



Sustainable Construction Supply Chain Management with Stochastic Material Demand

Samin Arbabi, Heibatollah Sadeghi* , Hêriş Golpîra 

*Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(Received: 26/11/2024, Revised: 22/02/2025, Accepted: 27/08/2025, Published: 21/09/2025)

DOR: 20.1001.1.20089198.1404.27.87.2.6

ABSTRACT

One of the most essential parts of a supply chain is paying attention to sustainability in order to effectively manage the chain. The supply chain in the construction industry, especially in the supply of materials, has recently received attention due to its significant impact on environmental sustainability and community well-being. This study examines the modeling and design of the construction supply chain by considering the dimensions of sustainability (economic, social, and environmental) with the aim of reducing chain costs under conditions of stochastic demand. The construction supply chain network design model considers suppliers, temporary facilities, and project construction centers. Temporary facilities are places for sending material requests to suppliers, receiving materials, and holding and pre-processing materials. The proposed problem is initially designed using a mixed-integer linear programming model, considering parameters such as material demand, carbon emission purchase and sale price, job opportunities created, and chain-related costs, while taking into account problem assumptions. However, since material demand values may face supply probability due to reasons such as construction stoppage at the project site (bad weather, suppliers' inability to supply materials, etc.), the probability demand parameter is considered and modeled using a normal distribution. Finally, the present problem is solved using GAMS software, and sensitivity analysis is performed on key parameters.

Keywords: Stochastic Demand, Sustainability, Supply Chain Management, Construction

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: h.sadeghi@uok.ac.ir

مدیریت زنجیره تأمین ساخت و ساز پایدار با تقاضای احتمالی مصالح

سمین اربابی^۱، هیبت اله صادقی^{۲*}، هیرش گل پیرا^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران ۲- دانشیار گروه مهندسی صنایع، گروه

مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران ۳- دانشیار گروه مهندسی صنایع، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

DOR: 20.1001.1.20089198.1404.27.87.2.6

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴

چکیده

یکی از ضروری ترین بخش ها در یک زنجیره تأمین توجه به بحث پایداری به منظور مدیریت مؤثر زنجیره است. زنجیره تأمین در صنعت ساخت و ساز، به ویژه در تأمین منابع، اخیراً به دلیل تأثیر قابل توجه آن بر پایداری محیط زیست و رفاه جوامع مورد توجه قرار گرفته شده است. در این مطالعه مدل سازی و طراحی زنجیره تأمین ساخت و ساز با در نظر گرفتن ابعاد پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی) و با هدف کاهش هزینه های زنجیره در شرایط احتمالی بودن تقاضا مورد بررسی قرار می گیرد. در این مطالعه یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین ساخت و ساز با در نظر گرفتن تأمین کنندگان، تسهیلات موقت و مراکز احداث پروژه ها در نظر گرفته می شود. منظور از تسهیلات موقت مکان هایی جهت ارسال تقاضا منابع به سمت تأمین کنندگان و سپس دریافت منابع، نگهداری و پیش پردازش منابع است. مسئله پیشنهادی در ابتدا با در نظر داشتن پارامترهایی مانند تقاضا منابع، قیمت خرید و فروش کربن منتشر شده، فرصت های شغلی ایجاد شده و هزینه های مرتبط با زنجیره با در نظر گرفتن مفروضات مسئله با استفاده از یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط طراحی می گردد. اما از آنجایی که مقادیر تقاضا منابع ممکن است به دلایلی از جمله توقف ساخت و ساز در محل پروژه (بدی آب و هوا، بدقولی تأمین کنندگان در تأمین منابع و ...) با احتمال در تأمین مواجه باشد، لذا پارامتر تقاضا احتمالی در نظر گرفته می شود و با استفاده از توزیع نرمال مدل سازی می شود. در پایان، مسئله حاضر توسط نرم افزار گمز حل می گردد و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی صورت می گیرد.

واژه های کلیدی: تقاضا احتمالی، پایداری، مدیریت زنجیره تأمین، ساخت و ساز

۱- مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین در صنعت ساخت و ساز شامل هماهنگی فرآیندهایی مانند تأمین، حمل و نقل، ذخیره سازی و توزیع مواد است. پیچیدگی پروژه های ساختمانی، ناشی از تنوع مواد، ذینفعان متعدد و الزامات متغیر، بر اهمیت یک زنجیره تأمین کارآمد تأکید دارد. بهینه سازی این زنجیره باعث کاهش هزینه ها، افزایش بهره وری و بهبود کیفیت پروژه می شود. همچنین، شناسایی تنگناها و اجرای راهبردهای مناسب، مدیریت خطرپذیری و کاهش اختلالات را تسهیل می کند [۲]. صنعت ساخت و ساز بیش از یک سوم انتشار مازاد دی اکسید کربن را به خود اختصاص می دهد، که نقش قابل توجهی در تغییرات اقلیمی دارد. علاوه بر این، فعالیت های ساختمانی موجب آلودگی زیست محیطی گسترده ای، از جمله تولید ضایعات ساختمانی، آلودگی هوا و تخریب منابع طبیعی

برای افزایش رقابت پذیری در دنیای کسب و کار امروزی که مملو از تغییرات است، طراحی و مدیریت مؤثر زنجیره تأمین امری ضروری به شمار می رود [۱]. در حال حاضر، مدیریت مؤثر زنجیره های تأمین نقش کلیدی در بازار و اقتصاد ایفا می کند. صنعت ساخت و ساز یکی از حوزه هایی است که برای عملکرد بهینه خود به مدیریت صحیح زنجیره تأمین نیاز دارد. افراد، صنایع و حتی دولت ها برای برآورده کردن نیازهای عمرانی خود، هزینه های قابل توجهی را متحمل می شوند. یکی از راهکارهای کارآمد برای کاهش این هزینه ها، تقویت هماهنگی در زنجیره تأمین ساخت و ساز است [۲].

* رایانامه نویسنده مسئول: h.sadeghi@uok.ac.ir

می‌شود. بنابراین، کنترل و کاهش این اثرات از طریق راهکارهایی مانند استفاده از مواد پایدار، بهینه‌سازی فرآیندهای ساخت و اجرای فناوری‌های سبز، امری ضروری است. تعدادی از نویسندگان [۳-۶] در مطالعات خود به این موضوع پرداختند که مفهوم پایداری توجه زیادی را از سوی دانشگاهیان جلب کرده است، اما به‌روزرسانی روش‌ها برای دستیابی به اهداف پایداری در پروژه‌ها فرآیندی پیچیده است. ایجاد تعادل میان جنبه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی از چالش‌های این حوزه است. تمرکز بیشتر بر پایداری در صنعت ساخت‌وساز به کشف روش‌های مؤثر برای ادغام این دیدگاه در عملیات تجاری منجر شده است. یکی از روش‌های تسریع این ادغام، جستجو برای معیارهای مسئولیت اجتماعی شرکتی است که می‌تواند به بهبود پایداری و تسهیل پذیرش آن توسط شرکت‌ها کمک کند. در نهایت، سه بعد کلیدی پایداری (زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی) با تأثیرات زنجیره‌های تأمین ساخت‌وساز پایدار بر پروژه‌های ساختمانی قابل ارتباط است. مطالعات گذشته غالباً این عوامل را به‌صورت مجزا بررسی کرده‌اند که این امر باعث ایجاد خلأ در درک و کاهش اثربخشی راه‌حل‌ها شده است. تدوین چارچوبی جامع که شاخص‌های قابل‌اندازه‌گیری پایداری را در بر گیرد می‌تواند این خلأ را پر کرده و به سیاست‌گذاران و پژوهشگران در طراحی راهکارهای مؤثر و ارتقای تاب‌آوری جوامع در جهانی پیچیده و حساس به محیط‌زیست کمک کند.

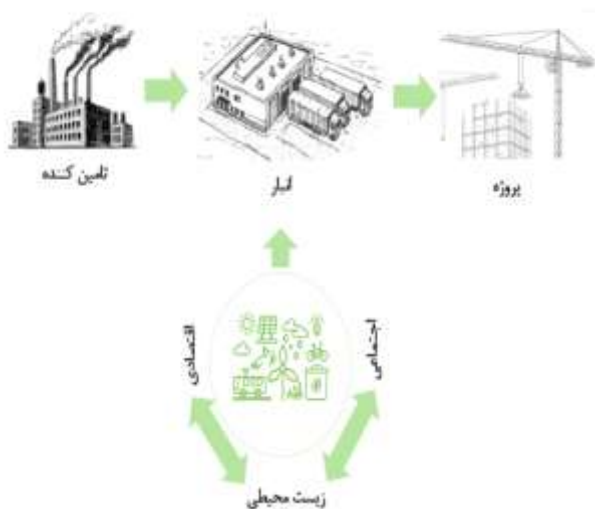
عدم قطعیت در زنجیره‌های تأمین به مجموعه‌ای از عوامل اشاره دارد که جریان اطلاعات، مواد، و محصولات را غیرقابل پیش‌بینی و متغیر می‌کند. این عدم قطعیت می‌تواند ناشی از تغییرات تقاضای مشتریان، نوسانات قیمت، تأخیرهای زمانی، کمبود مواد اولیه، یا بحران‌های جهانی باشد. این عدم قطعیت‌ها به چند دسته اصلی تقسیم می‌شوند: عدم قطعیت تقاضا، که ناشی از تغییرات غیرمنتظره در رفتار مشتریان و شرایط اقتصادی است؛ عدم قطعیت عرضه، که ممکن است به دلیل مشکلات تولیدکنندگان، شرایط آب و هوا یا قوانین جدید ایجاد شود؛ عدم قطعیت در فرآیندهای داخلی، مانند خرابی ماشین‌آلات و ناکارآمدی فرایندها؛ و عدم قطعیت محیطی شامل تحولات سیاسی، نوسانات ارزی، و بحران‌هایی چون

پاندمی‌ها و بلایای طبیعی. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند به مشکلاتی چون موجودی اضافی یا کمبود، کاهش سطح خدمت‌رسانی، و افزایش هزینه‌ها منجر شوند. از این رو، مدیریت این عدم قطعیت‌ها با راهکارهایی نظیر بهبود پیش‌بینی تقاضا، روابط قوی با تأمین‌کنندگان، بهره‌گیری از سیستم‌های پیشرفته اطلاعاتی و ایجاد انعطاف‌پذیری در زنجیره تأمین، برای کاهش اثرات منفی آن‌ها ضروری است [۷]. عدم قطعیت تقاضا از سایر عدم قطعیت‌ها مهم‌تر است زیرا به‌طور مستقیم بر تمامی تصمیمات موجودی، تولید و برنامه‌ریزی در زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارد. تغییرات غیرمنتظره در رفتار مشتریان و نوسانات تقاضا می‌تواند منجر به مشکلات جدی در تأمین موجودی، مدیریت انبار و برنامه‌ریزی منابع شود. به دلیل پیچیدگی و هزینه‌بر بودن فرآیندهای تولید و توزیع، هرگونه ناهماهنگی در تقاضا باعث افزایش هزینه‌ها و کاهش سطح خدمت‌رسانی می‌شود. علاوه بر این، عدم قطعیت تقاضا اثر زنجیره‌ای در کل زنجیره تأمین ایجاد می‌کند؛ از تأمین‌کنندگان مواد اولیه گرفته تا تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان. به عبارت دیگر، وقتی تقاضا به درستی پیش‌بینی نشود، نه تنها منجر به کمبود یا مازاد موجودی می‌شود، بلکه باعث کاهش اعتماد مشتریان و از دست رفتن سهم بازار نیز خواهد شد. به همین دلیل، مدیریت عدم قطعیت تقاضا از اهمیت بالاتری برخوردار است و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها، راهبردهای بازاریابی پویا، و انعطاف‌پذیری در پاسخ به تغییرات تقاضا، به عنوان عوامل کلیدی در کاهش این نوع عدم قطعیت شناخته می‌شوند [۸].

عدم قطعیت در صنعت ساخت‌وساز ناشی از عوامل متعددی از جمله نوسانات اقتصادی، تغییرات فصلی و اعلام ناگهانی پروژه‌ها است. نوسانات بازار، تحت تأثیر تغییرات اقتصادی مانند رکود یا رونق، می‌تواند به‌طور مستقیم بر تقاضا تأثیر بگذارد. همچنین، عوامل فصلی، به‌ویژه شرایط آب و هوایی، ممکن است تقاضا را در طول فصول نامطلوب کاهش دهند [۹]. لذا کنترل بهینه زنجیره تأمین در جهت مدیریت عدم قطعیت‌ها بیش از پیش حائز اهمیت می‌باشد.

برنامه‌ریزی کارآمد تهیه و ذخیره‌سازی مواد در تسهیلات ساختمانی می‌تواند منجر به بهبود قابل‌توجهی در بهره‌وری

(اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) و احتمالی بودن تقاضا منابع ساختمانی است؛ در ادامه، ضمن تعریف مسئله مدنظر، ویژگی‌های ساختاری مهم این مسئله معرفی شده است با بهره‌گیری از این عوامل و فرضیات، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای حل مسئله طراحی شده است، همچنین نمای کلی از مفاهیم کلیدی مسئله حاضر در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): نمای کلی از مفاهیم کلیدی در مسئله حاضر

۲- مروری بر پیشینه پژوهش

در صنعت ساخت‌وساز، طراحی و مدیریت زنجیره تأمین باید به نحوی انجام شود که نه تنها بهره‌وری و کارایی فرآیندها را به حداکثر برساند، بلکه به طور هم زمان اهداف مهمی همچون کاهش هزینه‌ها و تحقق پایداری در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را نیز محقق سازد. در این راستا، عواملی مانند هزینه‌های حمل و نقل، انبارداری و برنامه‌ریزی نامناسب، اگر به درستی کنترل و بهینه‌سازی نشوند، می‌توانند تأثیرات نامطلوبی بر هزینه‌های کلی پروژه گذاشته و موجب افزایش آن شوند. از این رو، به‌کارگیری راهبردهای مدیریتی کارآمد و فناوری‌های نوین در زنجیره تأمین، نقش کلیدی در بهبود عملکرد پروژه‌های ساخت‌وساز ایفا می‌کند، از این رو، برنامه‌ریزی دقیق و هماهنگی میان عناصر زنجیره تأمین، از تأمین‌کنندگان مواد اولیه تا پیمانکاران، می‌تواند به بهینه‌سازی این هزینه‌ها کمک کند. افزون بر این، در زنجیره تأمین ساخت‌وساز، توجه به

ساخت‌وساز، سودآوری پروژه و کاهش هزینه‌ها شود [۱]. به گونه‌ای که زنجیره تأمین ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در موفقیت پروژه‌ها، شامل مجموعه‌ای از هزینه‌های متنوع است که از مراحل تأمین مواد اولیه تا تحویل نهایی و نگهداری پروژه ادامه دارد، از این امر مستثنی نمی‌باشد. این هزینه‌ها به چند بخش اصلی تقسیم می‌شوند: نخست، هزینه‌های مواد اولیه که شامل خرید منابعی چون فولاد، سیمان و آجر است و به‌طور مستقیم تحت تأثیر نوسانات بازار و هزینه‌های حمل و نقل قرار دارد. همچنین، هزینه‌های حمل و نقل و لجستیک نقش حیاتی در انتقال مواد به محل ساخت و ساز ایفا می‌کند و بهینه‌سازی این فرآیند می‌تواند تأثیر بسزایی بر کاهش هزینه‌ها داشته باشد. در کنار این موارد، هزینه‌های نیروی انسانی که شامل دستمزد، آموزش و مزایای کارکنان است، به دلیل نیاز به تخصص‌های مختلف، بخش قابل توجهی از بودجه پروژه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. مدیریت موجودی و هزینه‌های ذخیره‌سازی مواد نیز باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که مواد در زمان مناسب و به‌صورت مؤثر در دسترس قرار گیرد. در نهایت، هزینه‌های مرتبط با خطرپذیری و عدم قطعیت، شامل تأخیرها و نوسانات قیمتی، می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر هزینه‌های کلی پروژه تأثیر بگذارد. به این ترتیب، بهینه‌سازی و مدیریت هزینه‌ها در زنجیره تأمین ساخت‌وساز نیازمند یک رویکرد جامع و یکپارچه است.

اختلال در زنجیره تأمین ساخت‌وساز می‌تواند ناشی از عوامل متنوعی باشد. حوادث طبیعی مانند زلزله و سیل، بحران‌های انسانی نظیر جنگ و ناآرامی‌های اجتماعی و مشکلات اقتصادی همچون نوسانات بازار همگی می‌توانند به تأخیر در تأمین منابع و افزایش هزینه‌ها منجر شوند. همچنین، اختلالات لجستیکی مانند تأخیر در تحویل مواد نیز می‌توانند جریان کار را مختل کنند. علاوه بر این، نقص‌های فناوری و عدم مدیریت خطرپذیری نیز از جمله عوامل دیگری هستند که می‌توانند آسیب‌پذیری زنجیره تأمین را افزایش دهند. شناسایی و مدیریت این عوامل برای حفظ کارایی و موفقیت پروژه‌های ساخت‌وساز ضروری است. هدف اصلی این مطالعه طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار دوسطحی برای زنجیره تأمین ساخت‌وساز با در نظر گرفتن سه بعد پایداری

در زنجیره تأمین ساخت‌وساز است، بنابراین حلی و همکاران [۲] در مطالعه خود به ارایه یک مدل بهینه‌سازی ریاضی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز با در نظر گرفتن تمام عناصر مهم دخیل در فرایند ساخت‌وساز شامل طراحان، پیمانکاران، تأمین‌کنندگان مواد و منابع ساختمانی، کارفرمایان و جریان‌های مواد و منابع ساختمانی، نیروی کار انسانی، تجهیزات، ماشین‌آلات، نقشه‌ها و مدارک ساختمانی پرداختند.

به دلیل عدم قطعیت در تقاضا و تأمین، کمبود مواد در پروژه‌های ساختمانی به طور کامل قابل جلوگیری نیست، لذا برای کاهش تأثیر این کمبودها بر برنامه زمانی و هزینه پروژه‌ها، مدیران باید مواد محدود را به‌طور مؤثری بین فعالیت‌ها تخصیص دهند، لذا لو و همکاران [۱۱] در مطالعه خود به بررسی ادغام مسائل لجستیک تأمین و لجستیک سایت پرداختند و چارچوبی برای مدل‌سازی مشترک تصمیمات تأمین و تخصیص موجودی ارائه کردند. براساس اطلاعات ویژگی‌های فعالیت‌ها (مانند برنامه، هزینه و تقاضا)، پنج سیاست تخصیص برای پشتیبانی از فرایند مدیریت موجودی یکپارچه پیشنهاد شد که عبارتند از: سیاست‌های مبتنی بر برنامه‌ی زمانی، هزینه، تقاضا، ترکیب برنامه و هزینه و ترکیب برنامه و تقاضا. همچنین، برای حل مدل موجودی یکپارچه و پیدا کردن سطح بهینه موجودی تحت هر سیاست تخصیص، از روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. لین و همکاران به دلیل اهمیت هماهنگی و انگیزش در زنجیره تأمین صنعت ساخت‌وساز و نیاز به تطابق با اهداف توسعه پایدار در شرایط عدم قطعیت، به مطالعه‌ای تحت عنوان «راهبردهای مشوق و هماهنگی زنجیره تأمین ساخت‌وساز پایدار بر اساس بهینه‌سازی قوی» آن‌ها یک مدل غیرخطی دو سطحی نامعین برای مدیریت هزینه‌ها و تنظیم محدودیت‌ها میان کارفرما، پیمانکار اصلی، پیمانکاران فرعی و تأمین‌کنندگان طراحی کردند. هدف اصلی این مطالعه بهینه‌سازی مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز با رویکرد توسعه پایدار بود [۱۲]. از آنجایی که تقاضای مشتریان در انبارهای تأمین‌کنندگان در سایت‌های ساخت‌وساز ممکن است با عدم قطعیت همراه باشد، لذا السادات سالاری و همکاران یک مدل ریاضی دو هدفه عدد صحیح مختلط در شرایط عدم قطعیت تقاضا و تحت سیاست بازپرسازی مرور دائم با هدف مسیریابی،

اصول پایداری زیست‌محیطی از طریق کاهش آلاینده‌ها و استفاده از منابع بازیافتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از منظر اجتماعی، ارتقای پایداری به معنای ایجاد شرایط کاری مناسب، افزایش امنیت و حمایت از جوامع محلی است. بنابراین، زنجیره تأمین ساخت‌وساز به‌منظور نیل به پایداری و کاهش اثرات منفی اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی باید به گونه‌ای مدیریت شود که همزمان با برآورده ساختن نیازهای پروژه، الزامات پایداری در سطوح مختلف زنجیره تأمین را نیز تأمین کند. سید و همکاران [۱] در مطالعه خود یک مدل بهینه‌سازی برای لجستیک در یک زنجیره تأمین ساخت‌وساز ارائه داده‌اند که خرید و انبار مواد را به طور هم‌زمان برنامه‌ریزی و بهینه می‌کند. این مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، هزینه‌های لجستیکی همچون سفارش، تأمین مالی، کمبود مواد و چیدمان انبار را به حداقل می‌رساند. گل‌پیرا و همکاران در مطالعه خود [۱۰]، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای ادغام راهبرد موجودی مدیریت شده توسط تأمین‌کننده در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین ساختمانی ارائه کردند. این مدل با استفاده از یک سیستم خبره، منابع را به‌طور پویا مکان‌یابی کرده و تأمین‌کنندگان و مکان‌های مناسب را در یک شبکه با ظرفیت محدود انتخاب می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش اندازه شبکه و تعداد پروژه‌ها به‌طور غیرخطی هزینه‌های کل زنجیره تأمین را افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش دفعات تأمین باعث کاهش هزینه‌های موجودی می‌شود و به ایجاد منافع مشترک برای دو طرف زنجیره تأمین کمک می‌کند. از آنجایی که بهینه‌سازی همزمان کیفیت و قابلیت اطمینان در زنجیره تأمین ساخت‌وساز موجب کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری، مدیریت خطرپذیری و بهبود رقابت‌پذیری شرکت‌ها می‌شود، لذا در مطالعه‌ی دیگری که توسط گل‌پیرا و همکاران [۱۰] صورت پذیرفت، یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح برای زنجیره تأمین چندپروژه‌ای و چندمنبعی در شرکت‌های ساختمانی با تدارکات غیرمتمرکز با هدف بهینه‌سازی همزمان کیفیت و قابلیت اطمینان ارائه کردند. مدل دوهدفه آن‌ها با استفاده از رویکرد "ال-پی متریک"، بهینه‌سازی همزمان کیفیت و قابلیت اطمینان را امکان‌پذیر می‌سازد. یکی از روش‌های کاربردی برای کاهش هزینه‌ها، توجه به ایجاد هماهنگی

موجودی، مکانیابی و حمل‌ونقل و به حداقل رساندن هزینه کل، دستیابی به زمان تحویل مطلوب و متعادل کردن بار کاری راننده در مرحله مسیریابی ارائه کردند [۱۳]. گلپیرا و همکاران [۱۴] در مطالعه خود به بررسی روش‌های بهینه‌سازی تبادل زمان - هزینه در پروژه‌های ساخت پرداختند. آنها با تحلیل مدل‌های ریاضی قطعی و غیرقطعی، و نیز روش‌های ابتکاری و فراابتکاری، کاستی‌های تحقیقات موجود را شناسایی و راهکارهایی برای پژوهش‌های آینده ارائه نمودند. این مطالعه مرجع ارزشمندی برای تحقیقات آتی در زمینه مدیریت بهینه پروژه‌ها محسوب می‌شود. از آنجایی که ناکارآمدی در تدارکات زنجیره تأمین در صنعت ساخت‌وساز اغلب منجر به تأخیر در پروژه، افزایش هزینه‌ها و اتلاف منابع می‌شود. روش‌های مدیریت سنتی برای محیط پویا و پیچیده‌ای که پروژه‌های ساختمانی در آن انجام می‌شود، نامناسب هستند. لذا بگیس [۱۵] در مطالعه خود با الهام از معماری عصبی مغز انسان به منظور بهینه‌سازی عملیات زنجیره تأمین می‌پردازد. هدف اصلی این مطالعه این بود که چگونه سیستم‌های عصبی می‌توانند مدیریت موجودی، بهینه‌سازی لجستیک، پیش‌بینی تقاضا و مدیریت ارتباط با تأمین‌کننده را در عملیات زنجیره تأمین ارتقا دهند. یکی از مشکلات اساسی در مدیریت موجودی پروژه‌های ساخت‌وساز، تأمین به موقع منابع در سایت پروژه است. تأخیر در ارسال منابع از تأمین‌کنندگان می‌تواند منجر به اجرا نشدن پروژه در زمان مقرر شود. برای بهبود مدیریت موجودی و زنجیره تأمین، تعیین میزان بهینه سفارش منابع با در نظر گرفتن محدودیت‌های پروژه و زمان مورد نیاز برای اجرای فعالیت‌های زنجیره تأمین ضروری است. لذا وکیلی و همکاران [۱۶] با هدف بهینه‌سازی میزان سفارش و زمان‌بندی فعالیت‌های زنجیره تأمین، به گونه‌ای که مجموع هزینه‌های نگهداری موجودی در سایت پروژه و هزینه‌های زنجیره تأمین به حداقل برسد، به ارائه مدلی ریاضی پرداختند. با توجه به اینکه بتن یکی از پرمصرف‌ترین منابع ساختمانی است که باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای زیادی می‌شود و استفاده از مواد سیمانی مکمل به‌عنوان جایگزینی برای سیمان می‌تواند به کاهش این انتشار کمک کند. با این حال، ارزیابی عملکرد ساخت‌وساز با بتن به دلیل تعاملات پیچیده بین خواص مکانیکی بتن و ویژگی‌های ساخت‌وساز، چالش‌برانگیز

است، لذا چن و همکاران [۱۷] یک روش جمع‌آوری شبیه‌سازی - محاسبه - تصمیم را برای تحلیل این تعاملات و ارزیابی عملکرد زنجیره تأمین ساخت‌وساز پیشنهاد کردند. نتایج نشان دهنده کارایی این روش در کمی‌سازی عملکرد و ارائه پشتیبانی تصمیم برای پیمانکاران است و می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا تأثیرات زنجیره تأمین بتن را به خوبی درک کنند و تصمیمات بهتری اتخاذ کنند. به‌منظور بهینه‌سازی منابع ژوارسکی و همکاران [۱۸] یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط ارائه کردند که هدف آن به حداقل رساندن هزینه‌های مدیریت موجودی است. این مدل با توجه به تغییرات غیر قابل پیش‌بینی قیمت مواد، قیمت‌ها را به صورت مقادیر فازی با توابع عضویت مثلثی بیان کردند. همچنین افق برنامه‌ریزی را به واحدهای زمانی تقسیم کردند تا تغییرات فصلی و نوسانات مصرف مواد در نظر گرفته شود. در تحقیقی که توسط قنادپور و همکاران صورت گرفت، یک شبکه زنجیره تأمین برای مدیریت موجودی منابع طراحی شد که علاوه بر محل ذخیره‌سازی اصلی، از انبار فرعی نیز برای نگهداری مواد استفاده می‌کند. برای تعیین مکان مناسب ساخت انبار، از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره بهره‌برداری شده است. همچنین با توجه به نقش مهم بخش حمل و نقل در افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی، این تحقیق به کاهش هزینه‌های خارجی زیست محیطی ناشی از حمل و نقل مواد می‌پردازد. در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای حل مشکل سفارش مواد با توجه به انبار فرعی و تأثیرات زیست محیطی آن ارائه شده است [۱۹]. در تحقیقی که توسط وانگ و همکاران انجام شد، یک مدل سیستم دینامیک برای ارزیابی اثرات شیوه‌های کم‌کربن در زنجیره تأمین ساختمان‌های پیش‌ساخته توسعه دادند. نتایج نشان داد که این شیوه‌ها می‌توانند به کاهش انتشار کربن کمک کنند و هم زمان سود مشارکت‌کنندگان را افزایش دهند [۲۰]. بررسی راهبرد سرمایه‌گذاری توسعه‌دهندگان و پیمانکاران در زمینه های ارتقای کم‌کربن و فناوری ساخت کربن منجر شده است که محققان به دنبال روشی به منظور بررسی راهبردهای توسعه‌دهندگان و پیمانکاران بپردازند، لذا فو و همکاران از مدلی بر پایه‌ی تئوری بازی پرداختند [۲۱]. در مطالعه‌ای که توسط لی و نگوینگ انجام شد، از روش تلفیقی تحلیل سلسله مراتبی

فازی و دلفی برای شناسایی روندهای کلیدی مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز پایدار استفاده کردند. این مطالعه به ارزیابی و رتبه‌بندی روش‌های ساخت ناب بر اساس این روندها پرداخته است. ارزیابی توسط ۲۸ کارشناس با تجربه بیش از چهار سال در زمینه ساخت ناب و مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز پایدار انجام شد. نتایج این مطالعه چارچوبی برای پیشبرد پایداری در مراحل مختلف پروژه‌های ساخت و ساز از طریق روش‌های ساخت ناب ارائه می‌دهد [۲۲]. در مطالعه‌ای که توسط هاروچه و همکاران انجام شد، نقش مدیریت زنجیره تأمین در ارتقای شیوه‌های ساخت‌وساز پایدار در صنعت ساخت‌وساز الجزائر بررسی گردید. این تحقیق با استفاده از رویکرد کمی و نظرسنجی آنلاین از ۲۳۷ شرکت‌کننده در صنعت ساخت‌وساز الجزائر انجام شد. نتایج نشان داد که رابطه مثبتی بین مدیریت زنجیره تأمین سنتی و ساخت‌وساز پایدار وجود دارد. همچنین، این مطالعه با تجزیه و تحلیل داده‌ها به شناسایی راه‌های تقویت شیوه‌های مدیریت زنجیره تأمین برای دستیابی به ساخت‌وساز پایدار پرداخته است [۲۳]. به علت اهمیت تأثیر زنجیره‌های تأمین ساخت‌وساز پایدار بر موفقیت پروژه‌ها در کشورهای در حال توسعه، مطالعه‌ای توسط آتیا و همکاران انجام شد. برخلاف مطالعات پیشین که بر چالش‌های پیاده‌سازی زنجیره‌های تأمین ساخت‌وساز پایدار تمرکز داشتند، این مطالعه به بررسی تأثیر کلی آن بر موفقیت پایدار پرداخت. با جمع‌آوری داده‌ها از ۷۰ متخصص ساختمان در مصر، یافته‌ها نشان داد که پذیرش عوامل زنجیره‌های تأمین ساخت‌وساز پایدار تأثیر مثبتی بر موفقیت پایدار در مرحله ساخت دارد و نتایج، اهمیت غلبه بر موانع و تقویت این عوامل را برای سیاست‌گذاری در کشورهای در حال توسعه برجسته می‌کند [۴]. جیانگ و یوان از بازی استکلبرگ برای تحلیل زنجیره تأمین ساختمان‌های پیش‌ساخته استفاده کردند و شرکت پیش‌ساخته را به عنوان "لیدر" و سازنده را به عنوان "پیرو" در نظر گرفتند. این مدل تأثیر سیاست سقف و تجارت را برای کنترل و کاهش انتشار کربن بررسی می‌کند و پیشنهادهایی برای قیمت‌گذاری و تولید سبز ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که آگاهی زیست‌محیطی مصرف‌کننده و اعمال سیاست‌های کنترل انتشار، تصمیم‌گیری‌های سبز را بهبود می‌بخشد [۲۴].

السادات سالاری و همکاران [۱۳] در مطالعه خود، به بررسی مزایای ساخت خارج از سایت و چالش‌های زنجیره تأمین مرتبط با آن پرداخته‌اند. آنها مدلی برای مدیریت زنجیره تأمین سه مرحله‌ای در ساخت خارج از سایت با محدودیت‌های تصادفی ارائه داده‌اند. در این مدل، چند کارخانه خارج از سایت، انواع مختلفی از اجزا را تولید کرده و به انبارهای تأمین‌کننده ارسال می‌کنند تا نیازهای سایت‌های ساختمانی را برآورده سازند و سیاست کنترل موجودی به صورت منظم بررسی می‌شود. این مطالعه به بهبود راهبردهای مدیریت زنجیره تأمین در ساخت خارج از سایت کمک می‌کند و نتایج آن برای برنامه‌ریزان پروژه و تأمین‌کنندگان بسیار کاربردی است. از سوی دیگر، از آنجایی که ساخت‌وساز یکپارچه یک روش ساخت‌وساز پایدار است، با این حال زنجیره تأمین پیچیده عملکرد پروژه را مختل می‌کند بنابراین ارشاد و زاید [۲۵] در مقاله خود به بررسی عوامل تأثیرگذار حیاتی در عملیات زنجیره تأمین ساخت‌وساز یکپارچه پرداختند.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تعدادی از پژوهشگران از جمله [۱۷]، [۱۹]، [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، [۲۳]، [۴] شاخص زیست‌محیطی یعنی انتشار کربن دی اکسید را در مدل‌سازی زنجیره تأمین ساخت‌وساز در نظر گرفتند، اما با بررسی دقیق‌تر مطالعه‌ای که شاخص اجتماعی را در مدل سازی زنجیره تأمین ساخت‌وساز در نظر بگیرد یافت نشد که نشان از اهمیت در نظر گرفتن شاخص اجتماعی در مدل‌سازی زنجیره تأمین ساخت‌وساز دارد. از سوی دیگر با تحلیل دقیق‌تر نتایج به این موضوع پی برده خواهد شد، که فقط در مطالعه [۱۳] عدم قطعیت تقاضا مورد بررسی قرار گرفته شد و با توجه به ماهیت غیرقابل پیش‌بینی پروژه‌های ساختمانی، لذا لزوم در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته شد. بنابراین با توجه به موارد بیان شده لزوم طراحی یک زنجیره تأمین ساخت‌وساز کارا که بتواند در کنار در نظر گرفتن شاخص‌های زیست‌محیطی و اقتصادی، شاخص اجتماعی را تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا در نظر بگیرد و به مدل‌سازی آن بپردازد، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته شد. بنابراین هدف از مطالعه حاضر طراحی یک زنجیره تأمین ساخت‌وساز به منظور پرکردن این شکاف‌های تحقیقاتی است

[illegible]

۱۲	آتیا و همکاران [۴]	تأثیر زنجیره پایدار بر پروژه‌های ساختمانی با استفاده از معادلات ساختاری ریاضی	۲۰۲۳	مدل مفهومی	✓														
۱۳	جیانگ و یوان [۲۴]	هماهنگی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن آگاهی زیست‌محیطی	۲۰۲۲	بازی استکلبرگ											✓				
۱۴	لین و همکاران [۱۲]	راهبرد مشوق در زنجیره تأمین پایدار	۲۰۲۴	مدل معادلات ساختاری											✓				
۱۵	السادات سالاری و همکاران [۱۳]	ساخت‌وساز خارج از سایت با محدودیت‌های تصادفی	۲۰۲۲	مقدار سفارش اقتصادی											✓				
۱۶	ارشاد و زاید [۲۵]	عوامل مؤثر بر مدیریت زنجیره پایدار	۲۰۲۲	مرور سیستماتیک	✓														
۱۷	وکیلی و همکاران [۱۶]	ارائه مدل موجودی - زمان‌بندی	۱۳۹۵	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	✓										✓				
۱۸	گل‌پیرا و همکاران [۱۰]	زمان‌بندی چند پروژه‌ای بهینه در زنجیره تأمین ساخت‌وساز	۲۰۲۱	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	✓										✓				
۱۹	حلی و همکاران [۲]	بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین ساخت‌وساز	۱۴۰۳	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	✓										✓				
۲۰	اربابی و همکاران [۲۶]	طراحی شبکه زنجیره تأمین ساخت‌وساز	۱۴۰۲	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه	✓										✓				
۲۱	اربابی و همکاران [۲۷]	طراحی بهینه زنجیره-تأمین ساخت‌وساز با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول، کنترل موجودی و ملاحظات مالیات کربن	۲۰۲۵	برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط	✓	✓									✓				
۲۲	مطالعه حاضر	مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز پایدار در شرایط احتمالی بودن تقاضا	-	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	✓	✓	✓	✓	✓						✓				

۳- بیان مسئله و تشریح مدل ریاضی

هدف اصلی از طراحی مدل مسئله حاضر تعیین مقادیر بهینه سفارش منابع، مقادیر کمبود و موجودی در دسترس برای هر دوره زمانی است. مکانیزم این زنجیره به شرح زیر است:

مراکز پروژه اطلاعات تقاضای خود را به تسهیلات موقتی که در کنار این مراکز جهت نگهداری و پیش‌پردازش منابع احداث شده‌اند ارسال می‌کنند، سپس این تسهیلات این تقاضا را به تأمین‌کنندگان ارسال می‌کنند، تا پاسخگوی نیازهای پروژه‌ها باشد. از آنجایی که تأمین‌کنندگان وظیفه تأمین منابع را برعهده دارند، لذا منابع مورد نیاز را به سوی مراکز پروژه ارسال می‌کنند. منابع در ابتدا وارد تسهیلات می‌شوند سپس در طول دوره برحسب نیاز به سمت مراکز پروژه‌ها می‌روند. با توجه به اینکه ممکن است تأمین‌کنندگان به دلایل مختلفی از جمله اعتصاب کارگران، بدی آب و هوا و غیره منابع مورد نیاز را در زمان مناسب تهیه نکنند، نوع تقاضا احتمالی و از توزیع نرمال پیروی می‌کند و از سوی دیگر کمبود مجاز است و از نوع پس-افت است؛ زیرا باید حتماً تا قبل از اتمام پروژه تهیه گردد. از سوی دیگر توجه به پایداری به منظور ارائه یک زنجیره تأمین کارا حائز اهمیت است لذا، در طراحی زنجیره تأمین این مطالعه ابعاد پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) در نظر گرفته شده است. بعد اقتصادی با هدف کاهش تمامی هزینه‌های زنجیره از جمله خرید، سفارش‌دهی، راه‌اندازی، حمل-ونقل، نگهداری و ثابت پیاده‌سازی می‌گردد. به‌منظور اجرای بعد زیست‌محیطی، سیاست سقف و تجارت کربن استفاده شده است تا بتوان هم میزان انتشار کربن دی اکسید را اندازه‌گیری کند و هم هزینه‌های مربوط به خرید یا فروش مجوزهای کربنی محاسبه شود. از سوی دیگر اشتغال‌زایی و ایمنی شغلی از جنبه‌های کلیدی پایداری اجتماعی است و پروژه‌های ساخت‌وساز پایدار از آنجایی که می‌توانند فرصت‌های شغلی ایجاد نمایند، علاوه بر بهبود معیشت به کاهش نرخ بیکاری کمک می‌کند؛ لذا فرصت‌های شغلی ثابت و متغیری که توسط

پارامترها

مقدار تقاضا برای تسهیل f در دوره t برای منبع

$$\bar{d}_{rft}$$

نوع r

مراکز تسهیلات و پروژه‌ها ایجاد شده است وارد مدل‌سازی می‌شود. همچنین به منظور وارد کردن ایمنی شغلی، آسیب-هایی که در حین کار پرسنل با آن مواجه است، مدنظر قرار گرفته شده است و هزینه روزهای از دست رفته به دلیل خسارات ناشی از کار وارد مدل‌سازی شده است. مدل ریاضی پایه مطالعه حاضر، برگرفته از مطالعه گل‌پیرا [۱۰] می‌باشد. برای متناسب‌سازی مدل ریاضی پایه، تغییرات زیر ایجاد شده است: الف) حذف مکان‌یابی تسهیلات موقت ب) ملاحظه تقاضا به‌صورت احتمالی ج) افزودن سایر ابعاد پایداری (اجتماعی و زیست‌محیطی) به‌طوری که بعد اجتماعی به تابع هدف شماره (۱) اضافه و بعد زیست‌محیطی به توابع هدف شماره‌های (۲) و (۳) و محدودیت شماره (۴) اضافه شده است. در ادامه ابتدا به بیان مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها پرداخته شده است و پس از آن مدل و محدودیت‌های معرفی و تشریح شده است.

۳-۱- مدل‌سازی ریاضی

ابتدا نمادهای به‌کاررفته در مدل‌سازی معرفی می‌گردند.

مجموعه‌ها:

$s \in S$ مجموعه تأمین‌کنندگان

$d \in D$ مجموعه پروژه‌ها

$r \in R$ مجموعه منابع

$f \in F$ مجموعه تسهیلات موقت

$t \in T$ مجموعه دوره‌های زمانی

$v \in V$ مجموعه روش‌های حمل و نقل

مجموعه تسهیلات موقت که به

نقاط پروژه تخصیص داده می‌-

شود. F_d

فاصله بین تأمین‌کننده s و تسهیل f Δ_{sf}

هزینه کمبود برای منبع r در تسهیل f در دوره t $\mathcal{C}_{prft}$

$\mathcal{G}_{rst}^{pur}$	قیمت خرید برای منبع نوع r از تأمین کننده s در دوره t	τ_d^{Fix}	فرصت های شغلی ثابتی که توسط پروژه ها ایجاد شده است.
X_{rst}	حداقل مقدار قابل پذیرش برای منبع نوع r از تأمین کننده s در دوره t	τ_f^{Var}	فرصت های شغلی متغیری که توسط تسهیلات ایجاد شده است.
$\mathfrak{W}_f$	ظرفیت تسهیل f	τ_d^{Var}	فرصت های شغلی متغیری که توسط پروژه ایجاد شده است.
$\mathfrak{W}_d$	ظرفیت پروژه d	$\mathcal{G}^{job}$	ضریب اشتغال زایی
$\mathcal{G}_f^F$	هزینه راه اندازی تسهیل f	$\mathcal{G}^{work}$	ضریب آسیب های شغلی
$\mathcal{G}_d^F$	هزینه راه اندازی پروژه d	$\mathcal{G}_f^{LD}$	هزینه روزهای از دست رفته به دلیل خسارات ناشی از کار در تسهیل f
$\mathcal{G}_{trst}$	هزینه حمل و نقل برای منبع نوع r از تأمین کننده s به سمت تسهیل f	$\mathcal{G}_d^{LD}$	هزینه روزهای از دست رفته به دلیل خسارات ناشی از کار در پروژه d
$\mathcal{G}_{hrt}^{Fix}$	هزینه ثابت تخصیص تسهیل f به پروژه d	متغیرها:	
$\mathcal{G}_{rst}^{Ord}$	هزینه سفارش دهی برای منبع نوع r از تأمین کننده s در دوره t	Ω_{rstv}	مقدار سفارش برای منبع نوع r از تأمین کننده s برای تسهیل f در دوره t
ϵ_f	میزان انتشار کربن به کیلوگرم از تسهیل f	$\mathcal{R}_{rft}^-$	باقی مانده پس افت برای منبع نوع r در تسهیل f در انتهای دوره زمانی t
ϵ_d	میزان انتشار کربن به کیلوگرم از پروژه d	$\mathcal{R}_{rft}^+$	موجودی در دسترس برای منبع نوع r در تسهیل f در انتهای دوره زمانی t
ϵ_{sfv}	میزان انتشار کربن از حمل منابع بین تسهیل f و پروژه d	$\mathcal{U}_s$	متغیر باینری که بیان کننده این است که آیا تأمین کننده s راه اندازی شده است یا خیر؟
Cap	مقدار کربن منتشر شده در طول کل افق برنامه ریزی	$\mathcal{U}_f$	متغیر باینری که بیان کننده این موضوع است که آیا تسهیل f راه اندازی شده است یا خیر؟
$\mathcal{G}^{Sel}$	قیمت فروش کربن در هر واحد (کیلوگرم)	$\mathcal{U}_d$	متغیر باینری که بیان کننده این است که آیا پروژه d راه اندازی شده است یا خیر؟
$\mathcal{G}^{Buy}$	قیمت خرید کربن در هر واحد (کیلوگرم)	$\mathcal{H}_{fd}$	متغیر باینری که بیان کننده این است که آیا تسهیل f منابع را به سمت پروژه d منتقل می کند یا خیر؟
τ_f^{Fix}	فرصت های شغلی ثابتی که توسط تسهیلات ایجاد شده است.		

$$\begin{aligned} & \sum_{f \in F_d} \sum_{d=1}^D \mathcal{L}_{fd} \mathfrak{S}_{fd}^{Fix} + \\ & \mathfrak{S}^{job} [(\sum_{f=1}^F \tau_f^{Fix} \mathfrak{F}_f) + \\ & (\sum_{d=1}^D \tau_d^{Fix} \mathfrak{F}_d)] + \\ & \mathfrak{S}^{job} [(\sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \tau_f^{Var} \frac{\mathfrak{F}_{rft}^+}{\mathfrak{W}_f}) + \\ & (\sum_{r=1}^R \sum_{f \in F_p} \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \tau_d^{Var} \frac{\mathfrak{F}_{rft}^+}{\mathfrak{W}_d})] + \\ & \mathfrak{S}^{work} [\sum_{f=1}^F \mathfrak{S} W_f^{LD} \mathfrak{F}_f + \\ & \sum_{d=1}^D \mathfrak{S} W_d^{LD} \mathfrak{F}_d] \end{aligned}$$

S.t:

$$Cost^{Sel} = - \mathfrak{S}^{Sel} Sel \quad (2)$$

$$Cost^{Buy} = \mathfrak{S}^{Buy} Buy \quad (3)$$

تابع هدف مدل پیشنهادی، به حداقل رساندن مجموع کل هزینه‌های زنجیره تأمین است، که این هزینه‌ها مطابق با روابط (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند. هزینه‌های زنجیره تأمین ارائه شده در این مطالعه عبارت است از: هزینه‌های خرید، حمل و نقل، سفارش‌دهی، تخصیص، کمبود، نگهداری، راه‌اندازی، ایجاد فرصت‌های شغلی و همچنین هزینه‌های ناشی از آسیب‌های شغلی (مطابق با رابطه (۱)). علاوه بر این، هزینه‌های مرتبط با خرید و فروش مجوزهای کربنی نیز برطبق روابط (۲) و (۳) در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور تبیین دقیق‌تر هر یک از مؤلفه‌های تابع هدف، در ادامه به توضیح نحوه محاسبه هر یک از این هزینه‌ها پرداخته شده است. هزینه خرید هر سفارش برابر است با حاصلضرب قیمت واحد خرید در مقدار سفارش. به طور مشابه، هزینه‌های سفارش‌دهی، نگهداری، کمبود، حمل‌ونقل و خرید و فروش مجوزهای کربنی نیز از حاصلضرب مقدار مربوطه (سفارش) در هزینه واحد آن‌ها محاسبه شده است. با این تفاوت که در محاسبه هزینه حمل و نقل، از آنجایی که فاصله بر میزان هزینه حمل و نقل تأثیرگذار است، لذا مسافت حمل نیز به

ψ_{rsft} متغیر باینری که بیان‌کننده این است که آیا منابع نوع r توسط تأمین‌کننده S برای تسهیل f و دوره زمانی t تهیه شود، مقدار ۱ را می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار ۰ را می‌گیرد.

$\mathfrak{B}_{rsft}$ مقدار کمبود برای منبع نوع r از تأمین‌کننده S در دوره t برای تسهیل f

$\mathfrak{F}_f$ متغیر باینری که بیان‌کننده این است که آیا تأمین‌کننده S راه‌اندازی شده است یا خیر؟

$\mathcal{L}_{fd}$ متغیر باینری که بیان‌کننده این است که آیا تسهیل f منابع را به سمت پروژه d منتقل می‌کند یا خیر؟

$\mathfrak{U}_{frtd}$ متغیر باینری که بیان‌کننده این است که آیا تسهیل f منبع نوع r به سمت پروژه d در زمان t منتقل می‌کند یا خیر؟

Sel مقدار کربن فروخته شده بر اساس سیاست محدودیت کربن و تجارت

Buy مقدار کربن خریداری شده بر اساس سیاست محدودیت کربن و تجارت

۲-۳- مدل‌سازی توابع هدف و محدودیت‌ها

در این بخش به فرمول بندی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین ساخت و ساز اختصاص داده شده است.

Min Cost:

$$\begin{aligned} & \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^V \Omega_{rsftv} \mathfrak{S}_{rst}^{pur} + \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^V \mathfrak{S} tr_{rsftv} \\ & \Omega_{rsftv} \Delta_{sf} + \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \mathfrak{S}_{rsf}^{ord} \quad (1) \\ & \psi_{rsft} + \sum_{f=1}^F \mathfrak{S}_f^F \mathfrak{F}_f + \sum_{d=1}^D \mathfrak{S}_d^F \mathfrak{F}_d + \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{f \in F_d} \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \mathfrak{S} pr_{rft} \mathfrak{F}_{rft}^+ + \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{f \in F_d} \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \mathfrak{S} hr_{rft} \mathfrak{F}_{rft}^+ + \end{aligned}$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^S \Omega_{r,s,f,t,v} \geq \tilde{\delta}_{rft} \quad (۸)$$

$$\forall r, f, t$$

$$\Omega_{r,s,f,t,v} \geq X_{rst} \times \psi_{rsft} \quad (۹)$$

$$\forall r, s, f, t, v$$

$$\Omega_{r,s,f,t,v} \leq \psi_{rsft} M' \quad (۱۰)$$

$$\forall r, s, f, t, v$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \Omega_{r,s,f,t,v} \leq \quad (۱۱)$$

$$M' \sum_{d=1}^D \mathcal{L}_{fd}$$

$$\forall f$$

$$\mathcal{F}_{rft}^+ = \mathcal{F}_{rf(t-1)}^+ + \sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^S \Omega_{r,s,f,t,v} \quad (۱۲)$$

$$- \sum_{s=1}^S \mathcal{B}_{rsft} \quad \forall r, f, t$$

$$\mathcal{F}_{rft}^- = \mathcal{F}_{rf(t-1)}^- + \tilde{\delta}_{rft} - \mathcal{B}_{rsft} \quad (۱۳)$$

$$\forall r, s, f, t, v$$

$$\mathcal{B}_{rsft} \leq \mathcal{F}_{rf(t-1)}^- \quad (۱۴)$$

$$\forall r, s, f, t$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \Omega_{r,s,f,t,v} \leq \quad (۱۵)$$

$$\mathbb{W}_s \times \mathbb{F}_s \quad \forall s$$

$$\sum_{v=1}^V \Omega_{r,s,f,t,v} \leq \psi_{rsft} \times \mathbb{W}_s \quad (۱۶)$$

$$\forall r, s, f, t$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \Omega_{r,s,f,t,v} \leq \mathbb{W}_f \quad (۱۷)$$

$$\times \mathbb{F}_f \quad \forall f$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \mathcal{F}_{rft}^+ \leq \mathbb{W}_d \times \quad (۱۸)$$

$$\mathbb{F}_d \quad \forall d$$

محدودیت‌های (۵) و (۶) تعریف می‌کنند که یک پروژه و یک تسهیل به یکدیگر اختصاص داده می‌شود و بالعکس. هر منبع باید از طریق تسهیل انتخابی به پروژه منتقل گردد؛ لذا برای نیل به این منظور محدودیت (۷) معرفی شده است. تضمین برآورده‌سازی تقاضا برای هر منبع توسط محدودیت (۸)

عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در مدل لحاظ شده و در مدل‌سازی وارد شده است. در محاسبه هزینه تخصیص، توجه به تخصیص گرفتن یا نگرفتن تسهیلات یا محل پروژه اهمیت دارد. از این رو، هزینه تخصیص از حاصلضرب متغیر باینری تخصیص در هزینه تخصیص مربوطه به دست می‌آید. برای لحاظ کردن جنبه‌های اجتماعی در تابع هدف، هزینه‌های مرتبط با اشتغال‌زایی و آسیب‌های شغلی بر طبق مطالعه [۱۴] در مدل وارد شده است. هزینه اشتغال‌زایی از دو بخش ثابت و متغیر تشکیل شده است. برای بخش ثابت، باید هزینه فرصت شغل‌های دائم ناشی از راه‌اندازی هر تسهیل یا پروژه مستقل از سطح فعالیت با در نظر گرفتن ضریب اشتغال‌زایی محاسبه شود؛ و برای بخش متغیر، هزینه‌هایی که به میزان بهره‌برداری واقعی از ظرفیت تسهیل یا پروژه ایجاد شده است، محاسبه گردد. به این منظور سطح واقعی فعالیت تسهیل یا پروژه (نسبت موجودی در دسترس به ظرفیت کل) در تعداد فرصت-های شغلی متغیر ایجاد شده و ضریب اشتغال‌زایی ضرب گردد. آخرین قسمت هزینه بعد اجتماعی، هزینه آسیب‌های شغلی است که به‌منظور محاسبه آن بایستی ابتدا هزینه روزهای از دست‌رفته ناشی از حوادث کاری در تسهیل/پروژه در ضریب آسیب‌های شغلی ضرب شود. سپس این مقدار در یک متغیر باینری ضرب می‌گردد که مشخص می‌کند آیا تسهیل/پروژه راه‌اندازی شده یا نه؛ در صورتی که تسهیل فعال نباشد، به تبع آن، آسیب شغلی وجود ندارد و این هزینه برابر صفر خواهد بود.

$$\sum_{f=1}^F \epsilon_f \mathbb{F}_f + \sum_{d=1}^D \epsilon_d \mathbb{F}_d + \quad (۴)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^V \epsilon_{sfv} \times$$

$$\Omega_{rsftv} + Sel \leq Buy + Cap$$

$$\sum_{f \in F_d} \mathcal{L}_{fd} = 1, \forall d \quad (۵)$$

$$\sum_{d=1}^D \mathcal{L}_{fd} = 1, \forall f \quad (۶)$$

$$\mathcal{U}_{frtd} = \mathcal{H}_{fd}, \forall f, r, t, d \quad (۷)$$

منظور پنج تسهیل موقت در مجاورت هر محل پروژه احداث شده است. یک تأمین‌کننده جهت تأمین یک نوع منبع در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور جابه‌جایی منابع از دو روش حمل و نقل استفاده شده است. مقادیر متغیرهای کلیدی مسئله حاضر پس از حل مدل در نرم‌افزار در جدول (۳) نمایش داده شده است.

همان‌طور که در جدول (۳)، نمایش داده شده است، به عنوان مثال توسط روش حمل و نقل اول، برای هر کدام از تسهیلات به ترتیب ۶، ۱۰۰، ۱۰۰، ۱۰۰ و ۶ واحد از منابع ساختمانی موردنظر جا به جا شده است. همچنین با استفاده از روش حمل و نقل دوم به ترتیب ۱۰۰ و ۶ و ۶ و ۶ و ۱۰۰ واحد از منابع ساختمانی موردنظر جا به جا شده است. مقدار موجودی مثبت در انتهای دوره زمانی برای هر کدام از تسهیلات برابر با ۰ است، به این معنا که تمام منابع منتقل شده مصرف شده است و هیچ منبعی در هر کدام از تسهیلات باقی نمانده است. همچنین مقدار کمبود برای هر کدام از تسهیلات برابر با ۰ است که این مهم نیز منطقی است؛ زیرا باتوجه به زنجیره‌ای که در این مطالعه طراحی شده است و دارای یک دوره زمانی است باید پروژه در انتهای دوره موردنظر به اتمام برسد و مقدار نیاز پروژه از منابع تأمین گردد. از سوی دیگر صفرشدن مقدار موجودی مثبت به این معنا است که مازاد بر تقاضا سفارش‌دهی نشده است و صفرشدن کمبود دال بر این موضوع است که پروژه به درستی مدیریت و اجرا شده است و زنجیره به نحو احسن طراحی شده است و تمامی مفروضات مطالعه حاضر برآورده شده است. همچنین باتوجه به اینکه هدف اصلی مسئله حاضر مدیریت زنجیره تأمین ساخت-وساز با در نظر گرفتن سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی می‌باشد، لذا در جدول (۴) نتایج مربوط به این سه بعد ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^S \Omega_{r,s,f,t} &\geq Z_{1-\alpha} \sqrt{Var_{\partial}} + \mu_{\partial} \\ P \{ \bar{\theta}_{rft} &= \bar{\theta}_{rf(t-1)} + \tilde{\partial}_{rft} - \mathcal{B}_{rsft} \} \\ &\geq 1 - \alpha \\ \Rightarrow P \{ \bar{\theta}_{rft} - \bar{\theta}_{rf(t-1)} - \tilde{\partial}_{rft} + \mathcal{B}_{rsft} &= 0 \} \geq 1 - \alpha \\ &\cong N(\mu_{\partial} - \bar{\theta}_{rft} - \bar{\theta}_{rf(t-1)} + \mathcal{B}_{rsft}, Var_{\partial}) \\ \Rightarrow P \{ Z \leq \frac{\bar{\theta}_{rft} + \bar{\theta}_{rf(t-1)} - \mathcal{B}_{rsft} - \mu_{\partial}}{\sqrt{Var_{\partial}}} \} &\geq 1 - \alpha \\ \Rightarrow \frac{\bar{\theta}_{rft} + \bar{\theta}_{rf(t-1)} - \mathcal{B}_{rsft} - \mu_{\partial}}{\sqrt{Var_{\partial}}} &\geq Z_{1-\alpha} \\ \Rightarrow \bar{\theta}_{rft} + \bar{\theta}_{rf(t-1)} - \mathcal{B}_{rsft} &\geq Z_{1-\alpha} \sqrt{Var_{\partial}} + \mu_{\partial} \end{aligned}$$

۴- یافته‌ها

برای انجام محاسبات این مطالعه، از نرم‌افزار GAMS نسخه ۲۵،۱،۲ استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها بر اساس پارامترهای ورودی ارائه‌شده در جدول (۲) و با بهره‌گیری از مدل طراحی شده در بخش‌های قبلی، بر روی سیستمی پنج هسته‌ای و ۴ گیگابایت حافظه انجام شده است. مسئله مدنظر در این مطالعه برای احداث پنج پروژه ساخت‌وساز طراحی شده است. بدین

جدول (۲): مقادیر پارامترهای ورودی مسئله حاضر

پارامتر	$\bar{\delta}_{rft}$	$\ominus^{Sel}$	$\ominus^{Buy}$	Cap	Δ_{sf}	$\ominus_f^F$	X_{rst}
مقدار	$U[10, 100]$ مقدار $Z_{-\alpha}$ برابر با $1/96$ در نظر گرفته شده است.	$0/3$	$0/5$	15000	$U[3, 15]$	$U[1, 15]$	$U[1, 2, 5]$
پارامتر	$\ominus_{p_{rft}}$	$\ominus_{h_{rft}}$	$\ominus_{tr_{rsft}}$	$\mathbb{W}_f$	$\mathbb{W}_p$	E_f	E_p
مقدار	$U[1, 5]$	$U[1, 17]$	$U[1, 10]$	$U[3, 4]$	$U[1, 2]$	$U[3, 4]$	$U[1, 2]$
پارامتر	$\ominus_{rst}^{purchase}$	$\ominus_p^F$	$\ominus_{rsf}^{Ord}$	E_{sfo}	τ_f^{Fix}	$\tau_p'^{Fix}$	τ_f^{Var}
مقدار	$405\$$	$U[1, 15]$	$U[1, 5]$	$0/297 \quad 0/252$ $0/397 \quad 0/353$ $1/97 \quad 0/151$ $0/226 \quad 0/242$ $0/345 \quad 0/322$	$U[10 \text{ و } 20]$	$U[10 \text{ و } 20]$	$U[10 \text{ و } 20]$
پارامتر	τ_p^{Var}	$\ominus W_f^{LD}$	$\ominus W_p'^{LD}$				
مقدار	$U[10 \text{ و } 20]$	$U[1 \text{ و } 10]$	$U[1 \text{ و } 10]$				

جدول (۳): مقادیر متغیرهای کلیدی مسئله حاضر

$\Omega_{r,s,f,t,o}$	O_1	O_2	f_{rft}^+	$\mathbb{W}_{rsft}$	y_f'
$f_1 \cdot t_1$	۶	۱۰۰	$f_1 \cdot t_1$.	$f_1 \cdot t_1$.	f_1 ۱
$f_2 \cdot t_1$	۱۰۰	۶	$f_2 \cdot t_1$.	$f_2 \cdot t_1$.	f_2 ۱
$f_3 \cdot t_1$	۱۰۰	۶	$f_3 \cdot t_1$.	$f_3 \cdot t_1$.	f_3 ۱
$f_4 \cdot t_1$	۱۰۰	۶	$f_4 \cdot t_1$.	$f_4 \cdot t_1$.	f_4 ۱
$f_5 \cdot t_1$	۶	۱۰۰	$f_5 \cdot t_1$.	$f_5 \cdot t_1$.	f_5 ۱
(الف)			(ب)	(ج)	(د)

Sel	.
Buy	.
(ر)	

جدول (۴): مقادیر کلیدی مسئله حاضر (ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی)

بعد زیست محیطی	بعد اجتماعی	بعد اقتصادی
هزینه های ناشی از اجرای سیاست سقف و تجارت کربن	هزینه های ناشی از آسیب های ناشی از کار و هزینه های ایجاد فرصت های شغلی	تابع هدف مسئله حاضر (حداقل کردن کلیه هزینه های زنجیره)
.	۹۷۰/۷۹۵۳۴	۹۲۶/۳۱۲۶۰۶

تابع هدف تغییر پیدا خواهد کرد. در ادامه این بخش به بررسی دو پارامتر کلیدی بر مقدار تابع هدف پرداخته شده است.

۴-۱- تحلیل تأثیر تغییرات C^{job} بر تابع هدف

باتوجه به نتایج جدول (۵) و شکل (۲)، مقدار تابع هدف به- صورت یکنواخت با افزایش C^{job} هزینه یا مقدار مرتبط با ایجاد شغل) افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که متغیر C^{job} تأثیر مستقیم و مثبت بر مقدار کل تابع هدف دارد. هر واحد افزایش در C^{job} منجر به افزایش معادل در مقدار تابع هدف می‌شود. همچنین افزایش تابع هدف به‌ازای هر ۱۰۰ واحد افزایش در C^{job} تقریباً ثابت است و حدود ۶۹۲۲/۰۲۵ واحد است. این رابطه نشان‌دهنده یک ارتباط خطی مابین تابع هدف و C^{job} است.

جدول (۵): تغییرات تابع هدف متأثر از تغییرات پارامتر C^{job}

C^{job}	تغییرات تابع هدف	C^{job}	تغییرات تابع هدف
۵۰۰	۲۷۷۹۹۶/۸۰۰	۱۰۰۰	۳۱۲۶۰۶/۹۲۶
۶۰۰	۲۸۴۹۱۸/۸۲۵	۱۱۰۰	۳۱۹۵۲۸/۹۵۱
۷۰۰	۲۹۱۸۴۰/۸۵۰	۱۲۰۰	۳۲۶۴۵۰/۹۷۷
۸۰۰	۲۹۸۷۶۲/۸۷۵	۱۳۰۰	۳۳۳۳۷۳/۱۰۰۲
۹۰۰	۳۰۵۶۸۴/۹۰۱	۱۴۰۰	۳۴۰۲۹۵/۰۲۷
۱۵۰۰	۳۴۷۲۱۷/۰۵		

۴-۲- تحلیل تأثیر تغییرات در بازه‌های تقاضا بر تابع هدف

مقدار تابع هدف با افزایش بازه‌های تقاضا به طور پیوسته افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که تقاضای بیشتر به طور مستقیم هزینه‌های کل زنجیره تأمین را افزایش می‌دهد. بازه‌های بالاتر تقاضا منجر به بار هزینه‌ای بیشتری در سیستم شده و تابع هدف را افزایش داده‌اند. جدول (۶) و همچنین شکل (۳) نشان می‌دهد که افزایش بازه‌های تقاضا به طور مستقیم موجب افزایش تابع هدف شده است، به‌طوری‌که از ۲۰۳۲۱۰/۵۸۸ در بازه [۵، ۱۵] به ۵۱۷۱۱۲/۷۴۱ در بازه [۵۰، ۱۵۰] رسیده است. این روند صعودی نشان‌دهنده تأثیر

اجرای سیاست سقف و تجارت کربن باعث شده تا میزان انتشار کنترل شود و نیازی به خرید و فروش مجوزهای کربنی نباشد. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده عملکرد موفقیت‌آمیز سیاست‌های کاهشی در چارچوب مدل باشد. این وضعیت نشان می‌دهد که زنجیره تحت بررسی توانسته است با کاهش انتشار کربن خود در چارچوب سقف تعیین شده عمل کند. در نتیجه، هزینه‌های مستقیم مربوط به خرید یا فروش مجوز کربن (که می‌توانست یک عامل هزینه باشد) حذف شده‌اند. همچنین مزیت این روش نشان‌دهنده تعادل میان انتشار و سیاست‌های زیست‌محیطی است که می‌تواند به کاهش فشار اقتصادی این بعد کمک کند.

سیاست‌های اجتماعی مدل‌سازی شده در این مطالعه مانند اشتغال‌زایی و توجه به آسیب‌های ناشی از کار باتوجه به اینکه هزینه‌هایی را به زنجیره وارد کرده است، اما منجر به پیاده- سازی بعد پایداری در زنجیره تأمین شده است. همچنین اجرای پروژه‌ها یا تسهیلات جدید، نیروی کار بیشتری را به خود جذب کرده است و هزینه‌های مستقیم مربوط به ایمنی و اشتغال را افزایش داده است. از سوی دیگر سیاست‌های زیست‌محیطی، حتی در نبود هزینه خرید یا فروش کربن، اثرات غیرمستقیم اجتماعی (مثل تأمین شغل) را داشته‌اند.

سیاست‌های اقتصادی نشان‌دهنده مجموع هزینه‌های کل زنجیره تأمین است. از آنجایی‌که سیاست سقف و تجارت کربن تأثیر مستقیمی بر کاهش هزینه زیست محیطی داشته، اما هزینه‌های اقتصادی همچنان بالاترین سهم را دارند. این مقدار ممکن است ناشی از نیاز به بهبود زیرساخت‌ها یا سرمایه‌گذاری‌های اضافی برای رعایت استانداردهای زیست محیطی باشد. همچنان این بعد سهم کل هزینه‌های زنجیره هستند.

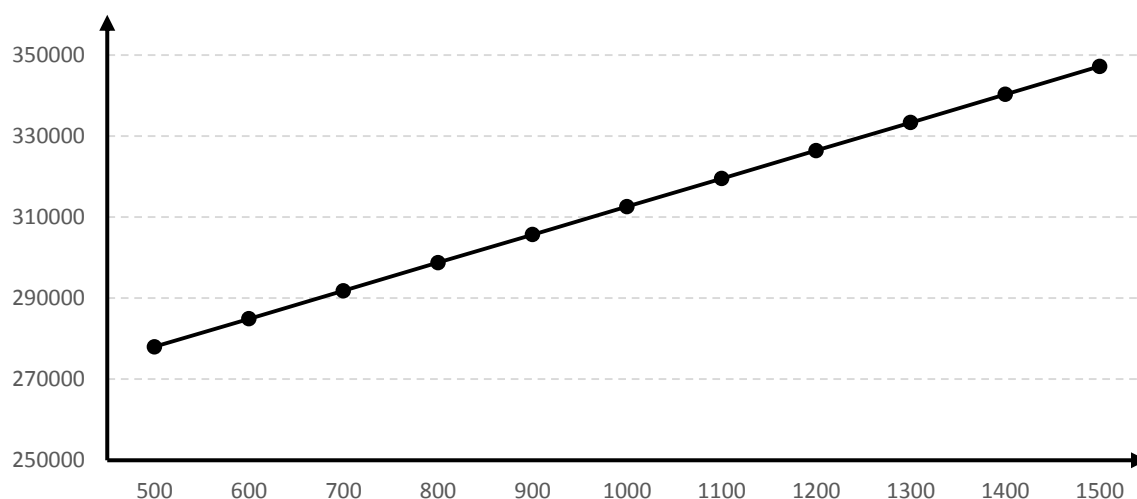
موضوع مهمی که در اینجا حائز اهمیت می‌باشد این است که چگونه با تغییر برخی از پارامترهای کلیدی در مسئله حاضر

جدول (۶): تغییرات پارامتر تقاضا بر تابع هدف

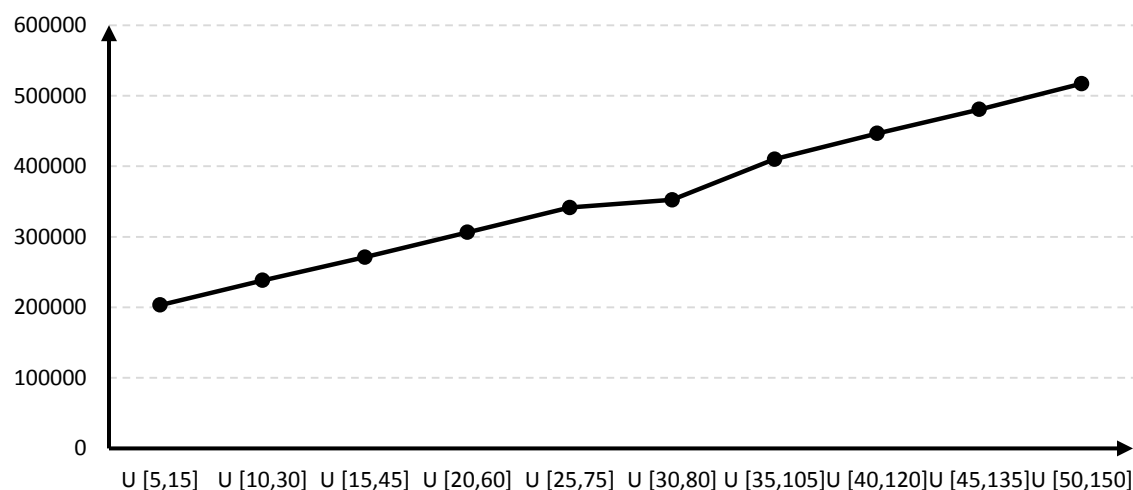
تغییرات تابع هدف	$\tilde{\delta}_{rft}$	تغییرات تابع هدف	$\tilde{\delta}_{rft}$
۴۱۰۰۸۱/۵۴۴	U [۳۵,۱۰۵]	۲۰۳۲۱۰/۵۸۸	U [۵,۱۵]
۴۴۶۵۱۷/۶۹۶	U [۴۰,۱۲۰]	۲۳۸۳۰۸/۷۹۸	U [۱۰,۳۰]
۴۸۰۶۷۶/۵۸۹	U [۴۵,۱۳۵]	۲۷۱۲۱۳/۰۳۷۰	U [۱۵,۴۵]
۵۱۷۱۱۲/۷۴۱	U [۵۰,۱۵۰]	۳۰۶۳۱۱/۵۸۱	U [۲۰,۶۰]
		۳۴۱۴۰۹/۷۹۱	U [۲۵,۷۵]
		۳۵۲۳۷۷/۹۸۱	U [۳۰,۸۰]

قابل توجه تقاضا بر هزینه‌های زنجیره تأمین است. افزایش بازه‌های تقاضا، به‌ویژه در محدوده‌های بالاتر، به دلیل نیاز به منابع بیشتر یا ظرفیت اضافی، نرخ افزایش غیرخطی داشته و فشار هزینه‌ای بیشتری ایجاد کرده است. در بازه‌های پایین‌تر، تغییرات یکنواخت‌تر است، اما در مقادیر بالاتر [۴۰, ۱۲۰] به بعد تأثیر چشمگیرتر می‌شود که نشان‌دهنده چالش‌های مدیریت تقاضا و افزایش هزینه‌های لجستیکی و عملیاتی است. پیشنهاد می‌شود با انجام تحلیل حساسیت، کاهش نوسانات تقاضا و سرمایه‌گذاری در ظرفیت‌سازی، هزینه‌های زنجیره بهینه شود.

تغییرات تابع هدف

شکل (۲): تغییرات تابع هدف متأثر از C^{job}

تغییرات تابع هدف



شکل (۳): تغییرات پارامتر تقاضا بر تابع هدف

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، مدیریت زنجیره تأمین ساخت و ساز پایدار در شرایط احتمالی مورد بررسی قرار گرفته شده است. به منظور تحلیل ابعاد مختلف پایداری، مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی توسعه داده شد. این مدل با استفاده از برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط فرموله شده و احتمالی بودن تقاضا با توزیع نرمال مدل سازی شده است. حل مدل در نرم افزار گمز انجام شد و تحلیل حساسیت بر پارامترهای کلیدی صورت گرفت. نتایج نشان داد که سیاست های زیست محیطی اجرا شده منجر به کاهش انتشار کربن و حذف نیاز به خرید و فروش مجوزهای کربنی شده است، که نشانگر موفقیت مدل در دستیابی به تعادل بین کاهش هزینه ها و حفظ پایداری زیست محیطی است. هزینه های اشتغال زایی به میزان قابل توجهی (۷۹۵۳۴,۹۷ واحد) برآورد شد، که تأثیر مثبت سیاست های پیشنهادی بر افزایش فرصت های شغلی را نشان می دهد، هرچند که این امر هزینه هایی را نیز به همراه دارد. در بعد اقتصادی، زنجیره تأمین با هزینه هایی مرتبط با سرمایه گذاری در زیرساخت های اجتماعی، زیست محیطی، اجرای پروژه، خرید منابع و سایر عوامل مدیریتی مواجه است. تحلیل حساسیت نشان داد که افزایش هزینه های اشتغال زایی رابطه ای خطی و مثبت با مقدار تابع هدف دارد؛ به طوری که با هر ۱۰۰ واحد افزایش در هزینه اشتغال زایی، مقدار تابع هدف به طور میانگین ۶۹۲۲,۰۲۵ واحد افزایش می یابد. در ارتباط با پارامتر تقاضا، رابطه ای غیرخطی با تابع هدف مشاهده شد؛ به طوری که در سطوح بالاتر، افزایش قابل ملاحظه ای بین این دو متغیر وجود دارد، اما در سطوح پایین تر تغییرات یکنواخت تر است. این یافته ها تأکید می کند که مدیریت تقاضا و کنترل نوسانات آن، همراه با سرمایه گذاری هدفمند در ظرفیت سازی، نقش حیاتی در کاهش هزینه های زنجیره تأمین ایفا می کند. مدل پیشنهادی، با توجه به ابعاد پایداری مختلف، توانست هزینه های زنجیره تأمین را به طور مؤثر کاهش دهد. در این مدل، ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به طور جامع لحاظ شدند و استفاده از مجوزهای کربنی به عنوان یکی از راهکارهای

کاهش تأثیرات زیست محیطی مورد بررسی قرار گرفت. برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می شود که مدل های چندهدفه برای پوشش کامل تر ابعاد پایداری، به ویژه مؤلفه های کیفی اجتماعی و زیست محیطی، توسعه یابند. همچنین، بررسی تأثیر عوامل احتمالی پیچیده تر مانند بیماری های مسری یا تغییرات اقلیمی شدید و استفاده از روش های پیشرفته تر بهینه سازی، نظیر الگوریتم های فراابتکاری برای حل مدل های پیچیده تر، از جمله مسیرهای پیشنهادی برای پژوهش های آینده است

۶- مراجع

- [1] Said, H. and K. El-Rayes, "Optimizing material procurement and storage on construction sites". Journal of Construction Engineering and Management. Vol. 137, no. 6, pp. 421-431. 2011.
- [2] Helli, S.S., H. Mokhtari, and S. Dehnavi, "Optimizing the Construction Supply Chain Network Considering the Flow of Materials, Equipment, Manpower, Drawings and Technical Documents". Research in Production and Operations Management. Vol. 15, no. 2, pp. 27-55. 2024.
- [3] Mollashahi, H., et al., "Inter-Chain Competition Based on Sustainability and Resilience Indicators in the Problem of Supply Chain Network Design". Supply Chain Management. Vol. 26, no. 82, pp. 77-93. 2024 (In Persian).
- [4] Attia, E.-A., et al., "Examining the Influence of Sustainable Construction Supply Chain Drivers on Sustainable Building Projects Using Mathematical Structural Equation Modeling Approach". Sustainability. Vol. 15, no. 13, pp. 10671. 2023.
- [5] [۵] Amirian, S., M. Amiri, and M.T. Taghavifard, "Integrating Sustainability and Reliability in the Supply Chain: a Systematic Literature Review". Supply Chain Management. Vol. 25, no. 79, pp. 123-151. 2023 (In Persian).
- [6] Amirian, S., M. Amiri, and M.T. Taghavifard, "Designing a Sustainable and Reliable Supply Chain Network Under Uncertainty) Case Study: West of Carton)". Supply Chain Management. Vol. 25, no. 81, pp. 87-115. 2024 (In Persian)
- [7] Atadoga, A., et al., "The role of IT in enhancing supply chain resilience: a global review". International Journal of Management & Entrepreneurship Research. Vol. 6, no. 2, pp. 336-351. 2024.
- [8] Jagabathula, S., D. Mitrofanov, and G. Vulcano, "Demand Estimation Under Uncertain Consideration Sets". Operation Research. Vol. 72, no. 1, pp. 19-42. 2024.
- [9] Chen, F.Y. and C.A. Yano, "Improving Supply Chain Performance and Managing Risk Under Weather-Related Demand Uncertainty". Management Science. Vol. 56, no. 8, pp. 1380-1397. 2010.
- [10] Golpîra, H., "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. Vol. 139, pp. 112841. 2020.
- [11] Lu, H., et al., "Study on construction material allocation policies: A simulation optimization method". Automation in Construction. Vol. 90, pp. 201-212. 2018.
- [12] Lin, Y.-q., C.-x. Guo, and Y. Tan, "The incentive and coordination strategy of sustainable construction supply chain based on robust optimisation". Journal of Control and Decision. Vol. 7, no. 2, pp. 126-159. 2020.
- [13] Salari, S.A.-S., et al., "Off-Site construction Three-Echelon supply chain management with stochastic constraints: A modelling approach". Buildings. Vol. 12, no. 2, pp. 119. 2022.
- [14] Golpîra, H. and A. Javanmardan, "Robust optimization of sustainable closed-loop supply chain considering carbon emission schemes". Sustainable Production and Consumption. Vol. 30, pp. 640-656. 2022.

- [22]Le, P.-L. and D.-T. Nguyen, "Exploring Lean Practices' Importance in Sustainable Supply Chain Management Trends: An Empirical Study in Canadian Construction Industry". *Engineering Management Journal* Vol. 36, no. 1, pp. 66-91. 2024.
- [23]Harouache, A., et al., "Influence of supply chain management on the sustainable construction industry in Algeria". *Frontiers in Built Environment*. Vol. 10. 2024.
- [24]Jiang, W. and M. Yuan "Coordination of Prefabricated Construction Supply Chain under Cap-and-Trade Policy Considering Consumer Environmental Awareness". *Sustainability*, 2022. Vol. 14, DOI: 10.3390/su14095724.
- [25]Arshad, H. and T. Zayed, "Critical influencing factors of supply chain management for modular integrated construction". *Automation in Construction*. Vol. 144 .pp. 104612. 2022.
- [26]Arbabi, S., H. Sadeghi, and H. Golpîra, "Designing a Construction Supply Chain Network for Resource Inventory Management Using Benders Decomposition Algorithm". *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*. Vol. 11, no. 23, pp. 105-119. 2024 (In Persian).
- [27]Arbabi, S., H. Sadeghi, and H. Golpîra, "Optimal Design for Construction Supply Chain under Time Value of Money, Inventory Control, and Carbon Tax Consideration". *Jourdan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. Vol. 19, no. 2. 2025.
- [28]Karami, Z. and R. Sadeghian, "Design of closed-loop supply chain network with considering of multi-part centers under uncertainty with two robust and stochastic approaches". *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*. Vol. 7, no. 15, pp. 323-337. 2020 (In Persian).
- [15]Bageis, A.S., "Neuromorphic Optimization in Construction Supply Chain Logistics Management". *Nanotechnology Perceptions*. pp. 326-345. 2024.
- [16]Vakili, M.R., S. Nori, and S. Yaghobi, "An Inventory–Scheduling Model for Supply Chain of Construction Project". *Industrial Management Journal*. Vol. 8, no. 1, pp. 113-140. 2016 (In Persian).
- [17]Chen, S., et al., "Exploring Performance of Using SCM Concrete: Investigating Impacts Shifting along Concrete Supply Chain and Construction". *Buildings*. Vol. 14, no. 7, pp. 2186. 2024.
- [18]Jaśkowski, P., A. Sobotka, and A. Czarnigowska, "Decision model for planning material supply channels in construction". *Automation in Construction*. Vol. 90, pp. 235-242. 2018.
- [19]Mohammadnazari, Z. and S.F. Ghannadpour, "Sustainable construction supply chain management with the spotlight of inventory optimization under uncertainty". *Environment, Development and Sustainability*. Vol. 23, pp. 10937-10972. 2021.
- [20]Wang, X., et al., "Exploration in carbon emission reduction effect of low-carbon practices in prefabricated building supply chain". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 368, pp. 133153. 2022.
- [21]Fu, C., et al., "Low-carbon strategy analysis in a construction supply chain considering government subsidies and contract design". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 470, pp. 143326. 2024.