



Research in Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329
Vol. 15, Issue 2, No. 37, Summer 2024



<https://doi.org/10.22108/pom.2024.141270.1554>

(Research paper)

Optimizing the Construction Supply Chain Network Considering the Flow of Materials, Equipment, Manpower, Drawings and Technical Documents

Seyed Saeid Helli*

Department, Faculty of Finance, Management and Entrepreneurship, University of Kashan, Kashan, Iran,
seyedsaeidhelli@gmail.com

Hadi Mokhtari

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran,
mokhtari_ie@kashanu.ac.ir

Saeed Dehnavi

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran,
dehnavi@kashanu.ac.ir

Purpose: Today, the efficient management of supply chains plays a fundamental role in the market and economy. The supply chain is a network of facilities working together to make and move products from upstream to downstream to provide customers with highly qualified products and services. Nowadays, construction has become a growing and huge industry sector worldwide. One of the supply chains that needs proper management is related to the construction industry. The purpose of this article is to optimize this type of supply chain by minimizing its total costs.

Design/methodology/approach: An attempt has been made to develop an optimization model for the construction supply chain, considering all the important elements involved in the construction process, i.e. contractors, designers, suppliers of materials and construction materials, as well as three important and basic flows in the construction industry, i.e. the flow of manpower, the flow of equipment and machinery, and the flow of materials. All indices, parameters, decision variables, objective functions and constraints have been introduced and presented in the proposed model.

* Corresponding author, Orcid: 0000-0002-5297-5841 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/>)



Findings: The model proposed by GAMS optimization software was solved and the obtained results included the lowest construction cost as well as the optimal amount of construction materials and materials, labour, equipment, and machinery based on the required construction size.

Research limitations/implications: The application of the supply chain in the construction industry is a relatively new topic. In the classic supply chain, the flow of materials and output at the end of the chain includes the manufactured product, while in the construction supply chain, the final output includes a building or a structure. Individuals, industries and even countries incur a lot of construction costs to meet their needs in the field of construction. The current study was influenced by limitations such as access to real data and the impossibility of handling a real case study, because the problem of designing the construction supply chain has wide dimensions and requires access to all dimensions of the construction industry chain, from upstream to downstream.

Practical implications: With the definition and expansion of the concept of supply chain and the use of supply chain management in manufacturing industries and the positive results it brought in various manufacturing industries, supply chain management emerged in the construction industry. Meanwhile, researchers, major contractors, and large construction companies are trying to find methods to take advantage of the supply chain management approach. Also, the stakeholders of the construction industry can enable active decision-making and agile responses to market fluctuations by continuously monitoring and updating the results of cost sensitivity analysis.

Social implications: Optimizing the construction supply chain can lead to reduced costs, improved project timelines, and enhanced sustainability. However, it may also impact local communities through job displacement, environmental concerns, and social inequality. Balancing efficiency with social responsibility is crucial to ensure equitable outcomes in construction projects.

Originality/value: By now, there has been no reference available in the literature in the field of construction supply chain considering the designer, the flow of manpower and the flow of drawings and technical documents. The proposed model is comprehensive and includes the construction chain, considering all aspects such as the flow of required materials and materials, the flow of labour, the flow of required equipment and machinery, the flow of plans and documents, and designers and contractors.

Keywords: Construction supply chain, Supply chain mathematical modelling, GAMS optimization software, Flow of drawings and documents



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۵، شماره ۲، پیاپی ۳۷، تابستان ۱۴۰۳
دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۵ ص ۲۷-۵۵



<https://doi.org/10.22108/pom.2024.141270.1554>

(مقاله پژوهشی)

بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین ساخت‌وساز با در نظر گرفتن جریان مواد و مصالح، تجهیزات، نیروی انسانی، نقشه‌ها و مدارک فنی

سید سعید حلی^{*}، هادی مختاری^۲، سعید دهنوی^۳

- ۱- کارشناس ارشد گروه مدیریت کسب و کار، دانشکده علوم مالی، مدیریت و کارآفرینی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، seyedsaeedhelli@gmail.com
- ۲- دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، mokhtari_ie@kashanu.ac.ir
- ۳- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، dehnavi@kashanu.ac.ir

چکیده: امروزه مدیریت صحیح زنجیره‌های تأمین، نقش اساسی و مهمی در بازار و اقتصاد دارند. یکی از زنجیره‌های تأمین نوین که به مدیریت صحیح نیاز دارد، به صنعت ساخت‌وساز مربوط است. افراد، صنایع و حتی کشورها برای رفع نیازهای خود در زمینه ساخت‌وساز، متحمل هزینه‌های عمرانی بسیاری می‌شوند. یکی از روش‌های کاربردی برای کاهش هزینه‌ها، توجه به ایجاد هماهنگی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز است. در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی ریاضی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز، با در نظر گیری تمام عناصر مهم دخیل در فرایند ساخت‌وساز شامل طراحان، پیمانکاران، تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی، کارفرمایان و جریان‌های مواد و مصالح ساختمانی، نیروی کار انسانی، تجهیزات، ماشین‌آلات، نقشه‌ها و مدارک ساختمانی، طراحی و ارائه می‌شود. مدل توسعه داده شده با نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS حل می‌شود و خروجی به دست آمده شامل مواردی همچون کمترین هزینه ساخت‌وساز و همچنین مقادیر بهینه مواد و مصالح ساختمانی، نیروی کار، تجهیزات و ماشین‌آلات را با توجه به متراژ ساخت‌وساز مورد نیاز دارد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین ساخت‌وساز، مدل‌سازی ریاضی زنجیره تأمین، نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS، جریان نقشه‌ها و مدارک



۱- مقدمه

صنعت احداث (ساخت‌وساز)، چالش‌های مهم و مؤثر بر عملکرد سازمان‌های پروژه‌محور را به‌طور جدی تجربه کرده است. این صنعت به‌دلیل ارتباط با بخش‌های مختلف اقتصاد و انواع حوزه‌های فعالیت (ساختمان مسکونی، ساخت‌وساز صنعتی، ساخت تجاری و ساخت‌وساز سنگین)، در عمل نیروی محرکه اقتصاد کشور محسوب می‌شود. با این حال، این تنوع ارتباطی باعث پیچیده‌شدن این صنعت می‌شود و به موازات بزرگ‌شدن یک پروژه ساخت، میزان تعاملات با دیگر بخش‌های صنعت و به‌تبع آن میزان پیچیدگی پروژه افزایش می‌یابد (کریمی^۱، ۱۳۹۴). امروزه بخش زیادی از نیازهای انسان، به صنعت ساخت‌وساز و پروژه‌های عمرانی مربوط است. در دنیای مدرن، هزاران پروژه ساخت‌وساز در تمام نقاط دنیا و با کاربردهای متنوع در حال انجام است. پروژه‌های ساخت‌وساز جاده‌ها، ترمینال‌های ورودی و خروجی شهرها، ساخت‌وساز مراکز تجاری، احداث سدها و نیروگاه‌ها، که همگی دارای اهمیت و تبعات اقتصادی، محیط‌زیستی، فرهنگی و اجتماعی گسترده‌ای نیز هستند، ضرورت توجه و دقت نظر به این حوزه را اثبات می‌کند. ساخت‌وساز نقش محوری در اقتصاد جهانی دارد و محرک مهم رشد و توسعه است. با افزایش شهرنشینی و رشد جمعیت، تقاضا برای زیرساخت‌ها و ساختمان‌ها همچنان در حال افزایش است و مدیریت کارآمد زنجیره تأمین برای اطمینان از تحویل به‌موقع مواد و منابع را ضروری می‌کند.

مدیریت زنجیره تأمین در صنعت ساخت‌وساز، شامل هماهنگی فعالیت‌های مختلف از جمله تهیه، حمل و نقل، ذخیره‌سازی و توزیع مواد است. پیچیدگی پروژه‌های ساخت‌وساز، که از سوی ذی‌نفعان متعدد، مواد متنوع و الزامات پروژه پویا مشخص می‌شود، بر اهمیت یک زنجیره تأمین مؤثر برای بهینه‌سازی نتایج پروژه تأکید می‌کند. مدیریت کارآمد زنجیره تأمین در ساخت‌وساز برای افزایش عملکرد پروژه از نظر هزینه، زمان، کیفیت و پایداری بسیار مهم است. با ساده‌سازی فرآیندها و به حداقل رساندن تأخیر در تحویل مواد، شرکت‌های ساختمانی هزینه‌های پروژه را کاهش داده و بهره‌وری کلی را بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، یک زنجیره تأمین مؤثر با شناسایی تنگناهای بالقوه و اجرای استراتژی‌هایی برای کاهش اختلالات، مدیریت ریسک بهتر را ممکن می‌کند. فناوری‌ها، تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌ها را تسهیل می‌کنند، ارتباطات بین ذی‌نفعان پروژه را افزایش می‌دهند و کارایی کلی را بهبود می‌بخشند. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌ها در بهینه‌سازی زنجیره‌های تأمین در بخش ساخت‌وساز وجود دارد. مسائلی مانند ارتباطات پراکنده بین ذی‌نفعان، نوسان قیمت مواد، شرایط آب و هوایی پیش‌بینی‌ناپذیر و محدودیت‌های نظارتی، عملکرد زنجیره تأمین را مختل می‌کند. بررسی این چالش‌ها نیازمند تلاش‌های مشترک بین بازیگران صنعت برای تقویت شفافیت، نوآوری و انعطاف‌پذیری در اکوسیستم زنجیره تأمین است.

به‌دلیل اهمیت صنعت ساخت‌وساز و همچنین گسترش مفهوم مدیریت زنجیره تأمین، به‌ویژه در بخش صنایع تولیدی و پیاده‌سازی و نتایج موفقیت‌آمیز آن در تولید، مدیریت زنجیره تأمین وارد صنعت ساخت‌وساز نیز شده است. همواره مدیران در تمامی صنایع، به بهینه‌سازی و مدیریت هزینه‌ها توجه کرده‌اند. در صنعت ساخت‌وساز به‌دلیل حجم و گستردگی بالا، کوچک‌ترین بهبودها در مدیریت زنجیره تأمین باعث صرفه‌جویی بسیار کلان در هزینه‌ها می‌شود. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و توسعه روش‌های بهینه‌سازی، سعی شده است که زنجیره ساخت‌وساز طراحی شود که بالاترین کارایی و کمترین هزینه را داشته باشد. بنابراین مدل توسعه داده

شده، نیاز مدیران و پیمانکاران را به داشتن زنجیره ساخت‌وساز با کارایی بالا، همراه با کمترین هزینه‌ها مرتفع کند. درباره طراحی و مدیریت بهینه زنجیره تأمین ساخت‌وساز، تعدادی تحقیق از قبل نیز موجود است، اما جامع‌تر و واقعی‌تر دیدن زنجیره تأمین ساخت‌وساز با توجه به افزودن ویژگی‌هایی همچون جریان نیروی انسانی در زنجیره و همچنین جریان نقشه‌ها و مدارک فنی در زنجیره، از نوآوری‌های این تحقیق است که تا به حال در تحقیق دیگری ارائه نشده است. در این راستا، مدل ریاضی جامع، که ویژگی‌های جدید درون مدل وارد شده است، توسعه داده و مدل و تفسیر جواب‌ها حل شده است. هدف تحقیق پیش رو، ارائه مدل ریاضی جامع از زنجیره تأمین ساخت‌وساز است. مدلی که شامل ویژگی‌هایی جامع از این نوع زنجیره، همچون جریان مواد و مصالح، تجهیزات و ماشین‌آلات مربوط به ساخت‌وساز، نیروی انسانی درگیر در ساخت‌وساز و نقشه‌ها و مدارک فنی موجود در بحث ساخت‌وساز است. در نهایت مدل پس از حل، پاسخگوی جریان‌هایی بهینه به منظور طراحی بهینه زنجیره ساخت‌وساز است و به مسئولینی کمک شایان می‌کند که دغدغه مدیریت هزینه‌های پروژه‌های ساخت‌وساز را دارند.

در ادامه این تحقیق، مفاهیم نظری و پیشینه پژوهش در بخش ۲ و ۳ به ترتیب ارائه می‌شوند. همچنین بخش ۴ روش‌شناسی تحقیق شامل تشریح مدل، مدل‌سازی، شامل نمادها، تابع هدف و محدودیت‌ها بیان می‌شوند. در بخش ۵ نمونه محاسباتی تبیین و در ادامه در بخش ۶، نتایج ارائه می‌شود. همچنین درباره نتایج در بخش ۷ بحث و در بخش ۸ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی انجام می‌شود.

۲- مفاهیم نظری

زنجیره تأمین از موضوعاتی است که در طول سالیان طولانی، در تولید به آن توجه کرده‌اند و تحقیقات فراوانی در آن زمینه انجام شده است. اما زنجیره تأمین ساخت‌وساز، تفاوت‌های ماهیتی با زنجیره تأمین تولید دارد که در ادامه تعدادی از موارد مهم ذکر می‌شود:

- در زنجیره تأمین کلاسیک، جریان مواد و خروجی در انتهای زنجیره، شامل محصول تولیدشده است، ولی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز، خروجی نهایی شامل یک بنا، سازه یا ساختمان است؛
- محصول برای هر مشتری تغییر می‌کند. هر مشتری سازه‌ای با طراحی و خصوصیات ویژه خود می‌خواهد. در زنجیره تأمین ساخت‌وساز، اسناد و مدارک نقشه‌های طراحی از طریق تیم طراح برای هر پروژه، خاص و ویژه همان پروژه است و بخش مهمی از زنجیره تأمین را تشکیل می‌دهد؛ در حالی که در زنجیره‌های تأمین مرسوم تولیدی، این چنین نیست و یکی از تفاوت‌های مهم زنجیره تأمین ساخت‌وساز با دیگر زنجیره‌های تأمین‌ها همین موضوع است.

پاپادوپولوس و همکاران^۲ (۲۰۱۶) چند تفاوت ماهیتی زنجیره تأمین ساخت‌وساز و زنجیره تأمین تولید را بیان کرده‌اند:

- محصول در زنجیره تأمین ساخت‌وساز (ساختمان) بیشتر موارد، برای یک مشتری یا پروژه واحد است؛
- مکان، تجهیزات و روش‌های تولید برای هر مشتری در برخی از موارد، دچار تغییر می‌شوند؛
- پرسنل ساختمانی، شاخص چرخش بالا در زمان ساخت و بین پروژه‌ها را دارند؛ یعنی همان‌طور که در پروژه‌های عمرانی مشاهده می‌شود، ممکن است افراد متفاوتی در زمان‌های مختلف به کار گرفته شوند؛

• همه قطعات و مواد، در محل کار ذخیره نمی‌شوند.

در زنجیره تأمین ساخت‌وساز، نیروهای کار، تجهیزات، ماشین‌آلات و مصالح از مبادی مختلف، همه با یک هدف مشترک و مقصد معین (محل ساخت‌وساز)، گرد هم می‌آیند و کارخانه ساخت‌وساز در اطراف یک محصول واحد ایجاد می‌شود؛ این برخلاف سیستم‌های تولیدی است که چندین محصول از یک کارخانه عبور می‌کنند. مطابق گزارش‌ها، زنجیره تأمین ساخت‌وساز تحت تأثیر بسیاری از مشکلات قرار دارد، برخی از مشکلات به شرح زیر است (سرپل و هردیا^۳، ۲۰۰۴):

- نبود همکاری، هماهنگی و تعهد بین مشتریان و تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین؛
 - مشکلات طراحی (تغییرات زیاد و اطلاعات ناسازگار)، به‌دلیل نظرات و ملاحظات مختلف عناصر دخیل از جمله:
 - کارفرما؛
 - طراح و پیمانکاران؛
 - کیفیت پایین مواد و اجزا؛
 - ارتباط و انتقال اطلاعات ناقص؛
 - مدیریت ناکافی در زنجیره تأمین، عمدتاً برنامه‌ریزی و کنترل ضعیف به‌دلیل ماهیت موقتی زنجیره تأمین ساخت‌وساز؛
 - آموزش ضعیف تأمین‌کنندگان، پیمانکار، پیمانکاران فرعی و کارگران به‌دلیل همکاری‌های کوتاه‌مدت و پروژه‌ای؛
 - وجود نداشتن ارزیابی مناسب برای عملکرد طرف‌های مختلف زنجیره تأمین.
- کریمی (۱۳۹۴)، ضمن اشاره به ماهیت موقتی بودن زنجیره تأمین پروژه‌های ساخت‌وساز، چالش‌ها و مسائل صنعت ساخت‌وساز را در ایران بررسی و به آنها اشاره کرده است. این موارد به شرح زیرند:
- نبود یکپارچگی اعضای زنجیره تأمین پروژه در صنعت ساخت؛
 - شفاف‌سازی نکردن نیازمندی‌های کارفرمایان و وظایف و تعاملات بین هریک از اعضا؛
 - خواب سرمایه به‌دلیل مدیریت نکردن صحیح جریان‌های اطلاعات و مواد در زنجیره تأمین ساخت؛
 - نبود امکان برنامه‌ریزی بلندمدت.

همان‌طور که شرح داده شد و در تحقیقات متعدد اشاره شده نیز بیان شد، ماهیت موقتی پروژه‌های ساخت‌وساز باعث ایجاد تفاوت‌هایی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز نسبت به زنجیره تأمین صنایع تولیدی شده و مشکلاتی از جمله ایجاد نشدن هماهنگی و همکاری طولانی و برنامه‌ریزی بلندمدت را در زنجیره تأمین ساخت‌وساز ایجاد کرده است.

۳- پیشینه پژوهش

کاربرد زنجیره تأمین در صنعت ساخت‌وساز، موضوع نسبتاً جدیدی است. صنعت احداث به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود: ساختمان، طراحی جاده‌ها و پل‌ها و سازه‌های عظیم و در نهایت سازه‌های تجاری خاص. دسته‌بندی اول، خود به دو بخش اصلی مسکونی و غیرمسکونی تقسیم می‌شود. همچنین روابط موجود در صنعت احداث، در دو سطح پروژه و سازمان بررسی می‌شود؛ زیرا هزینه مواد و تجهیزات در صنعت احداث، بین ۵۰ تا ۶۰ درصد کل

هزینه‌ها را شامل می‌شود، بیشترین تمرکز در صنعت احداث نیز، بر مدیریت ارتباط با تأمین‌کنندگان بوده است. بسیاری واژه مذکور را مترادف با مدیریت تدارکات می‌دانند و آن را بخشی از فرایندهای مدیریت زنجیره تأمین در نظر می‌گیرند (کریمی، ۱۳۹۴).

ژو و همکاران^۴ (۲۰۰۷)، یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی را برای برنامه‌ریزی مشارکتی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز ارائه کرده‌اند. در این مسئله بهینه‌سازی، هدف حداکثرکردن سود بوده و متغیرهای زمان ساخت و زمان تحویل کالا نیز، در نظر گرفته شده است. لایه‌های زنجیره تأمین مفروض مقاله، شامل پیمانکار اصلی، پیمانکار فرعی و تأمین‌کننده است. جیان-هوا و وان^۵ (۲۰۱۰) یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی را برای مسئله موازنه زمان و هزینه در زنجیره تأمین ساخت‌وساز بررسی کرده‌اند. در این مقاله، هدف بهینه‌سازی، حداکثرکردن سود طرفین قرارداد، با در نظر گرفتن مدت پروژه و واحد پول در واحد زمان بود. ژو و همکاران^۶ (۲۰۱۶) بهینه‌سازی مدلی را برای حداقل کردن هزینه موجودی ایمنی و هزینه فشردگی اجرای پروژه (هزینه‌های تأخیر تحویل مواد) را برای پروژه‌های تکراری با تأخیرهای تصادفی تحویل مواد ارائه کردند. در این مقاله، ساختار مفروض مدل‌سازی شده هر پروژه، شامل چند فعالیت است که هر فعالیت نیز، زنجیره تأمین مواد و مصالح ویژه خود را دارد. سو و همکاران^۷ (۲۰۱۸) مدل بهینه‌سازی را برای حداقل کردن هزینه‌های موجودی و تکمیل پروژه‌های ساخت‌وساز مدولار ارائه کرده‌اند که شامل هزینه‌های حمل و نقل، مونتاژ، موجودی و هزینه‌های جریمه عدم قطعیت است. در این مقاله، ساختار زنجیره تأمین مفروض شامل تولیدکننده، انبار و محل ساخت‌وساز است. فنگ و همکاران^۸ (۲۰۱۸) به استفاده از راه‌حل متعادل برای حل تعارضات ذاتی بین تصمیم‌گیرندگان زنجیره تأمین ساخت‌وساز روی آوردند. هدف بهینه‌سازی، حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی کل، حداقل‌رسانی هزینه‌های حمل و نقل و حداکثرکردن میزان رضایت بوده است. ساختار زنجیره تأمین مفروض شامل بخش تولید و بخش توزیع است. متغیرها شامل طرح توزیع بهینه مواد بخش ساخت و ساز (در سطح بالا) و برنامه تولید بهینه بخش بهره‌برداری (در سطح پایین) برای پروژه بزرگ ساخت نیروگاه برق آبی است. گلپیرا^۹ (۲۰۲۰) یکپارچگی بهینه مسئله مکان تسهیلات در زنجیره تأمین ساخت‌وساز چند پروژه‌ای، چند تأمین‌کننده و چند منبع چند منظوره را تحت استراتژی موجودی مدیریت شده از سوی فروشنده ارائه کرده است. هدف حداقل کردن هزینه کل با توجه به هزینه‌های قرارداد، هزینه‌های موجودی و پیش‌پرداخت، هزینه‌های حمل و نقل، هزینه‌های موقعیت تسهیلات و جریمه دیرکرد تحویل پروژه بود. در این تحقیق، ساختار زنجیره تأمین شامل تأمین‌کننده، انبار موقت، محل پیش‌پرداخت و محل تقاضا (محل پروژه) است. در این مقاله، متغیرها شامل مقادیر منابع انتقال داده شده از تأمین‌کنندگان به تسهیلات موقت و از تسهیلات موقت به نقاط تقاضاست. تصمیمات به انتخاب تأمین‌کننده و اختصاص تسهیلات موقت به مکان‌های کاندید مربوط است. المغرابی و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۰) مسئله برنامه‌ریزی مشترک پروژه‌های ساخت‌وساز را با هدف حداقل کردن هزینه کل ساخت‌وساز پروژه‌ها شامل هزینه تولید، سفارش‌دهی، فعالیت‌های ساخت‌وساز، حمل و نقل، موجودی، جریمه و پاداش دیرکرد یا تکمیل زود پروژه‌ها را مدل‌سازی و بهینه کرده‌اند. ساختار زنجیره تأمین مفروض شامل تولیدکننده، انبار و پروژه‌های مستقل (پیمانکار) است. کوتسوکوستا و کاتساونویس^{۱۱} (۲۰۲۰) مدل برنامه‌ریزی خطی چند دوره‌ای، مختلط و پویا را برای به حداقل رساندن هزینه زنجیره تأمین ساخت‌وساز چند سایته و چند محصوله ارائه کردند. هدف حداقل کردن هزینه‌ها و هزینه موجودی است. ساختار زنجیره تأمین مفروض شامل سه لایه

تأمین‌کننده، انبار (مرکز لجستیک) و محل پروژه است. محمدنظری و قنادپور^{۱۲} (۲۰۲۱) مدلی را برای بهینه‌سازی در مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز، با کانون توجه به بهینه‌سازی موجودی در شرایط عدم قطعیت ارائه کرده‌اند. هدف مدل حداقل کردن هزینه کل شامل هزینه خرید مواد، هزینه فرصت نگهداری موجودی، هزینه انبار، سفارش و همچنین هزینه خارجی گرمایش زمین است که در انتخاب تأمین‌کننده تأثیر دارد. ساختار زنجیره تأمین مفروض شامل تأمین‌کننده، انبار جانبی و محل ذخیره پروژه است.

جدول ۱. مروری بر ویژگی‌های اصلی پیشینه موضوع به‌همراه نوآوری‌های این تحقیق را ارائه می‌دهد.

جدول ۱- مروری بر پیشینه موضوع و مؤلفه‌های اصلی زنجیره تأمین ساخت‌وساز
Table 1- The literature review and main features on construction supply chain

مقاله	تعداد لایه	طراح	نیروی انسانی	انبار میانی	نقشه‌ها و مدارک فنی	محل ساخت‌وساز	پیمانکار
ژو و همکاران (۲۰۰۷)	۳					✓	
جیان-هوا و وان (۲۰۱۰)	۲						✓
زو و همکاران (۲۰۱۶)	۴			✓		✓	
سو و همکاران (۲۰۱۸)	۳			✓		✓	
فنگ و همکاران (۲۰۱۸)	۲					✓	
لی و همکاران ^{۱۳} (۲۰۲۰)	۳			✓		✓	
کوتسوکوستا و کاتسانویس (۲۰۲۰)	۳			✓		✓	
المغربی و همکاران (۲۰۲۰)	۳			✓		✓	
گلیبرا (۲۰۲۰)	۴			✓		✓	
محمدنظری و قنادپور (۲۰۲۱)	۳			✓		✓	
پژوهش حاضر	۴	✓	✓	✓	✓	✓	✓

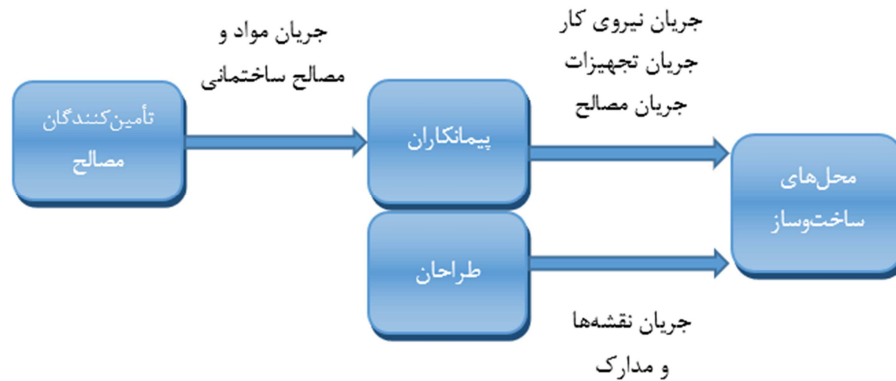
این جدول ویژگی‌های اصلی مقالات را در حوزه‌های تعداد لایه‌های زنجیره، طراح، نیروی انسانی، انبار میانی، نقشه‌ها و مدارک فنی، محل ساخت‌وساز و پیمانکار در نظر می‌گیرد. براساس اطلاعات جدول، همان‌طوریکه مشاهده می‌شود تا به حال پژوهشی در پیشینه در حوزه زنجیره تأمین ساخت‌وساز با در نظر گرفتن طراح، جریان نیروی انسانی و جریان نقشه‌ها و مدارک فنی انجام نشده و با توجه به خلأهای مطالعاتی، هدف از این پژوهش، ارائه مدلی جامع از زنجیره ساخت‌وساز با لحاظ کردن همه جوانب همچون جریان مواد و مصالح موردنیاز، جریان نیروی کار، جریان تجهیزات و ماشین‌آلات موردنیاز، جریان نقشه‌ها و مدارک، طراحان و پیمانکاران است.

۴- روش‌شناسی تحقیق

۴-۱ بیان مسئله و تشریح مدل

همان‌طوری که در بخش قبل مطرح شد، هدف از تحقیق حاضر ارائه مدل جامعی برای مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز است. ساخت‌وساز یکی از صنایع پیشرو در بیشتر اقتصادها و کشورهای دنیا محسوب می‌شود و به این جهت، مدیریت هزینه‌ها و استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی ضرورتی کاربردی و حیاتی است. هزینه بالای صنعت ساخت‌وساز، تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد؛ برای مثال در ایالات متحده، هزینه‌های ساخت‌وساز به‌طور درخور توجهی براساس مکان، محدوده پروژه، مواد و نیروی کار متفاوت است. به‌طور متوسط، هزینه‌های ساخت‌وساز مسکونی بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ دلار در هر فوت مربع متغیر است، در حالی که ساخت‌وساز تجاری بسیار بالاتر از ۲۰۰ تا ۴۰۰ دلار باشد. در ایران نیز این هزینه‌ها براساس منطقه جغرافیایی و دسترسی‌ها و برحسب ماهیت ساختمان متفاوت و گاهی بسیار زیاد است. در دنیا، پروژه‌های در مقیاس بزرگ مانند آسمان‌خراش‌ها یا توسعه زیرساخت‌ها، میلیاردها دلار هزینه دارند. هزینه‌های نیروی کار معمولاً ۴۰ تا ۵۰ درصد از کل هزینه‌های ساخت‌وساز را تشکیل می‌دهد. علاوه بر این، قیمت مواد به‌دلیل شرایط بازار و اختلالات زنجیره تأمین در نوسان است. الزامات قانونی، هزینه‌های تملک زمین و تأخیر در پروژه نیز، به هزینه بالای پروژه‌های ساخت‌وساز کمک می‌کند. در چنین شرایطی، بهینه‌سازی با افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها و بهبود نتایج پروژه، نقش حیاتی در صنعت ساخت‌وساز دارد. مدل حاضر با تابع هدف هزینه‌های جریان مواد، ساخت‌وسازها، خرید مواد اولیه، طراحی‌ها، خرید زمین و ... به دنبال افزایش کارایی مدیریت ساخت‌وسازها در عمل است. از ویژگی‌های اصلی مدل پیشنهادی، جامعیت آن در لحاظ کردن ابعاد کامل‌تری از مسئله برنامه‌ریزی زنجیره تأمین ساخت‌وساز نسبت به پیشینه تحقیق است و بنابراین به این لحاظ مدل تصمیم‌گیری ارائه‌شده از لحاظ ضرورت و کاربرد، کاربردی‌تر و همچنین به واقعیت نزدیک‌تر است. اساساً در نظر گرفتن مفاهیم زنجیره تأمین در صنعت ساخت‌وساز، مقوله نوینی را در پیشینه مدیریت ساخت‌وساز محسوب می‌شود و با توجه به هزینه‌های زیاد در صنعت ساخت‌وساز از یک سو و همچنین مدیریت جزئی‌نگرانه سنتی در عمل به این صنعت از سوی دیگر، ضرورت توسعه مدل‌های همه‌جانبه براساس مفاهیم زنجیره تأمین با جامعیت روابط و لایه‌ها و جریان‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین این تحقیق در راستای پوشش این خلأ تحقیقات بررسی جامع زنجیره صنعت ساخت‌وساز را دنبال می‌کند که در برگیرنده ابعاد جامعی همچون لایه‌های زنجیره، طراحان، پیمانکاران، نیروی انسانی، انبار میانی، نقشه‌ها و مدارک فنی و محل ساخت‌وساز است. شبکه زنجیره تأمین ساخت‌وساز در نظر گرفته شده در این تحقیق همانند شکل ۱، یک شبکه تک‌دوره‌ای است که از محل‌های ساخت‌وساز، طراحان ساختمان، پیمانکاران و تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی تشکیل شده است. در شبکه مفروض، عملیات ساخت‌وساز در محل‌های ساخت‌وساز منتخب انجام می‌شود. حداقل و حداکثر محل‌های ساخت‌وساز معین است. حداقل متراتژ ساخت‌وساز هر محل منتخب، از قبل معین است. همچنین حداکثر ظرفیت متراتژی هر محل ساخت‌وساز از قبل مشخص شده است. هر محل ساخت‌وساز منتخب، فقط یک پیمانکار دارد. زمین محل‌های ساخت‌وساز مختلف قیمت‌های متفاوتی دارد که این موضوع در مدل‌سازی لحاظ شده است. طراحان وظیفه طراحی محل‌های ساخت‌وساز منتخب، تهیه و ارائه مدارک و نقشه‌های مربوط به طراحی را بر عهده

دارند. طبیعتاً مدل‌سازی به‌نحوی انجام گرفته است تا مترائ طراحی هر محل ساخت‌وساز برابر با مترائ ساخت‌وساز در آن محل باشد. پیمانکاران مجری ساخت‌وسازند و مسئولیت هماهنگی و تأمین نیروی کار، تجهیزات، ماشین‌آلات، دریافت مواد و مصالح ساختمانی از تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی را بر عهده دارند. مدل‌سازی به‌نحوی انجام شده است که هر محل ساخت‌وساز، حداکثر یک پیمانکار داشته باشد. حداقل و حداکثر تعداد پیمانکاران کل، از قبل مشخص شده است. تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی نیز، وظیفه تأمین مواد و مصالح ساختمانی مورد نیاز پروژه‌ها را بر عهده دارند. تعداد مواد و مصالح ساختمانی، حداکثر تعداد تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی و همچنین ظرفیت هر یک از آنها از قبل مشخص شده است.



شکل ۱- زنجیره تأمین ساخت‌وساز ارائه شده

Fig. 1- The presented construction supply chain

۲-۴ مدل‌سازی

۱-۲-۴ اندیس‌ها

اندیس تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی	<i>a</i>
اندیس پیمانکاران	<i>c</i>
اندیس محل‌های ساخت‌وساز بالقوه	<i>p</i>
اندیس طراحان	<i>d</i>
اندیس مواد و مصالح ساختمانی	<i>b</i>
اندیس نیروهای کار	<i>h</i>
اندیس تجهیزات و ماشین‌آلات	<i>e</i>

۲-۲-۴ پارامترها

تعداد تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی $a = 1, 2, \dots, A$	<i>A</i>
تعداد پیمانکاران $c = 1, 2, \dots, C$	<i>C</i>
تعداد محل‌های ساخت‌وساز بالقوه $p = 1, 2, \dots, P$	<i>P</i>
تعداد طراحان $d = 1, 2, \dots, D$	<i>D</i>

تعداد مواد و مصالح ساختمانی	$b = 1, 2, \dots, B$	B
تعداد نیروهای کار	$h = 1, 2, \dots, H$	H
تعداد تجهیزات و ماشین‌آلات	$e = 1, 2, \dots, E$	E
هزینه انتقال مواد و مصالح ساختمانی b از تأمین‌کننده a به انبار پروژه پیمانکار c		TC_{ac}^b
هزینه انتقال مواد و مصالح ساختمانی b از انبار پروژه پیمانکار c به محل ساخت‌وساز p		TD_{cp}^b
هزینه انتقال هر نفر روز نیروی کار نوع h پیمانکار c به محل ساخت‌وساز p		TE_{cp}^h
هزینه ثابت قرارداد با تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی a		R_a
هزینه ثابت قرارداد با پیمانکار c		V_c
هزینه ثابت عملیاتی استفاده از انبار پروژه پیمانکار c		U_c
هزینه ثابت قرارداد خرید زمین محل ساخت‌وساز p		Q_p
هزینه خرید هر مترمربع زمین محل ساخت‌وساز p		G_p
هزینه تیم طراح ساخت‌وساز d برای طراحی محل ساخت‌وساز p به ازای هر مترمربع		T_{dp}
هزینه خرید هر واحد مواد و مصالح ساختمانی b از طریق پیمانکار c از تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی a		MC_{ac}^b
هزینه ذخیره‌سازی هر واحد مواد و مصالح ساختمانی b در انبار پروژه پیمانکار c		MP_c^b
هزینه تأمین هر نفر روز نیروی کار نوع h از سوی پیمانکار c		MN_c^h
هزینه تأمین هر عدد روز ماشین‌آلات نوع e از طریق پیمانکار c		MO_c^e
تقاضای متراژ ساخت‌وساز مورد نیاز کل برحسب مترمربع		DG
تقاضای هر نوع مواد و مصالح ساختمانی b در محل ساخت‌وساز p به ازای ساخت هر مترمربع از طریق پیمانکار c		DM_{cp}^b
تقاضای نفر روز نیروی کار نوع h در محل ساخت‌وساز p به ازای ساخت هر مترمربع از سوی پیمانکار c		DH_{cp}^h
تقاضای عدد روز تجهیزات و ماشین‌آلات نوع e در محل ساخت‌وساز p به ازای ساخت هر مترمربع از سوی پیمانکار c		DE_{cp}^e
ظرفیت تأمین مصالح ساختمانی b از سمت تأمین‌کننده مصالح ساختمانی a		SC_a^b
ظرفیت انبار پروژه پیمانکار c		WQ_c
ظرفیت حداکثر متراژ زمین ممکن برای خرید و ساخت‌وساز در محل ساخت‌وساز p		GC_p
حداکثر تعداد تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی		SM
حداکثر تعداد پیمانکاران		CM
حداکثر تعداد محل‌های ساخت‌وساز منتخب		PMA
حداقل تعداد محل‌های ساخت‌وساز منتخب		PMI
حداکثر متراژ ساخت‌وساز محل ساخت‌وساز منتخب p		CMA_p

CMI_p حداقل مترآژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز منتخب p (اگر محل ساخت و ساز p انتخاب شد، حداقل این مترآژ ساخت و ساز انجام شود)

$CMIH_p$ حداقل مترآژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز p (حتماً محل ساخت و ساز p حداقل این مترآژ ساخت و ساز انجام شود)

ρ یک عدد خیلی بزرگ

۴-۲-۳ متغیرهای تصمیم

XS_{ac}^b میزان مواد و مصالح ساختمانی b که از تأمین‌کننده a به انبار پروژه پیمانکار شاغل c منتقل می‌شود

XB_{cp} مترآژ ساخت و ساز در محل ساخت و ساز p از سوی پیمانکار شاغل c

XM_{dp} مترآژ طراحی محل ساخت و ساز p از سمت طراح d

ES_a متغیر صفر و یک، اگر از تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی a خرید انجام شود، در غیر این صورت صفر

EP_c متغیر صفر و یک، اگر پیمانکار c انتخاب شود، در غیر این صورت صفر

GB_p متغیر صفر و یک، اگر در محل ساخت و ساز p زمین خریداری شود، در غیر این صورت صفر

NN_{cp} متغیر صفر و یک، اگر پیمانکار c برای ساخت محل ساخت و ساز p انتخاب شود، در غیر این صورت صفر.

۴-۲-۴ تابع هدف

ابتدا هزینه‌های مختلف تشکیل‌دهنده تابع هدف بررسی می‌شود:

هزینه‌ی انتقال مواد و مصالح ساختمانی از تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی به انبار پروژه پیمانکار:

$$\sum_a \sum_c \sum_b TC_{ac}^b XS_{ac}^b \quad (1)$$

هزینه حمل و نقل مواد و مصالح ساختمانی از تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی به انبار پروژه پیمانکار با پارامتر TC_{ac}^b نمایش داده می‌شود. مجموع مواد و مصالح ساختمانی منتقل شده از تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی به انبار پروژه پیمانکار، با متغیر XS_{ac}^b مدل‌سازی شده است. ضرب هزینه انتقال هر واحد محصول در مقدار محصول منتقل شده، مجموع هزینه انتقال بین تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی و انبار پروژه پیمانکار را بیان می‌کند. برای محاسبه مجموع هزینه جریان بین تمامی تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی و انبار پروژه پیمانکارها، از سه نماد سیگما استفاده شده است.

هزینه انتقال مواد و مصالح ساختمانی از انبار پروژه پیمانکار به محل ساخت و ساز:

$$\sum_c \sum_p \sum_b TD_{cp}^b XB_{cp} DM_{cp}^b \quad (2)$$

هزینه حمل و نقل مواد و مصالح ساختمانی از انبار پروژه پیمانکار به محل ساخت‌وساز با پارامتر TD_{cp}^b نمایش داده می‌شود. مجموع مواد و مصالح ساختمانی منتقل شده از انبار پروژه پیمانکار به محل ساخت‌وساز، برابر است با حاصل ضرب متغیر متراژ ساخت‌وساز در محل ساخت‌وساز p از سوی پیمانکار شاغل c که با متغیر XB_{cp} مدل‌سازی و ضرب در تقاضای هر نوع مواد و مصالح ساختمانی b در محل ساخت‌وساز p به ازای ساخت هر مترمربع از سوی پیمانکار c که با پارامتر DM_{cp}^b نمایش داده می‌شود. ضرب هزینه انتقال هر واحد مواد و مصالح ساختمانی در مقدار مواد و مصالح ساختمانی منتقل شده، مجموع هزینه انتقال بین انبار پروژه پیمانکار و محل ساخت‌وساز را بیان می‌کند. برای محاسبه مجموع هزینه‌ی جریان بین تمامی انبار پروژه پیمانکارها و محل‌های ساخت‌وساز از سه نماد سیگما استفاده شده است.

هزینه انتقال نیروی کار پیمانکاران به محل ساخت‌وساز:

$$\sum_c \sum_p \sum_h TE_{cp}^h XB_{cp} DH_{cp}^h \quad (3)$$

هزینه انتقال هر نفر روز نیروی کار نوع h پیمانکار c به محل ساخت‌وساز p با پارامتر TE_{cp}^h نمایش داده می‌شود. مجموع نیروهای کار منتقل شده پیمانکار به محل ساخت‌وساز، برابر است با حاصل ضرب متغیر متراژ ساخت‌وساز در محل ساخت‌وساز p از سوی پیمانکار شاغل c که با متغیر XB_{cp} مدل‌سازی شده ضرب در تقاضای نفر روز نیروی کار نوع h در محل ساخت‌وساز p به ازای ساخت هر مترمربع از سوی پیمانکار c که با پارامتر DH_{cp}^h نمایش داده می‌شود. ضرب هزینه انتقال هر نفر روز نیروی کار در نفر روز نیروی کار منتقل شده، هزینه انتقال نیروی کار پیمانکاران به محل ساخت‌وساز را بیان می‌کند. برای محاسبه مجموع هزینه انتقال نیروی کار پیمانکاران به محل ساخت‌وساز، از سه نماد سیگما استفاده شده است.

هزینه‌ی ثابت قرارداد با تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی:

$$\sum_a R_a ES_a \quad (4)$$

هزینه قرارداد با تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی a با پارامتر R_a نمایش داده شده است. در صورت قرارداد با تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی مدنظر، متغیر صفر و یک مربوط به آن مقدار یک را اختیار می‌کند و در نتیجه حاصل ضرب متغیر در پارامتر هزینه، هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان را نشان می‌دهد. برای محاسبه مجموع هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان، از نماد سیگما استفاده شده است.

هزینه ثابت قرارداد با پیمانکار:

$$\sum_c V_c EP_c \quad (5)$$

هزینه قرارداد با پیمانکار c با پارامتر V_c نمایش داده شده است. در صورت قرارداد با پیمانکار مدنظر، متغیر صفر و یک مربوط به آن مقدار یک را اختیار می‌کند و در نتیجه حاصل ضرب متغیر در پارامتر هزینه، هزینه قرارداد با پیمانکار را نشان می‌دهد. برای محاسبه مجموع هزینه قرارداد با پیمانکار، از نماد سیگما استفاده شده است.

هزینه ثابت عملیاتی استفاده از انبار پروژه پیمانکار:

$$\sum_c U_c EP_c \quad (6)$$

هزینه ثابت عملیاتی استفاده از انبار پروژه پیمانکار c با پارامتر U_c نمایش داده شده است. در صورت استفاده از انبار پروژه پیمانکار مدنظر، متغیر صفر و یک مربوط به آن مقدار یک را اختیار می‌کند و در نتیجه حاصل ضرب متغیر در پارامتر هزینه، هزینه ثابت عملیاتی را نشان می‌دهد. برای محاسبه مجموع هزینه عملیاتی، از نماد سیگما استفاده شده است.

هزینه ثابت قرارداد خرید زمین محل ساخت و ساز:

$$\sum_p Q_p G B_p \quad (7)$$

هزینه قرارداد خرید محل ساخت و ساز p با پارامتر Q_p نمایش داده شده است. در صورت خرید زمین مدنظر، متغیر صفر و یک مربوط به آن مقدار یک را اختیار می‌کند و در نتیجه حاصل ضرب متغیر در پارامتر هزینه، هزینه قرارداد خرید را نشان می‌دهد. برای محاسبه مجموع هزینه قرارداد خرید زمین محل ساخت و ساز، از نماد سیگما استفاده شده است.

هزینه خرید زمین محل های ساخت و ساز:

$$\sum_c \sum_p G_p X B_{cp} \quad (8)$$

هزینه خرید هر مترمربع زمین محل ساخت و ساز p با پارامتر G_p نمایش داده می‌شود. متراژ زمین خریداری شده در محل ساخت و ساز p برابر با مجموع متراژ ساخت و ساز در محل ساخت و ساز p از سوی همه پیمانکاران شاغل، c است که با متغیر $X B_{cp}$ مدل سازی شده است. حاصل ضرب متغیر در پارامترهای هزینه، هزینه خرید زمین محل های ساخت و ساز را نشان می‌دهد.

هزینه طراحی ساخت و ساز از طریق طراحان ساختمان:

$$\sum_d \sum_p T_{dp} X M_{dp} \quad (9)$$

هزینه طراحی هر مترمربع محل ساخت و ساز p به وسیله طراح d با پارامتر T_{dp} نمایش داده می‌شود. متراژ طراحی محل ساخت و ساز p توسط طراح d ، با متغیر $X M_{dp}$ مدل سازی شده است. حاصل ضرب متغیر در پارامترهای هزینه، حق الزحمه طراحی طراحان محل های ساخت و ساز را نشان می‌دهد.

هزینه خرید مواد و مصالح ساختمانی از سوی پیمانکاران از تأمین کنندگان مواد و مصالح ساختمانی:

$$\sum_a \sum_c \sum_b M C_{ac}^b X S_{ac}^b \quad (10)$$

هزینه خرید هر واحد مواد و مصالح ساختمانی b از تأمین کننده مواد و مصالح ساختمانی a از سوی پیمانکار c با پارامتر $M C_{ac}^b$ نمایش داده می‌شود. مجموع مواد و مصالح ساختمانی خریداری شده از سوی پیمانکار از تأمین کننده، با متغیر $X S_{ac}^b$ مدل سازی شده است. حاصل ضرب متغیر در پارامترهای هزینه، هزینه خریداری مواد و مصالح ساختمانی را از تأمین کننده، به وسیله پیمانکار نشان می‌دهد.

هزینه ذخیره سازی مواد و مصالح ساختمانی در انبار پروژه پیمانکار:

$$\sum_a \sum_c \sum_b M P_c^b X S_{ac}^b \quad (11)$$

هزینه ذخیره‌سازی هر واحد مواد و مصالح ساختمانی b در انبار پروژه پیمانکار c با پارامتر MP_c^b نمایش داده می‌شود. مجموع مواد و مصالح ساختمانی منتقل شده از تأمین‌کننده به انبار، با متغیر XS_{ac}^b مدل‌سازی شده است. حاصل ضرب متغیر در پارامترهای هزینه، هزینه ذخیره‌سازی مواد و مصالح ساختمانی را در انبار نشان می‌دهد. هزینه حق‌الزحمه تأمین نیروهای کار از سوی پیمانکاران:

$$\sum_c \sum_p \sum_h MN_c^h XB_{cp} DH_{cp}^h \quad (12)$$

هزینه تأمین هر نفر روز نیروی کار نوع h از سوی پیمانکار c با پارامتر MN_c^h نمایش داده می‌شود. مجموع نیروهای کار پیمانکار محل ساخت‌وساز، برابر است با حاصل ضرب متغیر متر از ساخت‌وساز در محل ساخت‌وساز p از سوی پیمانکار شاغل c که با متغیر XB_{cp} مدل‌سازی می‌شود، ضرب در تقاضای نفر روز نیروی کار نوع h در محل ساخت‌وساز p به ازای ساخت هر متر مربع از سوی پیمانکار c و با پارامتر DH_{cp}^h نمایش داده می‌شود. ضرب هزینه به‌کارگیری هر نفر روز نیروی کار در نفر روز نیروی کار به‌کارگیری شده، هزینه به‌کارگیری نیروی کار پیمانکاران در محل ساخت‌وساز را بیان می‌کند. برای محاسبه مجموع هزینه به‌کارگیری نیروی کار پیمانکاران در محل ساخت‌وساز از سه نماد سیگما استفاده شده است.

هزینه تأمین تجهیزات و ماشین‌آلات از سوی پیمانکاران:

$$\sum_c \sum_p \sum_e MO_c^e XB_{cp} DE_{cp}^e \quad (13)$$

هزینه تأمین هر عدد روز تجهیزات و ماشین‌آلات نوع e از سوی پیمانکار c با پارامتر MO_c^e نمایش داده می‌شود. مجموع تجهیزات و ماشین‌آلات پیمانکار محل ساخت‌وساز، برابر است با حاصل ضرب متغیر متر از ساخت‌وساز در محل ساخت‌وساز p توسط پیمانکار شاغل c که با متغیر XB_{cp} مدل‌سازی می‌شود، ضرب در تقاضای نفر روز نیروی کار نوع e در محل ساخت‌وساز p به ازای ساخت هر متر مربع توسط پیمانکار c و با پارامتر DE_{cp}^e نمایش داده می‌شود. ضرب هزینه به‌کارگیری هر عدد روز تجهیزات و ماشین‌آلات در عدد روز تجهیزات و ماشین‌آلات به‌کارگیری شده، هزینه به‌کارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات پیمانکاران محل ساخت‌وساز را بیان می‌کند. برای محاسبه مجموع هزینه به‌کارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات پیمانکاران محل ساخت‌وساز، از سه نماد سیگما استفاده شده است.

تابع هدف این تحقیق، حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های این شبکه زنجیره تأمین است که از جمع معادلات (۱) تا

(۱۳) به دست می‌آید. رابطه (۱۴)، تابع هدف مدل پیشنهادی را نمایش می‌دهد:

(۱۴)

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_a \sum_c \sum_b TC_{ac}^b XS_{ac}^b + \\ & \sum_c \sum_p \sum_b TD_{cp}^b XB_{cp} DM_{cp}^b + \sum_c \sum_p \sum_h TE_{cp}^h XB_{cp} DH_{cp}^h + \sum_a R_a ES_a + \sum_c V_c EP_c + \sum_c U_c EP_c + \sum_p Q_p GB_p \\ & - \sum_c \sum_p G_p XB_{cp} + \sum_d \sum_p T_{dp} XM_{dp} + \sum_a \sum_c \sum_b MC_{ac}^b XS_{ac}^b + \sum_a \sum_c \sum_b MP_c^b XS_{ac}^b + \sum_c \sum_p \sum_h MN_c^h XB_{cp} DH_{cp}^h \\ & - \sum_c \sum_p \sum_e MO_c^e XB_{cp} DE_{cp}^e \end{aligned}$$

تابع هدف، هزینه‌های کلی زنجیره تأمین ساخت و ساز را حداقل می‌کند. با توجه به اینکه در پروژه‌های واقعی به‌طور عموم و همچنین پروژه‌های ساخت و ساز (عمرانی) به‌طور خاص، هزینه‌هایی که باید پرداخت شوند، در نهایت برای کارفرما و پیمانکار از لحاظ عدد کل (مبلغ کل) مهم‌اند و یک نوع هزینه خاص، برای مثال هزینه نیروی انسانی در مقابل یک نوع هزینه دیگری، مثل هزینه خرید مواد اولیه، اولویت یا برتری دارند یا هیچ برتری ندارند و همان‌طوری که ذکر شد، مبلغ کل مهم است. بنابراین در این تحقیق با این فرض مدل‌سازی تابع هدف به‌صورت جمع ساده (غیر وزنی) ارائه شد.

۴-۲-۵ محدودیت‌ها

$$\sum_c \sum_p XB_{cp} \geq DG \quad (15)$$

اولین و مهم‌ترین محدودیت در رابطه، با متراژ زیربناست که با رابطه (۱۵) نشان داده می‌شود؛ یعنی مجموع متراژ ساخت و سازهای انجام‌شده پیمانکاران در محل‌های ساخت و ساز، باید بزرگ‌تر یا مساوی متراژ زیربنای مورد نیاز کل برای ساخت و ساز باشد.

$$\sum_d XM_{dp} = \sum_c XB_{cp} \quad \forall p \quad (16)$$

رابطه (۱۶) تضمین می‌کند متراژ ساخت و ساز در هر محل با متراژ طراحی در هر محل برابر باشد. این محدودیت از تفاوت متراژ طراحی انجام‌شده با متراژ ساخت و ساز انجام‌شده، جلوگیری می‌کند.

$$\sum_c XB_{cp} \leq \rho * GB_p \quad \forall p \quad (17)$$

$$\sum_c XB_{cp} \geq GB_p \quad \forall p \quad (18)$$

رابطه (۱۷) نشان می‌دهد ساخت و ساز فقط در محل‌های ساخت و سازی انجام می‌شود که زمین در آنجا خریداری و قرارداد خرید زمین منعقد شده باشد. در صورتی که قرارداد خرید زمین منعقد نشده باشد، ساخت و سازی در آن انجام نمی‌شود. در سمت راست رابطه، اگر متغیر باینری برابر با یک شود، یعنی قرارداد خرید زمین برقرار شده است و سمت راست رابطه، برابر یک عدد بزرگ می‌شود؛ بنابراین تمام متراژ ساخت و سازهایی که در همه محل‌های ساخت و ساز از سوی تمام پیمانکاران انجام می‌گیرد، هر مقدار مثبت است. اما اگر متغیر باینری برابر صفر شود، یعنی زمینی خریداری نشده است و سمت چپ و راست رابطه برابر با صفر می‌شود؛ بنابراین هیچ ساخت و سازی در آن محل انجام نمی‌شود. رابطه (۱۸) مکمل رابطه (۱۷) است و تضمین می‌کند در صورتی که زمینی خریداری شود، حتماً باید ساخت و ساز در آن انجام شود. در صورت وجود نداشتن رابطه (۱۸)، اگر زمین خریداری شود و $GB_p = 1$ نیز اتفاق افتد، در صورتی که $XB_{cp} = 0$ شود، آنگاه زمینی وجود دارد که خریداری شده است، اما هیچ جریان ساخت و سازی در آن محل وجود ندارد.

$$\sum_p XB_{cp} \leq \rho * EP_c \quad \forall c \quad (19)$$

$$\sum_p XB_{cp} \geq EP_c \quad \forall c \quad (20)$$

رابطه (۱۹) نشان می‌دهد ساخت‌وساز، تأمین مواد و مصالح ساختمانی، ذخیره مواد و مصالح ساختمانی، تأمین نیروی کار، تجهیزات و ماشین‌آلات را فقط پیمانکارانی انجام می‌دهند که انتخاب شده‌اند و با آنها قرارداد برقرار شده است. در صورتی که پیمانکاری انتخاب نشده باشد، ساخت‌وسازی از سوی آن پیمانکار انجام نمی‌شود. در سمت راست رابطه، اگر متغیر باینری برابر با یک شود، یعنی قرارداد با پیمانکار برقرار شده است و سمت راست رابطه، برابر یک عدد بزرگ می‌شود؛ بنابراین تمام مترای ساخت‌وسازهایی که در همه محل‌های ساخت‌وساز از طریق پیمانکار انجام می‌گیرد، می‌تواند هر مقدار مثبتی باشد. اما اگر متغیری باینری برابر صفر شود، قرارداد برقرار نشده است و سمت چپ رابطه برابر با صفر می‌شود؛ بنابراین هیچ ساخت‌وسازی از سوی آن پیمانکار انجام نمی‌شود. رابطه (۲۰)، مکمل رابطه (۱۹) است و تضمین می‌کند در صورتی که پیمانکاری انتخاب شود، حتماً باید ساخت‌وساز از سوی او انجام شود. در صورت وجود داشتن رابطه (۲۰)، اگر پیمانکار انتخاب شود و $EP_c = 1$ نیز اتفاق افتد، در صورتی که $XB_{cp} = 0$ شود، آنگاه پیمانکاری وجود دارد که انتخاب شده است، اما هیچ ساخت‌وسازی از سوی آن پیمانکار انجام نمی‌شود.

$$\sum_p XS_{ac}^b \leq \rho * EP_c \quad \forall c \quad (21)$$

$$\sum_p XS_{ac}^b \geq EP_c \quad \forall c \quad (22)$$

رابطه (۲۱) نشان می‌دهد خرید و دریافت مواد و مصالح ساختمانی فقط از طریق پیمانکارانی انجام می‌شود که انتخاب شده‌اند و با آنها قرارداد برقرار شده است. در صورتی که پیمانکاری انتخاب نشده باشد، خرید و دریافت مواد و مصالح ساختمانی از سوی آن پیمانکار انجام نمی‌گیرد. در سمت راست رابطه، اگر متغیر باینری برابر با یک شود، یعنی قرارداد با پیمانکار برقرار شده است و سمت راست رابطه، برابر یک عدد بزرگ می‌شود؛ بنابراین تمام خرید و دریافت مواد و مصالح ساختمانی از طریق آن پیمانکار، باید کوچک‌تر یا مساوی آن عدد بزرگ شود. اما اگر متغیری باینری برابر صفر شود، قرارداد برقرار نشده است و سمت چپ رابطه برابر با صفر می‌شود؛ بنابراین هیچ خرید و دریافت مواد و مصالح ساختمانی از سوی آن پیمانکار انجام نمی‌گیرد. رابطه (۲۲) مکمل رابطه (۲۱) است و تضمین می‌کند در صورتی که پیمانکاری انتخاب شود، حتماً باید خرید و دریافت مواد و مصالح ساختمانی از طریق آن پیمانکار انجام شود. در صورت وجود داشتن رابطه (۲۲)، اگر پیمانکار انتخاب شود و $EP_c = 1$ نیز اتفاق افتد، در صورتی که $XS_{ac}^b = 0$ شود، آنگاه پیمانکاری وجود دارد که انتخاب شده است، اما هیچ خرید و دریافت مواد و مصالح ساختمانی از سوی آن پیمانکار انجام نمی‌شود.

$$\sum_p XS_{ac}^b \leq \rho * EP_c \quad \forall c \quad (23)$$

$$\sum_b \sum_a XS_{ac}^b \leq \rho * EP_c \quad \forall c$$

$$\sum_c \sum_b XS_{ac}^b \leq \rho * ES_a \quad \forall a$$

$$\sum_p XS_{ac}^b \geq EP_c \quad \forall c$$

$$\sum_a \sum_b XS_{ac}^b \geq EP_c \quad \forall c$$

$$\sum_c \sum_b XS_{ac}^b \geq ES_a \quad \forall a \quad (24)$$

رابطه (۲۳) نشان می‌دهد فروش و ارسال مواد و مصالح ساختمانی فقط از سوی تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی انجام می‌شود که انتخاب شده‌اند و با آنها قرارداد برقرار شده است. در صورتی که تأمین‌کننده‌ای انتخاب نشده باشد، فروش و ارسال مواد و مصالح از سوی آن تأمین‌کننده انجام نمی‌گیرد. در سمت راست رابطه، اگر متغیر باینری برابر با یک شود، یعنی قرارداد با تأمین‌کننده برقرار شده است و سمت راست رابطه برابر یک عدد بزرگ می‌شود؛ بنابراین تمام فروش و ارسال مواد و مصالح ساختمانی از سوی آن تأمین‌کننده باید کوچک‌تر یا مساوی آن عدد بزرگ شود. اما اگر متغیری باینری برابر صفر شود، قرارداد برقرار نشده است و سمت چپ رابطه برابر با صفر می‌شود؛ بنابراین هیچ فروش و ارسال مواد و مصالح ساختمانی از سوی آن تأمین‌کننده انجام نمی‌گیرد. رابطه (۲۴) مکمل رابطه (۲۳) است و تضمین می‌کند در صورتی که تأمین‌کننده‌ای انتخاب شود، حتماً باید فروش و ارسال مواد و مصالح ساختمانی از سوی آن تأمین‌کننده انجام شود. در صورت وجود داشتن رابطه (۲۴)، اگر تأمین‌کننده انتخاب شود و $ES_a = 1$ نیز اتفاق افتد، در صورتی که $XS_{ac}^b = 0$ شود، تأمین‌کننده‌ای وجود دارد که انتخاب شده است، اما هیچ فروش و ارسال مواد و مصالح ساختمانی از سوی آن تأمین‌کننده انجام نمی‌شود.

$$\sum_p XB_{cp} DM_{cp}^b = \sum_a XS_{ac}^b \quad \forall b, c \quad (25)$$

رابطه (۲۵) محدودیت تعادل است، تضمین می‌کند که کل تقاضای مواد و مصالح ساختمانی b پروژه‌های محل‌های ساخت‌وساز پیمانکار c با کل مواد و مصالح ساختمانی b برابر است که از همه تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی به انبار پروژه پیمانکار c فرستاده می‌شود.

$$\sum_p \sum_b XB_{cp} DM_{cp}^b \leq WQ_c \quad \forall c \quad (26)$$

محدودیت ظرفیت انبار پروژه پیمانکار با رابطه (۲۶) نشان داده می‌شود. در صورت بازبودن انبار پروژه پیمانکار c ، میزان کل محصولات که در آن ذخیره می‌شود، از ظرفیت انبار پروژه پیمانکار فراتر نمی‌رود؛ یعنی میزان کل محصولات که از هر انبار باز c به تمامی نقاط محل ساخت‌وساز منتقل و با $XB_{cp} DM_{cp}^b$ معین می‌شود، باید کوچک‌تر یا مساوی ظرفیت انبار c یعنی WQ_c باشد.

$$\sum_c XS_{ac}^b \leq SC_a^b \quad \forall a, b \quad (27)$$

محدودیت ظرفیت تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی با رابطه (۲۷) نشان داده می‌شود؛ یعنی به‌ازای ماده b که از هر تأمین‌کننده a برای تمامی انبارهای پروژه پیمانکارهای منتخب تأمین و با نماد XS_{ac}^b نمایش داده می‌شود، باید کوچک‌تر یا مساوی ظرفیت تأمین‌کننده a یعنی SC_a^b باشد.

$$\sum_c XB_{cp} \leq GC_p \quad \forall p \quad (28)$$

محدودیت ظرفیت حداکثر متراژ زمین ممکن برای خرید و ساخت‌وساز در محل ساخت‌وساز p با رابطه (۲۸) نشان داده می‌شود؛ یعنی در این محل، حداکثر این متراژ زمین برای خرید موجود است.

$$\sum_c XB_{cp} \leq CMA_p \quad \forall p \quad (29)$$

محدودیت حداکثر متراژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز منتخب p با رابطه (۲۹) نشان داده می شود. در صورت انتخاب محل ساخت و ساز p متراژ زمینی که خریداری می شود و ساخت و ساز در آن انجام می شود، از حداکثر متراژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز منتخب p فراتر نمی رود؛ یعنی مجموع ساخت و سازی که پیمانکاران انجام می دهند، باید کوچک تر یا مساوی حداکثر متراژ ساخت و ساز در محل ساخت و ساز منتخب p یعنی CMA_p باشد.

$$\sum_c XB_{cp} \geq GB_p CMI_p \quad \forall p \quad (30)$$

محدودیت حداقل متراژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز منتخب p با رابطه (۳۰) نشان داده می شود؛ یعنی اگر محل ساخت و ساز p انتخاب شد، حداقل این متراژ ساخت و ساز انجام شود. در صورت انتخاب محل ساخت و ساز p ، متراژ زمینی که خریداری می شود و ساخت و ساز در آن انجام می شود، از حداقل متراژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز منتخب p کم تر نیست؛ یعنی اگر محل p انتخاب شود، ساخت و سازی که پیمانکاران انجام می دهند، باید بیشتر یا حداقل برابر با حداقل متراژ ساخت و ساز در محل ساخت و ساز منتخب p یعنی CMI_p باشد.

$$\sum_c XB_{cp} \geq CMIH_p \quad \forall p \quad (31)$$

محدودیت حداقل متراژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز p با رابطه (۳۱) نشان داده می شود؛ یعنی حتماً در محل ساخت و ساز p حداقل این متراژ ساخت و ساز انجام شود. ساخت و سازی که پیمانکار انجام می دهد، باید بیشتر یا حداقل برابر با حداقل متراژ ساخت و ساز در محل ساخت و ساز p یعنی $CMIH_p$ باشد. تفاوت این محدودیت با محدودیت قبل، در اجباری بودن حداقل متراژ ساخت و ساز است.

$$XB_{cp} \leq \rho * NN_{cp} \quad \forall c, p \quad (32)$$

$$XB_{cp} \geq NN_{cp} \quad \forall c, p \quad (33)$$

رابطه (۳۲) نشان می دهد که ساخت و ساز فقط در محل های ساخت و ساز پیمانکارانی انجام می شود که برای ساخت آن محل انتخاب شده اند. در صورتی که پیمانکاری برای ساخت و ساز محلی انتخاب نشده باشد، ساخت و ساز در آن محل از سوی آن پیمانکار انجام نمی گیرد. در سمت راست رابطه، اگر متغیر باینری برابر با یک شود، یعنی پیمانکار برای ساخت محل انتخاب شده است؛ بنابراین متراژ ساخت و سازی که در آن محل ساخت و ساز از سوی پیمانکار انجام می گیرد، باید کوچک تر یا مساوی آن عدد بزرگ شود. اما اگر متغیری باینری برابر صفر شود، یعنی پیمانکار برای ساخت محل انتخاب نشده است و سمت چپ رابطه برابر با صفر می شود؛ بنابراین هیچ ساخت و سازی در آن محل از سوی آن پیمانکار انجام نمی شود. رابطه (۳۳) مکمل رابطه (۳۲) است و تضمین می کند در صورتی که پیمانکاری برای ساخت محلی انتخاب شود، حتماً باید ساخت و ساز از سوی آن پیمانکار در آن محل انجام شود. در صورت وجود نداشتن رابطه (۳۳)، اگر پیمانکاری برای ساخت محل ساخت و سازی انتخاب شود و $NN_{cp} = 1$ نیز اتفاق بیفتد، در صورتی که $XB_{cp} = 0$ شود، آنگاه $0 < \rho$ می شود؛ بنابراین پیمانکاری وجود دارد که برای ساخت و ساز در محلی انتخاب شده است، اما هیچ ساخت و سازی در آن محل از سوی آن پیمانکار انجام نمی شود.

$$\sum NN_{cp} \leq 1 \quad \forall p \quad (34)$$

رابطه (۳۴) حداکثر تعداد پیمانکاران هر محل ساخت و ساز را نشان می‌دهد؛ یعنی تعداد پیمانکاران هر محل ساخت و ساز، حداکثر یک پیمانکار است.

$$ES_a = \{0,1\} \quad \forall a \quad (35)$$

$$EP_c = \{0,1\} \quad \forall c$$

$$GB_p = \{0,1\} \quad \forall p$$

$$NN_{cp} = \{0,1\} \quad \forall c, p$$

رابطه (۳۵) تضمین می‌کند که متغیرها باینری‌اند.

$$XS_{ac}^b \geq 0 \quad (36)$$

$$XB_{cp} \geq 0$$

$$XM_{dp} \geq 0$$

رابطه (۳۶) تضمین می‌کند که متغیرها غیرمنفی‌اند.

۵. نمونه محاسباتی

برای بررسی خروجی زنجیره تأمین ساخت و ساز ارائه شده، با عنایت به اینکه تمرکز این مقاله از لحاظ نوآوری بر ویژگی‌های جدید مسئله زنجیره تأمین ساخت و ساز (جدول ۱) و همچنین چالش‌های مدل‌سازی ریاضی آن بوده است، بنابراین در این بخش، مثالی تصادفی در محیط برنامه‌نویسی ایجاد شد. همچنین سعی شده است تا پارامترها در بازه‌هایی تولید شوند که مثال منطقی و دارای هارمونی و هماهنگی باشند. این مثال با ۳ تأمین‌کننده مواد و مصالح ساختمانی، ۳ پیمانکار، ۳ محل ساخت و ساز در نظر گرفته شد. همچنین این مثال ۲ طراح، ۸ نوع مصالح ساختمانی، ۶ نیروی کار و ۳ تجهیز و ماشین دارد و زیربنای مورد نیاز کل برابر ۹۹۰ مترمربع است. مقدار پارامتر ورودی شامل هزینه انتقال و خرید مواد و مصالح ساختمانی از تأمین‌کنندگان به انبارهای پروژه پیمانکاران در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین هزینه و تقاضای مربوط به مواد و مصالح ساختمانی از انبار پروژه پیمانکار به محل ساخت و ساز در جدول ۳ نشان داده شده است. اطلاعات اصلی مربوط به پیمانکار شامل هزینه و تقاضای مورد نیاز در ارتباط با نیروی کار در محل ساخت و ساز، هزینه ثابت قرارداد با پیمانکار، هزینه ثابت عملیاتی استفاده از انبار پروژه پیمانکار و در نهایت ظرفیت انبار پروژه پیمانکار در جدول ۴ نشان داده شده است. جدول ۵ به اطلاعات کلیدی محل ساخت و سازها مربوط است. در جدول ۶ نیز هزینه ذخیره‌سازی هر واحد مصالح در انبار پیمانکار، هزینه تأمین هر نفر روز نیروی کار و هزینه تأمین هر عدد روز تجهیزات از سوی پیمانکار آورده شده است. اطلاعات مربوط به ظرفیت تأمین مصالح از طریق تأمین‌کنندگان و همچنین هزینه ثابت قرارداد با آن تأمین‌کنندگان در جدول ۷ ذکر شده است. در نهایت اطلاعات مربوط به تقاضای تجهیزات و ماشین‌آلات در محل‌های ساخت و ساز به ازای ساخت هر مترمربع از سوی پیمانکاران، به همراه هزینه تیم‌های طراحی در جدول ۸ داده شده‌اند.

جدول ۲- هزینه (انتقال)/(خرید) (میلیون ریال)/(میلیون ریال) مواد و مصالح ساختمانی از تأمین‌کنندگان به انبارهای پروژه پیمانکاران

Table 2- The cost (transportation)/(buy)(Million Rials / Million Rials) of material and building materials from suppliers to subcontractors' project warehouse

مواد و مصالح ساختمانی								پیمانکار	تأمین‌کننده
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
(۲)/(۱)	(۱)/(۲)	(۴)/(۱)	(۲)/(۱)	(۱)/(۱)	(۳)/(۱)	(۳)/(۳)	(۱)/(۲)	۱	
(۲)/(۲)	(۱)/(۵)	(۴)/(۲)	(۱)/(۵)	(۱)/(۳)	(۴)/(۲)	(۲)/(۵)	(۱)/(۳)	۲	۱
(۱)/(۲)	(۱)/(۴)	(۲)/(۲)	(۲)/(۴)	(۱)/(۲)	(۲)/(۲)	(۳)/(۳)	(۱)/(۲)	۳	
(۲)/(۱)	(۱)/(۲)	(۴)/(۲)	(۲)/(۳)	(۱)/(۴)	(۳)/(۳)	(۳)/(۵)	(۱)/(۴)	۱	
(۲)/(۱)	(۱)/(۲)	(۴)/(۱)	(۱)/(۲)	(۱)/(۱)	(۴)/(۱)	(۲)/(۲)	(۱)/(۱)	۲	۲
(۱)/(۳)	(۱)/(۴)	(۲)/(۳)	(۲)/(۴)	(۱)/(۳)	(۲)/(۳)	(۳)/(۴)	(۱)/(۳)	۳	
(۲)/(۳)	(۱)/(۲)	(۴)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۲)/(۳)	(۳)/(۲)	(۱)/(۲)	۱	
(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۴)/(۲)	(۱)/(۱)	(۱)/(۲)	(۳)/(۲)	(۲)/(۱)	(۱)/(۲)	۲	۳
(۱)/(۱)	(۲)/(۲)	(۲)/(۱)	(۲)/(۲)	(۱)/(۱)	(۱)/(۱)	(۳)/(۲)	(۱)/(۱)	۳	

جدول ۳- هزینه (انتقال)/(تقاضا) (میلیون ریال)/(تناژ) مواد و مصالح ساختمانی از انبار پروژه پیمانکار به محل ساخت‌وساز

Table 3- The cost (transportation)/(demand) (Million Rials / Tons) of material and building materials from subcontractors' project warehouse to construction site

مواد و مصالح ساختمانی								پیمانکار	تأمین‌کننده
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
(۱)/(۱)	(۲)/(۲)	(۲)/(۱)	(۱)/(۲)	(۱)/(۱)	(۲)/(۲)	(۲)/(۱)	(۳)/(۱)	۱	
(۱)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۱)	(۱)/(۳)	(۱)/(۲)	(۲)/(۱)	(۲)/(۴)	(۳)/(۲)	۲	۱
(۱)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۱)	(۱)/(۲)	(۱)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۳)	(۳)/(۱)	۳	
(۱)/(۳)	(۲)/(۵)	(۲)/(۳)	(۱)/(۵)	(۱)/(۳)	(۲)/(۲)	(۲)/(۴)	(۳)/(۳)	۱	
(۱)/(۱)	(۲)/(۲)	(۲)/(۱)	(۱)/(۱)	(۱)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۳)/(۱)	۲	۲
(۱)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۱)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۳)	(۳)/(۲)	۳	
(۱)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۱)	(۱)/(۱)	(۱)/(۱)	(۲)/(۲)	(۲)/(۱)	(۳)/(۲)	۱	
(۱)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۲)	(۱)/(۱)	(۱)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۳)/(۱)	۲	۳
(۱)/(۱)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۱)	(۱)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۳)/(۱)	۳	

جدول ۴- اطلاعات هزینه، تقاضا و ظرفیت مربوط به پیمانکاران

Table 4- The information of cost and capacity related to subcontractors

پیمانکار	محل ساخت‌وساز	هزینه / (تقاضای) نیروی کار (میلیون ریال در روز/ نفر-روز)							هزینه ثابت قراردادی با پیمانکار	هزینه ثابت عملیاتی استفاده از انبار پروژه پیمانکار	ظرفیت انبار پروژه پیمانکار
		۶	۵	۴	۳	۲	۱				
۱ ^{۱۱}	۱	(۳)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۱)/(۱)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	۱۱۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰	
	۲	(۳)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۱)/(۲)	(۲)/(۳)			
	۳	(۳)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۱)/(۲)	(۲)/(۳)			
۱ ^{۱۱}	۲	(۳)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۱)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	۱۰۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰۰	
	۳	(۳)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۱)/(۲)	(۲)/(۳)			
	۱	(۳)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۱)/(۲)	(۲)/(۲)			
۱ ^{۱۱}	۲	(۳)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۱)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	۱۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰	
	۳	(۳)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۱)/(۲)	(۲)/(۳)			
	۱	(۳)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۱)/(۲)	(۲)/(۲)			
۳	۲	(۳)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۲)/(۲)	(۱)/(۲)	(۱)/(۲)	(۲)/(۲)	۱۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰	
	۳	(۳)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۲)/(۱)	(۱)/(۱)	(۱)/(۱)	(۲)/(۲)			

جدول ۵- اطلاعات هزینه و ظرفیت مربوط به محل های ساخت و ساز

Table 5- The information of cost and capacity related to construction sites

زمین محل ساخت و ساز			هزینه ها و ظرفیت ها
۳	۲	۱	
۲۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰۰	هزینه ثابت قرارداد خرید زمین محل ساخت و ساز
۲۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰۰	هزینه خرید هر مترمربع زمین محل ساخت و ساز
۱۰۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰	ظرفیت حداکثر متراژ زمین ممکن برای خرید و ساخت و ساز در محل ساخت و ساز
۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	حداکثر متراژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز منتخب
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	حداقل متراژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز منتخب
۰	۰	۰	حداقل متراژ ساخت و ساز محل ساخت و ساز

جدول ۶- هزینه ذخیره سازی هر واحد مصالح در انبار پیمانکار، هزینه تأمین هر نفر روز نیروی کار و هزینه تأمین هر عدد روز تجهیزات توسط

پیمانکار

Table 6- The cost of storage per a unit of material in subcontractor's warehouse, the cost of work force per a person-day, and the cost of machines per number-day by subcontractor

ماشین آلات (میلیون ریال در روز)	نیروی کار (میلیون ریال در روز)									مواد و مصالح ساختمانی (میلیون ریال در روز)								
	۳	۲	۱	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۳۰	۵	۱	۱۰	۱۰۰	۱۰	۵۰	۳۰	۱۵	۱۵	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۱	
۲۹	۴	۱	۱۰	۹۵	۱۱	۵۰	۳۲	۱۵	۱۵	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۱	
۳۱	۶	۱	۱۰	۹۰	۱۰	۴۹	۲۸	۱۶	۱۶	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۱	

جدول ۷- اطلاعات مربوط به ظرفیت تأمین کنندگان مواد و مصالح و هزینه ثابت قرارداد با آنها

Table 7- The information related to capacity of suppliers of materials and the fixed cost of contract with them

هزینه ثابت قرارداد با تأمین کننده مواد و مصالح ساختمانی	مصالح ساختمانی (تناژ)									تأمین کننده مصالح ساختمانی
	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۲۰۰۰۰۰	۶*۱۰ ^۶	۱*۱۰ ^۶	۲*۱۰ ^۶	۲*۱۰ ^۶	۱*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۱
۲۵۰۰۰۰	۶*۱۰ ^۶	۱*۱۰ ^۶	۴*۱۰ ^۶	۱*۱۰ ^۶	۲*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۲
۱۹۰۰۰۰	۱*۱۰ ^۶	۱*۱۰ ^۶	۲*۱۰ ^۶	۱*۱۰ ^۶	۲*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۹*۱۰ ^۶	۳

جدول ۸ اطلاعات مربوط به تقاضای تجهیزات و ماشین آلات در هر محل ساخت و ساز به ازای ساخت هر مترمربع از سوی هر پیمانکار و هزینه

تیم طراحی

Table 8- The information related to demand for equipment and machines in construction site per a squared meter construction by subcontractor and the cost of design

تجهیزات و ماشین آلات	محل ساخت و ساز			پیمانکار
	۳	۲	۱	
	۱	۱	۱	۱
	۴	۴	۴	۲
	۲	۲	۳	۳
	۱	۱	۱	۱
	۴	۴	۴	۲

تجهیزات و ماشین‌آلات	پیمانکار	محل ساخت‌وساز		
		۱	۲	۳
	۳	۳	۲	۲
	۱	۱	۱	۱
۳	۲	۴	۴	۴
	۳	۳	۲	۲
هزینه تیم طراحی (میلیون ریال در روز)	۱	۱۲۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰
	۲	۱۱۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰

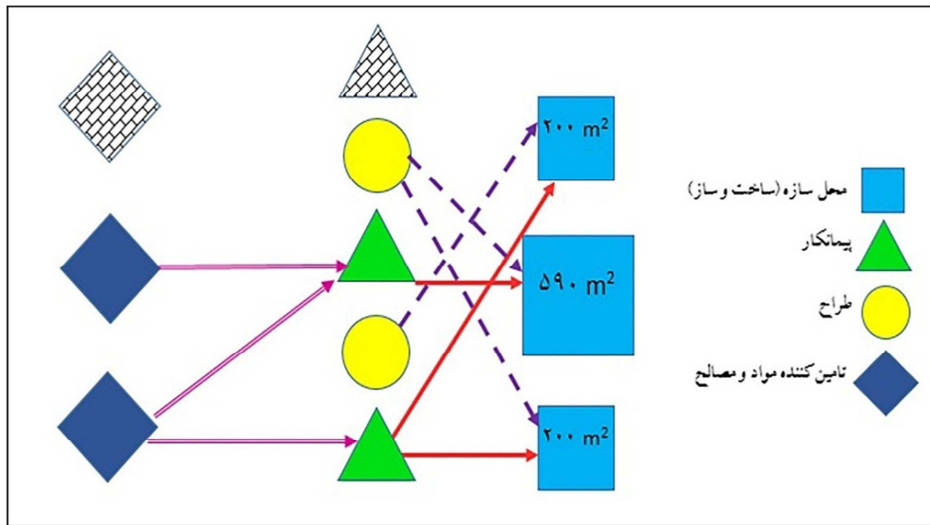
۶- نتایج

پس از حل مدل جامع ساخت‌وساز ارائه‌شده در این مقاله با نرم‌افزار GAMS، نتایج مربوط به متغیرهای بهینه به شرح زیر به دست آمد: هر سه محل ساخت‌وساز فعال شد و از بین سه پیمانکار، پیمانکاران دوم و سوم انتخاب شدند که نحوه تخصیص پیمانکاران به محل‌های ساخت‌وساز به این گونه است که محل ساخت‌وساز شماره ۲ به پیمانکار دوم و محل ساخت‌وساز شماره‌های ۱ و ۳ به پیمانکار سوم تخصیص یافت. متراژ ساخت‌وساز در حالت بهینه برای پیمانکار دوم در محل ساخت‌وساز شماره ۲ برابر با ۵۹۰ مترمربع و برای پیمانکار سوم برای محل‌های شماره ۱ و ۳ به ترتیب برابر با ۲۰۰ و ۲۰۰ مترمربع است. همچنین ۵۹۰ مترمربع و ۲۰۰ مترمربع محل‌های ساخت‌وساز به ترتیب شماره ۲ و ۳ با طراح شماره ۱ و ۲۰۰ مترمربع محل شماره ۱ توسط طراح شماره ۲ انجام می‌شود. در جواب بهینه مدل، تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی شماره‌های ۲ و ۳ انتخاب می‌شوند. میزان مواد و مصالح تأمین‌شده از سوی تأمین‌کنندگان به‌طرف پیمانکاران، در حالت بهینه مطابق جدول ۹ است. شکل ۲ نیز جواب بهینه را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود تابع هدف حداقل هزینه کل ساخت‌وساز معادل ۲۰۰۷۵۱۲۲۱۰ می‌شود. تطابق پاسخ و خروجی‌های مدل با یکدیگر و با پارامترهای ورودی، مؤید صحت مدل است.

جدول ۹- مواد و مصالح انتقال‌یافته از تأمین‌کنندگان به پیمانکاران در حالت بهینه

Table 9- The transferred material from suppliers to subcontractors in optimal state

تأمین‌کننده	پیمانکار	مواد و مصالح ساختمانی					
		۱	۲	۳	۴	۵	۶
۲	۲	۱۷۷۰	۰	۱۱۸۰	۵۹۰	۰	۱۱۸۰
۳	۲	۰	۱۱۸۰	۰	۰	۵۹۰	۱۱۸۰
	۳	۱۲۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۸۰۰



شکل ۲- پیکره‌بندی بهینه زنجیره تأمین به دست آمده در نمونه ذکر شده

Fig. 2- The optimal topology of achieved supply chain in mentioned case

۷- بحث

در این بخش، حساسیت و آنالیز خروجی‌های مدل بررسی خواهد شد. در تحلیل حساسیت، هر پارامتر در بازه بین ۵۰٪- تا ۵۰٪ تغییر داده می‌شود. این پارامترها به چهار دسته هزینه‌های انتقال، هزینه‌های ثابت، تقاضاها و ظرفیت‌ها تقسیم شده‌اند و شامل موارد زیرند:

هزینه‌های انتقال

- هزینه انتقال مواد و مصالح ساختمانی از تأمین‌کنندگان به انبار پروژه پیمانکاران؛
- هزینه انتقال مواد و مصالح ساختمانی از انبار پروژه پیمانکاران به محل‌های ساخت‌وساز؛
- هزینه انتقال هر نفر روز نیروی کار پیمانکاران به محل‌های ساخت‌وساز.

هزینه‌های ثابت

- هزینه ثابت قرارداد با تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی؛
- هزینه ثابت قرارداد با پیمانکاران؛
- هزینه ثابت عملیاتی استفاده از انبار پروژه پیمانکاران؛
- هزینه ثابت قرارداد خرید زمین محل‌های ساخت‌وساز.

تقاضاها

- تقاضای مترای ساخت‌وساز مورد نیاز کل؛
- تقاضای مواد و مصالح ساختمانی در محل‌های ساخت‌وساز از سوی پیمانکاران؛
- تقاضای نیروی کار در محل‌های ساخت‌وساز از سوی پیمانکاران؛
- تقاضای تجهیزات و ماشین‌آلات در محل‌های ساخت‌وساز از سوی پیمانکاران.

ظرفیت‌ها

- ظرفیت تأمین مصالح ساختمانی از سوی تأمین‌کنندگان؛

• ظرفیت انبار پروژه پیمانکاران؛

• ظرفیت زمین ممکن برای خرید و ساخت‌وساز در محل‌های ساخت‌وساز.

در انتها میزان تأثیر تغییرات پارامترها بر تابع هدف مثال اجرا شده با نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز، در جدول ۱۰ ارائه می‌شود. همچنین روند تغییرات تابع هزینه بر حسب نوسانات این چهار دسته از پارامترها، در قالب دو نمودار (شکل‌های ۳ و ۴) نمایش داده شد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، اثر تغییرات هزینه بهینه نسبت به هر چهار دسته از پارامترها (هزینه‌های انتقال و ثابت، تقاضاها و ظرفیت) مستقیم و صعودی است. همچنین برای تعیین میزان حساسیت هزینه به این چهار پارامتر، از شیب تقریبی خط‌ها به صورت زیر استفاده می‌شود.

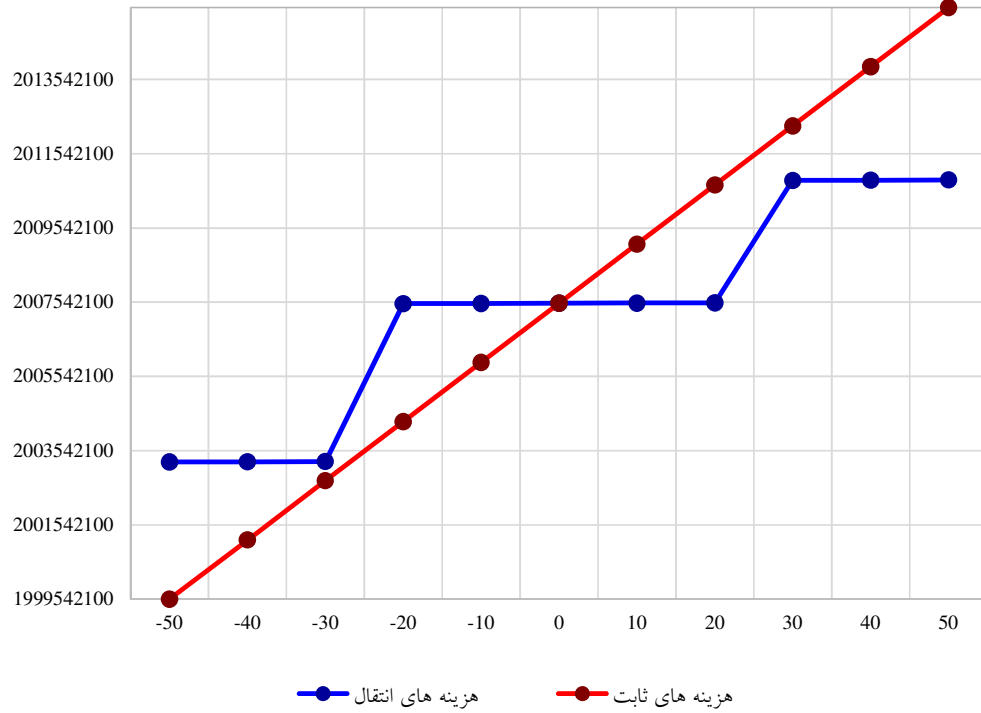
$$\frac{\text{Total cost (50\%)} - \text{Total cost (-50\%)}}{100} \quad (37)$$

این رابطه همان شیب تقریبی خط است که از تغییرات تابع هدف به ازای دو مقدار ۵۰ درصد و منفی ۵۰ درصد (محور عمودی) تقسیم بر اختلاف ۵۰ درصد و منفی ۵۰ درصد، یعنی ۱۰۰ (محور عمودی) به دست می‌آید که تقریبی خطی از میزان حساسیت تابع هزینه به پارامترهاست. پس از محاسبه، مقادیر حساسیت برای پارامتر هزینه‌های انتقال ۷۵۹۷۷٫۸، برای هزینه‌های ثابت ۱۵۹۴۰۰، برای تقاضاها ۹۸۳۶۴۴۰٫۲۲ و برای ظرفیت‌ها ۱۹۹۰۰۰۰۰ به دست آمده است که نشان‌دهنده بیشترین حساسیت برای ظرفیت‌ها و کمترین حساسیت برای هزینه‌های انتقال بر تابع هزینه کل است.

جدول ۱۰- تحلیل حساسیت بر چهار دسته از پارامترهای هزینه انتقال، هزینه ثابت، تقاضا و ظرفیت

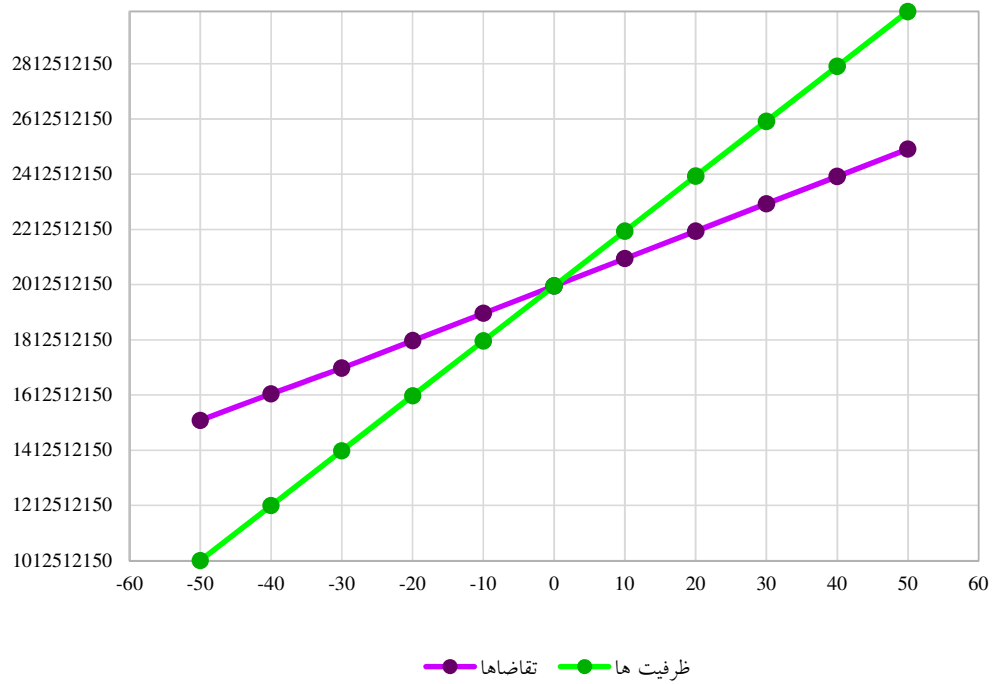
Table 10- Sensitivity analysis on transferring cost, fixed cost, demand and capacity

ظرفیت‌ها	پارامترهای ورودی			ضریب تغییرات
	تقاضاها	هزینه‌های ثابت	هزینه‌های انتقال	
۱۰۱۲۵۱۲۲۱۰	۱۵۲۰۰۳۴۸۰۰	۱۹۹۹۵۴۲۲۱۰	۲۰۰۳۲۳۸۰۲۵	-۵۰٪
۱۲۱۱۵۱۲۲۱۰	۱۶۱۶۷۶۵۱۶۰	۲۰۰۱۱۳۶۲۱۰	۲۰۰۳۲۴۳۶۸۸	-۴۰٪
۱۴۱۰۵۱۲۲۱۰	۱۷۰۹۹۳۰۸۰۴	۲۰۰۲۷۳۰۲۱۰	۲۰۰۳۲۴۹۳۵۱	-۳۰٪
۱۶۰۹۵۱۲۲۱۰	۱۸۰۹۱۱۴۷۲۶	۲۰۰۴۳۲۴۲۱۰	۲۰۰۷۵۰۲۵۳۶	-۲۰٪
۱۸۰۸۵۱۲۲۱۰	۱۹۰۸۳۰۸۵۲۸	۲۰۰۵۹۱۸۲۱۰	۲۰۰۷۵۰۷۳۷۳	-۱۰٪
۲۰۰۷۵۱۲۲۱۰	۲۰۰۷۵۱۲۲۱۰	۲۰۰۷۵۱۲۲۱۰	۲۰۰۷۵۱۲۲۱۰	٪۰
۲۲۰۶۵۱۲۲۱۰	۲۱۰۶۷۲۵۷۷۲	۲۰۰۹۱۰۶۲۱۰	۲۰۰۷۵۱۶۹۲۹	٪۱۰
۲۴۰۵۵۱۲۲۱۰	۲۲۰۵۹۴۹۲۱۴	۲۰۱۰۷۰۰۲۱۰	۲۰۰۷۵۲۱۶۴۸	٪۲۰
۲۶۰۴۵۱۲۲۱۰	۲۳۰۵۱۸۲۵۳۶	۲۰۱۲۲۹۴۲۱۰	۲۰۱۰۸۲۶۷۶۷	٪۳۰
۲۸۰۳۵۱۲۲۱۰	۲۴۰۴۴۲۵۷۳۹	۲۰۱۳۸۸۸۲۱۰	۲۰۱۰۸۳۱۲۸۶	٪۴۰
۳۰۰۲۵۱۲۲۱۰	۲۵۰۳۶۷۸۸۲۲	۲۰۱۵۴۸۲۲۱۰	۲۰۱۰۸۳۵۸۰۵	٪۵۰



شکل ۳- نمودار روند تحلیل حساسیت نسبت به هزینه های انتقال و ثابت

Fig. 3- Trend chart for sensitivity analysis of transferring and fixed costs



شکل ۴- نمودار روند تحلیل حساسیت نسبت به تقاضا و ظرفیت

Fig. 4- Trend chart for sensitivity analysis of demand and capacity

با توجه به اینکه روش حل ما دقیق و با استفاده از نرم‌افزار Gams است، جواب بهینه سراسری محاسبه شده است که درم قایسه با هر روش دیگر برتری خواهد داشت. درباره کارایی روش و زمان حل، چون روش مشابهی برای مدل پیشنهادی در این تحقیق از سوی دیگران توسعه داده نشده است تا بتوانیم چیزی را با آنها مقایسه کنیم، بنابراین زمان حل تمام اجراها (مثال اصلی به‌همراه تحلیل حساسیت‌ها) ثبت شد و ماکزیموم زمان حل حدود ۵ ثانیه به دست آمد.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل زنجیره تأمین ساخت‌وساز با در نظر گرفتن تمام عناصر مهم دخیل در فرایند ساخت‌وساز، یعنی پیمانکاران، طراحان، تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی و همچنین سه جریان مهم و اساسی در صنعت ساخت‌وساز، یعنی جریان نیروی انسانی، جریان تجهیزات و ماشین‌آلات و جریان مواد و مصالح ساختمانی ارائه شد. تمام اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌ها معرفی و تشریح شدند و مدل پیشنهادی نیز، ارائه شد. همان‌طور که متوجه شدیم، مدل زنجیره تأمین ساخت‌وساز ارائه‌شده، حداقل هزینه کل ساخت‌وساز را به‌دست آورد و همچنین متراژ ساخت‌وساز پیمانکاران در مکان‌های ساخت‌وساز بالقوه، تأمین‌کنندگان مواد و مصالح ساختمانی، طراحان و دیگر متغیرهای ساخت‌وساز نیز به دست آورده شد. از ویژگی‌های اصلی مدل‌سازی ارائه‌شده که در تحقیقات قبلی مشابه نداشته است، عبارت‌اند از:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| ➤ متغیرهای تصمیم جدید | ➤ پارامترهای جدید |
| • متراژ ساخت‌وساز در محل ساخت‌وساز؛ | • تعداد پیمانکاران؛ |
| • متراژ طراحی محل ساخت‌وساز؛ | • تعداد محل‌های ساخت‌وساز بالقوه؛ |
| • انتخاب پیمانکاران؛ | • تعداد طراحان؛ |
| • خرید زمین محل ساخت‌وساز. | • هزینه انتقال هر نفر روز نیروی کار؛ |
| | • هزینه ثابت قرارداد با پیمانکار؛ |
| | • هزینه خرید زمین محل ساخت‌وساز؛ |
| | • هزینه تیم طراح ساخت‌وساز؛ |
| | • تقاضای متراژ ساخت‌وساز. |
| ➤ محدودیت‌های جدید | ➤ هزینه‌های جدید در تابع هدف |
| • محدودیت قرارداد با پیمانکاران منتخب؛ | • هزینه‌های قرارداد با پیمانکاران؛ |
| • محدودیت قرارداد با طراحان منتخب؛ | • هزینه‌های خرید زمین؛ |
| • محدودیت ظرفیت پیمانکاران؛ | • هزینه‌های طراحی. |
| • محدودیت حداکثر متراژ خرید زمین؛ | ➤ |
| • محدودیت تعداد پیمانکاران و طراحان در دسترس | |

تحقیق حاضر تحت تأثیر محدودیت‌هایی همچون دسترسی به داده‌های واقعی و نبود امکان دسترسی به یک مطالعه موردی بوده است؛ زیرا مسئله طراحی زنجیره تأمین ساخت‌وساز، ابعاد وسیعی داشته است و به دسترسی به تمام ابعاد زنجیره صنعت ساخت‌وساز از بالادست تا پایین دست زنجیره نیاز دارد. برای پیشنهاد‌های مدیریتی، به لزوم به‌کارگیری اصول بهینه‌سازی و مدیریت زنجیره تأمین، به‌عنوان یک رویکرد و پارادایم جدید مدیریتی، در صنعت ساخت‌وساز اشاره می‌شود؛ به‌ویژه که در این صنعت به دلیل ماهیت و ابعاد گسترده‌ای که وجود دارد، حجم هزینه‌ها و بودجه بالاست و بهبود هرچند اندک در هزینه‌ها، به افزایش کارایی درخور توجهی برای صنایع مختلف و کشور منجر خواهد شد. با عنایت به بهینه‌سازی هزینه حاصل‌شده در این تحقیق، توصیه می‌شود مدیران صنعت ساخت‌وساز از تکنیک‌های بهینه‌سازی برای کاهش موثر هزینه‌ها با تخصیص مناسب منابع و افزایش کارایی استفاده کنند. مدیران با استفاده از ابزارهایی مانند برنامه‌ریزی خطی، فرصت‌های صرفه‌جویی در هزینه را شناسایی و استفاده از پیمانکاران، طراحان و مواد اولیه را بهینه می‌کنند. این رویکرد نه تنها سودآوری پروژه را افزایش می‌دهد، فرآیندهای تصمیم‌گیری بهتر را تقویت می‌کند و در نهایت به بهبود رقابت‌پذیری و رشد پایدار در بخش ساخت‌وساز منجر می‌شود. همچنین ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز با نظارت مستمر و به‌روزرسانی نتایج تحلیل حساسیت هزینه‌ها، تصمیم‌گیری فعال و پاسخ‌های چابک به نوسانات بازار را فعال می‌کنند. براساس نتایج حاصل‌شده، ظرفیت‌ها، تقاضاها، هزینه‌های ثابت و هزینه‌های انتقال به ترتیب جزء مؤثرترین پارامترهای مدیریت ساخت‌وساز بوده که تأثیر مستقیم بر هزینه کل و بودجه ساخت‌وساز دارند. بنابراین توصیه می‌شود مدیران صنعت ساخت‌وساز در راستای مدیریت بهینه بودجه، نظارت و کنترل مستقیمی بر این پارامترها داشته باشند و اولویت خود و تیم پروژه را بر این اجزا متمرکز کنند. درک اینکه چگونه تغییرات در هزینه‌های ورودی بر هزینه‌های کلی پروژه تأثیر می‌گذارد، به مدیران کمک می‌کند تا با افزایش کارایی، رقابت‌پذیری خود را در صنعت ساخت‌وساز افزایش دهند.

برای تحقیقات آتی، موارد زیر را برای گسترش این پژوهش ذکر می‌شود:

- زنجیره تأمین متقاطع چند دوره‌ای و تأثیر بهینه‌سازی توأمان و یکپارچه زنجیره تأمین‌ها برای بهبود اهداف به‌صورت مفصل مدل‌سازی، بررسی و ارائه شود؛
- تصمیمات مرتبط با حمل و نقل مانند انتخاب حالت‌ها و ادغام حمل و نقل مصالح ساختمانی؛
- در نظر گیری اقتصاد مقیاس تأمین مواد و مصالح ساختمانی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز؛
- در نظر گرفتن پیچیدگی‌های مدیریتی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز و اقتصاد مقیاس؛
- توسعه مدل زنجیره تأمین ساخت‌وساز از تک دوره‌ای به چند دوره‌ای؛
- تحقیق بر قراردادهای همکاری‌های بلندمدت پیمانکاران و تأمین‌کنندگان مواد و مصالح در زنجیره تأمین ساخت‌وساز؛
- بررسی تأثیرات نوع همکاری و قرارداد شامل مناقصه‌ای، مزایده‌ای و... در زنجیره تأمین ساخت‌وساز و مدل‌سازی انواع قراردادهای در زنجیره تأمین ساخت‌وساز.

References

- Elmughrabi, W., Sassi, O. B., Dao, T. M., & Chabaane, A. (2020). Collaborative supply chain planning and scheduling of construction projects. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10761-10766. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2858>.

- 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*, 157, 52-67. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.05.022>.
- 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, 112841. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112841>.
- Hsu, P. Y., Angeloudis, P., & Aurisicchio, M. (2018). Optimal logistics planning for modular construction using two-stage stochastic programming. *Automation in construction*, 94(C), 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.029>.
- Jian-hua, C., & Wan, T. (2010). Time-cost trade-off problem in construction supply chain: A bi-level programming decision model. *International Conference on Management Science & Engineering 17th Annual Conference Proceedings*, 212-217. <https://doi.org/10.1109/ICMSE.2010.5719807>.
- Karimi, R. (2015). *Design and development of a conceptual model of supply chain management for a case study of Iran's construction industry. PhD thesis*. [Project management and construction. College of Arts and Architecture. Tarbiat Modares University]. [In Persian].
- Koutsokosta, A., & Katsavounis, S. (2020). A Dynamic Multi-Period, Mixed-Integer Linear Programming Model for Cost Minimization of a Three-Echelon, Multi-Site and Multi-Product Construction Supply Chain. *Logistics*, 4(3), 19. <https://doi.org/10.3390/logistics4030019>.
- Le, P. L., Elmughrabi, W., Dao, T. M., & Chaabane, A. (2020). Present focuses and future directions of decision-making in construction supply chain management: a systematic review. *International Journal of Construction Management*, 20(5), 490-509. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1488089>.
- Mohammadnazari, Z., & Ghannadpour, S. F. (2021). Sustainable construction supply chain management with the spotlight of inventory optimization under uncertainty. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 10937-10972.
- Papadopoulos, G. A., Zamer, N., Gayialis, S. P., & Tatsiopoulos, I. P. (2016). Supply chain improvement in construction industry. *Universal Journal of Management*, 4(10), 528-534. <https://doi.org/10.13189/ujm.2016.041002>.
- Serpell, A. & Heredia, B. (2004). *Supply chain management in construction: diagnosis and application issues*. International Symposium on Globalisation and Construction, Bangkok, Thailand.
- Xu, X., Zhao, Y., & Chen, C. Y. (2016). Project-driven supply chains: integrating safety-stock and crashing decisions for recurrent projects. *Annals of Operations Research*, 241(1), 225-247.
- Xue, X., Sun, C., Wang, Y., & Shen, Q. (2007). *A two-level programming method for collaborative scheduling in construction supply chain management*. Lecture Notes in Computer Science, 4674. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74780-2_36.

¹ Karimi

² Papadopoulos et al.

³ Serpell and Heredia

⁴ Xue et al.

⁵ Jian and Wan

⁶ Xu et al.

⁷ Hsu et al.

⁸ Feng et al.

⁹ Golpîra

¹⁰ Elmughrabi et al.

¹¹ Koutsokosta and Katsavounis

¹² Mohammadnazari and Ghannadpour

¹³ Le et al.