



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329

Vol. 16, Issue 1, No. 40, Spring 2025



<https://doi.org/10.22108/pom.2025.141088.1550>

(Research paper)

The Impact of Suppliers' Capabilities on the Sequence of Activities in Complex Product Development Projects

Behzad Rahati

Industrial Engineering Department, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, behzadrahati@gmail.com

Jafar Gheidar-Kheljani*

Management and Industrial Engineering Department, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, kheljani@aut.ac.ir

Purpose: This study aims to develop a robust model for sequencing activities in the design and development of complex products while considering supplier capabilities. Given the intricate nature of product development and the interdependencies among various design activities, optimizing the sequence of these activities is essential for enhancing project efficiency and minimizing redundancies. This study seeks to bridge the gap between supply chain management and product development, addressing an under-researched area where supplier capabilities significantly impact project outcomes.

Design/methodology/approach: This research employs a quantitative and applied methodology, utilizing mathematical modeling and multi-objective optimization techniques to tackle the problem of activity sequencing. A comprehensive literature review informs the development of a theoretical framework to identify critical parameters influencing supplier selection and activity sequencing. The study incorporates uncertainty factors, particularly time constraints, by applying an epsilon-constraint method to transform the multi-objective optimization model into a single-objective one. Data for the research is collected through structured interviews and questionnaires directed at industry experts, ensuring the model's practical applicability and relevance.

Findings: The results indicate that integrating supplier capabilities into the selection process significantly minimizes feedback loops in activity sequences, which consequently reduces the amount

* Corresponding author, 0000-0002-9382-007X

2981-0329 / © University of Isfahan

This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)



of rework and overall project costs. The model was applied in a case study focused on gas turbine development, demonstrating its effectiveness in optimizing project timelines and budgets. The findings highlight the importance of choosing suppliers based on their competencies and the potential for mitigating project risks linked to information feedback among interconnected activities.

Research limitations/implications: While the model offers a comprehensive framework for understanding the relationship between supplier capabilities and activity sequencing, certain limitations must be recognized. The model's applicability may differ across various industries and project types, and further research is recommended to validate the model in diverse contexts. Additionally, the study acknowledges possible biases in the expert interviews and suggests future studies incorporate a broader range of data sources for a more comprehensive analysis.

Practical implications: The implications of this research for practice are significant. By implementing the proposed model, project managers can improve decision-making processes related to supplier selection and activity scheduling. This can result in shorter project durations and reduced costs while enhancing product quality and reliability. The model's framework can assist organizations in aligning supplier capabilities with project requirements, promoting more efficient collaboration within supply chains. Overall, this research contributes to improved resource management practices in complex product development scenarios.

Social implications: The societal impacts of this research are significant. By optimizing the design and development processes of complex products, businesses can promote more sustainable manufacturing practices and produce higher quality products. Enhanced collaboration among suppliers and project teams can stimulate innovation and positively influence industry standards. Furthermore, addressing supplier capabilities can strengthen the overall resilience of the supply chain, which is especially pertinent in today's dynamic market environments prone to disruptions. Additionally, by focusing on supplier capabilities and improving the overall efficiency of product development processes, this research advocates for the adoption of best practices and ethical standards within supply chains. As companies aim to collaborate with suppliers who meet specific competency benchmarks, this can lead to improved working conditions, fair labor practices, and responsible sourcing. Ultimately, such initiatives not only bolster the economic stability of communities but also promote social equity by creating opportunities for local suppliers and fostering inclusive growth within the industry.

Originality/value: This article introduces a novel approach to integrating supplier capabilities into the activity sequencing of complex product development. It offers valuable insights for both practitioners and researchers, highlighting the importance of supplier selection in project success. The originality of this study lies in its comprehensive model that considers both the technical and relational aspects of supplier engagement, thus providing a fresh perspective on the intersection of supply chain management and product development.

Keywords: Complex products, Multi-objective programming, Supplier capability, Robust optimization, Gas turbine development



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۶، شماره ۱، پیاپی ۴۰، بهار ۱۴۰۴

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰ ص ۹۱-۱۲۰



<https://doi.org/10.22108/pom.2025.141088.1550>

(مقاله پژوهشی)

تأثیر توانمندی تأمین‌کنندگان در توالی فعالیت‌های پروژه توسعه محصول پیچیده

بهزاد راحتی^۱؛ جعفر قیدرخلجانی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، behzadrahati@gmail.com

۲- دانشیار مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، kheljani@aut.ac.ir

چکیده: تعیین توالی فعالیت‌های طراحی و توسعه یک محصول پیچیده، همواره امری چالش‌برانگیز در مدیریت و برنامه‌ریزی آن بوده است. وجود فعالیت‌های مختلف با وابستگی اطلاعاتی، زمان و هزینه گوناگون، به‌خوبی لزوم ارائه یک روش قدرتمند را برای تعیین توالی بهینه فعالیت‌ها نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ممکن است هریک از فعالیت‌های طراحی و توسعه یک محصول پیچیده از سوی تأمین‌کنندگان متعدد، با توانمندی‌های مختلف امکان انجام داشته باشد، انتخاب تأمین‌کننده مناسب برای هر فعالیت، در تعیین توالی فعالیت‌ها نقش دارد. به همین منظور، یک مدل چندهدفه برای تعیین توالی فعالیت‌ها با لحاظ کردن توانمندی تأمین‌کننده‌ها و با توجه به وضعیت مالی پروژه ارائه شده است. برای تبدیل مدل برنامه‌ریزی چندهدفه به مدلی تک‌هدفه، از روش محدودیت افسیلون تقویت‌شده استفاده شده است. به‌علت اختلال در پارامتر زمان در دسترس هر دوره، مسئله دارای عدم قطعیت است و سناریوهای مختلفی وجود دارد. نظر به اینکه روش بهینه‌سازی استوار برای مقابله با ریسک عدم قطعیت کاربرد دارد، در پژوهش حاضر از آن استفاده شده است. درنهایت، کارایی مدل پیشنهادی از طریق پیاده‌سازی آن در مطالعه موردی طراحی و توسعه توربین گازی بررسی و ارزیابی‌های لازم برای اعتبارسنجی این مدل در رابطه با نتایج موجود و بهینه معتبر انجام شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد در نظر گرفتن توانمندی تأمین‌کنندگان در انتخاب آنها، مقدار تابع هدف بازخورد را به میزان درخور توجهی کاهش می‌دهد که این خود به معنای کاهش دوباره کاری ناشی از برون‌سپاری فعالیت‌ها و در نتیجه کاهش زمان و هزینه پروژه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: محصولات پیچیده، برنامه‌ریزی چندهدفه، توانمندی تأمین‌کننده، بهینه‌سازی استوار، توسعه توربین گازی

۱- مقدمه

سیستم‌های محصول پیچیده^۱، محصولاتی با هزینه ساخت بالا، پروژه‌محور، با فرآیند تولید فوق‌العاده پیچیده، سفارشی و همراه با تمرکز بالا بر مهندسی سیستم^۲ است. پیچیدگی در پروژه‌های توسعه محصول^۳، ناشی از ساختار، عملکرد محصول یا فناوری به کار رفته در آن است (Danilovic & Browning, 2007). در این راستا، چالش‌های مدیریت زمان و هزینه، به‌ویژه در پروژه‌های توسعه محصول، از اهمیت بنیادی برخوردار است.

با توجه به وابستگی‌های متقابل که در فرآیندهای توسعه محصول وجود دارد، به‌کارگیری روش‌های مناسب برای تسهیل فعالیت‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین کاهش دوباره‌کاری‌های غیرضروری ناشی از جریان اطلاعات بین این فعالیت‌ها، تأثیر بسزایی بر کارایی پروژه‌های توسعه دارد (Lin et al., 2012)؛ از این رو، مدیریت بهینه توالی^۴ فعالیت‌ها نیازمند درک عمیق از وابستگی‌ها و ارتباطات موجود بین آنهاست.

بنابراین با وجود این چالش‌ها، مدیران پروژه‌ها باید راهکارهایی را در دسترس داشته باشند که به آنها کمک کند تا توالی بهینه‌تری را برای فعالیت‌های مرتبط تعیین و از منابع موجود به‌طور مؤثر استفاده کنند. این امر به‌ویژه زمانی مهم است که بودجه‌های موجود به‌صورت دوره‌ای و نه یکجا تخصیص یابد (Attari-Shendi et al., 2022). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده بهینه از زمان و هزینه، نتایج مناسبی را در پروژه‌های طراحی و توسعه به‌همراه دارد.

در دنیای واقعی، نیاز به برون‌سپاری فعالیت‌ها نیز اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به اینکه برای هر فعالیت، تأمین‌کنندگان مختلفی وجود دارد، فرآیند انتخاب تأمین‌کننده مناسب، به یک چالش مهم تبدیل شده است. محققان بررسی‌های مختلفی را انجام داده‌اند تا ارتباطات پایدار میان زنجیره تأمین و فرآیند توسعه محصول را شناسایی کنند؛ اما تاکنون مدل جامعی ارائه نشده است که این دو حوزه را به هم پیوند دهد.

با وجود پیشینه پژوهشی نسبتاً قوی در زمینه محصولات پیچیده، توجه محققان کمتر معطوف به ایجاد مدلی شده است که بین دو حوزه زنجیره تأمین و توالی محصولات پیچیده ارتباط برقرار کند و توالی انجام فعالیت‌های طراحی و توسعه این محصولات را با در نظر گرفتن توانمندی‌های تأمین‌کننده بهبود دهد. هدف فعلی این مطالعه برای پرکردن این شکاف تحقیقاتی و پاسخگویی به نیاز برای برآورده کردن مدلی است که با ایجاد پل ارتباطی بین زنجیره تأمین و توالی فعالیت‌ها، مدل جامعی را برای برنامه‌ریزی محصولات پیچیده ارائه دهد؛ بنابراین با برقراری ارتباط بین توانمندی هر تأمین‌کننده و مفهوم برگشت به عقب، سطح توانمندی تأمین‌کنندگان^۵ در مدل توالی فعالیت‌ها لحاظ شده است. اهمیت و ضرورت این مسئله با چالش‌هایی بیشتر مشخص می‌شود که صنایع در مدیریت کارآمد فرآیندهای توسعه محصول پیچیده با آن روبه‌رو هستند. توالی ناکارآمد و انتخاب تأمین‌کننده نامناسب، به تأخیر در پروژه، افزایش هزینه‌ها و کاهش کیفیت محصول منجر می‌شود و بخش‌هایی مانند هوافضا، انرژی و تولید را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مسائل به‌ویژه در مطالعه موردی کاربردی برای این تحقیق، یعنی توسعه توربین‌های گازی، به دلیل زنجیره تأمین پیچیده و وابستگی متقابل بالای اجزا، حیاتی‌اند. توربین‌های گازی در تولید برق و کاربردهای صنعتی حیاتی‌اند؛ زیرا طراحی آنها به هماهنگی دقیق بین تأمین‌کنندگان مختلف برای برآورده کردن استانداردهای عملکرد و قابلیت اطمینان دقیق نیاز دارد. این مطالعه با پیشنهاد یک مدل جامع که

شکاف بین قابلیت‌های زنجیره تأمین و توالی فعالیت در توسعه محصول پیچیده را پر می‌کند، یک نیاز برآورده نشده را بررسی می‌کند. چنین مدلی برای صنایع و سازمان‌هایی ضروری است که برای کارایی و اثربخشی بیشتر در پروژه‌های پرمخاطره تلاش می‌کنند. برای رسیدن به این مهم و مطابق با بقیه گزارش، در بخش دوم خلاصه‌ای از مبانی نظری مرتبط با موضوع مطالعه ارائه می‌شود؛ سپس در بخش سوم درباره روش‌شناسی تحقیق بحث می‌شود و در بخش چهارم یافته‌های تحقیق در دسترس قرار می‌گیرد. در بخش پنجم ارائه نتایج و مقایسه آن با تحقیقات قبلی انجام و در نهایت بخش ششم، شامل نتیجه‌گیری نهایی همراه با فهرستی از پیشنهادها و پژوهشی براساس محدودیت‌ها و نتیجه‌گیری‌های مطالعه می‌شود.

۲- پیشینه نظری

۲-۱- توانمندی تأمین‌کنندگان

توانمندی تأمین‌کنندگان به مجموعه‌ای از قابلیت‌ها، منابع و دانش اشاره دارد که به آنها این امکان را می‌دهد تا به‌طور مؤثر در فرایند توسعه محصول جدید مشارکت کنند. این توانمندی‌ها شامل مهارت‌های فنی، ظرفیت‌های تولید، توانایی در نوآوری و همکاری نزدیک با خریداران است (Johnsen, 2009). توانمندی تأمین‌کنندگان، تأثیر زیادی بر موفقیت پروژه‌های توسعه محصول دارد و از این رو در تحقیقات مختلف بررسی شده است.

به‌طور خاص، تأمین‌کنندگان باید دارای قابلیت‌هایی باشند که آنها را قادر کند تا نه تنها در مراحل ابتدایی توسعه محصول جدید وارد شوند، در طول فرایند نیز به‌عنوان شرکا و همکاران مؤثر عمل کنند (Ragatz et al., 2002). به بیان دیگر، توانمندی‌های تأمین‌کننده در کاهش ریسک‌های مربوط به طراحی و تولید محصولات پیچیده و در نهایت ارتقای عملکرد پروژه‌ها مؤثر است (Hartley et al., 1998).

علاوه بر این، وجود یک رابطه نزدیک و هماهنگ بین تأمین‌کننده و خریدار، نقش حیاتی در تسهیل جریان اطلاعات و کاهش هزینه‌های مربوط به دوباره‌کاری دارد. در این راستا، اسمالز و اسمیتز^۷ (۲۰۱۲) بیان می‌کنند که ایجاد ارزش مشترک بین تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان، به بهبود کیفیت و کارایی منجر می‌شود. توانمندی تأمین‌کنندگان، عاملی کلیدی در تسهیل نوآوری و بهبود کیفیت محصولات است (Johnsen, 2009).

از دیدگاه تئوریک، برخی از محققان این مفهوم را از نظر مدیریت زنجیره تأمین بررسی و نحوه تأثیر توانمندی‌های تأمین‌کنندگان را بر فرایندهای تصمیم‌گیری و اجرای پروژه‌های پیچیده ارزیابی کرده‌اند (Kamath & Liker, 1994). این تحقیقات نشان می‌دهد که بهره‌گیری از تأمین‌کنندگان توانمند، نه تنها باعث افزایش قابلیت اطمینان در تأمین مواد اولیه می‌شود، زمان و هزینه‌های پروژه را نیز کاهش می‌دهد.

بنابراین، توانمندی تأمین‌کنندگان نه تنها به دانش و مهارت‌های فنی آنان مربوط می‌شود، شامل توانایی‌ها و رویکردهایی است که آنها را به شریکان استراتژیک تبدیل می‌کند. این همکاری به‌طور مستقیم، بر کیفیت و زمان عرضه محصولات تأثیر می‌گذارد و نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان بازخورد اطلاعاتی میان فعالیت‌ها و در نتیجه دوباره‌کاری آنها دارد.

۲-۲- برنامه‌ریزی و توالی فعالیت‌ها

برنامه‌ریزی و توالی فعالیت‌ها به فرآیند شناسایی، سازمان‌دهی و اولویت‌بندی وظایف و فعالیت‌هایی اشاره دارد که برای دستیابی به یک هدف خاص در یک پروژه یا فرایند تجاری ضروری‌اند. درواقع این دو مفهوم به یکدیگر وابسته‌اند و تأثیر مستقیمی بر موفقیت و کارایی پروژه دارند (Lin et al., 2015).

برنامه‌ریزی فعالیت‌ها شامل تعیین تکالیف مشخص و زمان‌بندی آنها به گونه‌ای است که جریان کار بهینه شود و منابع به طور مؤثری مدیریت شوند. این فرآیند معمولاً شامل شناسایی فعالیت‌ها، تعیین الگوهای زمانی و شناسایی وابستگی‌ها و روابط میان فعالیت‌هاست (Zhang et al., 2015). از دیدگاه تئوریک، برنامه‌ریزی صحیح به کاهش هزینه‌ها و زمان‌برودن پروژه کمک می‌کند و در عین حال، کیفیت نتایج پروژه را نیز افزایش می‌دهد.

توالی فعالیت‌ها نیز به ترتیب اجرای فعالیت‌ها در طول زمان اشاره دارد و بر اهمیت اجرای مؤثر و هماهنگی آنها در رابطه با یکدیگر تأکید می‌کند. یک توالی مناسب، خطر دوباره کاری، هدررفت زمان و منابع را به حداقل می‌رساند و در نهایت به ارتباط به موقع بین فعالیت‌ها منجر می‌شود (Steward, 1981). به عبارت دیگر در یک پروژه پیچیده، توالی درست فعالیت‌ها به تسهیل جریان اطلاعات و هماهنگی بین غیرفعال‌ها و تأمین‌کنندگان کمک می‌کند (Kusiak & Wang, 1993).

بنابراین، درک صحیح از مفاهیم برنامه‌ریزی و توالی فعالیت‌ها، نه تنها به شفافیت در اجرای پروژه‌ها کمک می‌کند، نقش بسزایی در بهینه‌سازی عملکرد کلی پروژه و کاهش ریسک‌های مربوط به نبود هماهنگی دارد.

بیشتر فعالیت‌ها در محصولات پیچیده، به هم پیوسته است و سازمان‌دهی این فعالیت‌های به هم پیوسته، همواره یک چالش بوده است. از آن سو، ابزارهای سنتی مدیریت پروژه مانند روش مسیر بحرانی و ارزیابی برنامه و روش بازنگری در مدیریت پروژه‌های پیچیده توسعه محصول، در مطالعات مختلف ذکر شده است (YanJun et al., 2011; Qian & Lin, 2014) و فعالیت‌های مرتبط را در محصولات پیچیده به خوبی نشان نمی‌دهند (Lin et al., 2008)؛ در نتیجه، ماتریس ساختار طراحی^۸ به وجود آمد تا وابستگی اطلاعات فعالیت‌های مرتبط در محصولات پیچیده را به خوبی نمایش دهد (Browning, 2001).

ماتریس ساختار طراحی را اولین بار استوارد^۹ (۱۹۸۱) ارائه کرد. او مدلی را ارائه داد که در آن وابستگی دودویی اطلاعاتی بین فعالیت‌ها وجود داشت تا به این شکل، تعداد علائم فیدبک در مثلث فوقانی ماتریس ساختار طراحی به حداقل برسد. مقادیر سلول‌های ماتریس ساختار طراحی، درجه وابستگی اطلاعات بین فعالیت‌ها هستند. بر این اساس، مقادیر زیر قطر اصلی انتقال اطلاعات را از فعالیت بالادست، به فعالیت پایین‌دست نشان می‌دهد؛ در حالی که مقادیر بالای قطر اصلی بازخورد اطلاعات را نشان می‌دهد که باعث دوباره کاری در فعالیت بالادست و تکرار می‌شود.

کوشیاک و وانگ^{۱۰} (۱۹۹۳) تابع هدف استوارد (۱۹۸۱) را با جایگزینی مقادیر باینری با مقادیر وزنی بین ۰ و ۱ تغییر دادند.

مدل‌های فوق، فقط بر بازخورد متمرکز شده‌اند. از طرفی، ژانگ و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۵) مفهوم خطر دوباره‌کاری را برای نزدیک کردن مدل‌های قبلی به دنیای واقعی توصیف کردند. آنها خاطرنشان کردند که علاوه بر زمان و هزینه فعالیت‌ها، زمان و هزینه دوباره‌کاری فعالیت‌ها نیز باید در مدل تعیین توالی در نظر گرفته شود.

در مدل ارائه شده به وسیله عطاری شندی و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۲)، به سطح بلوغ فناوری در فعالیت‌های مختلف موجود در طراحی یک محصول پیچیده توجه و نیز محدودیت بودجه نیز در مدل لحاظ شده است. ون و همکاران^{۱۳} (۲۰۲۱) دوباره‌کاری‌های مراتب بالاتر (مرتبه دو و سه) را در مدل خود لحاظ و از روش مبتنی بر ماتریس ساختار طراحی برای تعیین توالی فعالیت‌ها استفاده کرده‌اند. پیکانی و همکاران^{۱۴} (۲۰۲۳) با ارائه یک مدل دو مرحله‌ای دریافته‌اند که توجه بیشتر به حداقل کردن طول فیدبک، زمان تکمیل پروژه را افزایش می‌دهد. شانگ و همکاران^{۱۵} (۲۰۲۳) با توسعه یک الگوریتم موازی شاخه و تحدید مبتنی بر تجزیه دوگانه و حداقل رساندن طول فیدبک، توالی بهینه‌ای از فعالیت‌ها را به دست آورده‌اند. پنگ و همکاران^{۱۶} (۲۰۲۳) یک مسئله زمان‌بندی واکنشی چند پروژه‌ای را با محدودیت منابع^{۱۷}، با ورود پروژه جدید پیشنهاد می‌کنند تا هزینه تعدیل برنامه خط پایه را در حین دستیابی به هدف زمان‌بندی چند پروژه قطعی به حداقل برسانند.

با وجود تأکید محققان بر توانمندی و قابلیت تأمین‌کنندگان و نقشی که در پیشرفت پروژه دارد، در تحقیقات گذشته بحث تأمین‌کننده‌ها به صورت جداگانه از مدل در نظر گرفته می‌شد؛ حال آنکه یکپارچه کردن تصمیمات انتخاب تأمین‌کنندگان در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین محصولات پیچیده برای تعیین فعالیت‌ها، به محاسن زیادی از جمله کاهش هزینه‌ها، بالا بردن کیفیت و ... منجر می‌شود.

همچنین شرایط و رخداد‌های طبیعی و غیرطبیعی بیرونی نظیر سیل، زلزله، جنگ، تحریم‌های سیاسی، خرابی ماشین‌آلات و ... منابع پروژه را دچار عدم قطعیت می‌کند و بر زنجیره تأمین محصولات پیچیده و نیز توالی فعالیت‌های پروژه اثرگذارند.

به این منظور، این پژوهش به دنبال آن است که:

- با لحاظ کردن تصمیمات تأمین‌کننده‌ها در مسئله، رویکرد جدیدی را ارائه دهد که در آن تأثیر توانمندی تأمین‌کنندگان، بر توالی فعالیت‌ها لحاظ شده است؛
- اختلال در منبع مهم پروژه - یعنی زمان - را مدنظر قرار دهد و با عدم قطعیت به وجود آمده در سناریوهای مختلف آن، مقابله کند؛
- امکان هم‌پوشانی فعالیت‌ها، مفهوم برون‌سپاری و نقش آن در توالی فعالیت‌ها و همچنین تزریق دوره‌ای - و نه به صورت یکجا - بودجه به پروژه، از مفاهیمی‌اند که در دنیای واقعی، چالش یک مدیر پروژه است و در مدل ریاضی مقاله حاضر لحاظ شده‌اند تا از آن به عنوان یک مدل امکان‌سنجی پروژه‌های محصول پیچیده نیز، بهره جست.

۳- رویکرد و مدل سازی

۳-۱- رویکرد و روش شناسی

رویکرد پژوهش حاضر به صورت کمی و کاربردی طراحی شده است؛ به این معنا که با استفاده از تحلیل های کمی، فرایندهای توسعه محصول را بررسی می کند و بهبود می بخشد و نتایج آن به طور مستقیم در صنعت به کار می رود. این تحقیق از نوع سؤال محور است و با لحاظ کردن سؤالاتی درباره مسئله، تأثیر توانمندی تأمین کنندگان را بر توالی فعالیت ها بررسی می کند.

این سؤالات عبارت اند از:

♦ در توسعه یک محصول پیچیده، تأمین کنندگان به چه شکل باید انتخاب شوند؟

♦ توانمندی تأمین کنندگان در مدل به چه صورت در نظر گرفته شود؟

♦ مدل توالی فعالیت ها با توجه به توانمندی تأمین کنندگان چگونه باید تشکیل شود؟

اطلاعات مورد نیاز تحقیق حاضر از طریق پرسش نامه و مصاحبه های نیمه ساختاریافته با خبرگان صنعت جمع آوری شده است. همچنین، از مطالعات کتابخانه ای و تحلیل اسناد مرتبط با پروژه های توسعه محصول پیچیده استفاده شده است.

برای حل مسائل، از روش بهینه سازی چندهدفه و مدل سازی ریاضی استفاده شده است. برای تبدیل مدل چندهدفه به تک هدفه، از روش محدودیت اسیلون تقویت شده استفاده و داده های مورد نیاز برای طراحی مدل جمع آوری شده است. در این پژوهش با خبرگان صنعت در زمینه طراحی و توسعه محصولات پیچیده مصاحبه و نمونه گیری به روش غیر تصادفی هدفمند انجام شده است تا از تخصص و تجربیات افرادی با دانش عمیق در این زمینه بهره مند شویم.

اعتبار مدل با استفاده از روش تحلیل محتوای کیفی، به تأیید رسیده است. همچنین، از نظرسنجی های کارگاهی با حضور خبرگان، برای ارزیابی صحت و قابلیت اطمینان مدل استفاده شده است.

انتخاب مدل های بهینه سازی به دلیل قابلیت آنها در حل مسائل پیچیده و چندهدفه و همچنین توانایی در نمایش تعاملات بین متغیرها و پارامترها انجام و استفاده از روش های مدل سازی ریاضی، موجب افزایش دقت و شفافیت در تحلیل نتایج می شود.

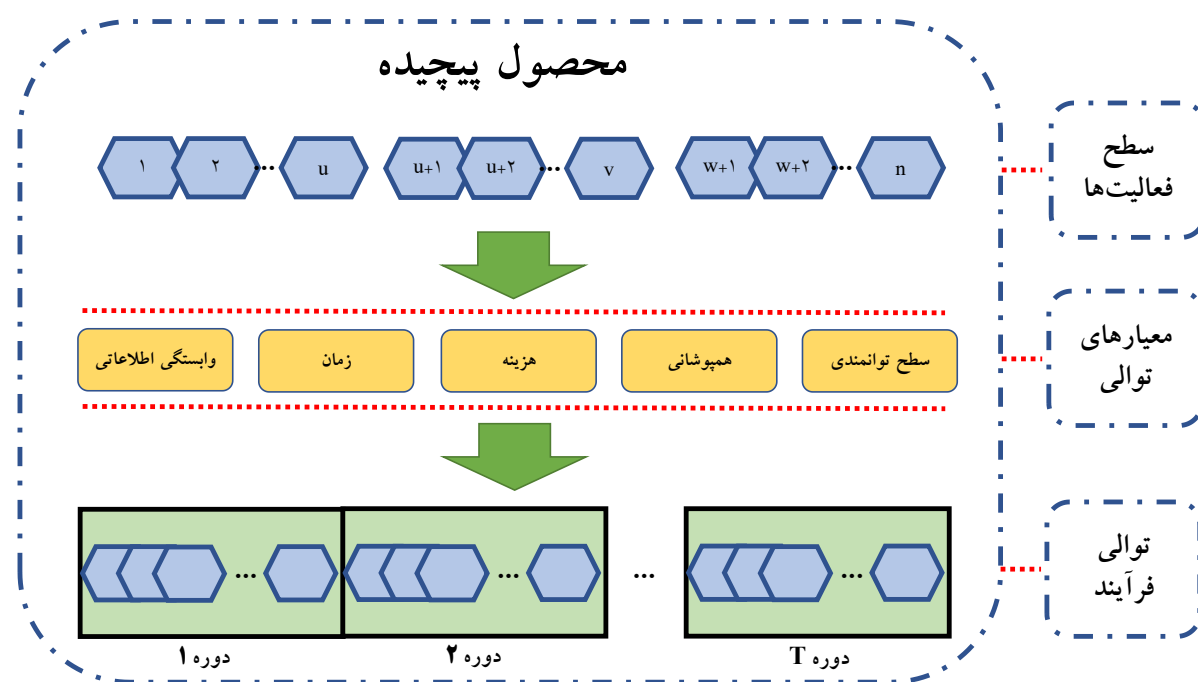
فرایند کلی و گام به گام حل مسئله، به شرح زیر است:

- شناسایی مسئله و تعریف اهداف تحقیق؛
- جمع آوری داده ها از طریق روش های ذکر شده؛
- طراحی مدل ریاضی برای تعیین توالی فعالیت ها با لحاظ کردن توانمندی تأمین کنندگان؛
- اجرای مدل با استفاده از نرم افزارهای بهینه سازی؛
- تحلیل نتایج و مقایسه های لازم؛
- اعتبارسنجی نتایج با استفاده از نظرات خبرگان.

تولید یک محصول پیچیده، شامل تعداد زیادی فعالیت به هم پیوسته است. به عبارتی، یک محصول پیچیده دارای فعالیت‌هایی است که از یکدیگر مستقل نیستند و به هم مربوط‌اند؛ بنابراین در پروژه‌های تولید این محصولات، مدیر پروژه باید نگاه جامع و کاملی نسبت به کلیت آن داشته باشد و با دید سیستمی برنامه‌ریزی کند. یکی از مهم‌ترین ابعاد برنامه‌ریزی دقیق و اصولی یک پروژه محصول پیچیده، تعیین توالی فعالیت‌های آن است؛ به گونه‌ای که وابستگی اطلاعاتی فعالیت‌ها، زمان و هزینه انجام هر فعالیت، امکان هم‌پوشانی دو یا چند فعالیت و نیز توانمندی تأمین‌کنندگان هم در آن لحاظ شده باشد. این امر با اهداف ذیل میسر می‌شود:

- (الف) طوری فعالیت‌ها به دنبال یکدیگر قرار گیرند که دوباره کاری ناشی از بازگشت اطلاعات کمینه شود؛
 - (ب) اعتبار مالی در نظر گرفته شده در هر دوره از تولید محصول پیچیده، به بهینه‌ترین شکل ممکن مصرف شود؛
 - (پ) تأمین‌کنندگانی برای فعالیت‌ها به کار گرفته شوند که توانمندی بالایی داشته باشند و با انجام اصولی فعالیت‌ها، احتمال برگشت به عقب را در فرایند طراحی و توسعه، به حداقل برسانند.
- در این پژوهش نقش توانمندی تأمین‌کنندگان، یک پارامتر مهم در تعیین توالی فعالیت‌های محصول پیچیده در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، طراحی و توسعه یک محصول پیچیده شامل تعدادی فعالیت مرتبط با یکدیگر است که از ۱ تا n شماره‌گذاری شده‌اند. علاوه بر این، به دلیل ویژگی‌های عملکردی پیچیده این محصولات، بیشتر پیش‌بینی دقیق پارامترهای فعالیت‌ها دشوار است. پس از برآورد پارامترهای فعالیت‌ها، فعالیت‌ها با در نظر گرفتن معیارهای نشان داده شده در شکل زیر، به دوره‌هایی اختصاص داده می‌شوند و توالی فعالیت‌ها با توجه به زمان و بودجه موجود در هر دوره، تعیین می‌شود. شایان ذکر است که برای نشان دادن توالی فعالیت‌ها و اعمال رویکرد همپوشانی، n موقعیت برای قراردادن n فعالیت در مدل وجود دارد.



شکل ۱- نمایش مفهومی مدل ارائه شده در پژوهش

Fig. 1- Conceptual presentation of the model presented in the research

۳-۲- تعریف مسئله ارتباط میان توانمندی تأمین‌کنندگان و توالی فعالیت‌ها

در این قسمت، روش ایجاد ارتباط بین سطح توانمندی تأمین‌کنندگان فعالیت‌های محصول پیچیده و توالی فعالیت‌ها بیان می‌شود.

برای این منظور، باید ابتدا مفهوم «برگشت به عقب»^{۱۸} در فرایند توسعه محصولات پیچیده شرح داده شود. به دلیل پیچیده بودن ماهیت این محصولات، فعالیت‌های توسعه محصولات پیچیده به یکدیگر، وابستگی اطلاعاتی دارند. این وابستگی اطلاعاتی، اگر از فعالیت‌های پایین دست (فعالیت‌های دارای عدد توالی بزرگ‌تر) به فعالیت‌های بالادست (فعالیت‌های دارای عدد توالی کوچک‌تر) باشد، بازخورد اطلاعاتی نام دارد و موجب پدیده‌ای به نام دوباره‌کاری می‌شود (Zhang et al., 2015).

مدیر پروژه توسعه محصولات پیچیده همواره باید تلاش کند توالی فعالیت‌ها را به گونه‌ای انجام دهد که حداقل بازخورد اطلاعاتی در توالی وجود داشته باشد تا به این وسیله دوباره‌کاری فعالیت‌ها - و در نتیجه هدررفت زمان و هزینه - به کمینه خود برسد.

امروزه بیشتر شرکت‌ها بخش‌هایی از فعالیت‌های توسعه محصول جدید خود را به تأمین‌کنندگان بیرونی واگذار می‌کنند؛ بنابراین، مشارکت تأمین‌کننده در توسعه محصول جدید مهم است؛ زیرا تأمین‌کنندگان دارای قابلیت‌های تخصصی و منحصر به فردی‌اند که با پیچیده‌تر شدن محصولات، این قابلیت‌ها پارامترهای تعیین‌کننده‌ای خواهند بود (Johnsen, 2009).

پرواضح است که هر سطح توانمندی تأمین‌کنندگان در بخش‌های مختلف در یک پروژه توسعه محصول پیچیده بیشتر باشد، احتمال برگشت به عقب و در نتیجه دوباره‌کاری ناشی از آن کمتر خواهد بود (Hartley et al., 1998). به همین دلیل، با استفاده از رابطه (۱)، ارتباط بین مفهوم توانمندی و احتمال برگشت به عقب، نمایش داده می‌شود:

سطح توانمندی تأمین‌کننده Ca_i

برگشت به عقب، ناشی از انتخاب تأمین‌کننده Re_i

$$Re_i = 1 - Ca_i \quad (1)$$

در این پژوهش با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی^{۱۹} (Rezaei, 2015)، که توضیحات آن در ادامه این بخش خواهد آمد، به هر تأمین‌کننده یک شاخص توانمندی در بازه [۰، ۱] تخصیص می‌یابد و با استفاده از آن، احتمال برگشت به عقب ناشی از انتخاب هر تأمین‌کننده به دست می‌آید. برای این کار، معیارهای امتیازدهی تأمین‌کنندگان Q_i, E_i, F_i, G_i و H_i در نظر گرفته می‌شود. در این صورت، با توجه به توضیحات بالا، سطح توانمندی یک تأمین‌کننده از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$Ca_i = w_{c1} * Q_i + w_{c2} * E_i + w_{c3} * F_i + w_{c4} * G_i + w_{c5} * H_i \quad (2)$$

که در آن w_{c1} ها از طریق اعداد مثلثی فازی $\tilde{w}_B$ و $\tilde{w}_j$ و $\tilde{w}_W$ به دست می‌آیند.

۳-۳- مدل‌سازی ریاضی مسئله

در این قسمت، مدل ریاضی مسئله تعیین توالی فعالیت‌های پروژه توسعه محصول پیچیده با شرح مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم، توابع هدف و نیز محدودیت‌های مدل، بیان می‌شود.

۳-۳-۱- علائم مدل ریاضی

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

i مجموعه تأمین‌کنندگان

u, v, w مجموعه فعالیت‌ها

p, p' مجموعه موقعیت مکانی فعالیت‌ها در توالی

t, t' مجموعه دوره‌های زمانی

پارامترها

Q_i امتیاز تأمین‌کننده در کیفیت

E_i امتیاز تأمین‌کننده در توان فنی

F_i امتیاز تأمین‌کننده در موعد تحویل

G_i امتیاز تأمین‌کننده در خدمات پس از فروش

H_i امتیاز تأمین‌کننده در موقعیت در صنعت بین رقبای

D_{ui} قیمت پیشنهادی تأمین‌کننده i برای انجام فعالیت u

Y_{ui} پارامتر باینری برابر ۱، اگر فعالیت u به تأمین‌کننده i مربوط باشد و در غیر این صورت ۰ است

HP_{uv} پارامتر باینری برابر ۱، اگر فعالیت u پیش‌نیاز سخت فعالیت v باشد و در غیر این صورت ۰ است

TS حداقل مقدار توانمندی تأمین‌کننده پذیرفتنی برای هر فعالیت

ID_{uv} وابستگی اطلاعاتی فعالیت u به فعالیت v

BID_{uv} مقدار باینری ID_{uv} (اگر $ID_{uv} > 0$ آنگاه $BID_{uv} = 1$ ، وگرنه $BID_{uv} = 0$ خواهد بود).

RI_{uv} نسبت مدت دوباره‌کاری به کل مدت انجام فعالیت u در اثر فعالیت v

CT_{uv} درصد هم‌زمانی فعالیت u با فعالیت v

$Cost_u$ هزینه فعالیت u

$Time_u$ زمان انجام فعالیت u

Bud_t بودجه تخصیص‌یافته برای دوره زمانی t

AT_t زمان در دسترس برای انجام فعالیت در دوره زمانی t

متغیر تصمیم

X_{ui} متغیر باینری برابر ۱، اگر فعالیت u به وسیله تأمین‌کننده i انجام شود.

A_{upt} متغیر باینری برابر ۱، اگر فعالیت u به موقعیت مکانی p در دوره زمانی t تخصیص یابد و در غیر این صورت برابر ۰ است.

B_{uv} متغیر باینری برابر ۱، اگر فعالیت u قبل از فعالیت v انجام شود و در غیر این صورت برابر ۰ است.

C_{uv} متغیر باینری برابر ۱، اگر دوباره کاری فعالیت u در اثر بازخورد از فعالیت v در دوره t انجام شود و در غیر این صورت برابر ۰ است.

۳-۳-۲- توابع هدف

۳-۳-۲-۱- تابع هدف بازخورد ناشی از وابستگی اطلاعاتی فعالیت‌ها

$$\text{Min } Z_1 = \sum_u \sum_{\substack{v \\ v \neq u}} \left[\sum_w \left(\sum_t a_{uwt} \times \sum_{p=w+1}^n a_{vpt} \right) ID_{uv} \right] \quad (3)$$

تابع هدف (۳)، طوری فعالیت‌ها را به دنبال یکدیگر قرار می‌دهد که مقدار کل بازخورد را - که به دوباره کاری فعالیت‌ها منجر می‌شود - کمینه کند. اگر فعالیت u قبل از فعالیت v تخصیص یافته باشد (یعنی فعالیت u در موقعیت مکانی w ام و فعالیت v در یک موقعیت مکانی بعد از w باشد)، آنگاه عبارت $(\sum_t a_{uwt} \times \sum_{p=w+1}^n a_{vpt})$ مقدار می‌گیرد و D_{uv} در بالای قطر اصلی ماتریس وابستگی اطلاعات خواهد بود که نشان‌دهنده بازخورد اطلاعات است؛ بنابراین مقدار آن در تابع هدف لحاظ می‌شود و موجب دوباره کاری است. به بیان دیگر، تابع هدف اول، طوری توالی فعالیت‌ها را تعیین می‌کند که مقدار دوباره کاری فعالیت‌ها به کمینه‌ترین مقدار ممکن برسد.

۳-۳-۲-۲- تابع هدف هزینه

$$\text{Min } Z_2 = \sum_t \left(\left(\sum_p \sum_u \text{Cost}_u \times A_{upt} + \sum_{u=1} \sum_{v=u+1} \text{BID}_{uv} C_{uv} (RI_{uv} \text{Cost}_u) \right) + \sum_u \sum_i X_{ui} * D_{ui} \right) \quad (4)$$

تابع هدف (۴)، به جنبه مالی مسئله مربوط است و هدف از آن، کمینه سازی هزینه انجام فعالیت‌های پروژه در هر دوره است. عبارت $\sum_p \sum_u \text{Cost}_u \times A_{upt}$ هزینه انجام فعالیت را محاسبه و عبارت $\sum_{u=1} \sum_{v=u+1} \text{BID}_{uv} C_{uv} (RI_{uv} \text{Cost}_u)$ هزینه دوباره کاری فعالیت‌های انجام شده در هر دوره زمانی را حساب می‌کند.

از طرفی، هر تأمین کننده برای انجام خدمات یا تأمین کالای مدنظر، یک قیمت پیشنهادی را به مدیر پروژه ارائه می‌دهد. مدیر پروژه باید قیمت‌ها را از تأمین کنندگان مختلف دریافت و حتی الامکان کم هزینه ترین تأمین کننده را انتخاب کند. عبارت $\sum_u \sum_i X_{ui} * D_{ui}$ به تابع هدف اول کمک می‌کند که تأمین کننده با کمترین هزینه پیشنهادی را انتخاب کند.

۳-۳-۳ محدودیت‌ها

$$\sum_t \sum_p A_{upt} = 1 \quad \forall u \quad (5)$$

محدودیت (۵) تضمین می‌کند که در هر دوره زمانی، هر فعالیت باید تنها به یک جایگاه مکانی تخصیص یابد.

$$\sum_u \sum_t A_{upt} = 1 \quad \forall p \quad (6)$$

برای تعیین توالی فعالیت‌ها، برای هر فعالیت یک جایگاه در نظر گرفته شده است. محدودیت (۶)، موجب می‌شود که در هر جایگاه مکانی، تنها یک فعالیت قرار دهد.

$$B_{uv} + B_{vu} = 1 \quad \text{for } 1 \leq u < v \leq n \quad (7)$$

محدودیت (۷)، درواقع بیانگر آن است که اگر $B_{uv} = 1$ ، آنگاه $B_{vu} = 0$ و برعکس و این یعنی اگر فعالیت u قبل از فعالیت v انجام شده باشد، آنگاه به‌طور منطقی فعالیت v قبل از فعالیت u انجام نشده است.

$$B_{uv} + B_{vw} + B_{wu} \leq 2 \quad \text{for } u < v, v < w, \text{ and } v \neq w \quad (8)$$

اگر فعالیت u قبل از فعالیت v و فعالیت v قبل از فعالیت w تخصیص یافته باشد، آنگاه به‌طور منطقی فعالیت u باید قبل از فعالیت w تخصیص یافته باشد. این قاعده در محدودیت (۸) بیان شده است.

$$C_{uvt} \leq \sum_p \sum_{t'=1}^t A_{upt'} \quad \forall t \text{ and for } u \neq v, BID_{uv} \neq 0 \quad (9)$$

محدودیت (۹) بیانگر آن است که دوباره‌کاری فعالیت u با استفاده از بازخورد اطلاعات، از فعالیت v در دوره زمانی t هنگامی رخ می‌دهد که فعالیت u در آن دوره زمانی یا دوره‌های پیشین انجام شده باشد؛ به عبارت دیگر، برای فعالیتی که هنوز انجام نشده است، دوباره‌کاری معنی ندارد.

$$C_{uvt} \leq \sum_p \sum_{t'=1}^t A_{vpt'} \quad \forall t \text{ and for } u \neq v, BID_{uv} \neq 0 \quad (10)$$

دوباره‌کاری فعالیت u ناشی از فعالیت v ، هنگامی رخ می‌دهد که فعالیت v شروع شده باشد. محدودیت (۱۰) نشان می‌دهد که وقتی فعالیت v شروع و اطلاعات اصلاحی از آن فعالیت دریافت شود، دوباره‌کاری شناسایی و در مدل لحاظ خواهد شد.

$$\sum_t C_{uvt} = B_{uv} \quad \text{for } u \neq v, BID_{uv} \neq 0 \quad (11)$$

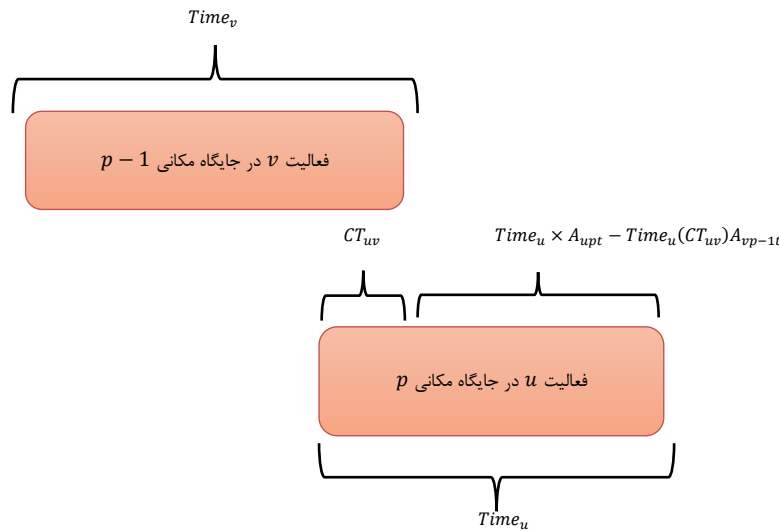
اگر امکان دوباره‌کاری فعالیت u ناشی از فعالیت v وجود داشته ($BID_{uv} \neq 0$) و فعالیت u قبل از فعالیت v تخصیص یافته باشد ($B_{uv} = 1$)، آنگاه دوباره‌کاری فعالیت u باید در مدل اعمال شده باشد که محدودیت (۱۱) دقیقاً بیانگر این موضوع است.

$$\sum_u \sum_p Cost_u \times A_{upt} + \sum_{u=1}^n \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq u}}^n BID_{uv} C_{uvt} (RI_{uv} Cost_u) \leq Bud_t \quad \forall t \quad (12)$$

محدودیت (۱۲) مؤید آن است که هزینه‌های هر دوره کمتر از مقدار بودجه تزیق‌شده به آن دوره است. هزینه‌های مربوط به انجام فعالیت‌ها و نیز هزینه‌های مربوط به دوباره‌کاری ناشی از بازخورد از فعالیت‌های پایین‌دستی، ساختار هزینه مدل را شکل می‌دهد.

$$\sum_u \sum_p \left(Time_u \times A_{upt} - \sum_{v \neq u} Time_u (CT_{uv}) A_{vp-1t} \right) + \sum_{u=1} \sum_{v=1}^{v \neq u} BID_{uv} C_{uvt} (RI_{uv} Time_u) \leq AT_t \quad \forall t \quad (13)$$

محدودیت (۱۳)، محدودیت زمان را برای هر دوره نشان می‌دهد؛ به این صورت که زمان کل انجام و دوباره‌کاری فعالیت‌ها باید کمتر از زمان در دسترس در هر دوره باشد. مشخصه بارز این محدودیت، امکان همپوشانی میان فعالیت‌هاست. همان‌گونه که در شکل (۲) مشخص است، هر فعالیت به فعالیت پیشین خود در توالی، به وسیله اندیس p متصل است.



شکل ۲- همپوشانی دو فعالیت

Fig. 2- Overlap of two activities

$$\sum_p A_{upt} + \sum_{p'} A_{vp't'} \leq B_{uv} + 1 \quad \forall u, v \text{ and } v \neq u, t < t' \quad (14)$$

محدودیت (۱۴)، نمایانگر ارتباط میان متغیر A_{upt} و B_{uv} است و تضمین می‌کند که اگر فعالیت u به دوره زمانی t و فعالیت v به یک دوره زمانی بعد از t تخصیص یافته باشد، آنگاه $Y_{uv} = 1$ خواهد بود.

$$\sum_i X_{ui} = 1 \quad \forall u \quad (15)$$

برای کاهش هزینه‌ها، ممکن است مدیر پروژه تنها با یک تأمین‌کننده در هر فعالیت کار کند. محدودیت (۱۵)، انتخاب حداکثر یک تأمین‌کننده را برای هر فعالیت کنترل می‌کند.

$$X_{ui} \leq Y_{ui} \quad \forall u, i \quad (16)$$

محدودیت (۱۶)، اجازه انتخاب تأمین‌کننده برای هر فعالیت را در صورتی به مدل می‌دهد که آن فعالیت در سبد خدمت آن تأمین‌کننده وجود داشته و یا به عبارتی، به آن تأمین‌کننده مربوط باشد.

$$B_{uv} \geq HP_{uv} \quad \forall u, v \quad (17)$$

در بین فعالیت‌های توسعه یک محصول پیچیده، حتماً فعالیت‌هایی وجود دارند که پیش‌نیاز یک فعالیت دیگر محسوب می‌شوند؛ این رابطه پیش‌نیازی، نرم یا سخت است.

فرض کنید فعالیت u ، پیش‌نیاز فعالیت v باشد.

الف) اگر این رابطه پیش‌نیازی از نوع سخت باشد، باید لزوماً فعالیت v بعد از اتمام فعالیت u انجام شود؛

ب) در صورت اینکه این پیش‌نیازی از نوع نرم باشد، فعالیت v باید لزوماً بعد از شروع فعالیت u انجام شود. محدودیت (۱۷) تضمین می‌کند که رابطه پیش‌نیازی سخت میان فعالیت‌ها در توالی، رعایت شود.

$$\sum_u \sum_i C a_i * X_{ui} \geq TS \quad (18)$$

از مهم‌ترین وظایف یک مدیر پروژه، کم کردن احتمال برگشت به عقب است. بسته به ابزارها و شرایط پروژه، این امر به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. روشی که در این مقاله به کار رفته است، مبتنی بر توانمندی تأمین‌کنندگان پروژه است؛ به این صورت که به هریک از تأمین‌کنندگان پروژه، با توجه به معیارهای سنجش کیفیت، توان فنی، موعد تحویل، خدمات پس از فروش، موقعیت در صنعت بین رقبا، با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی، یک امتیاز در بازه (۱ و ۰) داده می‌شود و توانمندی تأمین‌کننده i (Ca_i) نامیده می‌شود؛ از طرفی، هرچه یک تأمین‌کننده توانمندی بیشتری داشته باشد، احتمال انجام نادرست فعالیت مربوطه به وسیله او کمتر خواهد بود؛ بنابراین محدودیت (۱۸) سعی دارد انتخاب تأمین‌کننده را به نحوی انجام دهد که توانمندی از یک حدی کمتر نشود. مقدار اولیه پس از تعریف معیارهای ارزیابی و با استفاده از تحلیل داده‌های تاریخی و همچنین نظرسنجی از خبرگان انجام می‌شود.

$$A_{upt}, B_{uvt}, C_{uv} \in \{0,1\} \quad \forall u, v, p, t \quad (19)$$

محدودیت (۱۹) نشان می‌دهد که تمام متغیرهای تصمیم‌گیری، باینری‌اند.

۳-۳-۴- خطی سازی مدل

همان‌طور که در بخش قبلی مشاهده شد، تابع هدف (۳-۲) یک تابع کوادراتیک است و به خطی سازی و زمان محاسبه کمتر نیاز دارد. برای خطی کردن تابع هدف اول، از روش لی و سان^{۲۰} (۲۰۰۶) استفاده شده است. اثبات این روش در منبع لین و همکاران^{۲۱} (۲۰۱۲) آمده است.

بنابراین تابع هدف (۳)، به صورت زیر خطی سازی می‌شود:

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{u=1}^n \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq u}}^n [ID_{uv} * B_{uv}] \quad (20)$$

و رابطه (۲۱) محدودیت شمرده و به مسئله افزوده می‌شود:

$$B_{uv} \geq \sum_t a_{uwt} + \sum_t \sum_{p=1}^{w-1} a_{vpt} \quad \text{For } w = 1, 2, \dots, n \quad \forall u, v \text{ and } u \neq v \quad (21)$$

با توجه به رابطه بالا، اگر فعالیت u به جایگاه k ام ($\sum_t a_{uwt} = 1$) و فعالیت v به جایگاهی بعد از k ($\sum_t \sum_{p=1}^{w-1} a_{vpt} = 0$) تخصیص یافته باشد، آنگاه B_{uv} باید بزرگ‌تر از ۱ باشد.

۳-۴- روش حل مدل

مدل ریاضی ارائه شده در قسمت قبل، دارای مشخصه ویژه‌ای است که حل آن را تحت الشعاع قرار می‌دهد. این مشخصه، عدم قطعیتی است که برخی پارامترهای مدل با آن مواجه‌اند. برای این منظور و برای در نظر گرفتن عدم

قطعیت، باید روش مناسبی اتخاذ شود. همچنین، مدل یادشده دارای سه هدف است و به انتخاب یک رویکرد مناسب برای حل مدل چندهدفه نیاز دارد.

با توجه به این موارد، رویکرد زیر برای حل مدل در نظر گرفته شده است:

- ۱- به کار گرفتن یک رویکرد تصادفی استوار سناریومحور^{۲۲} برای لحاظ کردن عدم قطعیت پارامترها و ریسک اختلال در مدل ریاضی؛
- ۲- استفاده از روش حل محدودیت اپسیلون تقویت شده^{۲۳} برای تبدیل مسئله چندهدفه به یک مسئله تک هدفه و درنهایت حل آن.

۳-۴-۱- روش حل مسئله به صورت چندهدفه

برای تبدیل مسئله چندهدفه به یک مسئله تک هدفه، روش های متنوعی وجود دارد. روش مجموع وزنی^{۲۴}، برنامه ریزی آرمانی^{۲۵}، روش محدودیت اپسیلون^{۲۶}، لکسیکوگرافی^{۲۷} و ... از جمله این روش ها هستند.

در پژوهش حاضر، از روش محدودیت اپسیلون تقویت شده برای تبدیل مسئله چندهدفه به یک مسئله تک هدفه استفاده شده است. مهم ترین مزیت این روش، که آن را از دیگر روش ها متمایز می کند، کنترل شمار راه حل های کارآمد است. این رویکرد یک روش قدرتمند برای حل مسائل برنامه ریزی مختلط عدد صحیح خطی^{۲۸} و چندهدفه^{۲۹}، مانند طراحی شبکه زنجیره تأمین^{۳۰}، توالی فعالیت های یک پروژه و ... است.

روش محدودیت اپسیلون تقویت شده برای محاسبه مقادیر جدول نتایج نهایی، برای هر تابع هدف از رویکرد لکسیکوگراف استفاده و با این کار، محدودیت های مربوط به توابع هدف فرعی را با استفاده از متغیرهای کمکی، به مساوی تبدیل می کند.

نکته درخور توجه در بهینه سازی با این روش، رتبه بندی توابع هدف براساس اهمیت هر کدام از سوی تصمیم گیرنده است؛ به این صورت که ابتدا تابع هدف با بیشترین اولویت به صورت تک هدفه بهینه می شود. برای فهم بهتر این موضوع، فرض کنید $f_1(x)$ اولویت دارترین تابع هدف و f_1^* است. حال محدودیت $f_1(x) = f_1^*$ را به مدل اضافه و تابع هدف دوم را با حفظ جواب بهینه بهینه سازی اول، بهینه می کنیم. به این ترتیب f_2^* محاسبه می شود و این روند را برای تابع هدف i ام نیز، ادامه می دهیم (Mavrotas, 2009).

۳-۴-۲- بهینه سازی استوار غیرقطعی

در این قسمت، مدل سازی غیرقطعی با استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار^{۳۱} توسعه داده می شود. در شرایطی که داده های تاریخی کامل در دسترس نیستند یا دانش تخمین توزیع احتمالی پارامترهای غیرقطعی وجود ندارد، این تکنیک رویکرد کارآمدی برای مقابله با انواع عدم قطعیت است (Aghezzaf et al., 2010).

با توجه به اینکه روش بهینه سازی استوار آقازف و همکاران^{۳۲} (۲۰۱۰) برای مقابله با انواع ریسک عدم قطعیت و اختلال تبحر دارد، در پژوهش حاضر، از آن استفاده شده است. در ادامه، این روش شرح داده می شود:

فرض کنید O مجموعه سناریوهای ریسک است و هر سناریو با o نمایش داده می‌شود. همچنین احتمال وقوع سناریوی o برابر π_o است. به علاوه، A_o مسئله بهینه‌سازی قطعی برای هر سناریو و A_o^* مقدار بهینه مربوط به A_o است. حال باید مراحل زیر طی شود:

$$\text{Min } \eta \sum_{o \in O} \pi_o A_o + (1 - \eta) \text{Max}(A_o - A_o^*) \quad (22)$$

نکته مهم، برآورده شدن محدودیت‌های فنی مسئله علاوه بر رابطه (۲۲) است که $X \in \Omega$ نشانگر فضای شدنی مسئله تحت تمام سناریوهاست.

$$X \in \Omega \quad (23)$$

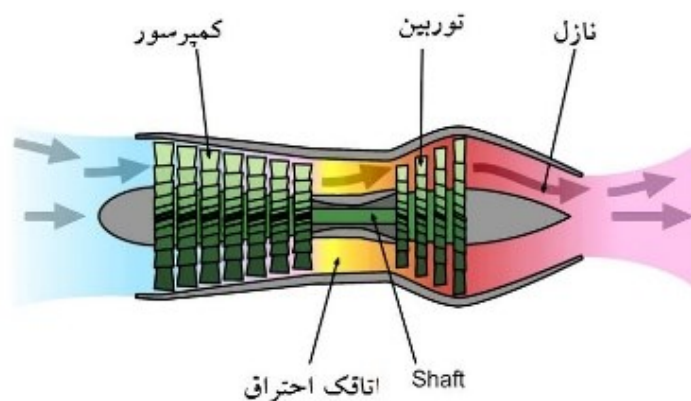
رابطه (۲۲) از دو عبارت تشکیل شده است که عبارت نخست $(\sum_{o \in O} \pi_o A_o)$ نشانگر ارزش مورد انتظار مسئله A_s و عبارت دوم $\text{Max}(A_o - A_o^*)$ نمایانگر حداکثر تأسف برای مسئله A_s در تمامی سناریوهاست. نماد دیگری η است که مقدار آن در بازه $[0-1]$ است و تصمیم‌گیر به وسیله آن، میان ارزش انتظاری و حداکثر تأسف موازنه ایجاد می‌کند؛ برای مثال، در صورتی که تصمیم‌گیر بخواهد یک زنجیره تأمین با سطح تأسف پایین (تغییرپذیری پایین) را طراحی کند، مقدار پارامتر η را باید کوچک در نظر بگیرد.

۳-۴-۳- روش بهترین-بدترین فازی

روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین-بدترین^{۳۳} را اولین بار آقای رضایی^{۳۴} در سال ۲۰۱۵ ارائه کرد. این روش، توانایی به دست آوردن وزن معیارها و گزینه‌ها را با توجه به مقایسات زوجی با تعداد کمتر داده دارد. در همین حال، روش بهترین-بدترین به طرز شگفت‌آوری، ناسازگاری ناشی از مقایسات زوجی را برطرف می‌کند. این روش مسئله را به دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند و نتایج رتبه‌بندی منطقی‌تری را به دست می‌آورد. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، اطلاعات معیارها مبهم است و به کمی کردن قضاوت‌های کیفی درباره توانمندی تأمین‌کنندگان نیاز دارد، از روش بهترین-بدترین فازی برای امتیازدهی به معیارهای انتخاب تأمین‌کنندگان استفاده شده است. در این روش ابتدا نظام معیارهای تصمیم‌گیری تشکیل می‌یابد و بعد بهترین (مهم‌ترین) معیار و بدترین (کم‌اهمیت‌ترین معیار) تعیین می‌شوند؛ سپس مقایسات مرجع فازی به ترتیب برای بهترین و بدترین معیار انجام و در نهایت اوزان فازی بهینه مشخص می‌شود. تشریح کامل این روش، در رضایی (۲۰۱۵) آمده است.

۴- مطالعه کاربردی

با توجه به ذخایر فراوان گاز در ایران و افزایش تقاضا برای تولید برق در کشور، امروزه استفاده از توربین گازی در صنایع مختلف، به‌ویژه برای تولید انرژی الکتریکی اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود. علاوه بر این، شناسایی وضعیت یک فناوری در جهان و همچنین قابلیت‌های فن‌آوری موجود در داخل کشور برای توسعه فناوری، برای ترسیم یک برنامه راهبردی به کار می‌رود. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، اجزای کلیدی توربین‌های گازی عبارت‌اند از توربین، محفظه احتراق و کمپرسور.



شکل ۳- قسمت‌های اصلی توربین

Fig. 3- Main parts of a gas turbine

۱-۴- جمع‌آوری داده‌ها

به‌منظور نزدیک‌شدن مسئله به دنیای واقعی، یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های دانش‌بنیان در زمینه طراحی و ساخت محصولات پیچیده انتخاب شده است. این شرکت که توربوتک نام دارد، سال‌هاست در این زمینه فعال است و هم‌اکنون از قطب‌های توربین گازی در کشور به حساب می‌آید. با طرح سؤالات مختلف از خبرگان این شرکت، مجموعه‌ای از فعالیت‌های به هم پیوسته برای ساخت یک توربین گازی سفارشی، با نام تجاری IGT25 استخراج شد که نتایج آن در جدول‌های (۱)، (۲)، (۳) و (۴) مشاهده می‌شود:

جدول ۱- فعالیت‌های اصلی ساخت توربین گاز- عمومی

Table 1- The main activities of gas turbine construction- General

ردیف	نام قطعه	شماره فعالیت	نام فعالیت	هزینه	زمان
		۱	بررسی مدارک فنی	-	۳۰
-	-	۲	استخراج لیست مواد مورد نیاز	-	۷
		۳	خرید قطعات استاندارد	۴۵۰۰	۲۰

جدول ۲- فعالیت‌های اصلی ساخت توربین گازی- توربین

Table 2- The main activities of gas turbine construction- Turbine

ردیف	نام قطعه	شماره فعالیت	نام فعالیت	هزینه	زمان
۱	توربین	۴	تأمین مواد خام شفت مانند دیسک‌های آهنگری شده	۲۰۰۰	۱۵
		۵	ماشین‌کاری شفت و دیسک	۵۰۰۰	۲۰
		۶	جوشکاری روتور	۰	۰
		۷	ماشین‌کاری روتور	۴۰۰۰	۴۰
		۸	مونتاژ روتور	۱۰۰۰	۱۲
		۹	بالانس‌کردن روتور	۳۰۰۰	۳۰
		۱۰	ریخته‌گری پره‌ها	۲۰۰۰	۲۵
		۱۱	ماشین‌کاری پره‌ها	۵۰۰۰	۳۲
		۱۲	پوشش‌دهی پره‌ها	۲۰۰۰	۱۷
		۱۳	ریخته‌گری	۵۰۰۰	۲۴

ردیف	نام قطعه	شماره فعالیت	نام فعالیت	هزینه	زمان
		۱۴	ماشین‌کاری	۳۰۰۰	۱۶
		۱۵	پوشش‌دهی	۱۰۰۰	۳۷
		۱۶	ریخته‌گری و آهنگری	۰	۰
		۱۷	ماشین‌کاری	۴۰۰۰	۲۱
		۱۸	مونتاژ	۲۰۰۰	۱۰
		۱۹	رنگ‌کردن	۶۰۰۰	۱۸
		۲۰	مونتاژ قطعات توربین	۳۰۰۰	۱۹

جدول ۳- فعالیت‌های اصلی ساخت توربین گازی- کمپرسور

Table 3- The main activities of gas turbine construction- Compressor

ردیف	نام قطعه	شماره فعالیت	نام فعالیت	هزینه	زمان
		۲۱	تأمین مواد خام پره‌های روتور کمپرسور مانند میله‌های آهنگری	۵۰۰۰	۲۴
		۲۲	ماشین‌کاری پره‌ها	۰	۰
		۲۳	پوشش‌دهی پره‌ها	۵۰۰۰	۲۳
		۲۴	تأمین مواد خام شفت مانند دیسک‌های آهنگری شده	۴۰۰۰	۳۹
		۲۵	ماشین‌کاری دیسک‌ها و شفت‌ها	۲۰۰۰	۳۶
		۲۶	جوشکاری روتور	۵۰۰۰	۱۵
		۲۷	ماشین‌کاری روتور	۲۰۰۰	۱۰
		۲۸	پوشش‌دهی روتور	۰	۰
		۲۹	مونتاژ روتور	۴۰۰۰	۱۲
۲	کمپرسور	۳۰	بالانس‌کردن روتور	۰	۰
		۳۱	تأمین مواد خام وین‌ها مانند میله‌های آهنگری و رینگ رولینگ	۳۰۰۰	۱۸
		۳۲	ماشین‌کاری وین و رینگ	۲۰۰۰	۱۲
		۳۳	مونتاژ سگمنت‌های وین	۴۰۰۰	۲۳
		۳۴	سفارش‌دهی ریخته‌گری پوسته‌ها	۳۰۰۰	۱۴
		۳۵	ماشین‌کاری پوسته‌ها	۲۰۰۰	۱۸
		۳۶	پوشش‌دهی پوسته‌ها	۶۰۰۰	۳۰
		۳۷	رنگ‌زنی پوسته‌ها	۰	۰
		۳۸	مونتاژ قطعات کمپرسور	۴۰۰۰	۱۶

جدول ۴- فعالیت‌های اصلی ساخت توربین گازی- محفظه احتراق

Table 4- The main activities of gas turbine construction- Cobustion Chamber

ردیف	نام قطعه	شماره فعالیت	نام فعالیت	هزینه	زمان
		۳۹	تأمین مواد خام محفظه احتراق مانند ورقه‌های فلزی و رینگ رولینگ	۲۰۰۰	۱۴
		۴۰	تولید قطعات محفظه احتراق از طریق ماشین‌کاری، شکل‌دهی و	۵۰۰۰	۲۰
		۴۱	سوراخ‌کاری ورقه‌های فلزی	۲۰۰۰	۲۲
		۴۲	پوشش‌دهی محفظه احتراق	۲۰۰۰	۲۲
		۴۳	مونتاژ قطعات محفظه احتراق	۴۰۰۰	۱۲
		۴۳	مونتاژ تمام قطعات	-	۳۰

در این بین، فعالیت‌هایی وجود دارند که برای مجموعه به برون‌سپاری نیاز دارند. این برون‌سپاری به دلایل مختلفی از جمله تخصیصی بودن فعالیت، هزینه زیاد انجام آن از سوی خود شرکت، اهمیت کم فعالیت و ... است که در جدول‌های بالا با رنگ زرد تمیز داده شده‌اند.

برای فعالیت‌های نیازمند برون‌سپاری، سبدي از تأمین‌کنندگان مختلف با سطوح توانمندی گوناگون در نظر گرفته شده است. طبق فرض مسئله، هر تأمین‌کننده تنها قادر به انجام یکی از فعالیت‌های شش‌گانه بالاست. برای آنکه مدل، هر تأمین‌کننده را به فعالیت مخصوص به خود معطوف کند، ماتریسی با عنوان ماتریس نگاشت تأمین‌کننده تعریف شده است که هدف مذکور را محقق می‌کند. نکته مهم، تعریف یک تأمین‌کننده خاص به نام «خود» است. برای آنکه مدل تنها برای فعالیت‌های شش‌گانه، تأمین‌کننده مناسب را برگزیند، تأمین‌کننده «خود» با استفاده از یک محدودیت به فعالیت‌های دیگر تخصیص داده شده است؛ به این معنا که این فعالیت‌ها را خود مجموعه انجام می‌دهد و به برون‌سپاری آنها نیازی نیست.

ضمناً برای آنکه مدل هم‌زمان با تعیین توالی مناسب فعالیت‌ها، تأمین‌کننده مناسب را نیز برای فعالیت‌های مربوطه انتخاب و به خودی خود هزینه و زمان آن تأمین‌کننده را لحاظ کند، زمان و هزینه فعالیت‌های نیازمند برون‌سپاری، صفر در نظر گرفته می‌شود تا زمان و هزینه آنها به اشتباه دو بار محاسبه نشود.

۲-۴- ماتریس‌های وابستگی‌های فعالیتی

برای نمایش میزان وابستگی فعالیت‌ها با یکدیگر از نظر جریان اطلاعاتی، میزان دوباره‌کاری و نیز درصد هم‌زمانی به ترتیب باید از ماتریس وابستگی اطلاعاتی، شدت دوباره‌کاری و هم‌زمانی استفاده شود. همان‌طور که در بخش دوم به آن اشاره شد، مقادیر این ماتریس‌ها همه در بازه عددی [۰,۱] هستند که با مشورت با خبرگان به دست آمده‌اند.

یکی دیگر از ماتریس‌هایی که در تعیین توالی فعالیت‌ها تأثیر جدی دارد، ماتریس پیش‌نیاز سخت یا همان HP_{uv} است. در این ماتریس، فعالیت‌هایی که پیش‌نیاز سخت فعالیت دیگرند، مقادیر HP آنها با ۱ نمایش داده شده است.

۳-۴- تعیین اهمیت معیارهای تعریف‌شده برای انتخاب تأمین‌کننده‌ها

محصولات پیچیده با توجه به ماهیت پیچیده‌شان، به تأمین‌کنندگان با ویژگی‌های خاص نیاز دارند. این محصولات تفاوت‌های بنیادینی با محصولات دارای تولید انبوه دارند و در نتیجه تأمین‌کنندگان آنها نیز باید استانداردهای معینی را داشته باشند. زمانی که تعداد معیارهای انتخاب تأمین‌کننده مناسب چندگانه باشد، تعیین اوزان هریک از آنها ضروری است. روش‌های گوناگونی برای این منظور وجود دارد که یکی از معروف‌ترین آنها، روش بهترین-بدترین فازی است. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر اطلاعات معیارها مبهم است و به کمی کردن قضاوت‌های کیفی درباره توانمندی تأمین‌کنندگان نیاز دارد، از روش بهترین-بدترین فازی برای امتیازدهی به معیارهای انتخاب تأمین‌کنندگان استفاده شده است.

به این ترتیب، اوزان فازی بهینه برای هریک از معیارها به قرار زیر خواهد بود:

$$w_{c1} = 0/3093$$

$$w_{c4} = 0/2583$$

$$w_{c2} = 0/2517$$

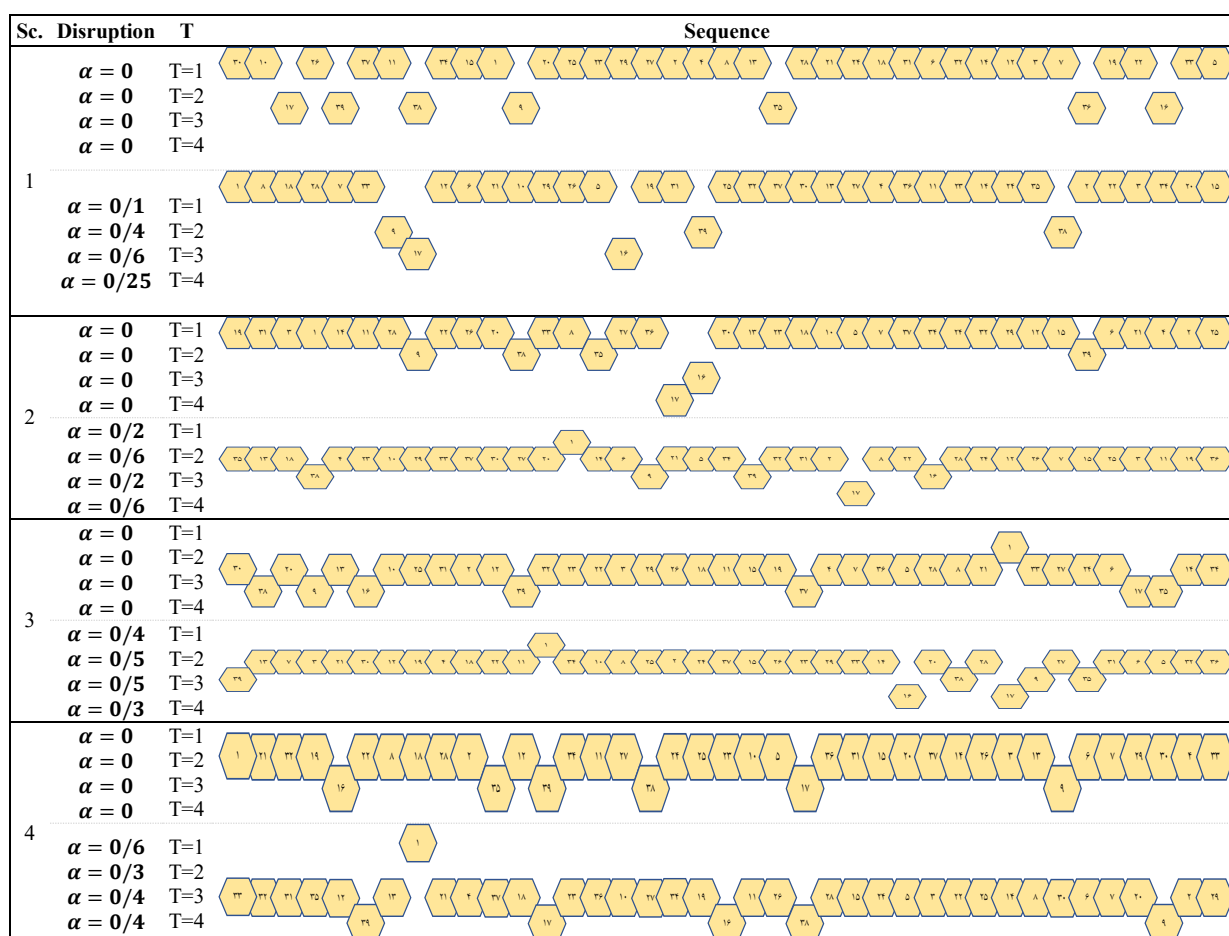
$$w_{c5} = 0/0783$$

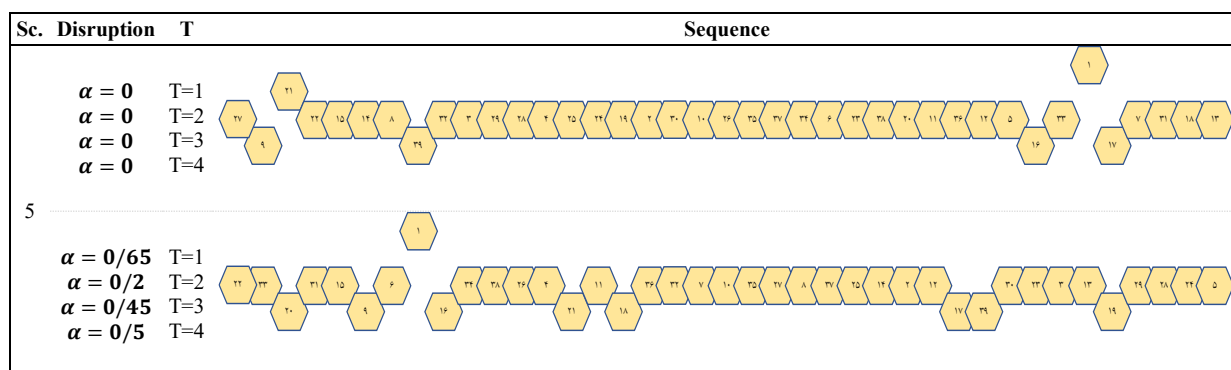
$$w_{c3} = 0/1024$$

مقدار توانمندی هر تأمین‌کننده نیز، با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

۴-۴- یافته‌ها

یکی از چالش‌های مهم در زمینه طراحی توربین‌های گازی، خرابی ماشین‌آلات است. با توجه به آنکه این دستگاه‌ها به شرایط یا مواد خاصی برای نگهداری نیاز دارند، نگهداری از آنها بسیار چالش‌برانگیز است و کم‌کاری یا بی‌دقتی در این زمینه، موجب خرابی آنها می‌شود؛ در نتیجه فرآیند ساخت توربین به صورت جدی، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای آنکه مدل به شرایط واقعی نزدیک‌تر شود، عدم قطعیت پارامترهای ورودی مسئله از طریق اعمال اختلال در پارامتر «زمان در دسترس هر دوره زمانی»^{۳۵} پیاده‌سازی شده است. اختلال یادشده از طریق اعمال ضرب $(1-\alpha)$ در پارامتر زمان در دسترس هر دوره اعمال می‌شود؛ پس از حل مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز^{۳۶}، توالی فعالیت‌ها در حالت اعمال اختلال در دوره‌های مختلف، تحت تأثیر سناریوهای پنج‌گانه در مقایسه با حالت بدون اختلال در شکل (۴)، به نمایش درآمده است:





شکل ۴- توالی فعالیت‌ها در حالت اعمال اختلال در دوره‌های مختلف، تحت تأثیر سناریوهای پنج‌گانه در مقایسه با حالت بدون اختلال

Fig. 4- The sequence of activities in the state of disturbance in different periods, under 5 scenarios, compared to the state without disturbance

۴-۵- اعتبارسنجی مدل

برای تحلیل کارایی و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، از مسئله توربین گازی به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد. این انتخاب به‌دلیل اهمیت بالای توربین‌های گازی در صنعت انرژی و تأثیر آنها بر کارایی و هزینه‌های عملیاتی زنجیره تأمین انجام شد.

اعتبارسنجی مدل در دو مرحله اصلی انجام شد:

۱- شبیه‌سازی و اجرا

مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده از پروژه‌های مرتبط با توربین گازی، شبیه‌سازی شد. این داده‌ها شامل اطلاعات عملکردی، هزینه‌ها و زمان‌های اجرایی بودند که به‌طور خاص برای شرایط مختلف عملیاتی تدوین شده بودند؛ سپس نتایج به دست آمده از مدل با داده‌های واقعی مقایسه شد تا دقت پیش‌بینی‌ها ارزیابی شود.

۲- تحلیل مقایسه‌ای

اعتبار مدل با انجام یک تحلیل مقایسه‌ای در دو سناریو مشخص شد. سناریوی اول شامل انتخاب تأمین‌کنندگان بدون در نظر گرفتن توانمندی‌های آنها بود و سناریوی دوم، تأثیر توانمندی‌های تأمین‌کنندگان را در فرآیند انتخاب آنها لحاظ کرده است. نتایج این سنجش‌ها نشان‌دهنده کاهش درخور توجهی در مقدار تابع هدف در سناریوی دوم (با لحاظ کردن توانمندی‌ها) نسبت به سناریوی اول بود.

از طریق این رویکرد، اعتبار مدل پیشنهادی نه تنها از نظر دقت پیش‌بینی تأیید شد، همچنین قابلیت آن را در فراهم‌سازی نتایج کاربردی و مفید برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به اثبات رساند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ترکیب قابلیت‌های تأمین‌کنندگان در فرآیند انتخاب آنها، به بهبود عملکرد زنجیره تأمین و کاهش هزینه‌ها منجر می‌شود.

این مراحل اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، کاربردی بودن و قابلیت اطمینان آن را در شرایط واقعی، تأیید می‌کند و نشان‌دهنده توانایی مدل در مواجهه با عدم قطعیت‌ها و چالش‌های موجود در صنعت انرژی است.

۵- بحث

در این بخش، حساسیت آستانه توانمندی و استواری تحلیل می‌شود. این تحلیل‌ها به ما این امکان را می‌دهند که قابلیت اطمینان و کارایی مدل پیشنهادی را در شرایط مختلف ارزیابی کنیم. با این حال، به‌منظور شفاف‌سازی نوآوری‌ها و برتری‌های مدل ما نسبت به کارهای پیشین، لازم است چند نکته کلیدی را مدنظر قرار دهیم.

۵-۱- نوآوری و تمایز مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی در این تحقیق، چندین نوآوری و تمایز کلیدی را نسبت به مدل‌های پیشین ارائه می‌کند: اول اینکه این مدل به‌طور خاص، براساس تجزیه و تحلیل عمیق توانمندی‌های تأمین‌کنندگان طراحی شده است و در حالی که بسیاری از مدل‌های موجود به زمینه‌های عمومی و تعاریف اکتفا می‌کنند، در این پژوهش تأکید ویژه‌ای بر تحلیل توانمندی‌های خاص و قابلیت‌های فنی تأمین‌کنندگان شده است. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق‌تر و جامع‌تری را در انتخاب تأمین‌کنندگان فراهم می‌آورد.

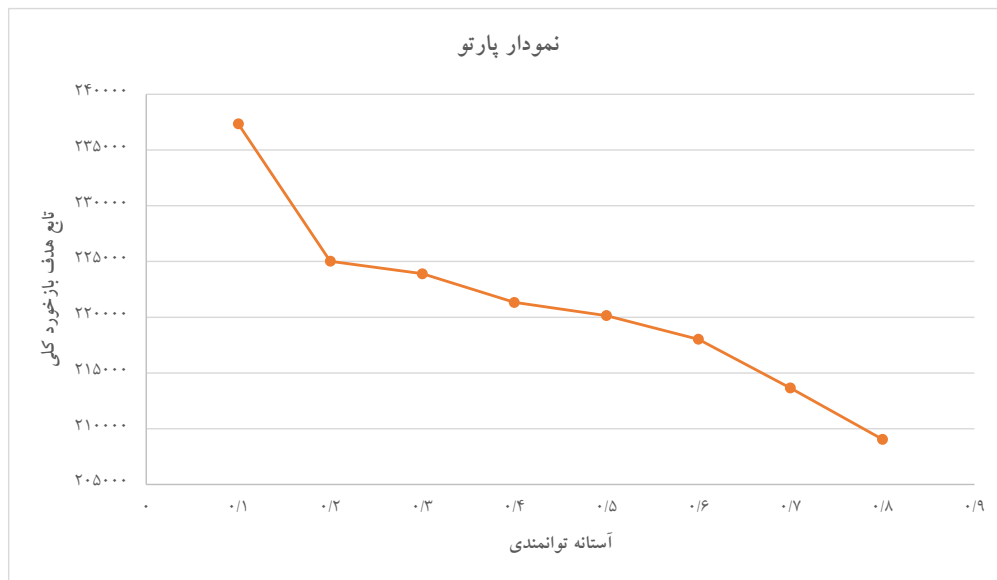
دوم، این مدل با بهره‌گیری از تحلیل حساسیت، عملکرد آن را در مواجهه با تغییرات پارامترهای مختلف شفاف‌سازی می‌کند. با استفاده از مقایسه نتایج با داده‌های واقعی و نظر خبرگان، مدل پیشنهادی دقت پیش‌بینی را در شرایط واقعی اعتبارسنجی می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه توانمندی‌های تأمین‌کنندگان، نتایج بهتری را در مقایسه با مدل‌های قبلی به ارمغان می‌آورد.

سوم، در این تحقیق از داده‌های واقعی مرتبط با عملکرد توربین‌های گازی استفاده و مدل در شرایط واقعی اعتبارسنجی شده است. این ویژگی، این امکان را به مدل می‌دهد که نتایج به دست آمده به‌طور مستقیم برای مدیران صنعت انرژی کاربردی باشد و به بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری، کمک کند.

با توجه به این نوآوری‌ها و تمایزات کلیدی، در ادامه حساسیت آستانه توانمندی و تحلیل حساسیت استواری تحلیل شده است تا ابعاد و قابلیت‌های موجود در مدل پیشنهادی به‌صورت عمیق‌تر بررسی شود.

۵-۲- تحلیل حساسیت آستانه توانمندی

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش آستانه توانمندی تأمین‌کنندگان (TS_{Sup}) که در معادله (۱۷-۳) آمده است، مدل ریاضی در انتخاب تأمین‌کننده فعالیت‌های نیازمند برون‌سپاری، سخت‌گیری بیشتری به خرج می‌دهد و تأمین‌کننده با سطح توانمندی بالاتر را انتخاب می‌کند؛ در نتیجه، احتمال برگشت به عقب ناشی از تأمین‌کنندگان کاهش و به تبع آن، مقدار تابع هدف بازخورد کلی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، این مدل توالی فعالیت‌ها را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که مقدار فیدبک کلی و در نتیجه میزان دوباره‌کاری کمتر شود.



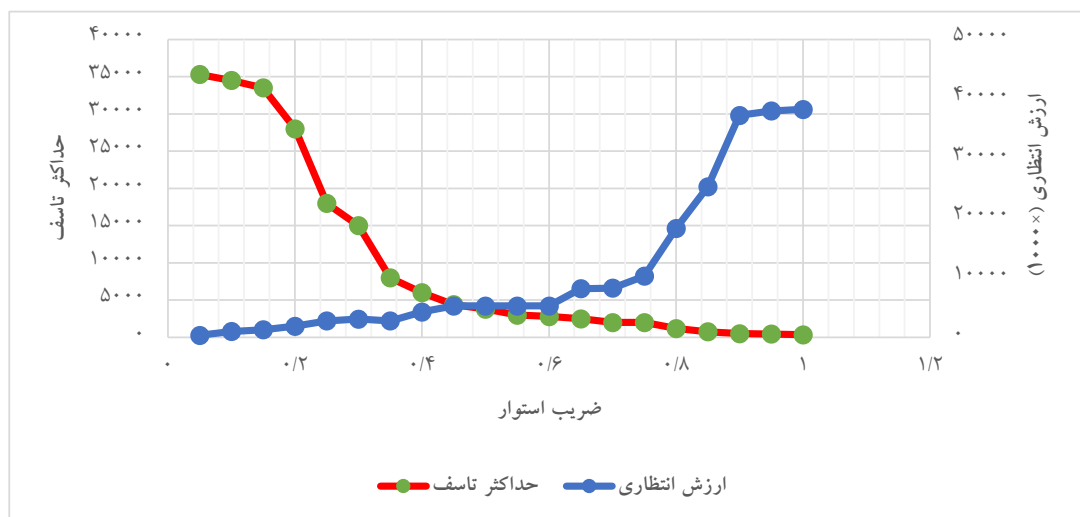
شکل ۵- تحلیل حساسیت مدل- آستانه توانمندی

Fig. 5- Model sensitivity analysis- Capability threshold

۳-۵- تحلیل حساسیت استواری

هر چقدر درجهٔ لاندا (ضریب ترجیح ریسک) افزایش یابد، مقدار مورد انتظار تابع هدف بدتر و در مقابل قسمت تأسف آن کمتر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، Z_s و Z_s^* به یکدیگر نزدیک شده‌اند و چون اختلاف این دو کم است، مقیاس دو محور عمودی تفاوت چشم‌گیری با یکدیگر دارند.

در شکل (۶)، نمودار آبی‌رنگ همان استواری بهینگی یا همان مقدار مورد انتظار و یا مقدار میانگین تابع هدف اصلی است و نمودار قرمز رنگ، استواری‌شدنی یا همان حداکثر تأسف (اختلاف مقدار تابع هدف تحت سناریوی s از مقدار بهینه به دست آمده از حل مدل قطعی تحت آن سناریو) است.



شکل ۶- تحلیل حساسیت استواری

Fig. 6- Robust sensitivity analysis

هر چقدر درجه ترجیح ریسک افزایش یابد، ریسک‌پذیری کاهش می‌یابد و مسئله سخت‌گیرانه‌تر می‌شود و به دلیل همین سخت‌گیری، توابع هدف بدتر می‌شوند و ارزش انتظاری زیاد می‌شود. هدف اصلی مسئله کمینه‌سازی، هزینه است و با افزایش درجه ترجیح ریسک، مقدار تابع هدف هزینه زیاد می‌شود تا جایی که به حداکثر سطح استواری برسد. این اتفاق در ضریب ترجیح ریسک ۰,۹ رخ می‌دهد. هرچقدر ضریب ترجیح ریسک از ۰,۹ زیاد شود، مقدار تابع هدف تغییر نمی‌کند.

در مقابل، نمودار نارنجی‌رنگ قرار دارد. در ابتدای کار که سطح استواری خیلی پایین است، اختلاف بین مقدار تابع هدف و مقدار بهینه به دست آمده تحت سناریوی S زیاد است. رفته‌رفته این اختلاف کمتر می‌شود. از ۰,۹ به بعد، چون بالاترین سطح استواری وجود دارد، کمترین میزان استواری‌شدنی و کمترین میزان تأسف در اختیار خواهد بود.

برای بررسی اعتبار و کارایی مدل پیشنهادی، نتایج تحقیق حاضر با کارهای قبلی در زمینه انتخاب تأمین‌کنندگان و تحلیل توانمندی‌ها مقایسه می‌شود.

راگاتر و همکاران^{۳۷} (۲۰۰۲) در مطالعه خود، مزایای ادغام تأمین‌کنندگان را در توسعه محصولات جدید، تحت شرایط عدم قطعیت فناوری بررسی کرده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که مشارکت تأمین‌کنندگان، به محصولات با کیفیت بالاتر و زمان‌بندی دقیق‌تری منجر می‌شود. در تحقیق حاضر نیز تأکید بر توانمندی‌های تأمین‌کنندگان و تأثیر آنها بر انتخاب بهینه تأمین‌کنندگان وجود دارد. یافته‌ها نشان می‌دهند که توانمندی‌های فنی تأمین‌کنندگان نه تنها به بهبود کیفیت کمک می‌کند، به کاهش زمان توسعه و بهینه‌سازی فرایندها نیز منجر می‌شود.

در تحقیق حاضر، حساسیت آستانه توانمندی و استواری مدل تحلیل شده است. در این راستا، یافته‌ها با رضایی (۲۰۱۵) مقایسه می‌شود که به روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره اشاره دارد؛ در حالی که روش‌های رضایی (۲۰۱۵) عمدتاً بر ارزیابی گزینه‌ها تأکید دارند، مدل حاضر به‌طور خاص بر تحلیل توانمندی‌های تأمین‌کنندگان و شناسایی تأثیرات آنها بر تصمیمات کلیدی متمرکز است. این رویکرد نه تنها دقت تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد، به تجزیه و تحلیل متقابل عامل‌های مختلف نیز کمک می‌کند.

ون و همکاران (۲۰۲۱)، فعالیت‌های مرتبط در پروژه‌های پیچیده را مدل‌سازی کرده است؛ اما بیشتر بر داده‌های شبیه‌سازی شده است. در مقابل، پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های واقعی در فرآیند اعتبارسنجی خود، نتایج مدل را در شرایط عملی اعتبارسنجی کرده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که نتایج مدل در شرایط واقعی، به‌شدت با پیش‌بینی‌ها مطابقت دارد که این مسئله نشان‌دهنده کارآمدی مدل حاضر و قابلیت استفاده از آن در صنعت انرژی است.

بنابراین با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده، مدل پیشنهادی ما در مقایسه با کارهای پیشین، بُعد جدیدی را به مفهوم ادغام تأمین‌کنندگان و تحلیل توانمندی‌های آنان اضافه می‌کند. نتایج تحقیق ما نه تنها به درک بهتری از فرآیندهای انتخاب تأمین‌کننده کمک می‌کند، بر محدودیت‌های کارهای گذشته نیز تأکید و اهمیت توجه به توانمندی‌ها و ارزیابی‌های جامع‌تر را در این حوزه ریشه‌دار می‌کند.

وجود ریسک‌های گوناگون در کسب‌وکارها و صنایع مختلف، به‌خصوص ریسک‌های ناشی از اختلال مانند بحران مالی، وقایع طبیعی نظیر سیل و زلزله، کمبود زمان، تحریم‌های بین‌المللی، نبود همکاری نهادهای مختلف داخلی و خارجی و ...، بروز آشفتگی و بحران را در عملکرد زنجیره تأمین آنها به‌دنبال دارد؛ بنابراین تغییرات اساسی در این صنایع، با هدف تاب‌آوری زنجیره تأمین و استوارسازی آن برای مقابله با عدم قطعیت یک نیاز بنیادین به شمار می‌رود؛ زیرا پیش‌بینی‌نکردن این ریسک‌ها و مقابله‌نکردن با آنها، خسارات جبران‌ناپذیری را در صنایع مختلف به‌همراه خواهد داشت.

همچنین به‌سبب ماهیت پیچیده این محصولات و وجود تأمین‌کنندگان مختلف، مدیر پروژه را ناگزیر به انتخاب یکی از آنها می‌کند. روش‌های معمول انتخاب تأمین‌کننده مناسب در مبحث زنجیره تأمین، تمرکز خود را تنها بر امتیاز تأمین‌کنندگان در پارامترهای مختلف- نظیر کیفیت، خدمات پس از فروش، قیمت و ...- گذاشته‌اند؛ در حالی که وجود مفهوم برگشت به عقب در فرآیند توسعه محصولات پیچیده، مدیر پروژه را ناگزیر می‌کند که علاوه بر پارامترهای فوق، این مفهوم را نیز در انتخاب تأمین‌کننده مناسب مدنظر قرار دهد که در تحقیق حاضر این مسئله لحاظ شده است.

یافته‌های مقاله حاضر نشان می‌دهد که لحاظ کردن توانمندی تأمین‌کنندگان در انتخاب آنها، مقدار تابع هدف بازخورد را به میزان درخور توجهی کاهش می‌دهد. برای ارزیابی دقیق این موضوع، مدل مطالعه‌شده در این تحقیق، در دو وضعیت مختلف اجرا شد: یکی با لحاظ کردن توانمندی‌های تأمین‌کنندگان و دیگری بدون در نظر گرفتن این توانمندی‌ها. داده‌های به دست آمده از این دو وضعیت، نشان می‌دهد که در حالت اول، دوباره‌کاری ناشی از برون‌سپاری فعالیت‌ها به میزان چشمگیری کاهش یافته و این امر به سهم خود، به کاهش زمان و هزینه‌های کلی پروژه منجر شده است. همچنین با وجود هزینه‌بر بودن استوارسازی زنجیره تأمین در برابر عدم قطعیت در ابتدای امر، این موضوع در بلندمدت، خسارت‌های مربوط به مقابله با ریسک را کاهش خواهد داد. افزون بر این، خروجی به دست آمده از مدل ریاضی، اتکاشدنی خواهد بود. همچنین ابزار مفیدی برای مدیران پروژه است و در تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه‌تر و کارآمدتر به کار می‌رود.

پژوهش حاضر در مسیر تکمیل خود، شامل محدودیت‌هایی است؛ از جمله آنکه داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق ممکن است به‌صورت تاریخی یا محدود به یک منطقه خاص باشند. به همین دلیل، نتایج ممکن است در شرایط یا زمینه‌های دیگر اعتبار کمتری داشته باشد. ممکن است مدل ریاضی توسعه‌یافته در پژوهش، برخی از عوامل پیچیده و پیش‌بینی‌ناپذیر (مانند رفتار تأمین‌کنندگان یا تغییرات ناگهانی در بازار) را نادیده گرفته و بر نتایج تأثیرگذار باشد. از طرفی به‌دلیل محدودیت‌های زمان و منابع، این تحقیق ممکن است قادر به بررسی همه‌جانبه زنجیره تأمین و تمام اختلالات ممکن نباشد. همچنین اگرچه این تحقیق سناریوهای مختلفی را تحت پوشش قرار داده است، ممکن است برخی از سناریوهای مهم و بالقوه دیگری نادیده گرفته شده باشند که نتایج متفاوتی را به‌همراه داشتند.

پیشنهادهای زیر برای تحقیقات آتی به کار می‌رود:

- ♦ برگزاری ارزیابی‌های دوره‌ای از عملکرد تأمین‌کنندگان به‌منظور پایش مداوم توانمندی‌ها و رعایت الزامات، به افزایش کیفیت خدمات و کاهش ریسک‌ها منجر می‌شود؛

- ♦ با توجه به آنکه توجه کردن به توسعه محصولات پیچیده، به توسعه نیافتن زیرساخت‌های حیاتی و مهم کشور منجر می‌شود؛ بنابراین توجه خاصی به برنامه‌ریزی برای بهینه کردن توسعه این محصولات در کشور مورد نیاز است؛
- ♦ مدل ریاضی توسعه یافته در این پژوهش، توجه خود را به ابعاد مهم یک پروژه- یعنی هزینه، زمان و توانمندی تأمین‌کنندگان- معطوف می‌کند و به همین دلیل یک ابزار علمی و مفید را برای مطالعه امکان‌سنجی مالی پروژه‌های ساخت و توسعه محصولات پیچیده از سوی مدیران پروژه است؛
- ♦ طراحی استراتژی‌های خاص تاب‌آوری برای مقابله با اختلالات مختلف در زنجیره تأمین، شامل متنوع‌سازی منابع تأمین و بسط نقاط تأمین‌کننده که به کاهش تأثیرات منفی ریسک‌ها کمک می‌کند؛
- ♦ لحاظ کردن امکان بروز اختلال در بخش‌های مختلف زنجیره تأمین و همین‌طور استفاده از راهبردهای تاب‌آوری متنوع برای پاسخ‌گویی به ریسک‌ها و اختلالات وارد شده به زنجیره تأمین؛
- ♦ در مقاله حاضر، عدم قطعیت در پارامتر زمان در دسترس هر دوره دیده شده است؛ در حالی که عدم قطعیت در دیگر پارامترهای مدل، نظیر وابستگی اطلاعاتی، بودجه، هزینه انجام فعالیت‌ها و ... پیشنهاد تحقیقاتی آتی است.

References

- Aghezzaf, E.-H., Sitompul, C., & Najid, N. M. (2010). Models for robust tactical planning in multi-stage production systems with uncertain demands. *Computers & Operations Research*, 37(5), 880-889. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.03.012>
- Attari-Shendi, M., Saidi-Mehrabad, M., & Gheidari-Kheljani, J. (2022). A Comprehensive Mathematical Model for Sequencing Interrelated Activities in Complex Product Development Projects. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 69(6), 2619-2633. <https://doi.org/10.1109/tem.2019.2936287>
- Browning, T. R. (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), 292-306. <https://doi.org/10.1109/17.946528>
- Danilovic, M., & Browning, T. R. (2007). Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. *International journal of project management*, 25(3), 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.003>
- Hartley, J. L., Zirger, B. J., & Kamath, R. R. (1998). Managing the buyer-supplier interface for on-time performance in product development. *Journal of operations management*, 15(1), 57-70. [https://doi.org/10.1016/s0272-6963\(96\)00089-7](https://doi.org/10.1016/s0272-6963(96)00089-7)
- Johnsen, T. E. (2009). Supplier involvement in new product development and innovation: Taking stock and looking to the future. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 15(3), 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2009.03.008>
- Kamath, R. R., & Liker, J. K. (1994). A second look at Japanese product development. *Harvard Business Review*, 72(6), 154-165. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(94\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0024-6301(94)90069-7)
- Kusiak, A., & Wang, J. (1993). Decomposition of the Design Process. *Journal of Mechanical Design*, 115(4), 687-695. <https://doi.org/10.1115/1.2919255>
- Li, D., & Sun, X. (2006). *Nonlinear Integer Programming* (Vol. 84). Springer. <https://doi.org/10.1007/0-387-32995-1>
- Lin, J., Chai, K. H., Wong, Y. S., & Brombacher, A. C. (2008). A dynamic model for managing overlapped iterative product development. *European journal of operational research*, 185(1), 378-392. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.022>

- Lin, J., Qian, Y., Cui, W., & Goh, T. N. (2015). An effective approach for scheduling coupled activities in development projects. *European journal of operational research*, 243(1), 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.019>
- Lin, J., Qian, Y., Yassine, A. A., & Cui, W. (2012). A fuzzy approach for sequencing interrelated activities in a DSM. *International Journal of Production Research*, 50(23), 7012-7025. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.648779>
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>
- Meier, C., Yassine, A. A., Browning, T. R., & Walter, U. (2016). Optimizing time–cost trade-offs in product development projects with a multi-objective evolutionary algorithm. *Research in Engineering Design*, 27(4), 347-366. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0222-7>
- Peng, W., Yu, D., & Lin, J. (2023). Resource-Constrained Multi-Project Reactive Scheduling Problem With New Project Arrival. *IEEE Access*, 11, 64370-64382. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3289822>
- Peykani, P., Gheidari-Kheljani, J., Shahabadi, S., Ghodsypour, S. H., & Nouri, M. (2023). A two-phase resource-constrained project scheduling approach for design and development of complex product systems. *Operational Research*, 23(1), 17. <https://doi.org/10.1007/s12351-023-00750-4>
- Qian, Y., & Lin, J. (2014). Organizing Interrelated Activities in Complex Product Development. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 61(2), 298-309. <https://doi.org/10.1109/tem.2013.2285738>
- Ragatz, G. L., Handfield, R. B., & Petersen, K. J. (2002). Benefits associated with supplier integration into new product development under conditions of technology uncertainty. *Journal of Business Research*, 55(5), 389-400. [https://doi.org/10.1016/s0148-2963\(00\)00158-2](https://doi.org/10.1016/s0148-2963(00)00158-2)
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- Shang, Z., Hao, J. K., & Ma, F. (2023). A double-decomposition based parallel exact algorithm for the feedback length minimization problem. *PeerJ Comput Sci*, 9, e1597. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1597>
- Smals, R. G. M., & Smits, A. A. J. (2012). Value for value—The dynamics of supplier value in collaborative new product development. *Industrial Marketing Management*, 41(1), 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2011.11.022>
- Steward, D. V. (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, (3), 71-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TEM.1981.6448589>
- Wen, M., Lin, J., Qian, Y., & Huang, W. (2021). Scheduling interrelated activities in complex projects under high-order rework: A DSM-based approach. *Computers & Operations Research*, 130, 105246. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105246>
- YanJun, Q., Jun, L., Thong Ngee, G., & Min, X. (2011). A Novel Approach to DSM-Based Activity Sequencing Problem. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 58(4), 688-705. <https://doi.org/10.1109/tem.2011.2107558>
- Zhang, J., Song, X., Chen, H., & Shi, R. (2015). Optimisation of critical chain sequencing based on activities' information flow interactions. *International Journal of Production Research*, 53(20), 6231-6241. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1043157>

¹ Complex Product Systems² Engineering- intensive Systems³ Product Development Projects⁴ Sequencing⁵ Supplier Capability⁶ New Product Development⁷ Smals & Smits

- ⁸ Design Structure Matrix
- ⁹ Steward
- ¹⁰ Kusiak & Wang
- ¹¹ Zhang et al.
- ¹² Attari-Shendi et al.
- ¹³ Wen et al.
- ¹⁴ Peykani et al.
- ¹⁵ Shang et al.
- ¹⁶ Peng et al.
- ¹⁷ Resource-Constrained Multi-Project Reactive Scheduling Problem
- ¹⁸ Feedback
- ¹⁹ Fuzzy BWM
- ²⁰ Li & Sun
- ²¹ Lin et al.
- ²² Scenario- based Robust Stochastic Approach
- ²³ Augmented Epsilon- Constraint Method
- ²⁴ Weighted Sum Method
- ²⁵ Goal Programming
- ²⁶ Epsilon- Constraint Method
- ²⁷ Lexicographic method
- ²⁸ Mixed Integer Linear Programming
- ²⁹ Multi- Objective Programming Model
- ³⁰ Supply Chain Network Design
- ³¹ Uncertain Modeling Using Robust Optimization Approach
- ³² Aghezzaf et al.
- ³³ Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method
- ³⁴ Rezaei
- ³⁵ AT_t
- ³⁶ GAMS Ver. 24.1.2
- ³⁷ Ragatz et al.

This page intentionally left blank.