

پذیرش ۱۴۰۴/۱۲/۲۲

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

آسیب‌پذیری

زمان‌بندی پروژه

محدودیت منابع

عدم قطعیت

الگوریتم ابتکاری

۱. مقدمه

پروژه‌ها همواره تحت تأثیر اختلال‌ها با منشا مختلف مانند عدم دسترسی به منابع، تحویل دیر هنگام مواد، عدم مهارت کافی نیروی کار، شرایط جوی نامناسب و تغییرات در حجم عملیات آسیب هستند

[۱-۲]. بروز چنین اختلال‌هایی نیاز به درک عمیق‌تر ساختار پروژه و درجه آسیب‌پذیری عناصر آن را به منظور به‌کارگیری استراتژی‌های کارآمد، برجسته می‌کنند [۳]. به همین منظور، ارزیابی آسیب‌پذیری یک پروژه با هدف تعیین فعالیت‌هایی که بیشترین حساسیت را نسبت

* نویسنده مسئول: سید حسام‌الدین ذگردی

تلفن: ۰۲۱-۸۲۸۸۳۳۹۴؛ پست الکترونیکی: zegordi@modares.ac.ir

در میان مدل‌های مختلف زمان‌بندی پروژه، مسأله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ($RCPSP^3$) که بر تعیین زمان شروع فعالیت‌ها با رعایت محدودیت‌های تقدم و دسترسی محدود به منابع تمرکز دارد، یکی از معروفترین مسائل در ادبیات زمان‌بندی پروژه است [۱۰]. در $RCPSP$ پایه یک فعالیت دارای زمان ثابت بوده و در طول اجرا نیازمند میزان مشخصی از یک یا چند نوع منبع است [۱۱]. مفهوم چند حالت اجرا برای فعالیت‌ها برمی‌گردد به تالیوت^۴ [۱۲] که با امکان اجرای فعالیت با حالت‌های مختلف انعطاف‌پذیری پروژه را افزایش می‌دهد. هر حالت با زمان و مقدار منبع موردنیاز برای فعالیت تعریف می‌شود. در مسأله زمان‌بندی چند حالتی پروژه با محدودیت منابع ($MRCPSPP^5$)، علاوه بر تعیین زمان شروع، حالت اجرایی هر فعالیت نیز باید مشخص شود [۱۳]. برای مثال، در یک پروژه عمرانی، یک فعالیت مشخص می‌تواند با تخصیص نیروی انسانی و تجهیزات بیشتر در زمان کوتاه‌تری انجام شود، یا با استفاده از منابع کمتر، مدت زمان اجرای آن افزایش یابد. این انعطاف‌پذیری امکان مدل‌سازی واقع‌بینانه‌تری فراهم می‌کند، زیرا در واقعیت نیز افزایش تخصیص منابع می‌تواند منجر به کاهش مدت فعالیت‌ها شود، در حالی که محدودیت منابع معمولاً باعث افزایش زمان اجرا می‌گردد [۱۴]. ویژگی قابل تغییر بودن حالت اجرایی فعالیت‌ها در شرایط عدم قطعیت اهمیت ویژه‌تری پیدا می‌کند زیرا می‌توان انجام فعالیت‌ها را با شرایط منطبق ساخت و سازگاری پروژه را با اختلالات پیش‌بینی نشده افزایش داد. در این راستا، این پژوهش، به‌منظور تولید زمان‌بندی سازگار با محیط‌های غیرقطعی پروژه‌ها، مسأله $MRCPSPP$ تصادفی سناریو محور ($SMRCPSPP^6$) را ارائه داده که زمان فعالیت‌ها به‌عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند.

مشابه $RCPSP$ ، مسأله $MRCPSPP$ و به تبع آن فرم غیرقطعی مسأله نیز قویا از نوع NP-hard است و همین موضوع موجب گرایش پژوهشگران به استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری شده است [۱۴]. این پژوهش یک رویکرد دو مرحله‌ای ابتکاری-دقیق مبتنی بر آسیب‌پذیری، برای حل مسأله $SMRCPSPP$ با در نظر گرفتن استراتژی تاب‌آوری پروژه ارائه می‌دهد.

ادامه این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. بخش ۲ مروری بر پیشینه پژوهش‌های مرتبط گذشته ارائه می‌دهد. در بخش سه، آسیب‌پذیری فعالیت‌ها و معیارهای مرتبط با آن شرح داده می‌شود. در بخش ۴ به تعریف مسأله و بیان مدل ریاضی پرداخته شده است. بخش ۵ به روش حل اختصاص یافته و بخش ۶ نتایج عددی حاصل از حل مدل برای مسائل استاندارد ارائه می‌شود. در نهایت، بخش ۷ مقاله با بیان نتیجه‌گیری به پایان می‌رسد.

به اختلال و عدم قطعیت دارند، به یک حوزه تحقیقاتی حایز اهمیت تبدیل شده است [۴]. اگرچه روش‌های مختلفی ارزیابی آسیب‌پذیری حوزه‌های زیادی را پوشش می‌دهند، مطالعات نسبتاً کمی به این موضوع مهم در حوزه مدیریت پروژه پرداخته‌اند [۵]. پس از تعیین فعالیت‌های حساس، لزوم توسعه راهکارها و استراتژی‌ها جهت تاب‌آور ساختن و تطبیق این عناصر با شرایط عدم قطعیت در گام بعدی قرار می‌گیرد. استراتژی‌های متعددی برای کاهش اثر عدم قطعیت‌ها و افزایش قابلیت اطمینان پروژه‌ها در نظر گرفته شده است. یکی از رویکردهای رایج در ادبیات مدیریت پروژه، تخصیص بافر در زمان‌بندی پروژه‌ها است. در این استراتژی به منظور محافظت از برنامه در برابر عدم قطعیت، به برنامه مینا زمان‌های بافر اضافه می‌شود. در ادبیات دو روش کلی متمرکز و غیرمتمرکز برای افزودن این زمان‌ها وجود دارد. در روش متمرکز، مقدار بافر به صورت یکجا برای کل پروژه لحاظ می‌شود [۶]. مدیریت بافر زنجیره بحرانی ($CCBM^1$) که توسط گلدرات^۲ [۷] ارائه شده را می‌توان به عنوان معروفترین روش بافر متمرکز نام برد. این روش به دلیل آنکه تنها بر موعد تحویل پروژه تأکید دارد و تأخیرهای فازها و فعالیت‌های پروژه را نادیده می‌گیرد مورد انتقاد بسیاری از محققین قرار گرفته است [۲]. برای جبران این ضعف، رویکردهای مبتنی بر بافر غیرمتمرکز که بافرهای کوچک را در نقاط مختلف برنامه اضافه می‌کرد، پیشنهاد شد. مجموعه‌ای دیگر از استراتژی‌ها بر روی شنآوری فعالیت‌ها تمرکز دارند که بیانگر مقدار زمانی هستند که یک فعالیت می‌تواند به تأخیر بیفتد بدون آنکه زمان تکمیل پروژه به تأخیر بیفتد. مفهوم این رویکرد براساس ایده‌ای است که در آن فواصل زمانی کافی در ساختار برنامه پایه در نظر گرفته می‌شود تا زمان‌بندی قادر باشد اختلالات ناشی از تأثیر عدم قطعیت‌ها را جذب کند [۸]. یک جریان تحقیقاتی دیگر به انعطاف‌پذیری در منابع می‌پردازد. این انعطاف‌پذیری می‌تواند از طریق روش‌های مختلفی از جمله استفاده از منابع شناور، برون‌سپاری یا خرید منابع حاصل شود [۹]. در استراتژی‌های منبع-محور می‌توان در ابتدای پروژه براساس ساختار و شرایط پروژه و شناخت اجزای آسیب‌پذیر، تمهیداتی جهت در نظر گرفتن منابع اضافی یا شنآوری منابع در نظر گرفت [۶]. یکی از نقاط ضعفی که در اغلب مقالاتی که از استراتژی‌های مبتنی بر افزونگی (بافر یا منبع) استفاده کردند به چشم می‌خورد این است که بافر یا منابع اضافی برای کل پروژه لحاظ شده یا در صورت غیرمتمرکز بودن، ویژگی‌های فعالیت‌های پروژه نادیده گرفته شده است. برای مثال توزیع بافر به صورت یکنواخت و بدون در نظر گرفتن میزان حساسیت و آسیب‌پذیری فعالیت‌ها در برابر عدم قطعیت انجام شده است [۲]. در این مقاله، خرید منابع براساس میزان آسیب‌پذیری و حساسیت فعالیت‌های پروژه نسبت به عدم قطعیت، به عنوان استراتژی تاب‌آوری انتخاب شده است.

5. Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem
 6. Stochastic Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem

1. Critical Chain Buffer Management
 2. Goldratt
 3. Resource-Constrained Project Scheduling Problem
 4. Talbot

۲. پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر مسأله زمان‌بندی پروژه با تخصیص منابع مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۱۵]. با این حال مدل‌های کلاسیک RCPSP و توسعه‌های آن، شرایط را قطعی در نظر گرفته در صورتی که در دنیای واقعی پروژه‌ها با انواع عدم قطعیت مواجه هستند [۱۶]. استراتژی‌های مختلفی در ادبیات به منظور مدیریت عدم قطعیت و افزایش تاب‌آوری برنامه‌ی زمان‌بندی به‌کار گرفته شده است. یک استراتژی پیشگیرانه این است که حداکثر زمان شناوری برای فعالیت‌ها در برنامه گنجانده شود تا بدون در نظر گرفتن مدل‌های تصادفی صریح یا سناریوهای عدم قطعیت، تأخیرهای احتمالی فعالیت‌ها تا حدی توسط زمان‌های شناوری جذب و ریسک تأخیر در تکمیل پروژه کاهش یابد. در پیشینه این حوزه تحقیق، تابع هدف‌های مختلفی مبتنی بر شناوری ارائه شده است. [۱۷] پیشینه کردن کوچکترین شناوری آزاد با در نظر گرفتن زمان فعالیت را به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند. [۱۸] چندین معیار از جمله شناوری کل فعالیت‌ها و حداکثر تعداد فعالیت‌های دارای شناوری را بررسی کردند. هائو و همکاران^۱ [۱۹] نیز یک معیار مبتنی بر مجموع شناوری آزاد با در نظر گرفتن تعداد پسنیاز و منبع مورد نیاز هر فعالیت ارائه دادند. استراتژی دیگری که در ادبیات مورد توجه محققین قرار دارد، افزودن زمان بافر به پروژه است. مفهوم بافر و مدیریت زنجیره بحرانی توسط گلدرا^۲ [۷] به منظور محافظت پروژه‌ها در برابر عدم قطعیت معرفی شد. زمان بافر، مقدار زمانی است که برای جبران عدم قطعیت و محافظت از برنامه در برابر اختلال در مدت زمان انجام پروژه گنجانده می‌شود [۲۰]. برای مثال، بهناس و همکاران^۳ [۲۱] چارچوبی برای پیاده‌سازی نظارت بافر CCPM^۳ مبتنی بر بلاکچین معرفی کرده و آن را با عملکرد پروژه ادغام کردند. نقطه ضعف افزودن بافر به روش سنتی، تخصیص یکجای آن به کل پروژه و انتهای زنجیره بحرانی است. در سال‌های اخیر تخصیص بافر به فعالیت به جای تخصیص بافر تنها به انتهای زنجیره پروژه مورد توجه قرار گرفته است [۲۲]. استراتژی افزونگی و تخصیص منابع، استراتژی دیگر افزایش تاب‌آوری است که کمتر در پیشینه تحقیق به آن پرداخته شده است در حالی که در حوزه مدیریت پروژه، تخصیص منابع جنبه‌ای حیاتی است که مستقیماً بر موفقیت و پایداری پروژه‌ها تأثیر می‌گذارد [۲۳]. آرتیگ^۴ و همکاران [۲۴] یک روش تخصیص منابع تاب‌آور را براساس طرح تولید برنامه موازی^۵ (PSGS) توسعه دادند. پولیچلا^۶ [۲۵] ساخت یک برنامه ترتیب جزئی زنجیره‌ای^۷ (POS) را از طریق گنجانیدن مجموعه‌ای از کمان‌های اضافی که نشان‌دهنده جریان‌های منبع هستند، پیشنهاد داد. لیانگ و همکاران^۸ [۲۶] یک الگوریتم ابتکاری دو مرحله‌ای توسعه دادند که در مرحله اول به یک مسأله تخصیص منابع می‌پردازد و در مرحله دوم با استفاده از الگوریتم تبرید

شبیه‌سازی شده، اندازه بافرهای زمانی را تعیین می‌کند. علاوه بر این مقالات که بر تخصیص منابع موجود تمرکز داشتند مقالات دیگری بر تخصیص منابع اضافی برای افزایش انعطاف‌پذیری پروژه تأکید کردند [۲۷، ۲۸]. مدیران پروژه، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ، تمایل دارند از برون‌سپاری یا تأمین منابع خارجی برای جلوگیری از تأخیر در پروژه و هزینه‌های احتمالی جریمه استفاده کنند. اغلب مقالاتی که در زمینه تخصیص شناوری، بافر یا منابع ارائه شده، ویژگی‌های خاص هر فعالیت را نادیده گرفته در حالی که آسیب‌پذیری فعالیت براساس ویژگی‌ها و موقعیت آن‌ها در شبکه پروژه با یکدیگر متفاوت است [۲۹]. در این پژوهش، یک روش نوآورانه برای تعیین میزان آسیب‌پذیری فعالیت‌ها براساس شاخص‌های مبتنی بر شبکه، زمان و منبع ارائه شده است.

از دیدگاه دسته‌بندی مسائل زمان‌بندی پروژه، برخی مسائل شناخته شده در ادبیات، از جمله مسأله تسطیح منابع^۹ و مسأله سرمایه‌گذاری منابع^{۱۰} با اینکه از لحاظ مدیریت منابع به مسأله این پژوهش نزدیک بوده، دارای تفاوت‌های اساسی با آن هستند. در مسأله تسطیح منابع، هدف اصلی کاهش نوسانات مصرف منابع موجود در طول زمان، با محدودیت رعایت موعد تحویل پروژه است [۳۰]. در حالی که در پژوهش حاضر تمرکز بر کاهش زمان تکمیل پروژه در شرایط عدم قطعیت بوده و امکان افزایش سطح منابع از طریق خرید منابع خارجی نیز در نظر گرفته شده است. همچنین، در مسأله تسطیح منابع معمولاً محدودیت منابع وجود نداشته و زمان‌بندی فعالیت‌های غیربحرانی با استفاده از شناوری آن‌ها تغییر می‌کند [۳۱]. از سوی دیگر، مسأله سرمایه‌گذاری منابع که نام دیگر آن هزینه دسترسی به منابع است، با هدف کمینه کردن هزینه مطرح می‌شود. در این مسأله، محدودیت منابع وجود ندارد، سطح منابع متغیر تصمیم و زمان اتمام، محدودیت است [۳۲]. در این پژوهش، محدودیت منابع اولیه وجود داشته و تصمیم‌گیری درخصوص میزان منابع اضافی انجام می‌گیرد و این تخصیص به‌صورت فعالیت‌محور و مبتنی بر شاخص آسیب‌پذیری انجام شده و علاوه بر آن، مدل در یک چارچوب دو مرحله‌ای تحت عدم قطعیت توسعه یافته است. همچنین، در مسأله موازنه زمان-هزینه، تمرکز بر کاهش زمان پروژه از طریق افزایش هزینه‌ها (مانند تخصیص منابع بیشتر) است [۳۳]. در حالی که در پژوهش حاضر، تصمیم‌گیری درخصوص خرید منابع با هدف افزایش تاب‌آوری و با در نظر گرفتن ساختار شبکه و آسیب‌پذیری فعالیت‌ها انجام می‌شود.

مسأله RCPSP و توسعه‌های آن در دسته مسائل NP-hard با پیچیدگی بالا هستند. همچنین یافتن ترکیب شدنی از حالت‌های اجرا برای MRCPSP وقتی تعداد منابع تجدیدنپذیر بیشتر از یک نوع باشد نیز NP-complete است [۳۴]. به همین دلیل بسیاری از مقالات در این حوزه از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری به منظور حل مسأله

6. Policella

7. Chained Partial Order Schedule (POS)

8. Liang

9. Resource leveling problem

10. Resource investment problem

1. Hao et al

2. Bannas

3. Critical Chain Project Management

4. Artigues

5. Parallel Schedule Generation Scheme (PSGS)

زمان‌بندی پروژه چندحالت با محدودیت منابع کمک گرفته‌اند. از جمله رویکردهای رایج می‌توان به الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۳۵-۳۶]، بهینه‌سازی کلونی مورچگان [۳۷-۳۸]، جستجوی محلی [۳۹] و الگوریتم تکامل تفاضلی [۴۰] اشاره کرد. با وجود کارایی مناسب در حل مسائل بزرگ، این الگوریتم‌ها فاقد تضمین بهینگی بوده و کیفیت جواب آن‌ها به شدت به تنظیم پارامترها و ساختار مسأله وابسته است. از سوی دیگر، روش‌های صرفاً دقیق به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالا، در بسیاری از موارد زمانبر و فاقد کارایی خواهند بود. بنابراین اخیراً برخی مقالات با استفاده از ترکیب روش‌های دقیق و الگوریتم‌های ابتکاری سعی در بهره‌مندی از مزایای هر دو روش داشته‌اند. در همین راستا، رودریگز^۱ [۱۴] با ادغام روش شاخه و کران درون یک الگوریتم فراابتکاری، یک الگوریتم برای حل مسأله RCPSP ارائه داده است تا علاوه بر بهبود کیفیت جواب‌ها، زمان محاسباتی را کنترل کند. در مقاله حاضر نیز به منظور حل مدل ارائه شده، از یک رویکرد دو مرحله‌ای استفاده شده است. در مرحله اول یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر آسیب‌پذیری فعالیت‌ها ارائه شده است. براساس خروجی مرحله اول، با استفاده از روش شاخه و کران مدل MILP در مرحله دوم حل خواهد شد. به‌طور خلاصه، نوآوری‌های اصلی این تحقیق شامل موارد زیر است:

- ارائه شاخص‌های مبتنی بر شبکه، زمان و منبع به منظور تعیین میزان آسیب‌پذیری فعالیت‌ها
- در نظر گرفتن استراتژی افزونگی منابع تجدیدپذیر برای افزایش تاب‌آوری پروژه
- ارائه الگوریتم ابتکاری خرید منبع مبتنی بر شاخص آسیب‌پذیری فعالیت‌ها
- توسعه مسأله SMRCPSP سناریو محور و حل آن با یک چارچوب دومرحله‌ای

۳. تحلیل آسیب‌پذیری فعالیت‌ها

از آنجا که آسیب‌پذیری مشخص‌کننده‌ی ضعف ذاتی سیستم پروژه و مکمل رویکردهای افزایش تاب‌آوری است، برخی تحقیقات ترکیب تحلیل آسیب‌پذیری با نظارت پروژه را ضروری دانستند [۴۱]. در صورتی که مدیر پروژه نسبت به ساختار شبکه پروژه و ویژگی فعالیت‌ها اطلاعات داشته باشد می‌تواند سطح سختی آن را شناسایی و اقدامات لازم را جهت اتمام به موقع پروژه در نظر بگیرد [۴۲]. در این پژوهش، برای سنجش اهمیت هر فعالیت در پروژه، ۱۱ شاخص مبتنی بر شبکه، زمان و منبع استخراج شده است. این شاخص‌ها شامل درجه ورودی و خروجی، تعداد پیش‌نیازها و پس‌نیازها، مرکزیت‌های شبکه‌ای، موقعیت نسبی فعالیت در پروژه، مدت زمان و شناوری فعالیت، مصرف منابع، فشردگی منابع و شاخص تعارض منابع هستند. در ادامه هریک از این شاخص‌ها توضیح داده شده است:

شاخص درجه ورودی: درجه ورودی نشان‌دهنده میزان وابستگی فعالیت به سایر فعالیت‌ها بوده و افزایش آن بیانگر حساسیت بیشتر فعالیت نسبت به تأخیرات بالادستی است. هرچه این شاخص بالاتر باشد به این معنی است که فعالیت به فعالیت‌های زیادی وابسته بوده و ریسک تأخیر آن بالاتر است. برای مثال اگر فعالیت‌های ۲ و ۳ پیشنهاد فعالیت ۴ باشند، مقدار این شاخص برای فعالیت ۴، برابر با ۲ است.

شاخص درجه خروجی: درجه خروجی نشان‌دهنده تعداد فعالیت‌هایی که بعد از این فعالیت شروع می‌شوند و بیانگر میزان اثرگذاری فعالیت بر فعالیت‌های پایین‌دستی شبکه پروژه است. هرچه این شاخص بیشتر باشد به این معنی است که تأخیر این فعالیت اثر دومینویی دارد و در صورت بروز اختلال، احتمال انتشار آن به فعالیت‌های بعدی بیشتر است.

شاخص مرکزیت بینابینی (BC): برای اندازه‌گیری نقش واسطه‌ای فعالیت‌ها در اتصال و انتقال جریان اجرایی پروژه مورد استفاده قرار گرفته است. مقدار بالای این شاخص بیانگر درجه اثر این فعالیت بر فعالیت‌های دیگر است و در صورتی که آن با اختلال مواجه شود فعالیت‌های زیادی تحت تأثیر این اختلال قرار خواهند گرفت. در واقع فعالیت‌هایی با مقدار بالای مرکزیت بینابینی نقش گلوگاهی در شبکه پروژه داشته و تأخیر آن‌ها می‌تواند منجر به اختلال همزمان چندین مسیر اجرایی شود. با استفاده از رابطه زیر شاخص BC برای فعالیت i محاسبه می‌شود.

$$BC(i) = \sum_{\substack{s,t \in V \\ i \neq s,t}} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V نماد مجموعه فعالیت‌ها است. σ_{st} نشان‌دهنده تعداد کل کوتاه‌ترین مسیرها از فعالیت s به فعالیت t است و $\sigma_{st}(i)$ تعداد کوتاه‌ترین مسیرهایی از s به t که از فعالیت i عبور می‌کنند را نشان می‌دهد. در واقع این شاخص سهم آن فعالیت را در مسیرهای ارتباطی کوتاه‌ترین مسیر بین سایر فعالیت‌های پروژه اندازه‌گیری و به نوعی گلوگاه‌ها را در پروژه مشخص می‌کند و در صورتی مقدار یک می‌گیرد که تمام مسیرهای کوتاه از فعالیت s به فعالیت t از فعالیت موردنظر عبور کنند. این شاخص امکان شناسایی فعالیت‌هایی را فراهم می‌کند که تأخیر آن‌ها می‌تواند به‌صورت زنجیره‌ای بر بخش‌های مختلف پروژه اثرگذار باشد.

شاخص مرکزیت نزدیکی (CC): این شاخص نشان می‌دهد یک فعالیت چقدر به سایر فعالیت‌ها نزدیک است و میزان دسترسی فعالیت

محاسبه می‌شود:

$$RT_{ik} = \frac{r_{ik}}{R_k} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، r_{ik} مقدار موردنیاز منبع نوع k برای اجرای فعالیت i و R_k مقدار منبع در دسترس نوع k است.

شاخص تعارض منبع (RC)^۳: این شاخص به منظور اندازه‌گیری میزان رقابت فعالیت‌ها بر سر منابع مشترک تعریف شده است. برای هر فعالیت، این شاخص به صورت تعداد فعالیت‌هایی محاسبه می‌شود که از نظر زمانی با آن هم‌پوشانی داشته و مجموع تقاضای منابع آن‌ها از ظرفیت منبع تجدیدپذیر پروژه فراتر رود. مقدار بالاتر این شاخص نشان‌دهنده احتمال بیشتر بروز صف منابع و در نتیجه افزایش ریسک تأخیر فعالیت است. شبه‌کد محاسبه شاخص تعارض منبع در ادامه ارائه شده است.

الگوریتم (۱). شبه‌کد تابع محاسبه شاخص تعارض منبع

Input:

- Set of activities N
- Set of renewable resources K
- Resource capacity R_k
- Earliest start and finish (ES_i, EF_i) for activity i
- Resource demand r_{ik} for activity i and resource k

Output:

- Resource Conflict Index RC_i for each activity i
- For each activity i in N :

$$RC_i = 0$$

For each activity j in $N, j \neq i$:

If activities i and j overlap in time:

For each resource k in K

If $r_{ik} + r_{jk} > R_k$:

$$RC_i = RC_i + 1$$

Break

شاخص اهمیت^۴ و آسیب‌پذیری فعالیت‌ها (I): این شاخص به منظور تجمیع ویژگی‌های مبتنی بر شبکه، زمان و منبع هر فعالیت تعریف شده است تا میزان اثرگذاری بالقوه آن فعالیت بر عملکرد کل پروژه به صورت کمی ارزیابی شود. با توجه به متفاوت بودن ویژگی‌ها، به منظور استانداردسازی از رابطه (۵) استفاده شده است. برای شاخص‌هایی که مقادیر کمتر آن‌ها بیانگر آسیب‌پذیری بیشتر فعالیت است، پس از استانداردسازی، رابطه (۶) اعمال شده است.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (۵)$$

$$X_{inv} = 1 - X_{norm} \quad (۶)$$

در رابطه بالا X نشان‌دهنده مقدار اولیه به دست آمده برای ویژگی فعالیت، X_{min} و X_{max} به ترتیب بیانگر کمترین و بیشترین مقدار برای هر ویژگی است. در نهایت شاخص آسیب‌پذیری فعالیت به صورت میانگین وزنی شاخص‌های نرمال‌سازی شده تعریف شده و مقدار بالاتر این شاخص نشان‌دهنده فعالیت‌هایی است که وقوع تأخیر یا اختلال در آن‌ها می‌تواند اثرات زنجیره‌ای قابل توجهی بر مدت تکمیل پروژه

به سایر فعالیت‌های پروژه را از طریق کوتاه‌ترین مسیرها اندازه‌گیری می‌کند. این شاخص برای فعالیت‌های میانی بیشتر از فعالیت‌های ابتدایی و انتهایی است. در رابطه (۲) شاخص مرکزیت نزدیکی (CC) برای فعالیت i محاسبه شده که $d(i, u)$ نشان‌دهنده طول کوتاه‌ترین مسیر از فعالیت i به فعالیت u است.

$$CC(i) = \frac{1}{\sum_{u \in V, u \neq i} d(i, u)} \quad (۲)$$

۳-۱. شاخص‌های مبتنی بر زمان

در این دسته علاوه بر زمان اجرای فعالیت، مقادیر موردنیاز برای محاسبه برخی شاخص‌های زمانی شامل زودترین و دیرترین زمان شروع و پایان و شناوری کل، از طریق روش مسیر بحرانی (CPM)^۱ استخراج شده‌اند.

شاخص مدت زمان اجرا: این شاخص به عنوان شاخصی از پیچیدگی و حجم عملیات در نظر گرفته شده است. فعالیت‌هایی که زمان طولانی‌تری داشته باشند با احتمال بیشتری در معرض رویدادهای مختلف قرار می‌گیرند [۴۳]. همچنین منابع در این فعالیت‌ها به مقدار بیشتری درگیر هستند.

شاخص موقعیت نسبی: این شاخص به منظور در نظر گرفتن اثر فعالیت‌ها در طول چرخه عمر پروژه استفاده شده است. با توجه به این که پیامدهای تأخیر فعالیت‌ها در مراحل مختلف پروژه یکسان نیست، موقعیت نسبی فعالیت‌ها در طول زمان اجرای پروژه به عنوان یکی از شاخص‌های مؤثر بر آسیب‌پذیری در نظر گرفته شده است. برای مثال در صورتی که فعالیت‌های انتهایی با اختلال مواجه شوند، امکان جذب اختلال در طول پروژه کمتر بوده و زمان تکمیل پروژه افزایش خواهد یافت. رابطه (۳) موقعیت فعالیت i را مشخص می‌کند که نسبت به زمان پروژه نرمال شده تا اثر زمان وقوع فعالیت‌ها در مقیاس پروژه لحاظ شود.

$$Pos(i) = \frac{ES_i}{projectduration} \quad (۳)$$

در رابطه بالا ES_i بیانگر زودترین زمان شروع فعالیت i است که از طریق روش مسیر بحرانی محاسبه می‌شود.

شاخص شناوری: این شاخص حداکثر زمانی که فعالیت می‌تواند بدون به تأخیر انداختن فعالیت‌های دیگر به تعویق بیفتد را نشان می‌دهد. زیاد بودن این شاخص بیانگر انعطاف‌پذیری زمانی بالای فعالیت در برنامه زمان‌بندی پروژه است. شناوری یک فعالیت برابر با اختلاف زودترین زمان شروع و پایان در نظر گرفته شده است.

۳-۲. شاخص‌های مبتنی بر منبع

در این پژوهش شاخص‌های مبتنی بر منبع برای توصیف انعطاف‌پذیری واقعی فعالیت‌ها در شرایط منابع محدود معرفی می‌شوند.

شاخص فشردگی منبع (RT)^۲: این شاخص شدت محدودیت منابع برای اجرای فعالیت را اندازه‌گیری می‌کند و در صورت وجود چند منبع مقدار بیشینه لحاظ می‌شود. فشردگی منبع با استفاده از رابطه زیر

افزودگی منابع برای افزایش تاب‌آوری برنامه در نظر گرفته شده است. این استراتژی مستلزم تأمین منابع اضافی پیش از مواجهه با اختلالات است تا در سناریوهای عدم قطعیت، پروژه با کمترین افزایش در زمان تکمیل مواجه شود. از آنجا که انعقاد قرارداد بابت خرید منابع باید در ابتدای پروژه انجام شده و همچنین نوع اجرای پروژه نیز باید به کارفرما اعلام گردد، این تصمیمات به دلیل ماهیت راهبردی باید در مرحله اول و مبتنی بر شاخص آسیب‌پذیری فعالیت‌ها گرفته شوند. نتایج حاصل از مرحله اول به عنوان ورودی مرحله دوم به مدل داده خواهد شد. در گام بعدی، تصمیمات مربوط به زمان اجرای پروژه و جریان منابع اولیه بین فعالیت‌ها و حالت اجرایی آن‌ها براساس مقادیر خرید اتخاذ می‌گردد.

به منظور مدل‌سازی، مسأله MRCPSPP با یک شبکه فعالیت روی گره 2 (AoN) در $G(N, A)$ در نظر گرفته شده است. که در آن مجموعه گره‌ها، N ، نشان‌دهنده فعالیت‌ها و مجموعه کمان‌ها، A ، نشان‌دهنده روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها است. در این شبکه گره‌های مجازی $N = 1$ و گره $N = n + 1$ به ترتیب به عنوان فعالیت‌های شروع و پایان پروژه هستند که هر کدام مدت زمان صفر دارند. هر فعالیت $i \in N$ دارای M_i حالت اجرایی است که با $M_i = 1, \dots, m_i$ مشخص می‌شوند. همچنین عدم قطعیت در مدت زمان فعالیت‌ها و به صورت متغیر تصادفی $d_{im_i\omega}$ بروی یک مجموعه محدود سناریو Ω نشان داده می‌شود. احتمال رخداد هر سناریو $\omega \in \Omega$ برابر با π_ω است که $\pi_\omega \geq 0$ و $\sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega = 1$ به منظور مدل کردن زمان تصادفی فعالیت‌ها از توزیع لگ نرمال^۳ استفاده شده است. انتخاب این توزیع به دلیل ویژگی زمان فعالیت‌ها است که علاوه بر مثبت بودن تمایل به مقادیر بزرگتر در آن‌ها بیشتر است. همچنین در ادبیات نشان داده شده که این توزیع برای مسائل زمان‌بندی پروژه مناسب است [۴۵-۴۶]. میزان مصرف منابع تجدیدپذیر در هر دوره زمانی نباید از حد اکثر میزان منبع در دسترس R_k و مقدار قابل خریداری منبع بیشتر باشد. میزان منابع تجدیدناپذیر در کل طول بازه‌ی اجرای پروژه نباید از میزان در دسترس آن U_h بیشتر شود. هر فعالیت i نیازمند r_{im_ik} واحد از منابع تجدیدپذیر و u_{im_ih} واحد از منابع تجدیدناپذیر است. مقدار منبع نوع k برای فعالیت‌های مجازی برابر با کل میزان در دسترس از منبع است $(r_{1m_1k} = r_{n+1m_{n+1}k} = R_k)$.

محدودیت پیش‌نیازی بین هر دو فعالیت i و j می‌تواند از نوع محدودیت پیش‌نیازی فنی یا محدودیت پیش‌نیازی منبع^۴ باشد. این روابط ایجاب می‌کنند که فعالیت j نمی‌تواند زودتر از فعالیت i شروع شود. مدل توسعه داده شده در این مقاله مبتنی بر مدل شبکه جریان است که برای نخستین بار توسط آرتیگ [۴۷] ارائه شده است. یک شبکه جریان منبع، روابط پیش‌نیازی مبتنی بر منبع را از طریق کمان‌های جریان منابع نشان می‌دهد. این کمان‌ها نشان‌دهنده انتقال منبع از فعالیت i به فعالیت j است. در MRCPSPP، یک برنامه‌ی

ایجاد نماید. فعالیت‌هایی با شاخص اهمیت بالا به عنوان نقاط آسیب‌پذیر پروژه شناسایی می‌شوند که تأخیر یا اختلال در آن‌ها می‌تواند بر عملکرد کلی پروژه اثر داشته باشد. این فعالیت‌ها کاندیداهای اصلی برای پایش دقیق‌تر و تخصیص منابع اضافی هستند. شاخص آسیب‌پذیری فعالیت براساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$V_i = \sum_l W_l X_{il} \quad (7)$$

در رابطه بالا X_{il} مقدار نرمال شده شاخص l برای فعالیت i و W_l وزن مربوط به ویژگی l است. به منظور تعیین W_l از روش آنتروپی شانون^۱ استفاده شده است [۴۴]. روش آنتروپی شانون یک تکنیک وزندهی عینی است که مبتنی بر اطلاعات موجود در داده‌ها عمل می‌کند. ایده اصلی آن این است که شاخص‌هایی با تنوع بالاتر در مقادیر بین فعالیت‌ها حاوی اطلاعات بیشتری بوده و بنابراین وزن بالاتری دریافت می‌کنند. در مقابل، شاخص‌هایی که مقادیر تقریباً یکسانی برای همه فعالیت‌ها دارند، اطلاعات کمتری ارائه داده و وزن کمتری می‌گیرند. مراحل این روش در الگوریتم (۲) ارائه شده است:

الگوریتم (۲). تعیین وزن شاخص‌ها براساس روش آنتروپی شانون

Step 1: Construct the Decision Matrix. Form a matrix $[X_{il}]$.
Step 2: Calculate the proportion for each activity. For each indicator l : $P_{il} = \frac{X_{il}}{\sum_i X_{il}}$
Step 3: Calculate the entropy value for each indicator. $E_l = -k \sum_i (P_{il} \cdot \ln P_{il})$, where $k = \frac{1}{\ln(n)}$ ensures $0 \leq E_l \leq 1$.
Step 4: Calculate the degree of divergence: $D_l = 1 - E_l$
Step 5: Calculate the final weight for each indicator. $W_l = \frac{D_l}{\sum_l D_l}$

با اجرای الگوریتم (۲)، وزن اختصاصی هر شاخص محاسبه شده و سپس در رابطه (۷) برای تعیین شاخص ترکیبی آسیب‌پذیری فعالیت‌ها به کار گرفته می‌شود.

۴. بیان مسأله و مدل‌سازی

در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای مبتنی بر سناریو با لحاظ غیرقطعی بودن زمان فعالیت‌ها ارائه می‌شود. مفروضاتی که در این مدل‌سازی لحاظ گردیده عبارتست از:
 (۱) وجود چند حالت اجرایی برای انجام هر فعالیت که هر حالت با مدت زمان و میزان مصرف منابع مشخص می‌شود. (۲) قبل از شروع هر فعالیت، همه‌ی پیش‌نیازی‌های آن باید به اتمام رسیده باشند. (۳) منابع هم تجدیدپذیر و هم تجدیدناپذیر هستند و محدودیت ظرفیت برای هر دو نوع منبع در نظر گرفته شده است. (۴) انقطاع در فعالیت‌ها مجاز نیست. (۵) زمان فعالیت‌ها غیرقطعی است و به صورت متغیر تصادفی مدل‌سازی می‌شود. (۶) عدم قطعیت از طریق مجموعه‌ای محدود از سناریوها با احتمال مشخص نمایش داده می‌شود.
 در پژوهش حاضر، خرید منابع از بیرون به عنوان یک استراتژی

میزان مورد نیاز منبع تجدیدپذیر نوع K برای فعالیت i در حالت اجرایی m	r_{imik}
میزان مورد نیاز منبع تجدیدناپذیر نوع h برای فعالیت i در حالت اجرایی m	u_{imih}
میانگین زمان فعالیت i در حالت اجرایی m_i تحت سناریو ω	$d_{im_i\omega}$
احتمال رخداد سناریو ω که $\pi_\omega \geq 0$ و $\sum_{\omega=1}^{\Omega} \pi_\omega = 1$	π_ω
حداکثر منبع تجدیدپذیر نوع K	R_k
حداکثر منبع تجدیدناپذیر نوع h	U_h
هزینه خرید هر واحد منبع خارجی تجدیدپذیر از بازار	c_k
مقدار بودجه در دسترس برای تاب آوری پروژه	$Budget$
M-بزرگ (مجموع زمان‌های فعالیت‌ها با در نظر گرفتن حالت اجرایی که بیشترین زمان را دارد).	μ

متغیرهای تصمیم:

متغیر صفر و یک که اگر در سناریو ω ، کار i قبل از کار j زمان‌بندی شود مقدار یک می‌گیرد.	$y_{ij\omega}$
متغیر جریان منبع که مقدار منبع انتقالی نوع k از فعالیت i به j را در سناریو ω نشان می‌دهد.	$f_{ijk\omega}$
متغیر منبع خارجی از نوع k برای فعالیت i نشان می‌دهد.	g_{ik}
متغیر صفر و یک که در صورت اجرای فعالیت i در حالت اجرایی m تحت سناریو ω مقدار یک می‌گیرد.	$x_{im\omega}$
زمان شروع فعالیت i تحت سناریو ω	$s_{i\omega}$

$$\text{Minimize } Z = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega S_{(N+1)\omega} \quad (4)$$

$S, t.:$

$$S_{1\omega} = 0 \quad \forall \omega \in \Omega \quad (5)$$

$$S_{j\omega} - S_{i\omega} \geq \sum_{m_i \in M_i} d_{im_i\omega} x_{im_i\omega} - \mu(1 - y_{ij\omega}) \quad (6)$$

$$\forall i, j \in N, \quad \forall \omega \in \Omega$$

$$y_{ij\omega} = 1 \quad \forall (i, j) \in A, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (7)$$

$$y_{ij\omega} + y_{ji\omega} \leq 1 \quad \forall i, j \in \tilde{N}, i < j \quad (8)$$

$$y_{ip\omega} \geq y_{ij\omega} + y_{jp\omega} - 1 \quad \forall i, j \in \tilde{N}, p \in N, i \neq p, p \neq j \quad (9)$$

$$f_{ijk\omega} \leq \min \left\{ \max_{m_i \in M_i} r_{im_i k}, \max_{m_j \in M_j} r_{jm_j k} \right\} y_{ij\omega} \quad (10)$$

$$\forall i, j \in \tilde{N},$$

$$i < j, \forall k \in K$$

$$\sum_{j \in N} f_{1jk\omega} \leq r_{1m_1 k}(\text{initial flow}) \quad (11)$$

$$\forall k \in K, \forall \omega \in \Omega$$

$$\sum_{i \in N^-} f_{i(n+1)k\omega} \leq r_{(n+1)m_{n+1} k}(\text{initial flow}) \quad (12)$$

$$\forall k \in K, \forall \omega \in \Omega$$

$$\sum_{j \in N, j \neq i} f_{ijk\omega} = \sum_{j \in N} f_{jik\omega} \quad (13)$$

$$\forall i \in _N^-, \forall k \in K, \forall \omega \in \Omega$$

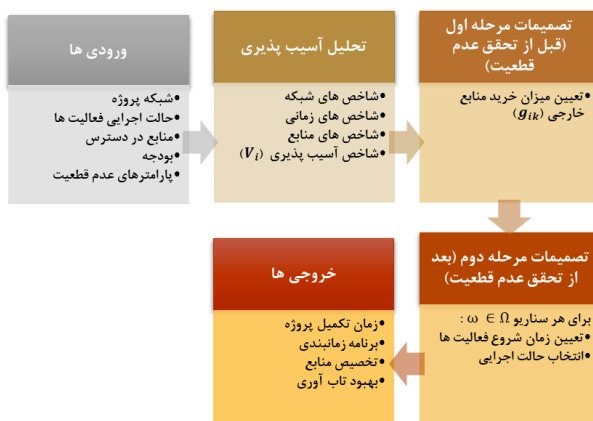
زمان‌بندی در صورتی از نظر منابع قابل اجرا است که در هر لحظه و برای هر نوع منبع، مقدار مصرفی آن از میزان ظرفیت موجود کمتر باشد. یک مجموعه ممنوعه^۱ به هر زیر مجموعه‌ای از فعالیت‌ها $F_m \subseteq N$ گفته می‌شود که ارتباط پیش‌نیازی فنی ندارند و $\sum_{i \in F_m} r_{imik} > R_k$ برای حداقل یک منبع برقرار باشد. یک مجموعه ممنوعه کمینه $\mathcal{F}$ مجموعه‌ای ممنوعه است که هیچ یک از زیرمجموعه‌های آن یک مجموعه ممنوعه نباشد. براساس قضیه اصلی نمایش [۴۸]، یک جواب برای MRCPS، با افزودن مجموعه‌ای از محدودیت‌های پیش‌نیازی اضافی $X_m \subseteq N^2 \setminus A$ به گراف اولیه $G(N, A)$ به دست می‌آید، به گونه‌ای که گراف توسعه یافته‌ی $G(N, A \cup X_m)$ بدون دور بوده و شامل هیچ مجموعه ممنوعه‌ای نباشد. این توسعه در شبکه پروژه، انتخاب کافی^۲ نامیده می‌شود. در مدل ارائه شده، متغیر $f_{ijk\omega}$ مقدار منبع نوع k که از گره i به سمت گره j تحت سناریو ω می‌رود را نشان می‌دهد. تصمیمات در مدل سناریو محور دو مرحله‌ای SMRCPS براساس مرحله‌ای اتخاذ قابل تقسیم هستند. در مرحله اول و قبل از تحقق عدم قطعیت تصمیم‌گیری در رابطه با (۱) خرید منبع انجام می‌گیرد. در مرحله دوم و بعد از مشخص شدن عدم قطعیت تصمیمات شامل (۲) تعیین حالت اجرای هر فعالیت (۳) تعیین تخصیص منبع مربوطه (۴) تعیین مقدار منبع انتقال یافته و (۵) تعیین زمان شروع هر فعالیت هستند. تابع هدف مدل کمینه‌سازی زمان تکمیل با در نظر گرفتن افزایش تاب‌آوری پروژه در برابر عدم قطعیت است. قبل از ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، ابتدا به معرفی کامل پارامترها و متغیرهای تصمیم در جدول (۱) پرداخته می‌شود.

جدول (۱). مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای به کار رفته در مدل

مجموعه‌ها:		
$1, \dots, n, n+1;$		
$1, n$	مجموعه فعالیت‌های پروژه	N
$+1: dummy$		
$2, \dots, n, n+1;$	مجموعه فعالیت‌های پروژه غیر از فعالیت شروع	$_N$
$1, \dots, n$	مجموعه فعالیت‌های پروژه غیر از فعالیت پایان	N^-
$2, \dots, n$	مجموعه فعالیت‌های پروژه غیر از فعالیت شروع و پایان	$_N^-$
$i! = j$ به طوری که j	مجموعه فعالیت‌های i و j	$\tilde{N}$
$1, 2, \dots, k$	مجموعه منابع تجدیدپذیر پروژه	K
$1, 2, \dots, h$	مجموعه منابع تجدیدناپذیر	H
	مجموعه روابط پیش‌نیازی	A
$1, 2, \dots, \omega$	مجموعه سناریوها	Ω
$1, \dots, m_i$	مجموعه حالت‌های اجرایی برای فعالیت $i \in N$	M_i

پارامترها:

برون‌سپاری منابع با استفاده از یک روش ابتکاری و مبتنی بر آسیب‌پذیری فعالیت‌ها در مرحله اول اتخاذ شده و تصمیمات مربوط به زمان‌بندی و توالی فعالیت‌ها در مرحله دوم با لحاظ عدم قطعیت در فعالیت‌ها اخذ می‌گردند. تصمیم خرید منابع تجدیدپذیر به‌صورت فعالیت‌محور تعریف می‌شود. این تصمیم پیش از تحقق عدم قطعیت اتخاذ و الگوریتم با اولویت‌بندی فعالیت‌ها براساس شاخص اهمیت، منابع محدود را به فعالیت‌هایی تخصیص می‌دهد که با توجه به ویژگی و ساختار، بیشترین آسیب‌پذیری را در شرایط عدم قطعیت خواهند داشت. سپس مقادیر به‌دست‌آمده از این مرحله به‌عنوان پارامتر ورودی در مدل بهینه‌سازی تحت عدم قطعیت مرحله دوم لحاظ شده و مسأله SMRCPSP حل خواهد شد. به منظور شفاف‌سازی اجزای مدل و ترتیب تصمیم‌گیری در رویکرد پیشنهادی، چارچوب مفهومی در شکل (۱) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در گام نخست، تحلیل آسیب‌پذیری فعالیت‌ها براساس شاخص‌های مبتنی بر شبکه، زمان و منابع انجام می‌شود. سپس، براساس مقادیر آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده، تصمیمات مرحله اول شامل تعیین میزان خرید منابع خارج از SMRCPSP حل شده و تصمیمات زمان‌بندی و تخصیص منابع تعیین می‌شوند. در زیر بخش‌های بعد جزئیات مربوط به روش ابتکاری-دقیق شرح داده خواهد شد.



شکل (۱). چارچوب مفهومی مدل پیشنهادی

۴-۱. روش ابتکاری خرید منبع

در این بخش یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر شاخص اهمیت فعالیت‌ها برای تعیین مقادیر خرید منابع تجدیدپذیر در مرحله اول مدل پیشنهاد شده است.

در ادامه، ابتدا ایده اصلی الگوریتم (۳) تشریح شده و سپس براساس شبه‌کد ارائه شده مراحل اجرایی الگوریتم توضیح داده می‌شود. منطق روش این است که فعالیت‌های با شاخص آسیب‌پذیری بالاتر، در صورت بروز اختلال، تأثیر بیشتری بر افزایش زمان تکمیل پروژه خواهند داشت و خرید منابع اضافی برای این فعالیت‌ها می‌تواند اثربخشی بیشتری در افزایش تاب‌آوری برنامه زمان‌بندی داشته باشد. ضرب V_i اولویت‌دهی به فعالیت‌های آسیب‌پذیرتر را تضمین می‌کند.

$$\sum_{i \in N^-, i \neq j} f_{ijk\omega} + g_{jk} \geq \sum_{m_j \in M_i} r_{jm_jk} x_{jm_j\omega} \quad (14)$$

$$\forall j \in N^-, \forall k \in K, \quad \forall \omega \in \Omega$$

$$g_{i,k} \leq \max_{m_i \in M_i} \{r_{im_ik}\} \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (15)$$

$$\sum_i \sum_{M_i} \sum_k c_k g_{ik} \leq Budget \quad (16)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m_i \in M_i} u_{im_ih} x_{im_i\omega} \leq U_h \quad \forall h \in H, \forall \omega \in \Omega \quad (17)$$

$$\sum_{m_i \in M_i} x_{im_i\omega} = 1 \quad \forall i \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (18)$$

$$f_{ijk\omega} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, i \neq n+1, j \neq 1, \forall k \in K \quad (19)$$

$$g_{i,k} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (20)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (21)$$

$$x_{im_i\omega} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall m_i \in M_i, \forall \omega \in \Omega \quad (22)$$

$$S_{i\omega} \geq 0 \quad \forall i \in N, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (23)$$

محدودیت (۸) نشان‌دهنده تابع هدف مسأله است و میانگین زمان تکمیل را بر روی تمام سناریوها کمینه می‌کند. محدودیت (۹) زمان شروع فعالیت مجازی یک را مشخص می‌کند. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند رابطه پیش‌نیازی رعایت شود، بدین معنا که اگر فعالیت i پیش‌نیاز فعالیت j باشد، فعالیت j تا زمان اتمام فعالیت i نمی‌تواند شروع شود. معادله (۱۱) مقدار متغیر $y_{ij\omega}$ را برای فعالیت‌هایی که روابط پیش‌نیازی دارند برابر با یک قرار می‌دهد (به این دلیل که مدل مجاز به تصمیم‌گیری درباره‌ی این متغیرها نیست). محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) به‌منظور عدم تشکیل تور در مدل لحاظ شده‌اند. محدودیت (۱۴) یک محدودیت M بزرگ است که ارتباط بین متغیرهای جریان و متغیر پیش‌نیازی مربوطه‌ی آن‌ها را برقرار می‌کند. محدودیت (۱۵) نشان‌دهنده حداکثر منبع در دسترس در ابتدای اجرای پروژه است. محدودیت (۱۶) بیانگر آزادسازی تمام منابع در انتهای پروژه است. محدودیت (۱۷) بیانگر این است که مقدار جریانی که از گره i خارج می‌شود باید برابر با مقدار جریان ورودی به آن باشد. محدودیت (۱۸) بیانگر این است که مقدار جریانی که به گره j وارد می‌شود به‌علاوه مقدار منبعی که باید از خارج برای این فعالیت به منظور کاهش اثر اختلال خریداری شود حداقل باید به اندازه میزان مورد نیاز منبع برای فعالیت j باشد. محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند که مقدار متغیر مربوط به خرید منبع خارجی حداکثر به اندازه مقدار منبع مورد نیاز فعالیت باشد. محدودیت (۲۰) تضمین می‌کند مقدار منابعی که از خارج خریداری می‌شود از بودجه اختصاص یافته برای مواجهه با اختلال بیشتر نشود. محدودیت (۲۱) محدودیت منابع تجدیدناپذیر را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۲) بیانگر این است که تنها یک حالت اجرایی برای هر فعالیت انتخاب شود. محدودیت‌های (۲۳) - (۲۷) دامنه متغیرهای مدل را نشان می‌دهد.

۵. روش حل

روش پیشنهادی شامل دو مرحله است که تصمیم مربوط به خرید یا

گرفته می‌شوند.

۴-۲. مدل مرحله دوم

در این مرحله مدل بر تصمیمات زمان‌بندی و جریان منابع در دسترس تمرکز دارد، در حالی که تصمیم مربوط به برون‌سپاری در مرحله اول انجام شده است و مقدار آن دیگر متغیر نبوده ($\bar{g}_{ik}$) و به عنوان ورودی به مرحله دوم داده می‌شود. بنابراین مدل مرحله دوم به صورت زیر خواهد شد:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} S_{(N+1)\omega} \quad (24)$$

S. t.:

$$S_{1\omega} = 0 \quad \forall \omega \in \Omega \quad (25)$$

$$S_{j\omega} - S_{i\omega} \geq \sum_{m_i \in M_i} d_{im_i\omega} x_{im_i\omega} - \mu(1 - y_{ij\omega}) \quad (26)$$

$$\forall i, j \in N, \quad \forall \omega \in \Omega$$

$$y_{ij\omega} = 1 \quad \forall (i, j) \in A, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (27)$$

$$y_{ij\omega} + y_{ji\omega} \leq 1 \quad \forall i, j \in \bar{N}, i < j \quad (28)$$

$$y_{ip\omega} \geq y_{ij\omega} + y_{jp\omega} - 1 \quad \forall i, j \in \bar{N}, p \in N, i \neq p, p \neq j \quad (29)$$

$$f_{ijk\omega} \leq \min \left\{ \max_{m_i \in M_i} r_{im_i k}, \max_{m_j \in M_j} r_{jm_j k} \right\} y_{ij\omega} \quad \forall i, j \in \bar{N}, \quad (30)$$

$$i < j, \forall k \in K$$

$$\sum_{j \in N} f_{1jk\omega} \leq r_{1m_1 k}(\text{initial flow}) \quad \forall k \in K, \forall \omega \in \Omega \quad (31)$$

$$\sum_{i \in N^-} f_{i(n+1)k\omega} \leq r_{(n+1)m_{n+1} k}(\text{initial flow}) \quad \forall k \in K, \forall \omega \in \Omega \quad (32)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq i} f_{ijk\omega} = \sum_{j \in N} f_{jik\omega} \quad \forall i \in N^-, \forall k \in K, \forall \omega \in \Omega \quad (33)$$

$$\sum_{i \in N^-, i \neq j} f_{ijk\omega} + \bar{g}_{jk} \geq \sum_{m_j \in M_j} r_{jm_j k} x_{jm_j\omega} \quad \forall j \in N^-, \forall k \in K, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (34)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{m_i \in M_i} u_{im_i h} x_{im_i\omega} \leq U_h \quad \forall h \in H, \forall \omega \in \Omega \quad (35)$$

$$\sum_{m_i \in M_i} x_{im_i\omega} = 1 \quad \forall i \in N, \forall \omega \in \Omega \quad (36)$$

$$f_{ijk\omega} \geq 0 \quad \forall i, j \in \bar{N}, i \neq n+1, j \neq 1, \forall k \in K \quad (37)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N \quad (38)$$

$$x_{im_i\omega} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall m_i \in M_i, \forall \omega \in \Omega \quad (39)$$

$$S_{i\omega} \geq 0 \quad \forall i \in N, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (40)$$

همان‌طور که در مدل بالا مشاهده می‌شود، محدودیت‌های (۱۹)، (۲۰) و (۲۴) به این دلیل که در مرحله اول لحاظ شده‌اند از مدل حذف شده و همچنین مقدار خرید در محدودیت (۱۸) به عنوان پارامتر در نظر گرفته می‌شود.

شاخص RT_{ik} نشان می‌دهد که فعالیت i چقدر به منبع k وابسته است. در صورتی که این مقدار نزدیک به صفر باشد، هرچند فعالیت آسیب‌پذیری بالایی داشته باشد، خرید منبع نوع k تأثیری بر عملکرد آن فعالیت نخواهد داشت. عامل $\max\{r_{im_ik}\}$ حداکثر نیاز به منبع k در میان تمام حالت‌های ممکن فعالیت i را نشان می‌دهد. خرید براساس این مقدار، تضمین می‌کند که مقدار خرید براساس پرتقاضاترین حالت اجرایی تعیین شود. در نهایت ضریب β انعطاف‌پذیری لازم برای تطبیق با شرایط مختلف پروژه را فراهم می‌کند.

الگوریتم (۳). شبه کد الگوریتم ابتکاری خرید منابع مبتنی بر

آسیب‌پذیری فعالیت

Sort activities in descending order of V_i

Initialize Remaining budget $\leftarrow$ Budget

Set $g_{ik} \leftarrow 0$

For each activity i in sorted order do

For each renewable resource k

If $RT_{ik} > 0$

$\hat{g}_{ik} \leftarrow \beta * V_i * RT_{ik} * \max\{r_{im_ik}\}$

$\hat{g}_{ik} \leftarrow \min(\hat{g}_{ik}, \max\{r_{im_ik}\})$

Required_Cost $\leftarrow \hat{g}_{ik} * c_k$

If Required_Cost $\leq$ Remaining budget, Then

$g_{ik} \leftarrow \hat{g}_{ik}$

Remaining_budget $\leftarrow$ Remaining_budget -

Required_cost

End If

End If

End For

End For

Return g_{ik}

Terminate algorithm

مطابق شبه‌کد ارائه شده در الگوریتم (۳)، ابتدا فعالیت‌ها براساس مقدار شاخص آسیب‌پذیری به‌صورت نزولی مرتب می‌شوند تا فعالیت‌های آسیب‌پذیرتر در اولویت تصمیم‌گیری قرار گیرند. سپس، برای هر فعالیت، تنها در صورتی خرید منبع انجام می‌شود که فعالیت دارای فشردگی بالای منبع و قابل توجه باشد. این شرط مانع از تخصیص غیرضروری منابع به فعالیت‌هایی می‌شود که محدودیت منبع نقش تعیین‌کننده‌ای در آن‌ها ندارد. مقدار خرید پیشنهادی متناسب با اهمیت فعالیت، میزان فشردگی منبع و نیاز واقعی فعالیت به آن منبع محاسبه شده و سپس با توجه به محدودیت بودجه تعدیل می‌گردد. همچنین یک ضریب تنظیم β برای تعیین میزان سهمی که از نیاز منبع مورد نیاز هر فعالیت قابل خرید است تعریف شده است. مقدار این پارامتر می‌تواند براساس ویژگی‌های پروژه و سطح ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده تنظیم شود. برای مثال در مسائل با بودجه بالا یا عدم قطعیت‌های شدید منبع، مقادیر β بزرگتر از شرایط با عدم قطعیت کمتر انتخاب می‌شود. با اجرای الگوریتم ابتکاری پیشنهادی، مقدار منابع خریداری شده g_{ik} مبتنی بر آسیب‌پذیری فعالیت‌ها تعیین می‌شود. سپس این مقادیر به‌عنوان ورودی برای مرحله دوم در نظر

۵. نتایج عددی

در این بخش نتایج آزمایش محاسباتی برای ارزیابی کیفیت جواب‌های به‌دست آمده از روش ابتکاری مبتنی بر آسیب‌پذیری و مدل MILP ارائه شده است. کدهای مربوط به روش و مدل‌سازی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python 3.10.15 پیاده‌سازی شده‌اند. به منظور حل مدل MILP، از حل‌کننده IBM ILOG CPLEX نسخه ۲۲.۱.۰ استفاده شده است. تمامی محاسبات با استفاده از یک پردازنده Ryzen 7-5800H با فرکانس 1.9 گیگاهرتز و رم و ۱۶ گیگابایت با محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه انجام شده است.

۵-۱. مسائل نمونه

به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، از مسائل نمونه استاندارد مجموعه‌ی MRCPSP در PSPLIB استفاده شده است و از هر یک از دسته‌های C15، 20 و 30، تعداد ۱۰ نمونه به صورت تصادفی انتخاب شده است. مجموعه داده‌ی PSPLIB با استفاده از نرم‌افزار تولید شبکه ProGen، تولید شده است. درجه‌ی پیچیدگی نمونه‌های تولید شده از طریق سه پارامتر زیر تنظیم شده‌اند:

- **قدرت ترتیب (OS - Order Strength):** این پارامتر میزان روابط پیش‌نیازی میان فعالیت‌های پروژه را نشان می‌دهد. مقدار بیشتر OS بیانگر انعطاف‌پذیری کمتر در زمان‌بندی و در نتیجه شبکه‌ی پروژه‌ی محدودتر است. در نمونه‌های MRCPSP مجموعه داده‌ی PSPLIB، مقدار OS در هر دسته برای تمامی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.

- **عامل منبع (RF - Resource Factor):** این پارامتر میانگین نسبت انواع منابع موردنیاز فعالیت‌های غیرمجازی را اندازه‌گیری می‌کند. مقدار آن عددی بین صفر و یک است؛ به‌طوری که مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده‌ی تنوع کمتر منابع مورد استفاده هستند.

- **قدرت منبع (RS - Resource Strength):** این پارامتر میزان محدودیت در دسترس بودن منابع را منعکس می‌کند. این مقدار نیز بین صفر و یک بیان می‌شود و مقادیر کوچک‌تر نشان‌دهنده‌ی محدودیت بیشتر منابع هستند. هر فعالیت می‌تواند در سه حالت مختلف اجرا شود و هر نمونه شامل دو منبع تجدیدپذیر و دو منبع تجدیدنپذیر است. با توجه به اینکه مسائل استاندارد که شامل تمام داده‌های مورد نیاز باشد وجود ندارد؛ مابقی داده‌های مورد نیاز به صورت زیر تولید شده است.

- به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت در زمان فعالیت‌ها، برای هر نمونه ۱۰۰ سناریو با استفاده از نمونه‌برداری تصادفی از توزیع لگ-نرمال تولید گردید. در این فرآیند، میانگین زمان فعالیت‌ها (μ) برابر با مدت زمان قطعی تعریف‌شده در مجموعه داده در نظر گرفته شد [۴۵، ۴۴]. انحراف معیار (σ) نیز برابر با 0.4μ فرض شده است. همچنین، احتمال رخداد سناریوها برابر و مقدار $\frac{1}{|\Omega|}$ لحاظ شده است که در آن $|\Omega|$ بیانگر تعداد سناریوها است.

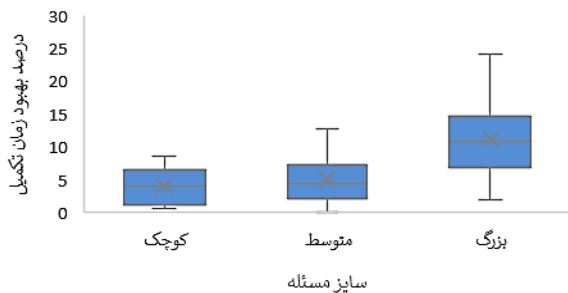
- هزینه خرید هر واحد منبع (تجدیدپذیر) خارجی نوع یک و دو

به ترتیب ۸ و ۱۱ واحد در نظر گرفته شده است.

- مقدار بودجه به صورت تصادفی در بازه $[50, 200]$ برای پروژه‌های کوچک، در بازه $[150, 250]$ برای متوسط و $[200, 400]$ برای بزرگ تولید شده است. همچنین ضریب تنظیم β برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است.

۵-۲. ارزیابی روش پیشنهادی

در این بخش، نتایج محاسباتی حاصل از روش پیشنهادی برای مسائل نمونه انتخاب شده، با لحاظ محدودیت زمان حل ۳۶۰۰ ثانیه گزارش شده است. تأثیر به‌کارگیری استراتژی تاب‌آوری بر زمان تکمیل در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲). مقایسه درصد بهبود زمان تکمیل با استفاده از استراتژی تاب‌آوری

برای مدل‌سازی عدم قطعیت مدت فعالیت‌ها، از توزیع لگ نرمال استفاده شده است. ابتدا به منظور ارزیابی اثربخشی استراتژی تاب‌آوری مبتنی بر آسیب‌پذیری فعالیت‌ها، نتایج حاصل از دو حالت "با" و "بدون" در نظر گرفتن این استراتژی در جدول (۲) نشان داده شده است. درصد کاهش زمان تکمیل در اثر به‌کارگیری استراتژی تاب‌آوری در ستون چهارم و دو شاخص میانگین فشردگی و تضاد منبع در دو ستون آخر آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پروژه‌هایی که شاخص RC و RT در آن‌ها بیشتر است بهبود بیشتری در زمان تکمیل داشته که بیانگر آن است که سیاست خرید منبع زمانی بیشترین تأثیر را دارد که پروژه دارای محدودیت‌های بیشتر منبع است. درصد کاهش زمان تکمیل در اثر به‌کارگیری استراتژی تاب‌آوری در ستون چهارم و دو شاخص میانگین فشردگی و تضاد منبع در دو ستون آخر آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پروژه‌هایی که شاخص RC و RT در آن‌ها بیشتر است بهبود بیشتری در زمان تکمیل داشته که بیانگر آن است که سیاست خرید منبع زمانی بیشترین تأثیر را دارد که پروژه دارای محدودیت‌های بیشتر منبع است.

برای مثال در نمونه L3046_1 با $RC = 4.5$ ، تخصیص منبع به فعالیت‌ها زمان تکمیل را حدود ۲۴٪ بهبود داده است، در حالی که در نمونه M2035_3 و M2050_3 با $RC = 0$ ، با تخصیص منبع تغییری در زمان تکمیل به‌وجود نیامده است. این نتایج به‌طور تلویحی نشان می‌دهند که روش‌های تخصیص ساده مانند خرید یکنواخت یا تصادفی منابع، به‌دلیل نادیده گرفتن شاخص‌هایی نظیر فشردگی و تعارض منبع، اثربخشی لازم را نخواهند داشت. در تخصیص یکنواخت، تمام فعالیت‌ها بدون توجه به میزان وابستگی به منبع، سهم مساوی از

منابع اضافی دریافت می‌کنند.

یافته، مقدار شکاف بهینگی (GAP) روش پیشنهادی نسبت به جواب بهینه محاسبه شده و در مواردی که جواب مدل MILP دارای فاصله با بهینگی است و مقدار GAP٪ نسبت به کران پایین به‌دست آمده از حلگر سیپلکس، مثبت است، GAP٪ روش پیشنهادی نسبت به همان کران پایین محاسبه شده است. ستون آخر جدول (۳) نشان‌دهنده کران پایین است. در ادامه، مشاهده می‌شود مدل MILP در ۷ نمونه به‌ویژه در مسائل با ۳۰ فعالیت، قادر به یافتن راه‌حل شدنی هم نبوده است. در مقابل روش دو مرحله‌ای پیشنهادی در تمامی نمونه‌ها موفق به تولید جواب شدنی شده است. در اکثر نمونه‌ها، مقدار فاصله با بهینگی در روش پیشنهادی بسیار کم بوده (میانگین فاصله با بهینگی ۱.۱۵٪) و در برخی موارد حتی جواب بهتری نسبت به مدل MILP در شرایط وجود محدودیت زمانی به‌دست آمده است.

جدول (۳). مقایسه روش Heuristic-MILP پیشنهادی و مدل

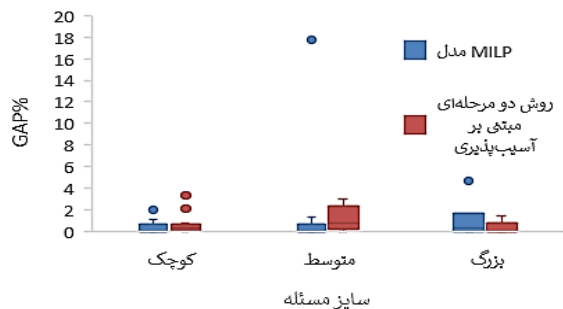
MILP												
Heuristic-MILP						مدل MILP						
GAP %	زمان محاسباتی	تابع هدف	GAP %	زمان محاسباتی	تابع هدف	LB	مثال	ردیف				
0.00	27.9	19.7	0	52.06	19.7	—	S_c1510_1	مجموعه ۱				
0.19	282	15.3	2.03	3600	15.58	15.27	S_c1510_2					
0.00	300.3	22.3	1.12	3600	22.55	22.30	S_c1510_3					
0.06	268	36.2	0	1840	36.18	—	S_c1510_4					
0.46	128	13.2	0	254.75	13.14	—	S_c1510_10					
2.09	10	16.6	0	11.46	16.26	—	S_c1527_3					
0.73	15.9	16.5	0	16.23	16.38	—	S_c1532_5					
3.32	146	24.6	0.84	1755	24	23.80	S_c1540_1					
0.29	20.4	17.1	0	22.1	17.05	—	S_c1550_8					
0.67	24	12.1	0	30.1	12.02	—	S_c1564_6					
0.85	23.7	17.9	0	45.92	17.75	—	M_2010_1	مجموعه ۲				
2.64	262	17.5	0	1224	17.05	—	M_2010_8					
0.36	0.61	28.1	17.75	3600	32.97	28	M_2030_4					
2.39	0.56	29.2	1.37	3600	28.91	28.5	M_2035_3					
0.25	0	28.3	0	35.63	28.23	—	M_2050_5					
0.00	27	22.3	0	70.46	22.3	—	M_2012_5					
2.02	59.7	18.7	0	92.14	18.33	—	M_2018_3					
0.80	396	18.9	0	86.05	18.75	—	M_2025_2					
3.01	298.9	28.4	0.69	3600	27.76	27.57	M_2043_6					
—	468	28	—	3600	—	—	M_2061_1					
0.26	117.1	38.2	0	590.4	38.1	—	L_j301_1	مجموعه ۳				
1.50	259	34.9	4.7	3600	36	34.38	L_j303_5					
3.65	44.7	31.2	0	57.9	30.1	—	L_j3017_7					
—	213	29.1	—	3600	—	—	L_j3025_2					
0.98	400	41.1	0.62	3600	40.7	—	L_j3033_7					
—	402.6	26.92	—	3600	—	—	L_j3034_6					
—	3600	27	—	3600	—	—	L_j3046_1					
—	637	33	—	3600	—	—	L_j3053_4					
—	252.3	25.8	—	3600	—	—	L_j3058_8					
—	305	32.48	—	3600	—	—	L_j3061_6					

جدول (۲). تأثیر به‌کارگیری استراتژی تاب‌آوری بر زمان تکمیل

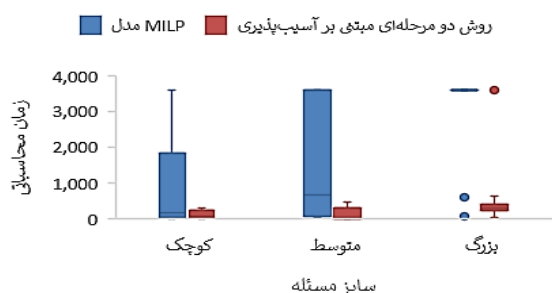
ردیف	مثال	شاخص منبع	زمان تکمیل		درصد بهبود
			بدون تاب‌آوری	با تاب‌آوری	
			RC	RT	
	S_c1510_1	0.4	1.9	19.7	-1.01
	S_c1510_2	0.7	2.5	15.3	-7.83
	S_c1510_3	0.2	1	22.3	-0.89
	S_c1510_4	0.8	1	36.2	-4.74
	S_c1510_10	0.48	2.1	13.2	-7.04
	S_c1527_3	0.25	0.5	16.6	-0.60
	S_c1532_5	0.63	4.1	16.5	-4.07
	S_c1540_1	0.75	2.75	24.6	-8.55
	S_c1550_8	0.35	1.8	17.1	-3.93
	S_c1564_6	0.1	0.5	11.9	-1.65
	M_2010_1	0.17	0.7	17.9	-3.24
	M_2010_8	0.27	1.5	17.5	-6.91
	M_2030_4	0.4	0.2	28.1	-1.75
	M_2035_3	0.2	0	29.2	0.00
	M_2050_5	0.3	0	28.3	0.00
	M_2012_5	0.35	1	22.3	-3.04
	M_2018_3	0.31	2.1	18.7	-12.62
	M_2025_2	0.4	1.7	18.9	-10.00
	M_2043_6	0.4	0.4	28.4	-5.33
	M_2061_1	0.5	1.5	28	-7.28
	L_j301_1	0.56	1.2	38.2	-11.16
	L_j303_5	0.51	1.7	34.9	-15.09
	L_j3017_7	0.47	0.33	31.2	-5.45
	L_j3025_2	0.6	1.7	29.1	-15.65
	L_j3033_7	0.5	1.6	41.1	-10.46
	L_j3034_6	0.42	0.33	26.92	-6.27
	L_j3046_1	0.7	4.5	27	-24.16
	L_j3053_4	0.48	1.8	33	-13.43
	L_j3058_8	0.42	0.2	25.8	-1.90
	L_j3061_6	0.4	0.6	32.48	-8.51

این امر منجر به تخصیص بودجه به فعالیت‌هایی می‌شود که با خرید منبع برای آن‌ها بهبود قابل توجهی در زمان تکمیل پروژه مشاهده نمی‌شود. از سوی دیگر، در تخصیص تصادفی، احتمال دارد فعالیت‌های با RT و RC بالا مانند نمونه $L3046_1$ منابع کافی دریافت نکنند، زیرا اولویت‌بندی مبتنی بر آسیب‌پذیری وجود ندارد. بنابراین، برتری روش پیشنهادی نشان می‌دهد که تخصیص هدفمند، برخلاف روش‌های ساده، قادر است بودجه را به سمت فعالیت‌های گلوگاهی و بحرانی هدایت کند. این مزیت به‌ویژه در پروژه‌های با اندازه بزرگ و پیچیدگی شبکه بالا برجسته‌تر می‌شود. میانگین کاهش زمان تکمیل در پروژه‌های کوچک حدود ۴٪، در پروژه‌ها متوسط حدود ۵٪ و در پروژه‌ها با ۳۰ فعالیت ۱۱.۲٪ بوده که نشان می‌دهد با افزایش اندازه پروژه اثر استراتژی پیشنهادی برجسته‌تر می‌شود. همچنین در صورت در نظر نگرفتن دو نمونه با $RC = 0$ در مجموعه پروژه‌های متوسط، میانگین کاهش زمان تکمیل ۶.۳٪ خواهد بود. در واقع افزایش تعداد فعالیت‌ها، باعث افزایش تعداد روابط، پیچیدگی شبکه، هم‌پوشانی زمانی و رقابت بر سر منابع شده و در نتیجه خرید هدفمند منابع برای فعالیت‌های آسیب‌پذیر تأثیر بیشتری بر بهبود زمان تکمیل دارد. از طرف دیگر، نتایج عملکرد رویکرد دومرحله‌ای (Heuristic-MILP) و مدل MILP در جدول (۳) مقایسه شده است. در مواردی که مدل MILP در محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه به جواب بهینه دست

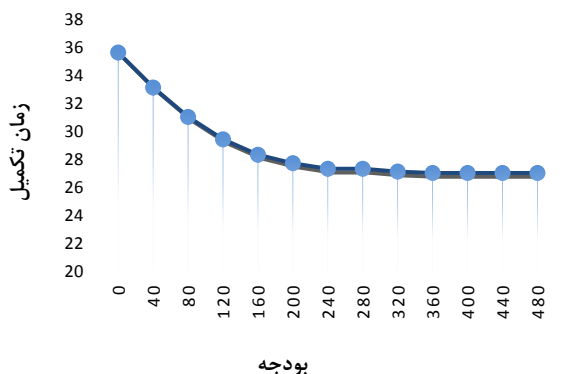
حل مستقیم مدل MILP نشان داد که روش پیشنهادی، به دلیل کاهش تعداد محدودیت‌ها و متغیرها نسبت به مدل اصلی، با حفظ کیفیت جواب، زمان محاسباتی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.



شکل (۳). مقایسه شکاف بهینگی در روش Heuristic-MILP و مدل MILP به تفکیک سایز مسئله



شکل (۴). مقایسه زمان محاسباتی در روش Heuristic-MILP و مدل MILP به تفکیک سایز مسئله



شکل (۵). اثر بودجه بر زمان تکمیل برای مسئله نمونه j3046-1

در بسیاری از نمونه‌ها، مدل MILP در محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه یا به جواب بهینه نرسیده یا حتی به جواب شدنی دست نیافته است، در حالی که روش پیشنهادی همواره جواب شدنی تولید کرده و مقادیر تابع هدف آن در فاصله بسیار نزدیکی از کران پایین قرار داشته است. در نتیجه، نتایج محاسباتی نشان داد که روش پیشنهادی برای خرید منابع، علی‌رغم سادگی ساختار، پس از ترکیب با مدل دو مرحله‌ای، از نظر زمان اجرا و قابلیت تولید جواب شدنی، عملکردی بسیار بهتر از حل مستقیم مدل MILP دارد و میانگین فاصله از بهینگی آن ۱.۱۵٪ درصد بوده است. این سادگی در عمل به قابلیت پیاده‌سازی آسان و کارایی محاسباتی بالا در حل مسائل بزرگ‌مقیاس

شکل (۳) نشان‌دهنده شکاف بهینگی در روش دومرحله‌ای و مدل MILP است. لازم به ذکر است در مواردی که مدل MILP قادر به حل نبوده و هیچ جوابی گزارش نشده، کران پایین در دسترس نبوده و مقدار شکاف بهینگی برای محاسبه نشده است. همچنین از نظر زمان محاسباتی نیز روش پیشنهادی عملکرد بسیار بهتری نسبت به مدل MILP داشته و توانسته است با زمانی بسیار کمتر به جواب‌های با کیفیت دست یابد. مقایسه زمان محاسباتی در هر دو رویکرد در شکل (۴) قابل مشاهده است.

۶. تحلیل حساسیت نسبت به پارامتر بودجه

در این بخش تأثیر میزان بودجه بر مدت زمان تکمیل پروژه برای مسئله نمونه 1-3046 از مجموعه داده بررسی شده است. با حل مسئله در سطوح مختلف بودجه، همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش بودجه از صفر به ۴۰۰ واحد، مدت زمان تکمیل پروژه از ۳۵.۶ به ۲۷ واحد زمانی کاهش می‌یابد. در بازه بودجه ۰ تا ۲۰۰ واحد، کاهش زمان تکمیل بسیار محسوس است (حدود ۷/۹ واحد کاهش). در حالی که در بازه ۲۰۰ تا ۳۶۰ واحد، شیب کاهش ملایم‌تر شده و از ۲۷/۷ به ۲۷/۰ واحد می‌رسد. پس از بودجه ۳۶۰ واحد نیز، مدت زمان تکمیل در مقدار ۲۷ واحد تثبیت می‌شود و افزایش بیشتر بودجه تأثیری بر زمان تکمیل نخواهد داشت. بنابراین بعد از بودجه ۳۶۰، مسئله عملاً بدون محدودیت منابع شده و هر گونه بودجه اضافی هزینه‌زا بوده و تاب‌آوری پروژه را بهبود نمی‌دهد.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک چارچوب دو مرحله‌ای برای زمان‌بندی چند حالتی پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمانی فعالیت‌ها و امکان خرید منابع تجدیدپذیر ارائه شد. ابتدا، معیارها و ویژگی‌های فعالیت‌ها به‌منظور سنجش آسیب‌پذیری و تعیین اهمیت هر فعالیت معرفی و محاسبه شد. سپس با استفاده از یک روش ابتکاری، تصمیمات خرید منبع براساس میزان آسیب‌پذیری فعالیت‌ها اتخاذ گردید، به‌گونه‌ای که منابع محدود به فعالیت‌هایی تخصیص یابند که بیشترین تأثیر را بر زمان تکمیل پروژه دارند. مقادیر خرید منابع مبتنی بر شاخص‌های آسیب‌پذیری، به‌عنوان پارامتر ورودی به مدل ریاضی عدد صحیح مختلط (MILP) داده شده و با حل مدل تصمیمات مربوط به توالی و زمان‌بندی فعالیت‌ها تعیین گردید. نتایج محاسباتی نشان داد که استراتژی خرید منابع مبتنی بر آسیب‌پذیری در مقایسه با حالت بدون خرید منبع، منجر به کاهش زمان تکمیل پروژه در اغلب نمونه‌ها می‌شود. این بهبود به‌ویژه در پروژه‌های متوسط و بزرگ چشم‌گیرتر بوده است، که بیانگر افزایش اهمیت تصمیمات هوشمندانه خرید منبع با افزایش اندازه و پیچیدگی شبکه پروژه است. تحلیل شاخص‌های فشردگی و تضاد منابع نیز تأیید می‌کند که پروژه‌هایی با مقادیر بالاتر این شاخص‌ها، با به‌کارگیری این استراتژی بیشترین بهبود را داشته‌اند. بنابراین درج مفهوم آسیب‌پذیری فعالیت‌ها در تصمیمات تخصیص و خرید منابع، در افزایش تاب‌آوری پروژه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. از سوی دیگر، مقایسه روش پیشنهادی دو مرحله‌ای (Heuristic-MILP) با

آزادسازی لاگرانژ برای مسأله زمان‌بندی چندپروژه‌ای با محدودیت منابع، برنامه‌ریزی سفارش‌دهی و برنامه‌ریزی تولید منابع مصرفی در زنجیره تامین پروژه محور. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن (ریاضی کاربردی)، ۳۳: ۲۰-۶۰.

[12] Talbot, F.B. (1982). resource-constrained project scheduling with time-resource tradeoffs: the nonpreemptive case, *Management Science*, 28: 1197 – 1210.

[13] Artigues, C., Hartmann, S., Vanhoucke, M. (2026). Fifty years of research on resource-constrained project scheduling explored from different perspectives, *European Journal of Operational Research*, 328.

[14] Rodríguez-Ballesteros, S., Alcaraz, J., Anton-Sanchez, L. (2026). Multi-mode resource-constrained project scheduling problem with time-dependent resource costs and capacities: A bi-objective approach, *Expert Systems with Applications*, 306:130955.

[۱۵] باقرزاده رحمانی، سارا، رضائیان، جواد، ابراهیمی، احمد. (۱۴۰۴). زمان‌بندی دوهدفه پروژه‌ها با گروه‌های کاری چندمهارته، اثر یادگیری و زمان‌های راه‌اندازی و پردازش وابسته به گروه کاری. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱۹: ۲۶-۳۵.

[16] Khoshsirat, M., Mousavi, S.M. (2024). A new proactive and reactive approach for resource-constrained project scheduling problem under activity and resource disruption: a scenario-based robust optimization approach, *Annals of Operations Research*, 338:597–643

[17] Kobylański, P., Kuchta, D. (2007). A note on the paper by MA Al-Fawzan and M. Haouari about a bi-objective problem for robust resource-constrained project scheduling, *International Journal of Production Economics*, 107: 496 – 501.

[18] Chtourou, H., Haouari, M. (2008). A two-stage-priority-rule-based algorithm for robust resource-constrained project scheduling, *Computers & Industrial Engineering*, 55: 183-194

[19] Hao, X., Lin, L., Gen, M. (2014). An effective multi-objective EDA for robust resource constrained project scheduling with uncertain durations, *Procedia Computer Science*, 36: 571 – 578 .

[20] Russell, M.M., Hsiang, S.M., Liu, M., Wambecke, B. (2014). Causes of time buffer and duration variation in construction project tasks: comparison of perception to reality, *Journal of Construction Engineering and Management*, 140: 04014016

[21] Bahnas, N., Adel, K., Khallaf, R., Elhakeem, A. (2024). Monitoring and controlling engineering projects with blockchain-based critical chain project management, *Automation in Construction*, 165: 105484

[22] She, B., Chen, B., Hall, N.G. (2021). Buffer sizing in critical chain project management by network

و پیچیده منجر می‌شود. به منظور توسعه پژوهش حاضر موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

- توسعه معیارهای پویای آسیب‌پذیری
- تعمیم چارچوب پیشنهادی به مسائل چند پروژه‌ای و مقایسه آسیب‌پذیری پروژه‌ها و اولویت‌بندی آن‌ها
- معرفی سایر استراتژی‌های تاب‌آوری و مقایسه با استراتژی پیشنهادی
- مقایسه سیستماتیک استراتژی‌های مختلف تخصیص منابع از جمله یکنواخت، تصادفی و مبتنی بر شناوری به‌منظور بینش بیشتر درخصوص روش مبتنی بر آسیب‌پذیری ارزیابی اثربخشی هر یک از روش‌ها.

مراجع

- [۱] کاتبی، علی؛ الماسیان، فریبرز؛ همای، پیمان، (۱۳۹۸). زمان‌بندی پروژه‌های ساخت با منابع محدود (MRCPSP) با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدت زمان فعالیت‌ها و تأخیرات، مهندسی سازه و ساخت، ۶، ۱۷۶-۹۸.
- [2] Cao, F., Servranckx, T., He, Z., Vanhoucke. M. (2025). A buffer allocation evolutionary algorithm for resource-constrained projects with activity clusters, *Journal of Scheduling*, 28: 483–511
- [3] Wang A. (2019). A framework for assessing project vulnerability to crises, *International Journal of Managing Projects in Business*, 12: 1079 – 1096.
- [4] Guo, N., Guo, P., Shang, J., Zhao, J. (2020). Project vulnerability analysis: A topological approach. *Journal of the Operational Research Society*, 71:1233–42 .
- [5] Aleksic, A., Puskaric, H., Tadic, D., Stefanovic, M. (2017). Project management issues: vulnerability management assessment. *Kybernetes*, 46: 1171-1188.
- [6] Zarghami, SA., Gunawan, I., Corral de Zubielqui, G., Baroudi, B. (2020). Incorporation of resource reliability into critical chain project management buffer sizing. *Int J Prod Res*, 58: 6130-6144
- [7] Goldratt EM. (1997). *Critical Chain*, The North River Press.
- [8] Milat, M., Knezic, S., Sedlar, J. (2021). A new surrogate measure for resilient approach to construction scheduling. *Procedia Comput. Science*, 181:468-476 .
- [9] Chaari, T., Chaabane, S., Aissani, N., Trentesaux, D. (2014). Scheduling under uncertainty: Survey and research directions. *International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, 229-234.
- [10] Liu, H., Qu, S., Li, R., Razaa, H. (2021). Bi-objective robust project scheduling with resource constraints and flexible activity execution lists, *Computers & Industrial Engineering*, 156: 107288.
- [۱۱] پرچمی افرا، خیرخواه امیرسامان. (۱۴۰۲). ارائه الگوریتم

- Computation, 195: 299 – 308.
- [36] Shen, H., Li, X. (2013). Cooperative discrete particle swarms for multi-mode resource-constrained projects, 2013 IEEE 17th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), Whistler, BC, Canada: 31 – 36.
- [37] Li, H., Zhang, H. (2013). Ant colony optimization-based multi-mode scheduling under renewable and nonrenewable resource constraints, *Automation in Construction*, 35: 431 – 438.
- [38] de la Pisa, M.P., Molina, J.C., Eguía, I. (2024). Ant colony algorithms for minimizing costs in multi-mode resource constrained project scheduling problems with spatial constraints, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 15: 667 – 684.
- [39] Geiger, M.J. (2017). A multi-threaded local search algorithm and computer implementation for the multi-mode, resource-constrained multi-project scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 256: 729 – 741.
- [40] Damak, N., Jarboui, B., Siarry, P., Loukil, T. (2009). Differential evolution for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems, *Computers & Operations Research*, 36: 2653 – 2659.
- [41] Song, Y., Vanhoucke, M. (2025). Schedule risk analysis for project control with risk interactions, *Annals of Operations Research*, 1-56
- [42] Kahraman, C., Onar, S.C. (2015). *Intelligent techniques in engineering management*, Springer.
- [43] Zhu, J., Mostafavi, A. (2014). A system-of-systems framework for performance assessment in complex construction projects, *Organization, Technology & Management in Construction: An International Journal*, 6: 0.
- [44] Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.
- [45] Tavares, L.V., Antunes Ferreira, J.A., Silva Coelho, J. (1998). On the optimal management of project risk, *European Journal of Operational Research*, 107: 451 – 469.
- [46] Trietsch, D., Mazmanyan, L., Gevorgyan, L., Baker, K.R. (2012). Modeling activity times by the Parkinson distribution with a lognormal core: Theory and validation, *European Journal of Operational Research*, 216: 386 – 396.
- [47] Artigues, C., Roubellat, F. (2000). A polynomial activity insertion algorithm in a multi-resource schedule with cumulative constraints and multiple modes, *European Journal of Operational Research*, 127: 297 – 316.
- [48] Bartusch, M., Möhring, R.H., Radermacher, F.J. (1988). Scheduling project networks with resource constraints and time windows, *Annals of Operations Research*, 16: 199 – 240.
- decomposition, *Omega*, 102: 102382 .
- [23] Lotfi, R., Vaseei, M., Ali, S.S., Davoodi, S.M.R., Bazregar, M., Sadeghi, S. (2024). Budget allocation problem for projects with considering risks, robustness, resiliency, and sustainability requirements, *Results in Engineering*, 24:102828.
- [24] Artigues, C., Michelon, P., Reusser, S. (2003). Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling, *European Journal of Operational Research*, 149: 249 – 267.
- [25] Policella, N. (2005). Scheduling with uncertainty: A proactive approach using partial order schedules, *AI Communications*, 18: 165 – 167.
- [26] Liang, Y., Cui, N., Hu, X., Demeulemeester, E. (2020). The integration of resource allocation and time buffering for bi-objective robust project scheduling, *International Journal of Production Research*, 58: 3839 – 3854.
- [27] Rohaninejad, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Vahedi-Nouri, B. (2015). Redundancy resource allocation for reliable project scheduling: A game-theoretical approach, *Procedia Computer Science*, 64: 265-273.
- [28] Shariatmadari, M., Nahavandi, N. (2020). A new resource buffer insertion approach for proactive resource investment problem, *Computers & Industrial Engineering*, 146: 106582 .
- [29] Hu, X., Cui, N., Demeulemeester, E., Bie, L. (2016). Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk, *European Journal of Operational Research*, 249: 717 – 727.
- [30] Li, H., & Demeulemeester, E. (2016). A genetic algorithm for the robust resource leveling problem. *Journal of Scheduling*, 19(1), 43-60
- [31] Gwak, H. S., Bea, S. H., & Lee, D. E. (2018). Resource Leveling using Genetic Algorithm. *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 19(1), 3-13
- [32] Liu, W., Zhang, J., Qu, C., & Zhang, H. (2024). Performance of Priority Rules for Finance-Based and Resource-Constrained Project Scheduling Heuristics. *Journal of Construction Engineering and Management*, 150(6), 04024047
- [33] Li, C., Wang, F., & Chung, T. (2024). Multi-mode multi-skill resource-constrained project scheduling problem with differentiated professional capabilities. *Journal of Project Management*, 9(1), 27–44
- [34] Kolisch, R., Sprecher, A. (1997). PSPLIB – A project scheduling problem library: OR software – ORSEP operations research software exchange program, *European Journal of Operational Research*, 96: 205 – 216.
- [35] Jarboui, B., Damak, N., Siarry, P., Rebai, A. (2008). A combinatorial particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems, *Applied Mathematics and*



Vulnerability Analysis of Activities and a Two-Stage Approach for Stochastic Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling

Farnaz Torabi Yeganeh¹, Seyed Hessameddin Zegordi^{2*}, Javad Behnamian³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2025/12/07

Revised 2026/02/26

Accepted 2026/03/13

Keywords:

Vulnerability,
Project Scheduling,
Resource Constraint,
Uncertainty,
Heuristic.

ABSTRACT

Projects are inherently subject to various uncertainties and disruptions, which are among the main causes of project completion delays and reduced reliability of the initial schedule. However, in real-world project environments, activities are not equally affected by disruptions, and ignoring these differences can lead to inefficient resource allocation and unnecessary cost overruns. This study proposes a novel approach to assessing activity vulnerability and vulnerability-based resource acquisition in the multi-mode resource-constrained project scheduling problem with stochastic activity durations. In the first stage, 11 network-based, temporal, and resource-based indicators are extracted and weighted using the Shannon entropy method. The vulnerability level of each activity is then calculated as a weighted combination of these indicators. Based on this, a heuristic algorithm is developed to acquire renewable resources, prioritizing activities with higher vulnerability and determining the purchase quantity as a function of the vulnerability index, resource tightness, and maximum resource requirement. Once the purchase quantities are determined, the proposed mixed-integer linear programming (MILP) model is solved to make scheduling and resource allocation decisions under uncertainty. Computational results show that the vulnerability-based resource acquisition strategy reduces makespan compared to no acquisition, while the two-stage heuristic-exact approach significantly reduces computational time compared to solving the MILP model directly. These findings highlight that identifying vulnerable activities plays a key role in enhancing the robustness of project scheduling.

* Corresponding author. S. H. Zegordi
Tel.: 021-82883394; E-mail address: zegordi@modares.ac.ir