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

(مقالهٔ پژوهشی)

تأثیر توانمندی تأمین‌کنندگان در توالی فعالیت‌های پروژهٔ توسعهٔ 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 توسعهٔ یک محصول پیچیده، همواره امری چالش‌برانگیز در مدیریت و برنامه‌ریزی آن بوده است. وجود فعالیت‌های مختلف با وابستگی اطلاعاتی، زمان و هزینهٔ گوناگون، به‌خوبی لزوم ارائهٔ یک روش قدرتمند را برای تعیین توالی بهینهٔ فعالیت‌ها نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ممکن است هریک از فعالیت‌های طراحی و توسعهٔ یک محصول پیچیده از سوی تأمین‌کنندگان متعدد، با توانمندی‌های مختلف امکان انجام داشته باشد، انتخاب تأمین‌کنندهٔ مناسب برای هر فعالیت، در تعیین توالی فعالیت‌ها نقش دارد. به همین منظور، یک مدل چندهدفه برای تعیین توالی فعالیت‌ها با لحاظ‌کردن توانمندی تأمین‌کننده‌ها و با توجه به وضعیت مالی پروژه ارائه شده است. برای تبدیل مدل برنامه‌ریزی چندهدفه به مدلی تک‌هدفه، از روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده استفاده شده است. به‌علت اختلال در پارامتر زمانِ 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 ازطریق پیاده‌سازی آن در مطالعهٔ موردی طراحی و توسعهٔ توربین گازی بررسی و ارزیابی‌های لازم برای اعتبارسنجی این مدل در رابطه با نتایج موجود و بهینهٔ 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 دوباره‌کاری ناشی از برون‌سپاری فعالیت‌ها و درنتیجه کاهش زمان و هزینهٔ پروژه خواهد بود.

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

* نویسنده مسئول، 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/)

۱- مقدمه

سیستم‌های محصول پیچیده[۱]، محصولاتی با هزینهٔ ساخت بالا، پروژه‌محور، با فرآیند تولید فوق‌العاده پیچیده، سفارشی و همراه با تمرکز بالا بر مهندسی سیستم[۲] است. پیچیدگی در پروژه‌های توسعهٔ 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 توسعهٔ محصول، از اهمیت بنیادی برخوردار است.

با توجه به وابستگی‌های متقابل که در فرآیندهای توسعهٔ 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 بهینهٔ 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 استفادهٔ 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 تأمین‌کنندهٔ مناسب، به یک چالش مهم تبدیل شده است. محققان بررسی‌های مختلفی را انجام داده‌اند تا ارتباطات پایدار میان زنجیرهٔ تأمین و فرآیند توسعهٔ محصول را شناسایی کنند؛ اما تاکنون مدل جامعی ارائه نشده است که این دو حوزه را به هم پیوند دهد.

با وجود پیشینهٔ پژوهشی نسبتاً قوی در زمینهٔ محصولات پیچیده، توجه محققان کمتر معطوف به ایجاد مدلی شده است که بین دو حوزهٔ زنجیرهٔ تأمین و توالی محصولات پیچیده ارتباط برقرار کند و توالی انجام فعالیت‌های طراحی و توسعهٔ 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 برآورده‌کردن مدلی است که با ایجاد پل ارتباطی بین زنجیرهٔ 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 توسعهٔ محصول پیچیده با آن روبه‌رو هستند. توالی ناکارآمد و انتخاب تأمین‌کنندهٔ نامناسب، به تأخیر در پروژه، افزایش هزینه ها و کاهش کیفیت محصول منجر می‌شود و بخش‌هایی مانند هوافضا، انرژی و تولید را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مسائل به‌ویژه در مطالعهٔ موردی کاربردی برای این تحقیق، یعنی توسعهٔ توربین‌های گازی، به‌دلیل زنجیرهٔ 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 برآورده‌کردن استانداردهای عملکرد و قابلیت اطمینان دقیق نیاز دارد. این مطالعه با پیشنهاد یک مدل جامع که

شکاف بین قابلیت‌های زنجیرهٔ تأمین و توالی فعالیت در توسعهٔ محصول پیچیده را پر می‌کند، یک نیاز برآورده‌نشده 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 بقیهٔ گزارش، در بخش دوم خلاصه‌ای از مبانی نظری مرتبط با موضوع مطالعه ارائه می‌شود؛ سپس در بخش سوم دربارهٔ روش‌شناسی تحقیق بحث می‌شود و در بخش چهارم یافته‌های تحقیق در دسترس قرار می‌گیرد. در بخش پنجم ارائهٔ نتایج و مقایسهٔ آن با تحقیقات قبلی انجام و درنهایت بخش ششم، شامل نتیجه‌گیری نهایی همراه با فهرستی از پیشنهادهای پژوهشی براساس محدودیت‌ها و نتیجه‌گیری‌های مطالعه می‌شود.

۲- پیشینهٔ 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 توسعهٔ 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 توسعهٔ 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 نه‌تنها در مراحل ابتدایی توسعهٔ محصول جدید[۶] 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 درنهایت ارتقای عملکرد پروژه‌ها مؤثر است (Hartley et al., 1998).

علاوه بر این، وجود یک رابطهٔ 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 تأمین کنندگان 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 ازنظر مدیریت زنجیرهٔ تأمین بررسی و نحوهٔ 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، نه‌تنها باعث افزایش قابلیت اطمینان در تأمین مواد اولیه می‌شود، زمان و هزینه‌های پروژه را نیز کاهش می‌دهد.

بنابراین، توانمندی تأمین‌کنندگان نه‌تنها 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 عرضهٔ محصولات تأثیر می‌گذارد و نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان بازخورد اطلاعاتی میان فعالیت‌ها و درنتیجه 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 به‌گونه‌ای است که جریان کار بهینه شود و منابع به‌طور 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 زمان‌بربودن 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 هماهنگ آنها در رابطه با یکدیگر تأکید می‌کند. یک توالی مناسب، خطر دوباره‌کاری، هدررفت زمان و منابع را به حداقل می‌رساند و درنهایت به ارتباط به‌موقع بین فعالیت‌ها منجر می‌شود (Steward, 1981). به عبارت دیگر در یک پروژهٔ 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، نه‌تنها 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 پیچیدهٔ توسعهٔ محصول، در مطالعات مختلف ذکر شده است (Yanjun et al., 2011; Qian & Lin, 2014) و فعالیت‌های مرتبط را در محصولات پیچیده به‌خوبی نشان نمی‌دهند (Lin et al., 2008)؛ درنتیجه، ماتریس ساختار طراحی[۸] به وجود آمد تا وابستگی اطلاعات فعالیت‌های مرتبط در محصولات پیچیده را به‌خوبی 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، درجهٔ 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 دوباره‌کاری 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[11] (۲۰۱۵) مفهوم خطر دوباره‌کاری را برای نزدیک‌کردن مدل‌های قبلی به دنیای واقعی توصیف کردند. آنها خاطرنشان کردند که علاوه بر زمان و هزینهٔ فعالیت‌ها، زمان و هزینهٔ دوباره‌کاری فعالیت‌ها نیز باید در مدل تعیین توالی در نظر گرفته شود.

در مدل ارائه‌شده به‌وسیلهٔ عطاری شندی و همکاران[12] (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. وِن و همکاران[13] (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[14] (۲۰۲۳) با ارائهٔ یک مدل دو مرحله‌ای دریافته‌اند که توجه بیشتر به حداقل‌کردن طول فیدبک، زمان تکمیل پروژه را افزایش می‌دهد. شانگ و همکاران[15] (۲۰۲۳) با توسعهٔ یک الگوریتم موازی شاخه و تحدید مبتنی بر تجزیهٔ دوگانه و حداقل‌رساندن طول فیدبک، توالی بهینه‌ای از فعالیت‌ها را به دست آورده‌اند. پنگ و همکاران[16] (۲۰۲۳) یک مسئلهٔ زمان‌بندی واکنشی چند پروژه‌ای را با محدودیت منابع[17]، با ورود پروژهٔ جدید پیشنهاد می‌کنند تا هزینهٔ تعدیل برنامهٔ خط پایه را در حین دستیابی به هدف زمان‌بندی چند پروژهٔ قطعی به حداقل برساند.

با وجود تأکید محققان بر توانمندی و قابلیت تأمین‌کنندگان و نقشی که در پیشرفت پروژه دارد، در تحقیقات گذشته بحث تأمین‌کننده‌ها به‌صورت جداگانه از مدل در نظر گرفته می‌شد؛ حال آنکه یکپارچه‌کردن تصمیمات انتخاب تأمین‌کنندگان در برنامه‌ریزی زنجیرهٔ تأمین محصولات پیچیده برای تعیین فعالیت‌ها، به محاسن زیادی ازجمله کاهش هزینه‌ها، بالابردن 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 زنجیرهٔ تأمین محصولات پیچیده و نیز توالی فعالیت‌های پروژه اثرگذارند.

به این منظور، این پژوهش به‌دنبال آن است که:

- با لحاظ‌کردن 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 به‌صورت 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 به‌عنوان یک مدل امکان‌سنجی پروژه‌های محصول پیچیده نیز، بهره جست.

۳- رویکرد و مدل‌سازی

۳-۱- رویکرد و روش‌شناسی

رویکرد پژوهش حاضر به‌صورت کمّی و کاربردی طراحی شده است؛ به این معنا که با استفاده از تحلیل‌های کمی، فرآیندهای توسعهٔ محصول را بررسی می‌کند و بهبود می‌بخشد و نتایج آن به‌طور مستقیم در صنعت به کار می‌رود. این تحقیق از نوع سؤال‌محور است و با لحاظ‌کردن سؤالاتی دربارهٔ مسئله، تأثیر توانمندی تأمین‌کنندگان را بر توالی فعالیت‌ها بررسی می‌کند.

این سؤالات عبارت‌اند از:

- در توسعهٔ یک محصول پیچیده، تأمین‌کننده‌ها به چه شکل باید انتخاب شوند؟
- توانمندی تأمین‌کنندگان در مدل به چه صورت در نظر گرفته شود؟
- مدل توالی فعالیت‌ها با توجه به توانمندی تأمین‌کنندگان چگونه باید تشکیل شود؟

اطلاعات مورد نیاز تحقیق حاضر ازطریق پرسش‌نامه و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان صنعت جمع‌آوری شده است. همچنین، از مطالعات کتابخانه‌ای و تحلیل اسناد مرتبط با پروژه‌های توسعهٔ محصول پیچیده استفاده شده است.

برای حل مسائل، از روش بهینه‌سازی چندهدفه و مدل‌سازی ریاضی استفاده شده است. برای تبدیل مدل چندهدفه به تک‌هدفه، از روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده استفاده و داده‌های مورد نیاز برای طراحی مدل جمع‌آوری شده است. در این پژوهش با خبرگان صنعت در زمینهٔ طراحی و توسعهٔ محصولات پیچیده مصاحبه و نمونه‌گیری به روش غیر تصادفی هدفمند انجام شده است تا از تخصص و تجربیات افرادی با دانش عمیق در این زمینه بهره‌مند شویم.

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

انتخاب مدل‌های بهینه‌سازی به‌دلیل قابلیت آنها در حل مسائل پیچیده و چندهدفه و همچنین توانایی در نمایش تعاملات بین متغیرها و پارامترها انجام و استفاده از روش‌های مدل‌سازی ریاضی، موجب افزایش دقت و شفافیت در تحلیل نتایج می‌شود.

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

- شناسایی مسئله و تعریف اهداف تحقیق؛
- جمع‌آوری داده‌ها ازطریق روش‌های ذکرشده؛
- طراحی مدل ریاضی برای تعیین توالی فعالیت‌ها با لحاظ‌کردن توانمندی تأمین‌کنندگان؛
- اجرای مدل با استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی؛
- تحلیل نتایج و مقایسه‌های لازم؛
- اعتبارسنجی نتایج با استفاده از نظرات خبرگان.

تولید یک محصول پیچیده، شامل تعداد زیادی فعالیت به هم پیوسته است. به‌عبارتی، 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 نسبت‌به کلیت آن داشته باشد و با دید سیستمی برنامه‌ریزی کند. یکی از مهم‌ترین ابعاد برنامه‌ریزی دقیق و اصولی یک پروژهٔ محصول پیچیده، تعیین توالی فعالیت‌های آن است؛ به‌گونه‌ای که وابستگی اطلاعاتی فعالیت‌ها، زمان و هزینهٔ 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:

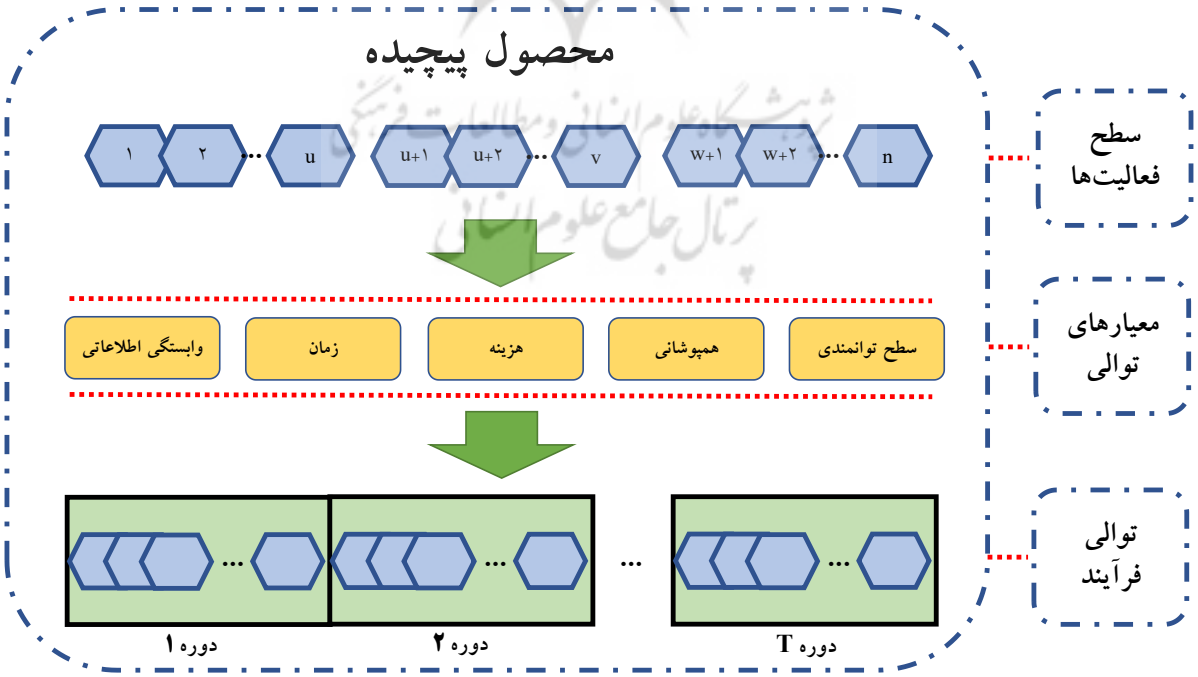
الف) طوری فعالیت‌ها به‌دنبال یکدیگر قرار گیرند که دوباره‌کاری ناشی از بازگشت اطلاعات کمینه شود؛

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 توسعهٔ یک محصول پیچیده شامل تعدادی فعالیت مرتبط با یکدیگر است که از ۱ تا n شماره‌گذاری شده‌اند. علاوه بر این، به‌دلیل ویژگی‌های عملکردی پیچیدهٔ 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 بودجهٔ موجود در هر دوره، تعیین می‌شود. شایان ذکر است که برای نشان‌دادن توالی فعالیت‌ها و اعمال رویکرد همپوشانی، n موقعیت برای قراردادن n فعالیت در مدل وجود دارد.



شکل ۱- نمایش مفهومی مدل ارائه‌شده در پژوهش

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

۳-۲- تعریف مسئلهٔ 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 توسعهٔ محصولات پیچیده شرح داده شود. به‌دلیل پیچیده‌بودن ماهیت این محصولات، فعالیت‌های توسعهٔ محصولات پیچیده به یکدیگر، وابستگی اطلاعاتی دارند. این وابستگی اطلاعاتی، اگر از فعالیت‌های پایین‌دست (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 پروژهٔ توسعهٔ محصولات پیچیده همواره باید تلاش کند توالی فعالیت‌ها را به‌گونه‌ای انجام دهد که حداقل بازخورد اطلاعاتی در توالی وجود داشته باشد تا به این وسیله دوباره‌کاری فعالیت‌ها – و درنتیجه هدررفت زمان و هزینه– به کمینهٔ خود برسد.

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

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

Ca_i :سطح توانمندی تأمین‌کننده i

Re_i :برگشت به عقب، ناشی از انتخاب تأمین‌کننده i

$$Re_i = 1 - Ca_i \quad (۱)$$

در این پژوهش با استفاده از روش بهترین- بدترین فازی[۱۹] (Rezaei, 2015)، که توضیحات آن در ادامهٔ این بخش خواهد آمد، به هر تأمین‌کننده یک شاخص توانمندی در بازهٔ [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 رابطهٔ (۲) به دست می‌آید:

$$Ca_i = w_{c1} * Q_i + w_{c2} * E_i + w_{c3} * F_i + w_{c4} * G_i + w_{c5} * H_i \quad (۲)$$

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

۳-۳- مدل‌سازی ریاضی مسئله

در این قسمت، مدل ریاضی مسئلهٔ تعیین توالی فعالیت‌های پروژهٔ توسعهٔ 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 مجموعهٔ تأمین‌کنندگان

u, v, w مجموعهٔ فعالیت‌ها

p, p' مجموعهٔ موقعیت مکانی فعالیت‌ها در توالی

t, t' مجموعهٔ 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 رقبا

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 j باشد و در غیر این صورت ۰ است

TS حداقل مقدار توانمندی تأمین‌کنندهٔ 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

$Cost_u$ هزینهٔ فعالیت u

$Time_u$ زمان انجام فعالیت u

Bud_t بودجهٔ تخصیص‌یافته برای دورهٔ زمانی t

AT_t زمان در دسترس برای انجام فعالیت در دورهٔ زمانی t

متغیر تصمیم

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

A_{upt} متغیر باینری برابر ۱، اگر فعالیت u به موقعیت مکانی p در دورهٔ 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_{uvt} متغیر باینری برابر ۱، اگر دوباره‌کاری 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

$$Min\ Z_1 = \sum_u \sum_{\substack{v \\ v \neq u}} \left[\sum_w \left(\sum_t a_{uwt} \times \sum_t \sum_{p=w+1}^{n} a_{vpt} \right) ID_{uv} \right] \quad (۳)$$

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

۳-۳-۲-۲- تابع هدف هزینه

$$Min\ Z_2 = \sum_t \left(\left(\sum_p \sum_u Cost_u \times A_{upt} + \sum_{u=1} \sum_{v=u+1} BID_{uv} C_{uvt} (RI_{uv} Cost_u) \right) \right) + \sum_u \sum_i X_{ui} * D_{ui} \quad (۴)$$

تابع هدف (۴)، به جنبهٔ مالی مسئله مربوط است و هدف از آن، کمینه‌سازی هزینهٔ انجام فعالیت‌های پروژه در هر دوره است. عبارت $\sum_p \sum_u Cost_u \times A_{upt}$ هزینهٔ انجام فعالیت را محاسبه و عبارت $\sum_{u=1} \sum_{v=u+1} BID_{uv} C_{uvt} (RI_{uv} Cost_u)$ هزینهٔ دوباره‌کاری فعالیت‌های انجام‌شده در هر دورهٔ زمانی را حساب می‌کند.

از طرفی، هر تأمین‌کننده برای انجام خدمات یا تأمین کالای مدنظر، یک قیمت پیشنهادی را به مدیر پروژه ارائه می‌دهد. مدیر پروژه باید قیمت‌ها را از تأمین‌کنندگان مختلف دریافت و حتی‌الامکان کم‌هزینه‌ترین تأمین‌کننده را انتخاب کند. عبارت $\sum_u \sum_i X_{ui} * D_{ui}$، به تابع هدف اول کمک می‌کند که تأمین‌کنندهٔ با کمترین هزینهٔ پیشنهادی را انتخاب کند.

۳-۳-۳- محدودیت‌ها

$$\sum_{t}\sum_{p} A_{upt} = 1 \ \forall u \quad (۵)$$

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

$$\sum_{u}\sum_{t} A_{upt} = 1 \ \forall p \quad (۶)$$

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.

$$B_{uv} + B_{vu} = 1 \ for\ 1 \le u < v \le n \quad (۷)$$

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.

$$B_{uv} + B_{vw} + B_{wu} \le 2 \ for\ u < v, v < w, and\ v \ne w \quad (۸)$$

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.

$$C_{uvt} \le \sum_{p}\sum_{t'=1}^{t} A_{upt'} \ \ \forall t\ and\ for\ u \ne v, BID_{uv} \ne 0 \quad (۹)$$

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

$$C_{uvt} \le \sum_{p}\sum_{t'=1}^{t} A_{vpt'} \ \ \forall t\ and\ for\ u \ne v, BID_{uv} \ne 0 \quad (۱۰)$$

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.

$$\sum_{t} C_{uvt} = B_{uv} \ for\ u \ne v, BID_{uv} \ne 0 \quad (۱۱)$$

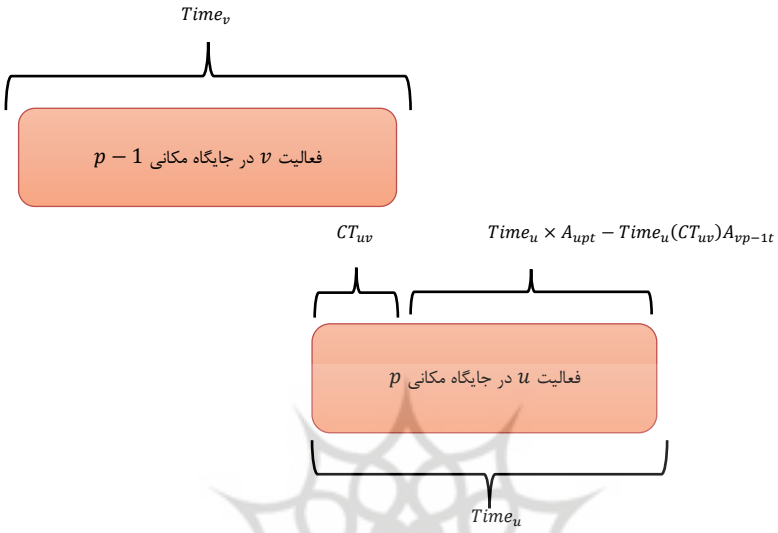
اگر امکان دوباره‌کاری فعالیت u ناشی از فعالیت v وجود داشته ($BID_{uv} \ne 0$) و فعالیت u قبل از فعالیت v تخصیص یافته باشد ($B_{uv} = 1$)، آنگاه دوباره‌کاری فعالیت u باید در مدل اعمال شده باشد که محدودیت (۱۱) دقیقا بیانگر این موضوع است.

$$\sum_{u}\sum_{p} Cost_u \times A_{upt} + \sum_{u=1}\sum_{\substack{v=1 \\ v\ne u}} BID_{uv} C_{uvt} (RI_{uv} Cost_u) \le Bud_t \ \forall t \quad (۱۲)$$

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

$$\sum_u \sum_p \left(Time_u \times A_{upt} - \sum_{\substack{v \\ v \neq u}} Time_u(CT_{uv}) A_{vp-1t}\right) + \sum_{u=1} \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq u}} BID_{uv} C_{uvt} (RI_{uv} Time_u) \leq AT_t \quad \forall t \qquad (۱۳)$$

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. مشخصهٔ بارز این محدودیت، امکان همپوشانی میان فعالیت‌هاست. همان‌گونه که در شکل (۲) مشخص است، هر فعالیت به فعالیت پیشین خود در توالی، به‌وسیلهٔ اندیس p متصل است.



شکل ۲- همپوشانی دو فعالیت

Fig. 2- Overlap of two activities

$$\sum_p A_{upt} + \sum_{p'} A_{vp't'} \leq B_{uv} + 1 \quad \forall u, v \; and \; v \neq u, t < t' \qquad (۱۴)$$

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

$$\sum_i X_{ui} = 1 \; \forall u \qquad (۱۵)$$

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.

$$X_{ui} \leq Y_{ui} \; \forall u, i \qquad (۱۶)$$

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

$$B_{uv} \geq HP_{uv} \; \forall u, v \qquad (۱۷)$$

در بین فعالیت‌های توسعهٔ یک محصول پیچیده، حتماً فعالیت‌هایی وجود دارند که پیش‌نیاز یک فعالیت دیگر محسوب می‌شوند؛ این رابطهٔ 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 رابطهٔ پیش‌نیازی سخت میان فعالیت‌ها در توالی، رعایت شود.

$$\sum_{u}\sum_{i} Ca_i * X_{ui} \geq \mathrm{TS} \qquad (۱۸)$$

از مهم‌ترین وظایف یک مدیر پروژه، کم‌کردن 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 بازهٔ (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 به‌وسیلهٔ او کمتر خواهد بود؛ بنابراین محدودیت (۱۸) سعی دارد انتخاب تأمین‌کننده را به‌نحوی 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.

$$A_{upt}, B_{uvt}, C_{uv} \in \{0,1\} \ \forall u, v, p, t \qquad (۱۹)$$

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

۳-۳-۴- خطی‌سازی مدل

همان‌طور که در بخش قبلی مشاهده شد، تابع هدف (۳-۲) یک تابع کوادراتیک است و به خطی‌سازی و زمان محاسبهٔ کمتر نیاز دارد. برای خطی‌کردن 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)، به‌صورت زیر خطی‌سازی می‌شود:

$$Min\ Z_1 = \sum_{u=1}^{n}\sum_{\substack{v=1 \\ v\neq u}}^{n}[ID_{uv} * B_{uv}] \qquad (۲۰)$$

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

$$B_{uv} \geq \sum_{t} a_{uwt} + \sum_{t}\sum_{p=1}^{w-1} a_{vpt} \qquad For\ w = 1, 2, \dots, n\ \ \forall u, v\ and\ u \neq v \qquad (۲۱)$$

با توجه به رابطهٔ 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.

۴-۳- روش حل مدل

مدل ریاضی ارائه‌شده در قسمت قبل، دارای مشخصهٔ ویژه‌ای است که حل آن را تحت‌الشعاع 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 لحاظ‌کردن عدم قطعیت پارامترها و ریسک اختلال در مدل ریاضی؛

۲- استفاده از روش حل محدودیت اپسیلون تقویت‌شده[۲۳] برای تبدیل مسئلهٔ چندهدفه به یک مسئلهٔ تک‌هدفه و درنهایت حل آن.

۳-۴-۱- روش حل مسئله به‌صورت چندهدفه

برای تبدیل مسئلهٔ چندهدفه به یک مسئلهٔ تک‌هدفه، روش‌های متنوعی وجود دارد. روش مجموع وزنی[۲۴]، برنامه‌ریزی آرمانی[۲۵]، روش محدودیت اپسیلون[۲۶]، لکسیکوگرافی[۲۷] و ... از جملهٔ این روش‌ها هستند.

در پژوهش حاضر، از روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده برای تبدیل مسئلهٔ چندهدفه به یک مسئلهٔ تک‌هدفه استفاده شده است. مهم‌ترین مزیت این روش، که آن را از دیگر روش‌ها متمایز می‌کند، کنترل شمار راه‌حل‌های کارآمد است. این رویکرد یک روش قدرتمند برای حل مسائل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح خطی[۲۸] و چندهدفه[۲۹]، مانند طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین[۳۰]، توالی فعالیت‌های یک پروژه و ... است.

روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده برای محاسبهٔ مقادیر جدول نتایج نهایی، برای هر تابع هدف از رویکرد لکسیکوگراف استفاده و با این کار، محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی را با استفاده از متغیرهای کمکی، به مساوی تبدیل می‌کند.

نکتهٔ درخور توجه در بهینه‌سازی با این روش، رتبه‌بندی توابع هدف براساس اهمیت هرکدام از سوی تصمیم‌گیرنده است؛ به این صورت که ابتدا تابع هدف با بیشترین اولویت به‌صورت تک‌هدفه بهینه می‌شود. برای فهم بهتر این موضوع، فرض کنید $f_1(x)$ اولویت‌دارترین 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 بهینهٔ بهینه‌سازی اول، بهینه می‌کنیم. به این ترتیب f_2^* محاسبه می‌شود و این روند را برای تابع هدف i ام نیز، ادامه می‌دهیم (Mavrotas, 2009).

۳-۴-۲- بهینه‌سازی استوار غیرقطعی

در این قسمت، مدل‌سازی غیرقطعی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار[۳۱] توسعه داده می‌شود. در شرایطی که داده‌های 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 بهینه‌سازی 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 می‌شود:

فرض کنید O مجموعهٔ سناریوهای ریسک است و هر سناریو با o نمایش داده می‌شود. همچنین احتمال وقوع سناریوی o برابر π_o است. به‌علاوه، A_o مسئلهٔ بهینه‌سازی قطعی برای هر سناریو و A_0^* مقدار بهینهٔ مربوط به A_o است. حال باید مراحل زیر طی شود:

$$Min\,\eta \sum_{o\in O} \pi_o A_o + (1-\eta) Max(A_o - A_0^*) \quad (۲۲)$$

نکتهٔ مهم، برآورده‌شدن محدودیت‌های فنی مسئله علاوه بر رابطهٔ (۲۲) است که $X \in \Omega$ نشانگر فضای شدنی مسئلهٔ تحت تمام سناریوهاست.

$$X \in \Omega \quad (۲۳)$$

رابطهٔ (۲۲) از دو عبارت تشکیل شده است که عبارت نخست $(\sum_{o\in O} \pi_o A_o)$ نشانگر ارزش مورد انتظار مسئلهٔ A_s و عبارت دوم $Max(A_o - A_0^*)$ نمایانگر حداکثر تأسف برای مسئلهٔ A_s در تمامی سناریوهاست. نماد دیگری η است که مقدار آن در بازهٔ [۰-۱] است و تصمیم‌گیر به‌وسیلهٔ آن، میان ارزش انتظاری و حداکثر تأسف موازنه ایجاد می‌کند؛ برای مثال، در صورتی که تصمیم‌گیر بخواهد یک زنجیرهٔ تأمین با سطح تأسف پایین (تغییرپذیری پایین) را طراحی کند، مقدار پارامتر η را باید کوچک در نظر بگیرد.

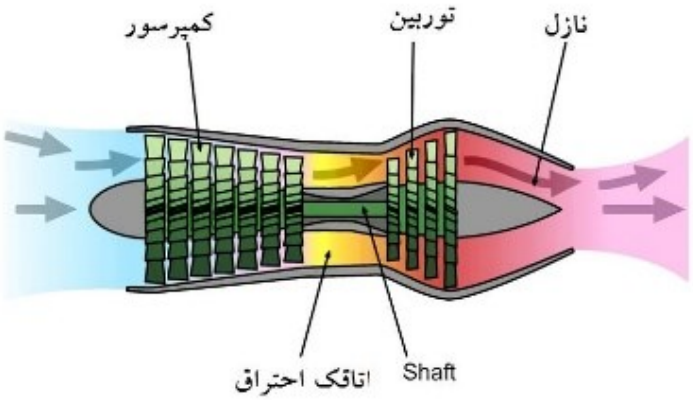
۳-۴-۳- روش بهترین-بدترین فازی

روش تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ 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 به‌طرز 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 کمی‌کردن قضاوت‌های کیفی دربارهٔ 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 درنهایت اوزان فازی بهینه مشخص می‌شود. تشریح کامل این روش، در رضایی (۲۰۱۵) آمده است.

۴- مطالعهٔ 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 توسعهٔ فناوری، برای ترسیم یک برنامهٔ راهبردی به کار می‌رود. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، اجزای کلیدی توربین‌های گازی عبارت‌اند از توربین، محفظهٔ احتراق و کمپرسور.



شکل ۳- قسمت‌های اصلی توربین

Fig. 3- Main parts of a gas turbine

۴-۱- جمع‌آوری داده‌ها

به‌منظور نزدیک‌شدن مسئله به دنیای واقعی، یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های دانش‌بنیان در زمینهٔ 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	شمارهٔ 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	شمارهٔ فعالیت	نام فعالیت	هزینه	زمان
۱	توربین	۴	تأمین مواد خام شفت مانند دیسک‌های آهنگری‌شده	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	شمارهٔ 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	شمارهٔ فعالیت	نام فعالیت	هزینه	زمان
۲	کمپرسور	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 آهنگری‌شده	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
		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- محفظهٔ احتراق

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

ردیف	نام قطعه	شمارهٔ فعالیت	نام فعالیت	هزینه	زمان
۳	محفظهٔ احتراق	۳۹	تأمین مواد خام محفظهٔ احتراق مانند ورقه‌های فلزی و رینگ رولینگ	۲۰۰۰	۱۴
		۴۰	تولید قطعات محفظهٔ احتراق ازطریق ماشین‌کاری، شکل‌دهی و سوراخ‌کاری ورقه‌های فلزی	۵۰۰۰	۲۰
		۴۱	پوشش‌دهی محفظهٔ احتراق	۲۰۰۰	۲۲
		۴۲	مونتاژ قطعات محفظهٔ احتراق	۴۰۰۰	۱۲
		۴۳	مونتاژ تمام قطعات	–	۳۰

در این بین، فعالیت‌هایی وجود دارند که برای مجموعه به برون‌سپاری نیاز دارند. این برون سپاری به دلایل مختلفی ازجمله تخصصی‌بودن فعالیت، هزینهٔ 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، سبدی از تأمین‌کنندگان مختلف با سطوح توانمندی گوناگون در نظر گرفته شده است. طبق فرض مسئله، هر تأمین‌کننده تنها قادر به انجام یکی از فعالیت‌های شش‌گانهٔ 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. نکتهٔ مهم، تعریف یک تأمین‌کنندهٔ خاص به نام «خود» است. برای آنکه مدل تنها برای فعالیت‌های شش‌گانه، تأمین‌کنندهٔ 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، تأمین‌کنندهٔ مناسب را نیز برای فعالیت‌های مربوطه انتخاب و به خودی خود هزینه و زمان آن تأمین‌کننده را لحاظ کند، زمان و هزینهٔ فعالیت‌های نیازمند برون‌سپاری، صفر در نظر گرفته می‌شود تا زمان و هزینهٔ آنها به اشتباه دو بار محاسبه نشود.

۴-۲- ماتریس‌های وابستگی‌های فعالیتی

برای نمایش میزان وابستگی فعالیت‌ها با یکدیگر ازنظر 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 بازهٔ 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.

۴-۳- 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 درنتیجه تأمین‌کنندگان آنها نیز باید استانداردهای معینی را داشته باشند. زمانی که تعداد معیارهای انتخاب تأمین‌کنندهٔ 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 کمی‌کردن قضاوت‌های کیفی دربارهٔ 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} =۰/۳۰۹۳

w_{c2} =۰/۲۵۱۷

w_{c3} =۰/۱۰۲۴

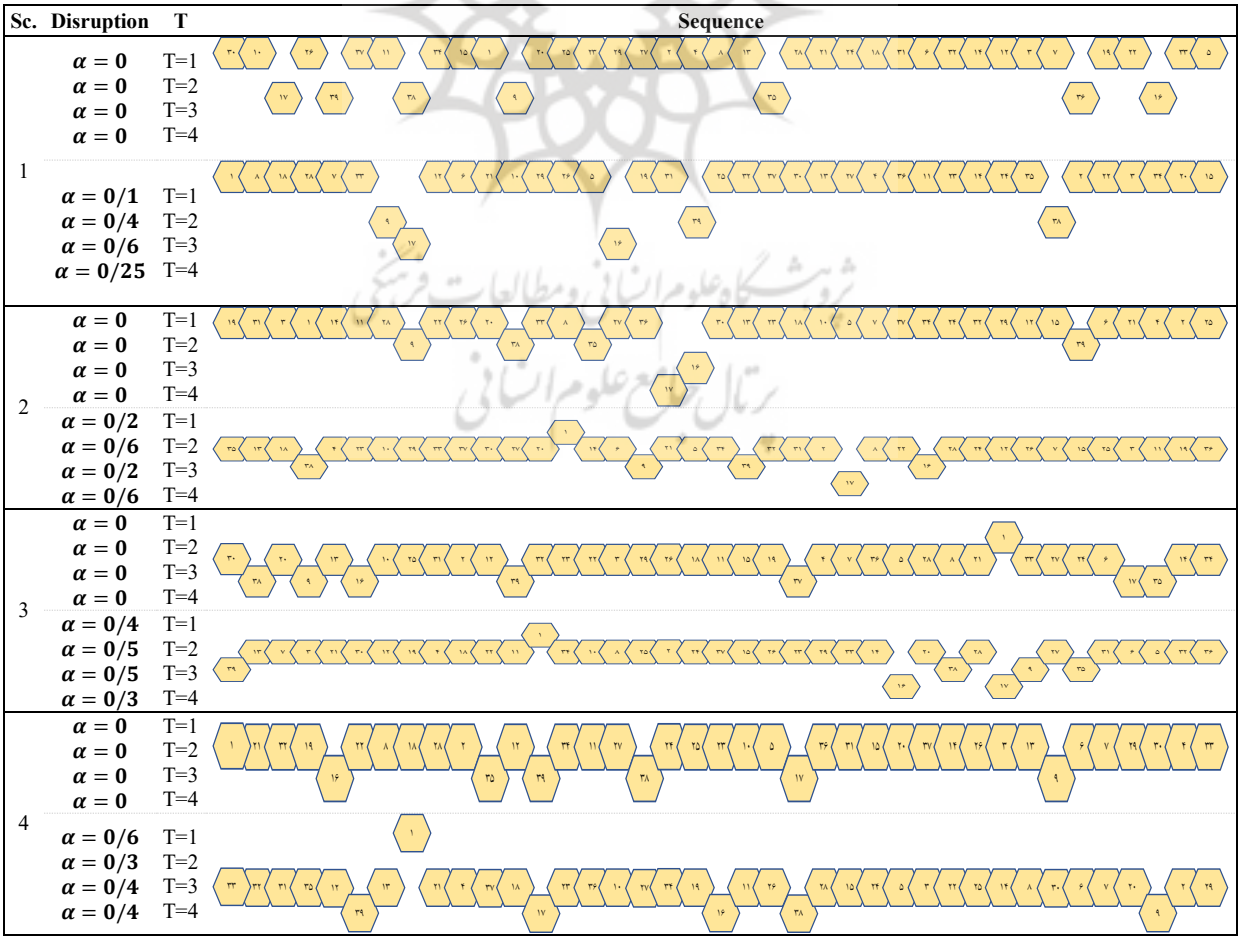
w_{c4} =۰/۲۵۸۳

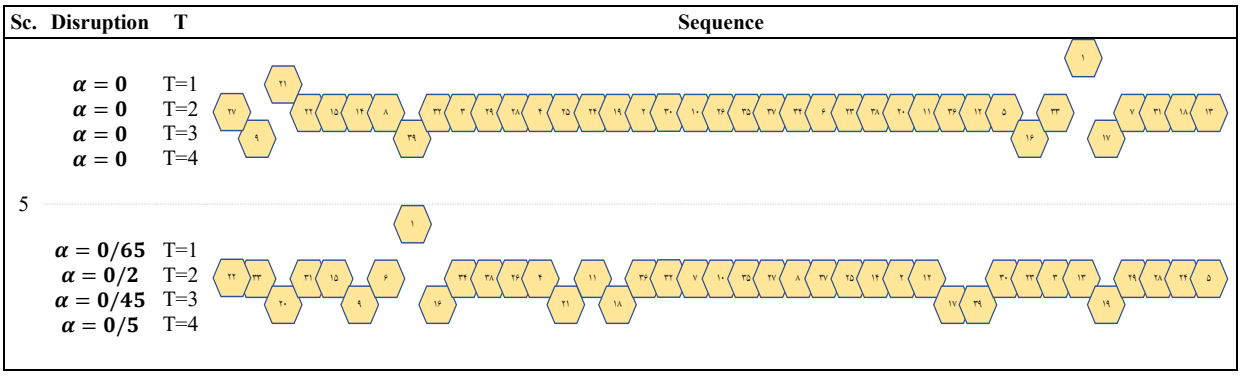
w_{c5} =۰/۰۷۸۳

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

۴-۴- یافته‌ها

یکی از چالش‌های مهم در زمینهٔ 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؛ درنتیجه فرآیند ساخت توربین به‌صورت جدی، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای آنکه مدل به شرایط واقعی نزدیک‌تر شود، عدم قطعیت پارامترهای ورودی مسئله ازطریق اعمال اختلال در پارامتر «زمان در دسترس هر دورهٔ زمانی»[۳۵] پیاده‌سازی شده است. اختلال یادشده ازطریق اعمال ضریب $(1-\alpha)$ 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 مسئلهٔ توربین گازی به‌عنوان مطالعهٔ موردی استفاده شد. این انتخاب به‌دلیل اهمیت بالای توربین‌های گازی در صنعت انرژی و تأثیر آنها بر کارایی و هزینه‌های عملیاتی زنجیرهٔ تأمین انجام شد.

اعتبارسنجی مدل در دو مرحلهٔ 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 نشان‌دهندهٔ کاهش درخور توجهی در مقدار تابع هدف در سناریوی دوم (با لحاظ‌کردن توانمندی‌ها) نسبت‌به سناریوی اول بود.

ازطریق این رویکرد، اعتبار مدل پیشنهادی نه‌تنها ازنظر 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 زنجیرهٔ تأمین و کاهش هزینه‌ها منجر می‌شود.

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

۵- بحث

در این بخش، حساسیت آستانهٔ 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 شفاف سازی نوآوری‌ها و برتری‌های مدل ما نسبت به کارهای پیشین، لازم است چند نکتهٔ کلیدی را مدنظر قرار دهیم.

۵-۱- نوآوری و تمایز مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی در این تحقیق، چندین نوآوری و تمایز کلیدی را نسبت‌به 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.

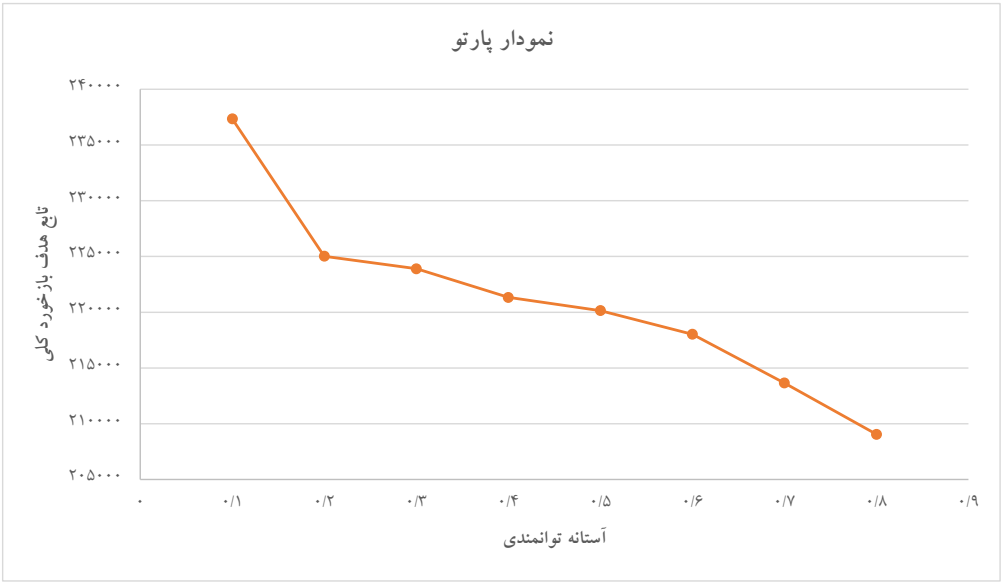
دوم، این مدل با بهره‌گیری از تحلیل حساسیت، عملکرد آن را در مواجهه با تغییرات پارامترهای مختلف شفاف‌سازی می‌کند. با استفاده از مقایسهٔ نتایج با داده‌های واقعی و نظر خبرگان، مدل پیشنهادی دقت پیش‌بینی را در شرایط واقعی اعتبارسنجی می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه توانمندی‌های تأمین‌کنندگان، نتایج بهتری را در 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 آستانهٔ توانمندی و تحلیل حساسیت استواری تحلیل شده است تا ابعاد و قابلیت‌های موجود در مدل پیشنهادی به‌صورت عمیق‌تر بررسی شود.

۵-۲- تحلیل حساسیت آستانهٔ توانمندی

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش آستانهٔ توانمندی تأمین‌کنندگان (TS_{Sup}) که در معادلهٔ (۱۷-۳) آمده است، مدل ریاضی در انتخاب تأمین‌کنندهٔ فعالیت‌های نیازمند برون‌سپاری، سخت‌گیری بیشتری به خرج می‌دهد و تأمین‌کننده با سطح توانمندی بالاتر را انتخاب می‌کند؛ درنتیجه، 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 درنتیجه میزان دوباره‌کاری کمتر شود.



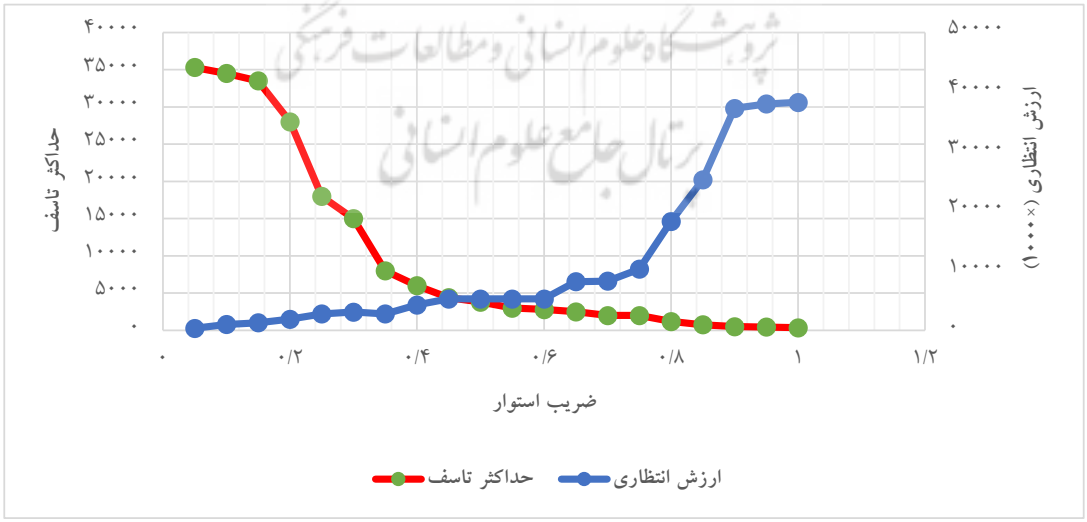
شکل ۵- تحلیل حساسیت مدل- آستانهٔ توانمندی

Fig. 5- Model sensitivity analysis- Capability threshold

۵-۳- 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 قرمزرنگ، استواری‌شدنی یا همان حداکثر تأسف (اختلاف مقدار تابع هدف تحت سناریوی s از مقدار بهینهٔ به دست آمده از حل مدل قطعی تحت آن سناریو) است.



شکل ۶- تحلیل حساسیت استواری

Fig. 6- Robust sensitivity analysis

هر چقدر درجهٔ 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 مسئلهٔ کمینه‌سازی، هزینه است و با افزایش درجهٔ 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 بهینهٔ 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 زمینهٔ انتخاب تأمین کنندگان و تحلیل توانمندی‌ها مقایسه می‌شود.

راگاتز و همکاران[۳۷] (۲۰۰۲) در مطالعهٔ خود، مزایای ادغام تأمین‌کنندگان را در توسعهٔ 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 بهینهٔ تأمین‌کنندگان وجود دارد. یافته‌ها نشان می‌دهند که توانمندی‌های فنی تأمین‌کنندگان نه‌تنها به بهبود کیفیت کمک می‌کند، به کاهش زمان توسعه و بهینه‌سازی فرآیندها نیز منجر می‌شود.

در تحقیق حاضر، حساسیت آستانهٔ 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 نه‌تنها 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 نشان‌دهندهٔ 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 نه‌تنها 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.

۶- نتیجه‌گیری

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 زنجیرهٔ تأمین آنها به‌دنبال دارد؛ بنابراین تغییرات اساسی در این صنایع، با هدف تاب‌آوری زنجیرهٔ 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 پیچیدهٔ این محصولات و وجود تأمین‌کنندگان مختلف، مدیر پروژه را ناگزیر به انتخاب یکی از آنها می‌کند. روش‌های معمول انتخاب تأمین‌کنندهٔ مناسب در مبحث زنجیرهٔ 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 توسعهٔ محصولات پیچیده، مدیر پروژه را ناگزیر می‌کند که علاوه بر پارامترهای فوق، این مفهوم را نیز در انتخاب تأمین‌کنندهٔ مناسب مدنظر قرار دهد که در تحقیق حاضر این مسئله لحاظ شده است.

یافته‌های مقالهٔ حاضر نشان می‌دهد که لحاظ‌کردن 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 لحاظ‌کردن 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 هزینه‌بربودن استوارسازی زنجیرهٔ 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 جملهٔ آنکه داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق ممکن است به‌صورت تاریخی یا محدود به یک منطقهٔ 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 همه‌جانبهٔ زنجیرهٔ 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 بالقوهٔ 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 توجه‌کردن به توسعهٔ محصولات پیچیده، به توسعه‌نیافتن زیرساخت‌های حیاتی و مهم کشور منجر می‌شود؛ بنابراین توجه خاصی به برنامه‌ریزی برای بهینه‌کردن توسعهٔ این محصولات در کشور مورد نیاز است؛
- مدل ریاضی توسعه‌یافته 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 مطالعهٔ امکان‌سنجی مالی پروژه‌های ساخت و توسعهٔ محصولات پیچیده از سوی مدیران پروژه است؛
- طراحی استراتژی‌های خاص تاب‌آوری برای مقابله با اختلالات مختلف در زنجیرهٔ تأمین، شامل متنوع‌سازی منابع تأمین و بسط نقاط تأمین‌کننده که به کاهش تأثیرات منفی ریسک‌ها کمک می‌کند؛
- لحاظ‌کردن امکان بروز اختلال در بخش‌های مختلف زنجیرهٔ تأمین و همین‌طور استفاده از راهبردهای تاب‌آوری متنوع برای پاسخ‌گویی به ریسک‌ها و اختلالات واردشده به زنجیرهٔ تأمین؛
- در مقالهٔ 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., & Gheidar-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

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/https://doi.org/10.1016/0024-6301%2895%2991069-7

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., Gheidar-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

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 Systems
[2] Engineering- intensive Systems
[3] Product Development Projects
[4] Sequencing
[5] Supplier Capability
[6] New Product Development
[7] 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

This page intentionally left blank.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی