Journal of Industrial Management Studies
Vol.19 No 61, Summer 2021, 65-93
.atu.ac.ir
DOI: 10/22054/jims. 2021.4487.2354

Original Reserch / Review / …
Received:18/7/2019
Accepted:7/2/2020
ISSN:22518029
eISSN:

Multi-project Optimal Scheduling Considering Reliability and Quality Within the Construction Supply Chain: A Hybrid Genetic Algorithm

Hêriş Golpîra* Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

Erfan Babaee Tirkolaee Instructor, Department of Industrial Engineering Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

Mohammad Taghi Taghavifard Associate Professor, Department of Industrial Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran

Fayegh Zaheri Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

Abstract

Although the construction industry, especially due to its relationship with other economic sectors, is an important sector that plays a key role in economic growth, the Construction Supply Chain (CSC) has been considered less attention. Thus, CSC network design is of great importance for companies and governments. Presenting an original mixed-integer linear programming, this paper introduces an optimal multi-project multi-resource multi-supplier CSC network design for large construction companies with a decentralized procurement strategy. The objective is to design a reliable supply chain based on the quality of projects under a predefined budget, considering the entire supply chain as a single entity. Using a bi-objective approach to formulate the chain and the Lp-metric to solve the problem provides a mon-objective framework for reliability-quality trade-off. GAMS software is employed to solve small- and medium-scale problems, and a hybrid algorithm is developed based on the Genetic Algorithm (GA) and Simulated Annealing (SA) algorithm to solve the large-scale problem. Results show the capability of the model to attain an optimal size of the chain and the quality-reliability trade-off considering a pre-specified budget. This is the first to obtain such a structured integrated framework in the CSC.

Keywords: Mixed-Integer Linear Programming, Construction Supply Chain, Multi-Objective Optimization, Hybrid Genetic Algorithm.

* Corresponding Author: H_Golpira@iasdj.ac.ir
How to Cite: Vol.19 No 61, Summer 2021

مقاله پژوهشی /سخن سردبیر

تاریخ دریافت:۹۸/۴/۲۷ تاریخ پذیرش:۹۸/۱۱/۱۸ eISSN: ISSN:۲۲۵۱۸۰۲۹

فصلنامهٔ مطالعات مدیریت صنعتی
دوره نوزدهم، شماره ٦١، تابستان ١٤٠٠، ٩٣-٦٥
.atu.ac.ir
DOI:١٠,٢٢٠٥٤ /jims.٢٠٢١,٤٤٨٧١,٢٣٥٤

زمان‌بندی چندپروژه‌ای بهینه با درنظرگرفتن قابلیت‌اطمینان و کیفیت در زنجیره تأمین ساخت‌وساز: الگوریتم ژنتیک ترکیبی

هیرش گل‌پیرا* استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

عرفان بابائی تیرکلائی مربی دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، مازندران

محمد تقی تقوی‌فرد دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران

فایق ظاهری استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

چکیده

هرچندکه صنعت ساخت‌وساز، به ویژه به دلیل رابطه آن با سایر بخش‌های اقتصادی یکی از مهمترین شاخه-هایی است که نقش کلیدی در رشد اقتصادی کشورها ایفا می‌کند، زنجیره تأمین ساخت و ساز کمتر مورد توجه محقیق قرار گرفته است. از این رو طراحی زنجیره تأمین ساخت و ساز نه تنها برای شرکت‌های عمرانی، بلکه برای دولت‌ها نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا، با ارائه یک مدل جدید برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح، این مقاله به معرفی یک چارچوب بهینه برای ساختاربندی شبکه زنجیره تأمین ساخت و ساز چند پروژه‌ای چندمنبعی و دارای چند تأمین‌کننده برای شرکت‌های ساختمانی بزرگ دارای استراتژی تدارکات غیرمتمرکز می‌پردازد. هدف نهایی، طراحی یک مدل زنجیره تأمین با توجه به کیفیت و قابلیت اطمینان در بودجه پیش‌بینی شده، با در نظر داشتن کل زنجیره تأمین به عنوان یک موجودیت واحد است. فرمول‌بندی مسأله در یک چارچوب دو هدفه بوده و با استفاده از رویکرد "ال-پی متریک"سبب ایجاد یک چارچوب تک هدفه ساختارمند برای تبادل کیفیت-قابلیت اطمینان می‌شود. برای حل مسأله در ابعاد کوچک و متوسط از نرم‌افزار گمس و در ابعاد بزرگ از یک الگوریتم ترکیبی شامل الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده می‌شود. نتایج حاصل از حل مدل نشان از این دارد که مدل امکان انتخاب اندازه مناسب برای زنجیره تأمین ساخت و ساز را به همراه تبادل کیفیت-قابلیت اطمینان به صورت توأمان فراهم می‌آورد و از این نظر با توجه به پیشینه تحقیق، نخستین پژوهش به شمار می‌رود. همچنین، نتایج مقایسه روشهای حل پیشنهادی نشان دهنده کارایی بالای الگوریتم حل پیشنهادی است.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی خطی عددصحیح، زنجیره تأمین ساخت و ساز، بهینه‌سازی چند هدفه، الگوریتم ژنتیک ترکیبی.

* نویسنده مسئول: H_Golpira@iausdj.ac.ir

مقدمه

شبکه‌ای از امکانات و عملیات که وظایف پردازش و توسعه محصول، تهیه مواد از تأمین کنندگان و حرکت آنها بین امکانات تا نقاط تقاضای نهایی را به عهده دارند زنجیره‌تأمین نامیده می‌شود. قرارگرفتن نهاده‌ها در قالب زنجیره‌تأمین هزینه را کاهش می‌دهد و بهبود در پاسخ به تغییرات، افزایش سطح خدمات و تسهیل در تصمیم‌گیری را به همراه می‌آورد (Golpîra, Najafi, Zandieh, & Sadi-Nezhad, 2017). ارزش رویکرد تجمیع نهادها و نهاده‌ها در امتداد زنجیره‌تأمین در بسیاری از صنایع و خدمات مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته است. با این حال زنجیره‌تأمین در مسائل مربوط به ساخت و ساز عمرانی کمتر مورد توجه محقیق قرار گرفته است (Nguyen et al., 2018). هرچندکه این صنعت، به ویژه به دلیل رابطه آن با سایر بخش‌های اقتصادی یکی از مهمترین شاخه‌هایی است که نقش کلیدی در رشد اقتصادی کشورها ایفا می‌کند (Cheng, Law, Bjornsson, Jones, & Sriram, 2010). از این رو طراحی زنجیره تأمین ساخت و ساز نه تنها برای شرکت‌های عمرانی، بلکه برای دولت‌ها نیز از اهمیت زیادی برخوردار است (Liu, Xu, & Qin, 2017; Niu et al., 2016). هرچند که تنوع بالای فعالیت‌ها در بخش ساخت و ساز سبب پیچیده شدن طراحی و بخصوص مدیریت زنجیره تأمین در این بخش می‌شود (Tserng, Yin, & Li, 2006).

در حوزه مدیریت زنجیره تأمین ساخت و ساز، تأکید عمده محققین بیشتر بر ارتقای تعامل بین سازمان‌ها و اجزاء تشکیل‌دهنده زنجیره برای دستیابی به بالاترین سطح هماهنگی است (Dallasega, Rauch, & Linder, 2018; Zhang, Fu, & Kang, 2018). در همین راستا مدیریت جریان مواد و موجودی و اطلاعات مرتبط در طول زنجیره به عنوان پایه‌های اساسی مدیریت زنجیره تأمین ساخت و ساز معرفی شده‌اند (Vidalakis, Tookey, & Sommerville, 2011). چراکه هزینه‌های حمل در پروژه‌های ساختمانی به مراتب بیشتر از سایر صنایع است (Shakantu, Tookey, & Bowen, 2003). این هزینه‌ها همچنین، از اولویت و اهمیت بیشتری برخوردار می‌شوند زمانی که بدانیم، موادی که در این صنعت حمل می‌شوند عمدتاً در حجم بالا و قیمت واحد پایین

هستند و این موضوع، خود بر پیچیدگی مدیریت هزینه‌ها در این صنعت، به نسبت صنایع دیگر می‌افزاید (Shakantu et al., 2003; Vidalakis et al., 2011). چرا که تعداد بیشتر تجهیزات دخیل در پروژه‌ها خصوصاً در شرکت‌های بزرگی که دارای چندین پروژه به صورت همزمان هستند، با توجه به قاعده بازده به مقیاس، هرچند که سبب کاهش هزینه‌های حمل در واحد حمل می‌شود، هزینه‌های موجودی و نگهداری مواد را افزایش می‌دهد (Tserng et al., 2006).

در سیستم‌های تولید و خدمات کلاسیک هر جزء از زنجیره، شبکه حمل و لوجستیک، نقاط ذخیره‌سازی و نحوه بازپرسازی خاص خودش را در یک سیستم موجودی چند لایه-ای و سلسله مراتبی از پیش‌تعیین شده و غیرپویا تعریف می‌کند (Yang, Pan, & Ballot, 2017). این نوع از تعریف زنجیره‌تأمین، با پویایی خاصی که در ساخت و ساز و در بخش‌های عمرانی وجود دارد، سازگار نیست (Vidalakis et al., 2011). این موضوع با برقراری یک تعامل مناسب بین اجزاء شبکه برای تأمین نیاز از هریک از تأمین-کنندگان داخل شبکه که توان تأمین را داشته باشد، تا حدود زیادی مرتفع می‌شود (Vrijhoef & Koskela, 2000; Yang et al., 2017)، هرچند که تحقیقات زیادی در این زمینه در پیشینه تحقیق صنعت ساخت و ساز به چشم نمی‌خورد. این مقاله برای ارائه یک مدل ریاضی در راه پر کردن این شکاف تحقیقاتی ارائه شده است.

از آنجا که بهینه‌سازی ریاضی سبب کاهش زمان طراحی بهینه سیستم‌ها می‌شود، در حالی که به طور همه‌جانبه‌ای توانایی در نظر گرفتن اکثر پارامترهای مهم در تصمیم‌گیری را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد (Golpîra & Khan, 2019)، لذا در این تحقیق از رویکرد بهینه‌سازی ریاضی برای مدل‌سازی استفاده شده است. این رویکرد امکان دستیابی به اهداف استراتژیک و عملیاتی را به طور همزمان فراهم می‌آورد (Liu et al., 2017) به گونه‌ای که چوداری و تیندوانی (۲۰۱۷) کارایی رویکرد بهینه‌سازی را در طراحی زنجیره تأمین ساخت و ساز با تأکید بر راه‌سازی به اثبات رساندند (Choudhari & Tindwani, 2017). هرچند که در پیشینه تحقیق، تعداد بسیار محدودی از تحقیق‌ها به استفاده از چنین رویکردی در ارتباط با طراحی زنجیره تأمین ساخت و ساز پرداخته‌اند. این در حالی است که هم در بخش خدمات (Zahiri, Torabi, Mohammadi, &

(Aghabegloo, 2018) و هم در صنعت (Golpîra, 2017)، این رویکرد از عمومیت و کارایی خاصی برخوردار است.

با توجه به شکاف‌های تحقیقاتی پیش‌گفته، این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط چندهدفه را برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین ساخت و ساز چند پروژه‌ای چند منبعی که دارای چند تأمین‌کننده است ارائه می‌دهد. در این مدل نه تنها برای نزدیکتر شدن به عالم واقعیت، هزینه‌های پروژه در قالب محدودیت بودجه کلی شرکت عمرانی مدل شده‌اند، بلکه یک رویکرد کاملاً جدید به مسأله قابلیت اطمینان در برنامه‌ریزی نیز ارائه شده است، به انضمام اینکه بعد کیفیت پروژه‌ها نیز فراموش نشده است. لذا، مدل به گونه‌ای طراح شده است که با هدف دست‌یابی به کیفیت مناسب، بودجه کلی شرکت عمرانی را نیز با یک رویکرد بهینه مد نظر قرار دهد. از این رو مدل به ارزیابی تبادل کیفیت و قابلیت اطمینان زنجیره تأمین نیز با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی بهینه تخصیص منابع مختلف به پروژه‌ها می‌پردازد. هم چنین، در نهایت برای حل مدل پیشنهادی، به توسعه یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی پرداخته می‌شود که قادر به تولید جواب‌های با کیفیت برای مسائل بزرگ در مقایل رویکرد حل دقیق پیشنهادی، که مناسب برای مسائل کوچک و متوسط است، می‌باشد.

ادامه مقاله به این شکل تبیین می‌شود که در بخش ۲ تاریخچه‌ای از موضوع بیان می‌گردد. مسأله در بخش ۳ به صورت ریاضی فرموله می‌شود. بخش ۴ شامل تشریح گام به گام الگوریتم پیشنهادی بوده و در نهایت مدل پیشنهادی با استفاده از نتایج حاصل از حل چندین مثال تصادفی در بخش ۵ به چالش کشیده می‌شود تا در نهایت، بخش ۶ به یک جمع‌بندی از مقاله بپردازد و پیشنهادهایی برای تحقیق‌های آتی نیز ارائه گردد.

پیشینه پژوهش

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر حرکت به سمت تلفیق رویکرد زنجیره تأمین در صنعت ساخت و ساز و عمرانی تقویت شده است، لذا تاریخچه نسبتاً غنی‌ای از این مبحث در حال حاضر در دسترس است که در منابع (Behera, Mohanty, & Thunberg & Fredriksson, 2018 ;Prakash, 2015; Dallasega et al., 2018; Golpîra 2020; Donato, Ahsan, & Shee, 2015; Simatupang &

Sridharan, 2016) به صورت جامعی مرور شده‌اند، هرچند که به بیان این منابع، هنوز جای کار در رابطه با زنجیره تأمین ساخت و ساز بسیار زیاد است.

لندن و سنگ (۲۰۱۳) نتایج عملیاتی مطالعات پیشین در زمینه سیستم‌های یکپارچه طراحی و تحویل در زنجیره‌های تأمین ساخت و ساز را مورد مطالعه کلی قرار دادند (London & Singh, 2013). ژو و همکاران (۲۰۱۳) یک رویکرد ریاضی را با هدف ماکسیموم کردن سود کل یک زنجیره‌تأمین ساخت و ساز سبز با درنظر گرفتن زنجیره اصلی، زنجیره معکوس و مسائل زیست محیطی ارائه کردند. رویکرد ارائه شده آنها بدون در نظر گرفتن استواری شبکه و پارامتر کیفیت پروژه‌ها و به صورت یک هدفه ارائه شده است (Zhou, Chen, & Wang, 2013). لیو و همکاران (۲۰۱۵) روشی را ارائه کردند که با استفاده از آن اجزاء تشکیل دهنده شبکه زنجیره تأمین ساخت و ساز امکان کنترل بهینه عملیاتی خود را به دست می‌آورند (Liu, Xu, & Zhang, 2015). لاویکا و همکاران (۲۰۱۵) رویکردی را برای درک مفاهیم موفقیت آمیز بودن قراردادها و همچنین رویه‌های مکمل هماهنگی و همکاری در زنجیره تأمین پروژه‌های ساختمانی پیچیده فراهم کردند (Lavikka, Smeds, & Jaatinen, 2015). منذال (۲۰۱۵) به بررسی تأثیر انطباق عرضه و تقاضا بر انعطاف‌پذیری زنجیره‌تأمین و همچنین تأثیر آن بر عملکرد عملیاتی و روابط شرکت‌های تشکیل‌دهنده شبکه پرداختند. نیو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش اجزاء ساختمانی هوشمند، یک سیستم بهتر برای تصمیم‌گیری در زنجیره-تأمین ساخت و ساز را ارائه کردند (Niu et al., 2016). رحیمی و همکاران (۲۰۱۷) یک رویکرد زنجیره تأمین چابک را با نگاه به انتخاب تأمین‌کنندگان و پیمان‌کاران، بر اساس ارزشیابی آنها با استفاده از روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها[1]، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی[2] و روش دیماتل فازی[3] ارائه کردند (Rahimi, Tavakkoli-Moghaddam, Shojaie, & Cheraghi, 2017). وانگ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی[4] و مدل‌سازی اطلاعات ساختمانی[5] یک چارچوب انتخاب تأمین-

1 DEA: Data Envelopment Analysis
2 AHP: Analytical Hierarchy Process
3 FDEMATEL: Fuzzy Decision Making Trial and Evaluation Laboratory Method
4 GIS: Geographic Information System
5 BIM: Building Information Modeling

کننده۱ برای طراحی زنجیره‌تأمین ساخت و ساز به گونه‌ای ارائه کردند که قابلیت انعطاف تأمین‌کننده۲ را در شرایط پیچیده بخش ساخت و ساز به عنوان یک عامل کلیدی در نظر گرفته باشند (Wang, Zhang, Chong, & Wang, 2017). مون و همکاران (۲۰۱۷) با اشاره به ضرورت تعریف و طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ساخت و ساز از نقطه نظر اطلاعات و دسترسی به آنها، یک رویکرد جدید را برای کنترل شبکه با تأکید بر علوم شبکه ارائه کردند (Moon, Han, Zekavat, Bernold, & Wang, 2017). لین و همکاران (۲۰۱۷) به مسأله انگیزه و هماهنگی زنجیره تأمین ساخت و ساز متشکل از مالک، پیمانکار عمومی، پیمانکاران فرعی و تأمین‌کننده بر اساس اهداف توسعه پایدار در محیط غیرقطعی با استفاده از مدل‌سازی غیرقطعی دو سطحی پرداختند. آنها در نهایت با استفاده از تئوری فازی به مقابله با عدم قطعیت پرداختند و مسأله نهایی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کردند (Lin, Guo, & Tan, 2018). با بررسی نقاط آسیب‌پذیر زنجیره-تأمین ساخت و ساز، ذین العابدین و اینگیریژ (۲۰۱۸) تأثیر و پویایی ریسک‌های اجزاء تشکیل‌دهنده شبکه زنجیره‌تأمین ساخت و ساز را مورد بررسی قرار دادند (Zainal Abidin & Ingirige, 2018). کیم و انگویان (۲۰۱۸) با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، روشی برای ارزیابی روابط در زنجیره‌تأمین ساخت و ساز را ارائه کردند. چن و همکاران (۲۰۱۸) مدلی ریاضی تک هدفه را برای انتخاب تأمین‌کننده و برنامه‌ریزی پروژه با الهام از شرایط متغیر واقعی و با هدف مینیموم کردن تأخیر در پروژه‌ها به صورت برنامه‌ریزی خطی مختلط صفر و یک ارائه و یک رویکرد تجربی را نیز برای حل آن پیشنهاد دادند (Chen, Lei, Wang, Teng, & Liu, 2018). ژاسکویسکی و همکاران (۲۰۱۸) برای برنامه‌ریزی موجودی شبکه زنجیره‌تأمین ساخت و ساز با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی خطی فازی، به ارائه یک مدل ریاضی در چارچوب مدل موجودی حجم سفارشات اقتصادی۳ پرداختند (Jaśkowski, Sobotka, & Czarnigowska, 2018). فنگ و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل را برای طراحی زنجیره‌تأمین ساخت و ساز در

1 Supplier selection
2 Resilience capability
3 EOQ: Economic Order Quantity

قالب مدل بازی استاکلبرگ۱ به صورت برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای دوسطحی۲ برای دستیابی به یک استراتژی تعادلی۳ ارائه کردند. آنها نهایتاً برای حل مدل از یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی۴ بهره گرفتند (Feng, Ma, Zhou, & Ni, 2018). ست و همکاران (۲۰۱۸) یک چارچوب تصمیم‌گیری چنمعیاره را برای اثبات اثرگذاری شرایط رقابتی بر انتخاب مناسب تأمین‌کنندگان در قالب زنجیره‌تأمین ساخت و ساز ارائه کردند (Seth, Nemani, Pokharel, & Al Sayed, 2018). ژیانگ و همکاران (۲۰۱۹) مدل توزیع سود یک زنجیره‌تأمین ساخت و ساز دوسطحی شامل یک پیمانکار عمومی و یک پیمانکار جزء با سیاست سرمایه و معامله۵ را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از تئوری بازی۶ و روش ارزش شاپلی۷، تصمیم‌گیری بهینه کاهش انتشار و توزیع سود تحت سه حالت همکاری رقابت خالص۸، همکاری، و همکاری خالص به دست آوردند (Jiang, Lu, & Xu, 2019). یزدانی و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی جدید را برای حل مسأله انتخاب تأمین‌کننده سبز در زنجیره‌تأمین ساخت و ساز به گونه‌ای ارائه کردند که رابطه بین فاکتورهای ریسک انتخاب تأمین‌کننده با استفاده از روش‌های ارزیابی براساس فاصله از راه حل متوسط۹، دیماتل و آنالیز حالات خرابی۱۰ مورد ارزیابی قرار گیرد (Yazdani, Chatterjee, Pamucar, & Abad, 2019).

شرح مسأله و روش شناسی پژوهش

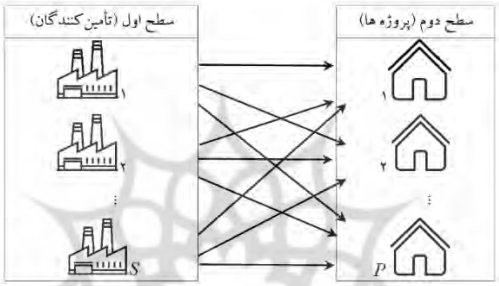
روش‌شناسی و بیان مسأله

مسأله مورد بررسی در این پژوهش نه تنها به ارائه یک رویکرد کمی و ارتباط گرای جدید برای طراحی شبکه زنجیره تأمین ساخت و ساز نشان داده‌شده در شکل ۱، بلکه به ارزیابی

1 Stackelberg game
2 Bi-level multistage programming model
3 Equilibrium strategy
4 Hybrid metaheuristic algorithm
5 Cap-and-trade policy
6 Game theory
7 Shapley value method
8 Pure competition
9 EDAS: Evaluation based on Distance from Average Solution
10 FMEA: Failure Mode & Effects Analysis

تبادل کیفیت و قابلت اطمینان زنجیره تأمین با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی بهینه تخصیص منابع مختلف به پروژه‌ها از سوی چندین تأمین‌کننده بالقوه می‌پردازد.

شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی شامل چندین تأمین‌کننده $s \in S' = \{1,2,...,S\}$ و چندین سایت اجرایی معادل با پروژه‌ها $p \in' = \{1,2,,...,P\}$ است. هدف اصلی شبکه، تعیین برنامه تأمین منابع مورد نیاز برای $r \in R' = \{1,2,,...,\mathrm{R}\}$ منبع در هر پروژه توسط تأمین‌کنندگان به‌نحوی است که حجم تأمین در هر دوره از سوی تأمین‌کننده منتخب برای هر پروژه از جمله متغیرهای تصمیم اصلی مسأله باشد که باید بر اساس حجم تقاضای هر پروژه در هر زمان از هر منبع تعیین گردد.



شکل ۱. شمای کلی شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی

تمام جریان‌های موردنیاز شبکه در طول یک افق برنامه‌ریزی گسسته $t \in T' = \{1,2,,...,T\}$ برنامه‌ریزی می‌شوند. از جمله فرضیات موجود در دنیای واقعی که در این مدل نیز مورد توجه ویژه قرار دارد این است که گاهی اوقات تأمین‌کنندگان ممکن است قادر به تأمین منابع مورد نیاز برنامه‌ریزی شده به خصوص برای منابع تجدیدناپذیر نباشند و این اتفاق منجر به ایجاد تقاضای برآورده نشده در پروژه‌ها شود که ممکن است تبعات سنگینی از لحاظ هزینه (جریمه) یا زمان (تأخیر تحویل پروژه) به وجود آورد. به همین دلیل، با در نظر گرفتن جریمه‌های مورد نیاز، امکان تأمین با تأخیر نیز در شبکه فراهم شده است، به نحوی که در نهایت تمامی تقاضای مورد نیاز پروژه‌ها برآورده شود. نهایتاً، از جمله محدودیت-های اصلی شبکه، محدودیت بودجه در دسترس پروژه‌ها است که به عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی مد نظر قرار گرفته می‌شود. زمان اتمام هر پروژه نیز معادل با آخرین زمان دریافت منبع از تأمین‌کنندگان در نظر گرفته شده است.

علایم به‌کار رفته در مدل‌سازی

جهت فرموله کردن مدل پیشنهادی پژوهش، معرفی علائم ریاضی مورد نیاز به صورت زیر ارائه می‌شود:

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

$s \in S' = \{1,2,,...,S\}$ مجموعه تأمین‌کنندگان

$p \in P' = \{1,2,,...,P\}$ مجموعه پروژه‌ها

$t,t' \in T' = \{1,2,,...,T\}$ مجموعه دوره‌های زمانی

$r \in R' = \{1,2,,...,\mathrm{R}\}$ مجموعه منابع مورد نیاز پروژه‌ها

R_p مجموعه انواع منابع مورد نیاز پروژه p

پارامترها

C_{spr}^{Al} هزینه ثابت عقد قرارداد تأمین‌کننده s و پروژه p جهت تأمین منبع r

C_{sr}^{Tr} هزینه واحد حمل منبع r از تأمین‌کننده s به سوی محل پروژه p

C_{rp}^{Pr} هزینه واحد پردازش موجودی منبع r برای پروژه p

$C_{rt'tp}^{Pv}$ هزینه واحد تأخیر در تأمین منبع r پروژه p در دوره t که در دوره t' تأمین می‌شود

C_p^{Qu} هزینه کیفیت برای پروژه p

QS_{srt} ظرفیت تأمین‌کننده s جهت تأمین منبع r در دوره زمانی t

Q_{rpt}^{Rq} تقاضای مورد نیاز پروژه p از منبع r در دوره زمانی t

$M_p^{\min}$ حداقل زمان اتمام پروژه p

$M^{\max}$ حداکثر زمان اتمام پروژه‌ها

Bg میزان بودجه در دسترس

Q_p^{Set} نقطه کیفیت تعیین شده برای پروژه p

$\bar{Q}$ بیشینه انحراف کیفی مجاز

Q_p^{unit} مقدار واحد ارتقای کیفیت مبتنی بر زمان اتمام پروژه p

m یک عدد بزرگ اختیاری

متغیرها

M_p زمان اتمام پروژه p

q_{srt} کمیت منبع r ارسال شده از سوی تأمین‌کننده s در دوره زمانی t

$q''_{srt't'p}$ کمیت منبع r ارسالی از تأمین‌کننده s در دوره t جهت برآوردن تقاضای برآورده نشده در دوره t' برای پروژه p

B_{srp} متغیر صفر و یک که برابر ۱ است اگر تأمین‌کننده s برای تأمین منبع r به پروژه p انتخاب گردد

B'_{stp} متغیر صفر و یک؛ هنگامی برابر با ۱ است که تأمین‌کننده s قادر به تأمین منابع مورد نیاز پروژه p در دوره t باشد.

F_p شناوری پروژه p

Q_p^+ مقدار انحراف مثبت بین نقطه کیفیت تعیین شده و کیفیت اکتسابی پروژه p

Q_p^- مقدار انحراف منفی بین نقطه کیفیت تعیین شده و کیفیت اکتسابی پروژه p

B''_p متغیر کمکی صفر و یک برای انتخاب یکی از متغیرهای Q_p^+ و Q_p^- برای پروژه p

مدل‌سازی

حال با استفاده از علائم ریاضی ارائه شده، مدل ریاضی دو هدفه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط شامل توابع هدف و محدودیت‌ها در زیر ارائه می‌شود:

رابطه ۱)
$$\max \wp_{St} = \sum_{p=1}^{P} F_p$$

رابطه ۲)
$$\max \wp_{Qu} = \sum_{p=1}^{P} \left(Q_p^+ - Q_p^-\right)$$

subject to:

رابطه ۳)
$$\sum_{p=1}^{P} C_p^{Qu}\left(Q_p^+ + 1.3\times Q_p^-\right) + \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{r=1}^{R} C_{spr}^{Al} B_{srp} + \sum_{s=1}^{S}\sum_{r=1}^{R}\sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P} C_{sr}^{Tr}\left(q_{srt} + \sum_{t'\in T,\, t'<t} q''_{srt't p}\right) +$$
$$\sum_{s=1}^{S}\sum_{r=1}^{R}\sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P} C_{rp}^{Pr}\left(q_{srt} + \sum_{t'\in T,\, t'<t} q''_{srt't p}\right) + \sum_{r=1}^{R}\sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t'\in T,\, t'<t} C_{rt'p}^{Pv} q''_{srt't p} \le Bg$$

رابطه ۴)
$$F_p = M^{\max} - M_p \quad \forall p$$

رابطه ۵)
$$Q_p^+ - Q_p^- = Q_p^{unit} \times M_p - Q_p^{Set} \qquad \forall p,$$

رابطه ۶)
$$Q_p^+ + Q_p^- \le \bar{Q} \qquad \forall p,$$

رابطه ۷)
$$Q_p^+ \le M \times B_p''' \qquad \forall p$$

رابطه ۸)
$$Q_p^- \le M\left(1 - B_p'''\right) \quad \forall p$$

رابطه ۹)
$$q_{srt} \le m B_{srp} \qquad \forall s, r, p, t$$

رابطه ۱۰)
$$t.B'_{stp} \le M_p \qquad \forall s, p, t$$

رابطه ۱۱)
$$B_{srp} \ge B'_{stp} \qquad \forall s, r, p, t$$

رابطه ۱۲) $q''_{srt'tp} \le m.B'_{stp} \quad \forall s,p,r,t,t'$

رابطه ۱۳) $\sum_{s=1}^{S}\left(q_{srt}+\sum_{t'\in T,t'<t} q''_{srt'tp}\right)=Q_{rpt}^{Rq} \quad \forall r\in R_p,p,t$

رابطه ۱۴) $q_{srt} \le Q_{srt}^{Cp} \quad \forall s,r,t$

رابطه ۱۵) $M_p^{\min} \le M_p \le M^{\max} \quad \forall p$

رابطه ۱۶) $B_{srpt}, B''_p \in \{0,1\} \quad \forall s,r,p,t$

رابطه ۱۷) $q_{srt}, q''_{srt'tp}, Q_p^+, Q_p^- \ge 0 \quad \forall s,r,t,t',p$

رابطه ۱۸) $F_p \in R^p \quad \forall p.$

تابع هدف اول-رابطه (۱) منجر به بیشینه‌سازی شناوری، یعنی قابلیت اطمینان پروژه‌ها می-گردد. تابع هدف دوم-رابطه (۲) به بیشینه‌سازی انحراف مثبت کیفیت کل وابسته به مدت زمان پروژه‌ها می‌پردازد. رابطه (۳) بیانگر آن است که هزینه کل شبکه زنجیره تأمین باید در طول انجام تمامی پروژه‌ها کوچکتر یا مساوی با بودجه کل در دسترس باشد. هزینه کل شامل ۵ جمله می‌باشد. جمله اول بیانگر هزینه کیفیت کل پروژه‌ها، جمله دوم بیانگر هزینه کل ثابت عقد قراردادها با تأمین کنندگان، جمله سوم بیانگر هزینه کل حمل و نقل، جمله چهارم شامل هزینه کل پردازش موجودی و جمله پنجم نیز بیانگر هزینه کل جریمه تأخیر در برآوردن تقاضای پروژه‌ها از سوی تأمین کنندگان می‌باشد. رابطه (۴) میزان شناوری هر پروژه را محاسبه می‌کند. رابطه (۵) اختلاف مقادیر بین انحراف‌های مثبت و منفی بین نقطه کیفیت تعیین شده و نقطه کیفیت اکتسابی هر پروژه را محاسبه می‌کند. رابطه (۶) تضمین می‌کند که جمع مقادیر این انحراف‌های مثبت و منفی از بیشینه انحراف کیفی مجاز بیشتر نباشد. روابط (۷) و (۸) نشان‌دهنده آن هستند که هیچ پروژه‌ای نمی‌تواند به طور همزمان هم انحراف مثبت و انحراف منفی داشته باشد. رابطه (۹) تضمین می‌کند که تا وقتی تأمین-کننده‌ای برای عقد قرارداد در پروژه‌ای انتخاب نشود، هیچ منبعی از سوی آن برای پروژه-ای ارسال نگردد. رابطه (۱۰) زمان اتمام پروژه‌ها را محاسبه می‌نماید. رابطه (۱۱) به ترتیب بیانگر ارتباط بین متغیرهای انتخاب تأمین‌کننده و تعیین زمان تأمین توسط تأمین‌کننده منتخب می‌باشد. رابطه (۱۲) تضمین می‌کند که زمانیکه تأمین‌کننده منتخب برای ارسال منابع در زمانی انتخاب شود، امکان برآوردن تقاضای از دست رفته در دوره‌های دیگر مهیا می‌شود. رابطه (۱۳) تضمین می‌کند که تمامی تقاضای مورد نیاز هر پروژه از هر منبع در دوره مورد نظر یا دوره‌های دیگر باید توسط تأمین‌کنندگان منتخب تأمین گردد. رابطه (۱۴) بیانگر محدودیت عرضه تأمین‌کنندگان می‌باشد. رابطه (۱۵) بیانگر آن است که زمان

اتمام پروژه نباید از حد پایین مورد نظر کمتر و از حد بالای مدنظر نیز بیشتر باشد. رابطه (۱۶) نشان‌دهنده متغیرهای صفر و یک مدل می‌باشد. رابطه (۱۷) نشان‌دهنده متغیرهای مثبت مدل ریاضی و در نهایت رابطه (۱۸) نشان‌دهنده متغیر آزاد در علامت مدل می‌باشد.

رویکرد مقابله با چند هدفه بودن

در این مقاله جهت مقابله با دو هدفه بودن مدل ریاضی پیشنهادی و تشکیل یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با هدفی یگانه از روش "ال-پی مترک۱" استفاده می‌شود که در این بخش به ارائه آن پرداخته می‌شود. از این رو تابع هدف رابطه (۱۹) به عنوان هدف واحد با رویکرد کمینه‌سازی انحراف از مقادیر بهینه هر تابع هدف با استفاده از روش ال-پی متریک ارائه می‌شود و با اضافه شدن رابطه (۲۰) به عنوان شرط لازم روش در تعیین اوزان به محدودیت‌های مسأله، مدل نهایتاً به صورت زیر آماده حل می‌گردد.

رابطه ۱۹)

$$\min \wp = \left(\sum_{o=\{St,Qu\}} w_o \left(\frac{\wp_o^{\max}(\mathbf{x}) - \wp_o(\mathbf{x})}{\wp_o^{\max}(\mathbf{x})} \right)^p \right)^{1/p} , \quad 1 \le p \le \infty$$

رابطه ۲۰)

$$\sum_{o=\{St,Qu\}} W_o = 1, 0 < W_o < 1$$

در رابطه (۱۹)، اندیس **o** مرتبط با توابع هدف مسأله و w_o وزن تابع هدف **o**ام می‌باشد. هم چنین، $\mathbf{x}$ بردار متغیرهای تصمیم‌گیری مسأله و $\wp_o(\mathbf{x})$ نیز تابع هدف **o**ام همراه با $\wp_o^{\max}(\mathbf{x})$ به عنوان مقدار ایده‌آل هدف **o**ام در نظر گرفته می‌شود (چون توابع هدف از نوع بیشینه‌سازی می‌باشند). در نهایت p مقداری است که بر اساس نگرش تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. برای تشکیل مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی، در این تحقیق، مقدار p برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود.

1 Lp-metric

الگوریتم ژنتیک ترکیبی

به دلیل درجه پیچیدگی بالای مدل پیشنهادی، حل مدل توسط روش‌های دقیق تنها در ابعاد کوچک و متوسط امکان‌پذیر است. بنابراین، به منظور حل مسأله در ابعاد بزرگ به توسعه یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی شامل الگوریتم شبیه‌سازی تبرید۱ جهت تولید جواب‌های اولیه و یک الگوریتم ژنتیک۲ جهت تولید جواب نهایی با کیفیت استفاده می‌شود. در بخش‌های بعدی سازوکار و نوآوری‌های الگوریتم‌های پیشنهادی توضیح داده می‌شوند.

نمایش جواب

به منظور نمایش جواب در این مسأله از یک رشته ابتکاری جهت تخصیص تامین‌کنندگان به پروژه‌ها استفاده می‌شود و با تعیین اطلاعات مرتبط با تخصیص مقادیر، سایر متغیرهای مدل پیشنهادی از جمله زمان اتمام هر پروژه نیز در هر جواب بدست آمده مشخص می‌گردد. جهت درک بهتر این موضوع به شکل ۲ توجه کنید.

P / S	۱	۲	۳
۱	۰/٦٨	۰/۷۲	۰/۱۵
۲	۰/۹٤	۰/۱٦	۰/۱۳
۳	۰/۲٤	۰/۱۸	۰/۹۸

شکل ۲. ماتریس نمایش جواب برای یک منبع و دوره زمانی خاص.

با توجه به شکل ۲، اعداد بالای ۰/۵ به معنای انتخاب تأمین‌کننده برای تأمین هر منبع در هر دوره است که برای یک منبع مشخص اعداد نرمالایز می‌شوند تا درصد ارسال منبع مورد نظر توسط هر تأمین‌کننده در دوره مورد نظر مشخص شود.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

در این بخش، یک جمعیت از جواب‌های اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود که بتواند در هردوره زمانی برنامه تخصیص و ارسال به تأمین کنندگان و زمانبندی پروژه‌ها را شامل شود. هم چنین، صرفاً مجموعه جواب‌های شدنی به عنوان جمعیت ورودی به الگوریتم

1 Simulated Annealing (SA)
2 Genetic Algorithm (GA)

شبیه‌سازی تبرید در نظر گرفته می‌شوند و سپس پس از اعمال عملگرهای این الگوریتم صرفاً جواب‌های شدنی به عنوان جمعیت اولیه ورودی به الگوریتم ژنتیک مد نظر قرار می‌گیرند.

پس، به منظور بهبود جواب‌های تصادفی تولیدی، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بهره برده می‌شود و تمامی جواب‌های اولیه به صورت جداگانه با این الگوریتم بهبود داده می‌شوند. این الگوریتم اولین بار توسعه کیرکپاتریک و همکاران (۱۹۸۳) معرفی گردید (Kirkpatrick et al., 1983). چارچوب کلی الگوریتم به این گونه است که با یک جواب اولیه الگوریتم شروع می‌شود، پارامترهای اولیه الگوریتم شامل تعداد تکرارهای الگوریتم در هر دما ($\mathbf{M}$)، مقدار دمای اولیه ($\mathbf{T_0}$)، نرخ کاهش دما ($\boldsymbol{\alpha}$)، مقدار دمای نهایی ($\mathbf{T_{end}}$) و ثابت بولتزمن ($\mathbf{K}$) می‌باشد که قبل از شروع جستجو مقداردهی اولیه می‌شوند. سپس یک همسایگی برای جواب اولیه در نظر گرفته شده و در صورتیکه مقدار تابع هدف همسایه تولیدشده بهتر از تابع هدف جواب باشد، همسایه جایگزین جواب شده و در غیر این صورت مقدار تفاوت تابع جواب همسایه و جواب اولیه (Δ) محاسبه شده و سپس یک عدد تصادفی در بازه صفر و یک تولید شده با مقدار رابطه احتمال الگوریتم ($\mathbf{exp(-\Delta/KT)}$) مقایسه می‌گردد، در صورتی که عدد تصادفی از مقدار رابطه الگوریتم کمتر باشد جواب بدتر پذیرفته می‌شود. در هر دما تعدادی تکرار رخ می‌دهد و پس از آن دما کاهش می‌یابد. رابطه سرمایش وکاهش دما به صورت $\mathbf{T \leftarrow \alpha T}$ می‌باشد. شرط توقف نیز رسیدن به دمای نهایی است. در این مقاله با توجه به حل سه مسأله نمونه که به تصادف انتخاب گردیده‌اند، با روش سعی و خطا مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای الگوریتم عبارت‌اند از:

$M=5, \boldsymbol{\alpha}=0.98, \mathbf{T_0}=200, \mathbf{T_{end}}=1, K=0.8$

الگوریتم ژنتیک

جمعیت نهایی تولید شده توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در مرحله قبل به عنوان ورودی الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته می‌شود. این الگوریتم اولین بار توسط دجونگ (۱۹۷۵) معرفی گردید و سپس توسط محققان دیگری توسعه یافت (De Jong, 1975). بدین منظور با استفاده از الگوریتم ابتکاری تعدادمشخصی جواب اولیه (nmax) تولید می‌گردد و از بین جواب‌های حاصله به اندازه تعداد جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک انتخاب شده و سپس عملگرهای تقاطع و جهش بر روی جواب‌ها اعمال می‌شوند تا در نهایت شرایط توقف الگوریتم فراهم گردد. برای انتخاب جواب‌ها نیز، تعداد جمعیت اولیه مورد نیاز بر

اساس بهترین کیفیت-بهترین مقدار تابع برازش مرتب می‌شوند که همان تابع هدف نهایی بدست آمده توسط روش ال-پی متریک می‌باشد.

عملگر تقاطع مهمترین عملگر در الگوریتم ژنتیک است. بدین صورت که پس از انتخاب یک زوج جواب از میان جمعیت اولیه، اعداد بالای قطر با اعداد پایین قطر جواب دیگر جابجا می گردند و بالعکس. عملگر جهش نیز همان عملگرهای جستجوی محلی توضیح داده شده برای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید می‌باشد. با توجه به موارد فوق تعداد جواب اولیه تولید شده توسط الگوریتم ابتکاری برابر ۲۰۰ درنظر گرفته شده، تعداد تولید جواب توسط عملگر تقاطع ۱۵۰ و نرخ جهش (Pm) نیز برابر ۰/۱ درنظرگرفته شده است.

در نهایت شبه کد الگوریتم ژنتیک ترکیبی پیشنهادی در شکل ۳ ارائه می گردد.

```
آغاز الگوریتم
//جمعیت اولیه
قراردهید K = 1
جمعیت اولیه را توسط الگوریتم ابتکاری پیشنهادی ایجاد کنید
جمعیت اولیه ایجادشده را توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بهبود دهید
مراحل بالا را با اعمال K: = K + 1 تکرار کنید
    اگر K == k_max
    متوقف شوید
خروجی: به تعداد k_max جمعیت اولیه
//تکرار اصلی
    قرار دهید n=1
    هنگامیکه n <= n_max
}
    یک جفت از جمعیت اولیه را انتخاب کنید (P1,P2)
    عملگر تقاطع را بر روی آن‌ها اعمال کنید (S)
    یک عدد تصادفی در بازه [0,1] ایجاد کنید (R)؛ اگر R<Pm باشد
    عملگر جهش را بر روی S اعمال کنید
    جمعیت را بروز کنید
    قرار دهید n: = n + 1
{
هنگامیکه شرایط توقف الگوریتم بوجود آمد،
خروجی: بهترین جواب بدست آمده
پایان الگوریتم
```

شکل ۳. شبه کد الگوریتم ژنتیک ترکیبی پیشنهادی.

بحث و نتایج محاسباتی

تولید مثال‌های تصادفی

این بخش به ارائه نتایج محاسباتی برای ارزیابی و صحه‌گذاری مدل ریاضی پیشنهادی و آنالیز حساسیت پارامترهای کلیدی مسأله می‌پردازد. به همین جهت ۶ مسأله در ابعاد مختلف (کوچک، متوسط و بزرگ) طراحی شده و ابعاد و مقادیر پارامترهای ورودی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. نمونه‌های تصادفی ایجاد شده

مسأله	$\|S\|$	$\|P\|$	$\|T\|$	$\|R\|$
۱	۳	۳	٦	۳
۲	٦	٦	۱۲	۱۰
۳	۱۵	۱۵	۲٤	۲۰
٤	۲۰	۲۰	۲٤	۳۰
۵	۳۰	۳۰	۳٦	٤۰
٦	۵۰	۵۰	۳٦	۵۰

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۲. مقادیر پارامترهای مسأله

پارامتر	مقدار
C_{spr}^{Al}	یکنواخت بین ۵۰ و ۱۰۰
C_{sr}^{Tr}	یکنواخت بین ۱ و ۵
C_{rp}^{Pr}	یکنواخت بین ۲ و ٤
$C_{rt'tp}^{Pv}$	یکنواخت بین ۸ و ۱۲
C_{p}^{Qu}	یکنواخت بین ٤۰ و ٦۰
QS_{srt}	یکنواخت بین ۱۰ و ۲۰
$M_{p}^{\min}$	یکنواخت بین ۱ و نصف مدت زمان ماکسیموم
$M^{\max}$	T
Bg	۱۰۰۰۰۰۰
Q_{rpt}^{Rq}	یکنواخت بین ۰/۵ و ۳
$\bar{Q}$	٤۰
Q_{p}^{unit}	یکنواخت بین ٤ و ٦
Q_{p}^{Set}	یکنواخت بین ۱۵ و ۲۵
m	$۱۰^{۸}$

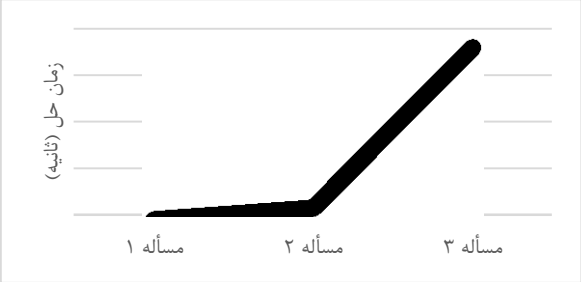
نتایج حاصل از روش حل دقیق

همانطور که در بخش ۳ ذکر شد، مدل ریاضی پیشنهادی این پژوهش یک مدل برنامه-ریزی خطی عدد صحیح مختلط بوده که می‌تواند براحتی توسط روش‌های حل دقیق حل شود. به همین دلیل، جهت حل مسائل تصادفی ایجاد شده، از حل کننده CPLEX نرم افزار GAMS و با استفاده از یک سیستم به مشخصات Intel Core i7-6700HQ CPU @ 2.60 GHz with 12 GB memory به حل مسائل و صحه‌گذاری مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود. پس از حل مسائل نتایج خلاصه شامل آمار و اطلاعات مرتبط با حل و مدل و هم چنین نتایج بهینه کلی مسائل در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که محدودیت زمانی حل ۳۶۰۰ ثانیه برای حل مسائل با استفاده از روش دقیق در نظر گرفته شده است. هم چنین پس از توقف نرم افزار تا زمان ۳۶۰۰ ثانیه هیچ جواب موجهی برای مثال ۴ الی ۶ جدول ۱ حاصل نشد.

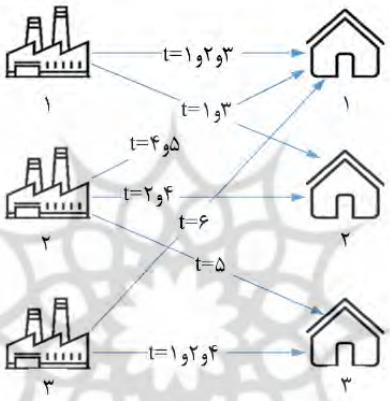
جدول ۳. آمار و اطلاعات کلی مدل و حل مسائل نمونه

اطلاعات و آمارها	مسأله ۱	مسأله ۲	مسأله ۳
مولفه‌های غیر صفر	٦٤٩٢	٣٢٦٤٢٤	١٥٨٩٩٦٨٢
تعداد تک روابط	٢٤٣٣	١١٤١٢٢	٥٤١٩٣١٣
تعداد تک متغیرها	١١٢٩	٥٣٣٨٩	٢٦٠٩١٨٢
تعداد متغیرها	٨٤	٧٩٨	٩٩١٥
هزینه کل کیفیت	٢٧١	٢٩٦١	١١٥٥٦
هزینه کل عقد قرار داد	٦٩٥	٤٥٧٠	٢٤٠٨٢
هزینه کل حمل و نقل	٢٥٥٧	١٦٨٩٨	٩٣٥٩٦
هزینه کل موجودی	٢٥٢٥	١٨٨٢٦	٩٢٧٧٣
هزینه کل جریمه تأخیر	٨٧٣	١٢٥٣٠	٥٩٧٨٠
هزینه کل	٦٩٢١	٥٥٧٨٦	٢٨١٧٨٨
تابع هدف اول	٤	٣٧	٢١٢
تابع هدف دوم	٦,٧٠٨	٨٧,١٧٣	٤٣١,٦٤٦
تابع هدف ال-پی متریک	-٣/٤٠١	-٤/٠٨٥	-٢١/١٥
زمان حل (ثانیه)	٤	٢٥٢	٣٧٠٥

همانطورکه از نتایج بر می‌آید، به ازای افزایش ابعاد مسأله زمان حل نرم‌افزار به شدت افزایش یافته است به طوریکه برای حل مسأله سوم به مدت زمانی بیش از ۱ ساعت نیازمند شده است. برای درک بهتر تاثیرگذاری ابعاد مسأله بر کارایی روش حل دقیق پیشنهادی در ایجاد یک روند غیرخطی در افزایش زمان حل، نمودار ۱ روند افزایش زمان حل را در مسائل مختلف نشان می‌دهد. در مسائل بهینه‌سازی برای برخورد با چنین شرایطی، ضروری است که به توسعه روش‌های حل جایگزین شامل روش‌های حل تقریبی (ابتکاری یا فراابتکاری) برای مسائل با ابعاد بسیار بزرگ پرداخت تا بتوان به صورت اثربخش و کارایی در یک زمان چند جمله ای کوتاه و مناسب به حل آن‌ها پرداخت. از آنجاییکه توسعه روش‌های حل تقریبی خارج از محدوده این پژوهش است، و هم چنین بدلیل تشابه نتایج و روند بدست آمدن آن‌ها در مسائل مختلف، مسأله شماره ۱ به عنوان نمونه برای بررسی بیشتر عملکرد مدل پیشنهادی انتخاب می‌شود. از این رو، جهت درک بهتر فضای مسأله، خروجی بهینه بدست آمده برای مسأله اول در شکل ۴ تشریح شده است.



نمودار ۱. مقایسه زمان‌های حل مختلف



شکل ٤. شبکه زنجیره تامین بدست آمده برای مسأله ۱

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

نتایج حاصل از روش حل ژنتیک ترکیبی

در این بخش جهت مقایسه کارایی الگوریتم ژنتیک ترکیبی پیشنهادی، مثال‌های تصادفی ایجاد شده توسط این الگوریتم حل شده و از لحاظ زمان حل و هم چنین مقدار تابع هدف ال-پی متریک (تابع برازش) مورد مقایسه با روش حل دقیق قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که این الگوریتم توسط نرم افزار Matlab 2016 روی سیستم با مشخصان گفته شده در بخش ۲-۵ اجرا می‌گردد.

مثال تصادفی	حل کننده CPLEX		الگوریتم ژتیک ترکیبی		
	تابع هدف ال-پی متریک	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف ال-پی متریک	زمان حل (ثانیه)	درصد انحراف
۱	-۳/٤۰۱	٤	-۳/٤٥٤	۱٥	۱/٥۷
۲	-٤/۰۸٥	۲٥۲	-٤/۱٤٦	۲۳	۱/٤۹
۳	-۲۱/۱٥	۳٦۰۰	-۲۱/٦٤۳	۲۹	۲/۳۳
٤	-	-	-۱۸/۲٥۰	۳٥	-
٥	-	-	-۳۲/۱٥٦	٥۹	-
٦	-	-	-٤۱/۰۰٥	۸۷	-
میانگین	-۹/٥٥	۱۲۸٥/۳۳	-۲۰/۱۱۲	۲۳/۲۲	۱/۸۰

جدول ٤-نتایج حل مدل

همانطور که از نتایج جدول ۴ بر می‌آید، الگوریتم پیشنهادی این پژوهش قابلیت حل مسائل تصادفی با متوسط زمان ۲۳/۲۲ و متوسط انحراف ۱/۸۰ درصد را دارا می‌باشد که نشانگر قابلیت بالای این الگوریتم در حل مسأله است. از سوی دیگر، روش حل دقیق پیشنهادی پژوهش صرفاً قابلیت حل ۳ مثال اول مسأله ظرف مدت زمان محدود ۳۶۰۰ ثانیه را با متوسط زمان ۱۲۸۵/۳۳ دارد که به مراتب بسیار بیشتر از متوسط زمان حل مورد نیاز توسط الگورتم ژنتیک ترکیبی پیشنهادی می‌باشد. بنابراین، با توجه به نتایج می‌توان اظهار داشت که برای حل مثال‌های تصادفی در ابعاد دنیای واقعی عملا حل کننده **CPLEX** کارایی و مطلوبیت لازم را ندارد و روش فراابتکاری پیشنهادی به عنوان بهترین رویکرد حل پیشنهاد می‌شود.

آنالیز حساسیت

در این بخش، به جهت مطالعه رفتار توابع هدف در مقابل تغییرات پارامترها در دنیای واقعی و تعیین سیاست‌های بهینه متناسب، آنالیز حساسیت بر روی تعداد پروژه‌ها و طول بازه زمانی در مسأله اول صورت می‌گیرد. هدف، مطالعه اثرگذاری تغییرات در شبکه زنجیره‌تأمین مورد بررسی پروژه‌ها می‌باشد. نتایج بدست‌آمده به صورت ارائه توابع هدف و جمله‌های هزینه در جدول ۵ به ازای ترکیب حالات مختلف شبکه در مسأله ۱ ارائه می‌گردد. همچنین، نمایش روند تغییرات توابع هدف در مقابل تغییرات این پارامترها در نمودارهای ۲، ۳ و ۴ تشریح می‌شود.

جدول ۵. نتایج محاسباتی آنالیز حساسیت پارامتر تقاضا

#	۱	۲	۳	٤	٥
مقادیر	P=۲,T=٥	P=۲,T=٦	P=۳,T=٦	P=٤,T=٦	P=٥,T=۷
تابع هدف اول	۱	۳	٤	۸	۱۳
تابع هدف دوم	۲/۳۰۲	۱٤/٤۱٤	٦/۷۰۸	-٥/۷۸٤	-٤/۷۷۱
هزینه کیفیت	٤۲٥/۳۳۷	٤۷٥/٦۷٤	۲۷۱/۷۹٤	۸۳٦/۳٤۰	۱۱۲٦/۹۹۲
هزینه قرار داد	٤۸۱	٤۸۱	٦۹٥	۹۱۸	۹۱۸
هزینه حمل و نقل	۱٤۳۰	۱۳۱۸	۲٥٥۷	۳۱۰۰	۳۰۲۳
هزینه موجودی	۱٦۳٤	۱٤۹٤	۲٥۲٥	۳٥۹۳	۳٥۸۰
هزینه جریمه‌های تاخیر	٦۰۳	٥۰۳	۸۷۳	۱۰۸٤	۹۲۱
هزینه کل	٤٥۷۳/۳۳۷	٤۲۷۱/٦۷٤	٦۹۲۱/۷۹٤	۹٥۳۱/۳٤	۹٥٦۸/۹۹۲

نمودار ۲. آنالیز حساسیت تابع هدف اول

نمودار ۳. آنالیز حساسیت تابع هدف دوم

نمودار ٤. آنالیز حساسیت هزینه کل

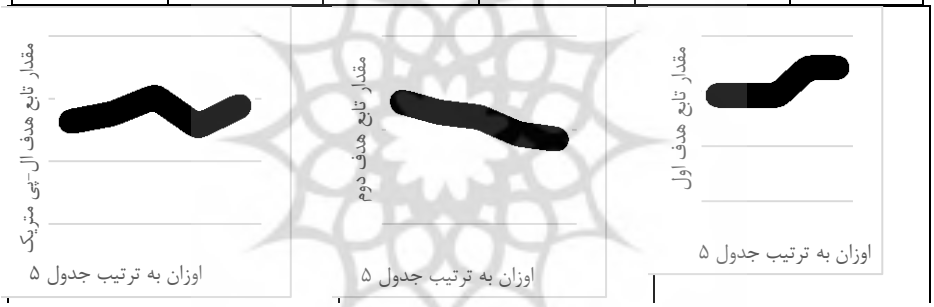
همانطور که از نتایج بدست آمده توسط نمودارهای ۲-۴ و جدول ۴ بر می‌آید، توابع هدف و هزینه کل شبکه به ازای حالات مختلف در نظر گرفته شده برای تعداد پروژه‌ها و بازه زمانی رفتارهای متفاوت همراه با نوسان‌های گوناگون از خود نشان داده‌اند بطوریکه می‌توان فهمید بیشترین تغییرات مربوط به هدف اول یا مقدار شناوری کل بوده است. مقدار شناوری با افزایش ابعاد افزایش یافته و با کاهش آن نیز کاهش یافته است و بیشترین تغییر خود را در آخرین بازه افزایش ابعاد نشان داده است که حدود **۳,۲۵** برابر با مقدار آن برای حالت عادی در نظر گرفته شده برای مسأله ۱ بوده است. تابع هدف دوم یا همان مقدار کیفیت کل پروژه‌ها رفتاری متفاوت با تابع هدف اول داشته است و در بازه‌های مختلف تغییرات جهت‌گیری متفاوتی داشته است. بیشترین تغییرات این تابع هدف برای اولین بازه تغییر ابعاد بوده است که حدود **۱۲,۴۹۲** واحد نسبت به حالت عادی در نظر گرفته شده برای مسأله ۱ کاهش یافته است. در نهایت هزینه کل مسأله نیز در ۳ بازه افزایش ابعاد مسأله دارای افزایش بوده و تنها در یک بازه دارای کاهش بوده است. بطوریکه بیشترین تغییر آن در اولین بازه کاهش ابعاد و به اندازه **۳۸,۲۸**٪- مقدار حالت عادی در نظر گرفته شده برای مسأله ۱ بوده است. علت اصلی افزایش مجدد جزیی آن در بازه دوم کاهش ابعاد مسائل، به دلیل برآیند مولفه‌های مختلف هزینه و افزایش توام هزینه‌های حمل و نقل، پردازش موجودی و جریمه تاخیر بوده است.

مدیریت شبکه، با تحلیل این نتایج و مطالعه تاثیرگذاری آن‌ها می‌تواند براحتی سناریوهای مختلف و شرایط مختلف در دنیای واقعی را مورد بررسی و تحلیل قرار دهد و در نهایت بهترین سیاست را در جهت افزایش منفعت شبکه اتخاذ نماید. به عبارت دیگر، امکان مقایسه نتایج حاصل از کیفیت و قابلیت اطمینان به گونه‌ای فراهم می‌شود که امکان مدیریت تعداد پروژه‌ها و زمان‌بندی آنها تحت یک مدیریت تأمین واحد فراهم می‌آید. طبق مطالعات صورت‌گرفته، تاکنون پژوهشی که اندازه بهینه شبکه با تکیه بر تعداد بهینه پروژه تحت سرپرستی یک مدیریت واحد تأمین ارائه نشده است و این تحقیق اویلین تحقیق در این زمینه است.

حال جهت آنالیز حساسیت مدل در خصوص ضرایب تخصیص داده شده در رویکرد حل ال-پی-متریک برای دست‌یابی به تبادل کیفیت-قابلیت اطمینان پیشنهادی در این تحقیق، ترکیب‌هایی از حالات مختلف، وزن‌های توابع هدف به مدل اعمال می‌شوند. جدول ۶ و نمودارهای ۵ و ۶ مقادیر بدست آمده در این آنالیز را نشان می‌دهند.

جدول ٦. نتایج محاسباتی آنالیز حساسیت پارامتر تقاضا

#	۱	۲	۳	٤	٥
مقادیر	$W_1=0/1, W_2=0/9$	$W_1=0/2, W_2=0/8$	$W_1=0/3, W_2=0/7$	$W_1=0/4, W_2=0/6$	$W_1=0/5, W_2=0/5$
تابع هدف اول	٤	٤	٤	٥	٥
تابع هدف دوم	٦/٧٠٨	٦/١٤٠	٥/٨٩٨	٥/٠٠٣	٤/٧٢٢
تابع هدف ال-پی متریک	٣/٤٠١	٣/٦٥٤	٤/١٩٨	٣/٢٥٠	٣/٩١٣



نمودار ۵. آنالیز حساسیت وزن‌های توابع هدف- مقادیر حاصل از تابع هدف اول

نمودار ٦. آنالیز حساسیت وزن‌های توابع هدف- مقادیر حاصل از تابع هدف دوم

نمودار ۷. آنالیز حساسیت وزن‌های توابع هدف- تابع هدف ال-پی متریک

همانطور که از نتایج بدست آمده از آنالیز حساسیت در جدول ۵ و نمودارهای ۵-۷ برمی‌آید، مقادیر توابع هدف نسبت به تغییر مقادیر وزن‌ها، تغییرات متفاوتی را از خود نشان می‌دهند. تغییر مقادیر توابع هدف همانگونه که از شکل‌های ۵ و ۶ برمی‌آید، تبادلی که این تحقیق به دنبال آن بود، به طور کامل و دقیق اتفاق افتاده است. به این معنی که با افزایش وزن تابع هدف اول، یعنی قابلیت اطمینان، مقدار حاصل از آن افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که با افزایش این وزن و براساس معادله (۲۰) وزن و مقدار دیگر تابع هدف،

یعنی تابع هدف مربوط به کیفیت کاهش یافته است. بدین ترتیب به وضوح امکان تبادل بین قابلیت اطمینان و کیفیت در سطح بودجه مشخص، در این پژوهش به طور کامل فراهم شده است. از طرفی همانگونه که در شکل ۷ نمایش داده شده است، تغییرات تابع هدف حاصل از رویکرد حل ال-پی متریک، با تغییرات اوزان، تغییر قابل توجه و قابل تحلیلی را از خود نشان نداده است. بدین ترتیب، مدیر به راحتی و بدون توجه به سایر ابعاد پروژه‌ها می‌تواند یک تبادل کامل و ساخت‌یافته را بین کیفیت و قابلیت اطمینان پروژه برقرار نماید.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی دو هدفه برای ساختاربندی یک زنجیره تأمین دو سطحی در حوزه عمرانی و ساخت و ساز به گونه‌ای ارائه شده است که امکان فرمول‌بندی یک تبادل کیفیت-قابلیت اطمینان را در سطح بودجه تخصیصی و در شرایطی که شرکت عمرانی تصمیم‌گیرنده، دارای پروژه‌های متعددی است فراهم آورد. توابع هدف دقیق و محدودیت‌های منطقی طراحی شده در این تحقیق سبب نزدیک‌شدن مدل به عالم واقعیت شده است و شکاف تحقیقاتی موجود در حوزه طراحی زنجیره تأمین ساخت و ساز را به خوبی پوشش داده است.

نتایج حاصل از حل مدل در اندازه‌های مختلف و همچنین در اوزان مختلف مربوط به پیاده‌سازی روش ال-پی متریک و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک ترکیبی حاکی از این واقعیت هستند که مدیر به راحتی با استفاده از مدل می‌تواند اندازه بهینه شبکه زنجیره تأمین را تعیین نماید به گونه‌ای که هم بودجه در دسترس را مد نظر داشته باشد و هم کیفیت و قابلیت اطمینان به خاتمه پروژه را بهینه کرده باشد. از این رو مدیر به عنوان تصمیم‌گیرنده شبکه به راحتی این امکان را خواهد داشت تا پروژه‌های تحت عمل شرکتش را با استفاده از این مدل، از نظر مدیریت تأمین مشترک، دسته‌بندی نماید. به علاوه، تصمیم‌گیرنده می‌تواند در سطح بودجه مدنظرش، نوعی تبادل بین قابلیت اطمینان به خاتمه پروژه‌ها و کیفیت آنها را نیز فراهم آورد.

این تحقیق علیرغم نتایج برجسته پیش‌گفته، دارای محدودیت‌هایی است که زمینه را برای تحقیق‌های آتی فراهم می‌آورد. یکی از محدودیت‌های مدل ارائه شده در روش حل آن

است که علیرغم دقیق بودن، با افزایش حجم شبکه، بسیار زمان‌بر شده و استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری را موجه می‌سازد. از این رو الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای حل مسأله در ابعاد بالا توسعه یافت. به همین دلیل، توسعه روش‌های فراابتکاری دیگر جهت ارزیابی و مقایسه با الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای حل این مدل در اندازه‌های بزرگ می‌تواند زمینه مناسبی برای تحقیق‌های آتی باشد. محدودیت دیگر این مدل، در نظر نگرفتن مدیریت موجودی در مدل است. استفاده از مدل‌های مناسب موجودی، در این مدل می‌تواند با تعیین حجم و نقطه سفارش، نه تنها مدل جامع‌تری را به همراه داشته باشد بلکه باعث کاهش هزینه‌ها نیز گردد.

ORCID

Hirosh Golpira: https://orcid.org/0000-0003-1346-9572
Erfan Babaie Tir Kalaie: https://orcid.org/0000-0003-1664-9210
Mohammad Taghi Taghavi Fard: https://orcid.org/0000-0002-4212-2079

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

Behera, P., Mohanty, R., & Prakash, A. (2015). Understanding construction supply chain management. *Production Planning & Control, 26*(16), 1332-1350.

Chen, W., Lei, L., Wang, Z., Teng, M., & Liu, J. (2018). Coordinating supplier selection and project scheduling in resource-constrained construction supply chains. *International Journal of Production Research, 56*(19), 6512-6526.

Cheng, J. C., Law, K. H., Bjornsson, H., Jones, A., & Sriram, R. (2010). A service oriented framework for construction supply chain integration. *Automation in Construction, 19*(2), 245-260.

Choudhari, S., & Tindwani, A. (2017). Logistics optimisation in road construction project. *Construction Innovation, 17*(2), 158-179.

Dallasega, P., Rauch, E., & Linder, C. (2018). Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. *Computers in Industry, 99*, 205-225.

Donato, M., Ahsan, K., & Shee, H. (2015). Resource dependency and collaboration in construction supply chain: literature review and development of a conceptual framework. *International Journal of Procurement Management, 8*(3), 344-364.

Feng, C., Ma, Y., Zhou, G., & Ni, T. (2018). Stackelberg game optimization for integrated production-distribution-construction system in construction supply chain. *Knowledge-Based Systems*.

Golpîra, H. (2017). Supply chain network design optimization with risk-averse retailer. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management (IJISSCM), 10*(1), 16-28.

Golpîra, H. (2020). Optimal integration of the facility location problem into the multi-project multi-supplier multi-resource Construction Supply Chain network design under the vendor managed inventory strategy. Expert Systems with Applications*, 139*.

Golpîra, H., & Khan, S. A. R. (2019). A multi-objective risk-based robust optimization approach to energy management in smart residential buildings under combined demand and supply uncertainty. *Energy, 170*, 1113-1129.

Golpîra, H., Najafi, E., Zandieh, M., & Sadi-Nezhad, S. (2017) .Robust bi-level optimization for green opportunistic supply chain network design problem against uncertainty and environmental risk. *Computers & Industrial Engineering, 107*, 301-312.

De Jong, K. A. (1975). An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems Ph. D. Dthesis. Univ. Of Michigan. Ann Arbirmich.

Jaśkowski, P., Sobotka, A., & Czarnigowska, A. (2018). Decision model for planning material supply channels in construction. *Automation in Construction, 90*, 235-242.

Jiang, W., Lu, W., & Xu, Q. (2019). Profit Distribution Model for Construction Supply Chain with Cap-and-Trade Policy. *Sustainability, 11*(4), 1215.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.

Lavikka, R. H., Smeds, R., & Jaatinen, M. (2015). Coordinating collaboration in contractually different complex construction projects. *Supply chain management: an international journal, 20*(2), 205-217.

Lin, Y.-q., Guo, C.-x., & Tan, Y. (2018). The incentive and coordination strategy of sustainable construction supply chain based on robust optimisation. *Journal of Control and Decision*, 1-34.

Liu, Q., Xu, J., & Qin, F. (2017). Optimization for the Integrated Operations in an Uncertain Construction Supply Chain. *IEEE Transactions on Engineering Management, 64*(3), 400-414.

Liu, Q., Xu, J., & Zhang, Z. (2015). Construction supply chain-based dynamic optimisation for the purchasing and inventory in a large scale construction project. *European Journal of Industrial Engineering, 9*(6), 839-865.

London, K., & Singh, V. (2013). Integrated construction supply chain design and delivery solutions. *Architectural engineering and*
design management, 9(3), 135-157.

Moon, S., Han, S., Zekavat, P. R., Bernold, L. E., & Wang, X. .(۲۰۱۷) Process-waste reduction in the construction supply chain using proactive information network. *Concurrent Engineering, 25*(2), 123-135.

Nguyen, P. T., Nguyen, V. N., Pham, L. H., Nguyen, T. A., Le, Q., Nguyen, H. T. T., & Huynh, V. D. B. (2018). Application of Supply Chain Management in Construction Industry. *Advances in Science and Technology-Research Journal, 12*(2), 11-19.

Niu, Y., Lu, W., Liu, D., Chen, K., Anumba, C., & Huang, G. G. (2016). An SCO-Enabled Logistics and Supply Chain–Management System in Construction. *Journal of construction engineering and management, 143*(3), 04016103.

Rahimi, Y., Tavakkoli-Moghaddam, R., Shojaie, S., & Cheraghi, I. (2017). Design of an innovative construction model for supply chain management by measuring agility and cost of quality: An empirical study. *Scientia Iranica, 24*(5), 2515-2526.

Seth, D., Nemani, V. K., Pokharel, S., & Al Sayed, A. Y. (2018). Impact of competitive conditions on supplier evaluation: a construction supply chain case study. *Production Planning & Control, 29*(3), 217-235.

Shakantu, W., Tookey, J. E., & Bowen, P. A. (2003). The hidden cost of transportation of construction materials: an overview. *Journal of Engineering, Design and Technology, 1*(1), 103-118.

Simatupang, T. M., & Sridharan, R. (2016). A critical analysis of supply chain issues in construction heavy equipment. *International Journal of Construction Management, 16*(4), 326-338.

Thunberg, M., & Fredriksson, A. (2018). Bringing planning back into the picture–How can supply chain planning aid in dealing with supply chain-related problems in construction? *Construction Management and Economics*, 1-18.

Tserng, H. P., Yin, S. Y., & Li, S. (2006). Developing a resource supply chain planning system for construction projects. *Journal of construction engineering and management, 132*(4), 393-407.

Vidalakis, C., Tookey, J. E., & Sommerville, J. (2011). Logistics simulation modelling across construction supply chains. *Construction innovation, 11*(2), 212-228.

Vrijhoef, R., & Koskela, L. .(۲۰۰۰) The four roles of supply chain management in construction. *European Journal of Purchasing & Supply Management, 6*(3-4), 169-178.

Wang, T.-K., Zhang, Q., Chong, H.-Y., & Wang, X. (2017). Integrated supplier selection framework in a resilient construction supply chain: An approach via analytic hierarchy process (AHP) and grey relational analysis (GRA). *Sustainability, 9*(2), 289.

Yang, Y., Pan, S., & Ballot, E. (2017). Innovative vendor-managed inventory strategy exploiting interconnected logistics services in the Physical Internet. *International Journal of Production Research, 55*(9), 2685-2702.

Yazdani, M., Chatterjee, P., Pamucar, D., & Abad, M. D. (2019). A risk-based integrated decision-making model for green supplier selection: A case study of a construction company in Spain. *Kybernetes*.

Zahiri, B., Torabi, S. A., Mohammadi, M., & Aghabegloo, M. (2018). A multi-stage stochastic programming approach for blood supply chain planning. *Computers & Industrial Engineering, 122*, 1-14.

Zainal Abidin ,N. A., & Ingirige, B. (2018). The dynamics of vulnerabilities and capabilities in improving resilience within Malaysian construction supply chain. *Construction Innovation*.

Zhang, S., Fu, Y., & Kang, F. (2018). How to foster contractors' cooperative behavior in the Chinese construction industry: Direct and interaction effects of power and contract. *International Journal of Project Management, 36*(7), 940-953.

Zhou, P., Chen, D., & Wang, Q. (2013). Network design and operational modelling for construction green supply chain management. *International Journal of Industrial Engineering Computations, 4*(1), 13-28.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی