نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS
نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
سال یازدهم، شماره بیست و سوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۲، صفحه ۱۰۵-۱۱۹
www.ier.basu.ac.ir
ISSN: 2345-2269
DOI: https://dx.doi.org/10.22084/IER.2024.5568

طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز باهدف مدیریت موجودی منابع با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز

سمین اربابی[۱]، هیبت‌اله صادقی[۲*]، هیرش گل‌پیرا[۳]

۱. دانشجوی دکترای مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۴۰۲/۷/۵
پذیرش ۱۴۰۲/۱۰/۱۵
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز
مدیریت موجودی
الگوریتم تجزیه بندرز
انتخاب تأمین‌کننده

خلاصه

طراحی کارآمد زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز دارای پیچیدگی‌های فراوانی است؛ لذا ضرورت طراحی مناسب زنجیره‌تأمین باتوجه به تنوع بالای منابع (تجدیدناپذیر) دارای اهمیت بالایی است. باتوجه به متغیر بودن محیط پروژه، پویایی پیشرفت پروژه و خطراتی که پروژه‌های ساختمانی با آن مواجه است، پروژه ممکن است از برنامه زمان‌بندی شده برای اجرای آن عقب بیفتد. ازسوی دیگر کیفیت منابع در کیفیت ساخت پروژه‌های ساخت‌وساز دارای اهمیت است؛ لذا در این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه به‌منظور طراحی شبکه زنجیره‌تأمین دوسطحی در صنعت ساخت‌وساز باهدف حداقل کردن هزینه‌های زنجیره، حداقل کردن انحراف از برنامه زمانی تحویل منابع و حداکثرکردن کیفیت ارائه شده است. این چارچوب قادر به برنامه‌ریزی پویا منابع ازنظر زمان‌بندی و تحویل و همچنین انتخاب تأمین‌کنندگان مناسب که فقط به امکانات مجاز در یک شبکه محدود می‌شوند. از دو روش کلاسیک و الگوریتم تجزیه بندرز به‌منظور حل مدل استفاده شده است. مسأله در سه اندازه حل گردید و الگوریتم تجزیه بندرز توانست در زمان بسیار کوتاهی به حل مسأله در ۳ اندازه بپردازد.

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین و جامع‌ترین مسائل در تصمیم‌گیری استراتژیک که به بهینه‌سازی عملیات بلندمدت و کارآمد کل زنجیره نیازمند است، مسأله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین است. تعیین تعداد، موقعیت، ظرفیت تسهیلات و همچنین کانال‌های توزیع و مقدار مواد مورد نیاز برای تولید، حرکت، و مصرف این مواد از تولیدکننده تا مشتریان شامل طراحی شبکه می‌شوند [۱]. هدف از طراحی زنجیره‌تأمین علاوه‌بر مکان‌یابی تسهیلات، حداقل‌کردن هزینه‌هایی مانند خرید، تولید، حمل‌ونقل و ... است [۲]. پروژه طراحی شبکه زنجیره‌تأمین با تعیین مکان‌های تسهیلات و تعیین ظرفیت مورد نیاز آن‌ها و برنامه‌ریزی فرآیندهای خرید، تولید، توزیع و نگهداری محصولات مواجه است [۳].

صنعت ساخت‌وساز یک محرک رشد برای اقتصاد جهانی با رشدی برابر ۴/۵ درصدی در میان مدت، در بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ خواهد داشت، که میزان رشد آن نسبت‌به بخش‌های تولید و خدمات بالاتر است. با نگاهی به دوره زمانی در بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰، رشد تولید ساخت‌وساز برای این دوره زمانی به‌طور متوسط تقریباً ۳/۶ درصد در سال خواهد بود و همچنان صنعت ساخت‌وساز محرک اصلی رشد برای اقتصاد جهانی باقی خواهد ماند. در طی دوره بین سال‌های ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۰، رشد ساخت‌وساز همچنان بالاتر از تولید و کمتر از خدمات خواهد بود [۴]. در دنیای امروزی توسعه صنعت ساخت‌وساز

* نویسنده مسئول: هیبت‌اله صادقی
تلفن: ۰۸۷-۳۳۶۶۰۰۷۳؛ پست الکترونیکی: h.sadeghi@uok.ac.ir

منجربه رشد و توسعه جوامع شده است. صنعت ساخت‌وساز نقش پررنگی در جذب سرمایه، اشتغال‌زایی، جذب افراد کارآمد و تحصیل‌کرده را دارد. پیشرفت فناوری در جهت بهینه‌سازی کیفیت مصالح، روش‌های طراحی و اجرا، تسریع ساخت‌وساز، استفاده کارآمد از نیروی کار و استفاده از روش‌های نوین ساخت از مؤلفه‌های تأثیرگذار در این صنعت است. باتوجه به نقش پررنگ صنعت ساخت‌وساز در رشد اقتصادی کشورها و ارتباط صنعت ساخت‌وساز با بخش‌های بالادستی و پایین‌دستی مانند منابع و مصالح (فلزات اساسی و کانی‌های غیرفلزی) و خدمات املاک و مستغلات دلایل و نقش این صنعت در اشتغال‌زایی و اقتصاد کشور توجه به این صنعت را حائز اهمیت کرده است. صنعت ساخت‌وساز به‌دلیل تنوع انواع منابع مورد نیاز هر کدام از پروژه‌ها، تعدد تأمین‌کنندگان و تنوع پروژه‌های ساخت‌وساز این زنجیره را پیچیده‌تر کرده است. طراحی کارآمد زنجیره‌تأمین به‌دلیل شبکه‌ای بودن ساختار آن که شامل مشخصات بازار، انتخاب تولیدکننده، روش‌های توزیع و تخصیص خانواده‌های محصول به بازارهای گوناگون است، دارای پیچیدگی‌های فراوانی است، لذا ضرورت طراحی مناسب زنجیره‌تأمین باتوجه به تنوع بالای منابع در صنعت‌وساز دارای اهمیت بالایی است. صنعت ساخت‌وساز به‌دلیل رشد روزافزون جمعیت در جهان، یکی از پرمصرف‌ترین مصرف‌کننده‌های منابع طبیعی به‌شمار رفته است. منابع در پروژه‌ها باتوجه به ارزش این منابع طبیعی و افزایش روز به روز قیمت آن نقش پررنگی در قیمت تمام شده پروژه‌ها دارد، ازاین‌رو مدیریت منابع نقش مهم و کلیدی در جهت کاهش قیمت تمام شده پروژه‌های ساخت‌وساز و بهره‌وری پروژه‌ها دارد. پروژه‌های ساخت‌وساز عموماً با محدودیت‌هایی اعم از منابع، ماشین‌الات و تجهیزات کارگاهی و نقدینگی مواجه است که تأثیر قابل توجهی بر زمان‌بندی و هزینه پروژه‌ها دارد. همچنین تعادل میان زمان و هزینه به‌عنوان یکی از جنبه‌های مهم مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز شناخته شده است، که باتوجه به بودجه یا مهلت مقرر پروژه یا حداقل‌کردن هزینه یا مدت زمان پروژه به‌دست خواهد آمد [۵]. در حالت کلی در زنجیره‌تأمین صنایع مختلف، سه نوع هزینه اصلی و تأثیرگذار، شامل هزینه‌های حمل‌ونقل، موجودی و مدیریت وجود دارد. هر کدام از این هزینه‌ها به‌ترتیب ۵۸ درصد، ۳۸ درصد و ۴ درصد از کل هزینه‌های لجستیک را شامل خواهد شد [۶]. کنترل و نگه‌داری موجودی به‌دلیل نقش پررنگ خود در کاهش هزینه‌ها مورد توجه سازمان‌ها قرار گرفته شده است. باتوجه به اینکه اقلام موجود در سازمان باید از منظر زمان، هزینه، کیفیت و تعداد در بخش‌های تولید و فروش در دسترس باشند، لذا تصمیم‌گیری بهینه در ارتباط با زمان تولید، مقدار تولید و زمان‌های حمل‌ونقل یکی از دغدغه‌های مدیران است [۷]. مدیریت و کنترل موجودی منابع مصرفی در ساخت‌وساز از آنجا قابل اهمیت است، که حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد از کل هزینه پروژه صرف مصالح و مدیریت آن خواهد شد. به‌عبارت دیگر مدیریت زنجیره‌تأمین یکی از فرآیندهای اصلی یک پروژه ساختمانی است و هرگونه صرفه‌جویی در هزینه منابع می‌تواند منجربه بهبود در سودآوری گردد، ازسوی دیگر میانگین هزینه منابع ۶۴ درصد ارزش فروش و تنها ۳۶ درصد هزینه دستمزد و حقوق، سربار سود و غیره را دارا است [۸]. در مدل‌های موجودی تولیدکننده و خریدار، دو نوع استراتژی برای ارسال سفارش از طرف تولیدکننده درنظر گرفته شده است: استراتژی نخست براساس سیستم‌های کلاسیک که در آن تمام محصولات سفارش‌داده شده خریدار به‌صورت یکجا و بعد از مدت زمان تدارک، از طرف خریدار ارسال می‌گردد که به این حالت SSSD یا Single Setup Single Delivery گفته می‌شود، در حالت دوم سفارش هر دوره خریدار طی چند مرحله در طی دوره دریافت می‌شود که به این حالت (SSMD) Single Setup Multiple Delivery گفته می‌شود. در سیاست SSSD هزینه‌های نگه‌داری افزایش ولی هزینه‌های تدارک کاهش می‌یابد ولی سیستم SSMD عکس این موضوع عمل خواهد کرد [۹]. ازسوی دیگر ساخت‌وساز یک صنعت روبه رشد و در حال حرکت است، که در آن تجهیزات زیادی در مکان‌ها و پروژه‌های مختلف استفاده می‌شوند. این أمر مدیریت موجودی را به یک چالش تبدیل می‌کند، زیرا هدف ایده‌آل این است که موجودی خود را سازماندهی کنید و بدانید که چه مقدار از منابع موجود در میدان موجود است. لازم به ذکر است که هزینه‌های موجودی نقش حائز اهمیتی بر کنترل موجودی و مدیریت آن در پروژه‌ها دارد. به‌دلیل فرارقابتی بودن و پروژه محور بودن صنعت‌وساز، هرگونه مسأله در مدیریت زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز (مثلاً نداشتن برنامه‌ریزی صحیح) می‌تواند منجربه زیان‌های شدید در جنبه‌های مختلف پروژه شود.

در دنیای رقابتی امروز ارائه محصولات و خدمات باکیفیت مناسب و قیمت پایین و به‌موقع لازمه حیات بنگاه‌های تولیدی به‌شمار می‌آید. منشأ این معیارهای ارزیابی معمولاً در نهادهای ورودی جستجو می‌شود که توسط تأمین‌کنندگان یک بنگاه فراهم می‌شود. این نگرش به فرآیند تأمین و تدارک، ارزش استفاده از تکنیک‌های دقیق و کارآمد را برای ارزیابی تأمین‌کنندگان بیان می‌کند [۱۰]، لذا مسأله انتخاب تأمین‌کننده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مطالعه برای انتخاب تأمین‌کننده، از یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی چندهدفه استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه، ارائه یک مدل ریاضی جهت طراحی یک زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز، انتخاب تأمین‌کننده تحت مکانیزم بازه‌ی زمانی نرم و درنظر گرفتن ملاحظات مدیریت موجودی است. در این مقاله فرض شده است که خریدار می‌تواند منابع متعدد را از چندین تأمین‌کننده با صلاحیت تهیه کند. در این مطالعه، یک مدل ریاضی خطی با سه تابع هدف فرموله می‌شود که شامل دو تابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی و یک تابع هدف به‌صورت بیشینه‌سازی است. همچنین یک زنجیره‌تأمین دوسطحی در صنعت ساخت‌وساز شامل تأمین‌کنندگان و پروژه‌ها با هدف تهیه مقادیر مناسب سفارش منابع از تأمین‌کننده منتخب برای هر دوره و هر کدام از پروژه‌ها ارائه می‌گردد. در این راستا پیشینه پژوهش گستردهای وجود دارد که در بخش دوم به آن پرداخته شده است. در بخش سوم و چهارم به‌ترتیب به مدل‌سازی، نتایج و تحلیل

حساسیت پرداخته شده است .در انتها در بخش پنجم به جمع‌بندی مباحث پرداخته شده است.

۲. مرور پیشینه تحقیق

۲-۱. طراحی زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز

با تجربه صنعت تولید، کوسکلا فلسفه تولید جدید را در ساخت‌وساز به‌کار برد [۱۱]. در همان دوره، اوبراین و فیشر مدیریت زنجیره را به‌صراحت در ساخت‌وساز معرفی کردند [۱۲]. به نقل از لو و همکاران از زمان این مقالات اولیه، تعدادی از مطالعات بعدی انجام شده که به‌دنبال رسیدگی به مسائل مدیریت زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز هستند، که به دو گروه اصلی طبقه بندی می شوند: اول، اتخاذ فناوری اطلاعات برای پشتیبانی از فرآیند مدیریت؛ و دوم، بهبود فرآیندهای مدیریت براساس روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی [۱۳]. دسته اول، شامل مطالعاتی هستند که از فناوری‌های اطلاعاتی مختلف مانند سامانه بازشناسی با امواج رادیویی برای نظارت بصری مدیریت زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز استفاده می‌شود و خارج از بحث این مطالعه است که به بررسی آن پرداخته نخواهد شد. برای دسته دوم، مطالعاتی قرار دارند که از رویکردها و روش‌های مختلفی برای توسعه مدل‌های زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز استفاده کرده بودند، قرار گرفته‌اند [۱۳]. ویدالاکیس و همکاران یک مدل شبیه‌سازی براساس تکنیک مدل‌سازی شبیه‌سازی گسسته ایجاد کردند. آن‌ها در مطالعه خود از نرم‌افزار شبیه‌سازی برای ارزیابی أثر نوسانات تقاضا مصالح ساختمانی بر کارایی هزینه زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که سود با سطح تقاضا رابطه معکوس دارد، که دلیل آن بیشتر به‌دلیل هزینه موجودی بالاتر همراه با تقاضای بالاتر بوده است [۱۴]. ژانگ و همکاران یک روش برنامه‌ریزی خطی برای محاسبه مقادیر بهینه مواد برای حمل‌ونقل از انبارهای مختلف به سایت‌های مختلف ساخت‌وساز ارائه کردند. تابع هدف به‌حداقل رساندن هزینه کل توزیع و حمل‌ونقل مواد بود که در معرض محدودیت‌های ظرفیت ذخیره‌سازی انبارها و تقاضا در سایت‌ها قرار داشت [۱۵]. یاشکوفسکی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای تعیین مقادیر سفارش اقتصادی و تعیین مقرون‌به‌صرفه‌ترین کانال‌های عرضه مواد با هدف کاهش هزینه‌های موجودی در صنعت ساخت‌وساز ارائه کردند [۱۶]. هسو و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای به‌منظور تعیین نحوه واکنش تولید کارخانه و مدیریت موجودی به تغییرات تقاضا در سایت‌های ساخت‌وساز با هدف کاهش کل هزینه‌ها از قبیل موجودی و حمل‌ونقل ارائه کردند [۱۷]. محمدنظری و قنادپور یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در شرایط عدم قطعیت قیمت و مقدار مصرف مصالح و با هدف انتخاب بهترین تأمین‌کننده، یافتن بهترین مکان برای انبار، مقدار بهینه تحویل منابع با هدف کاهش هزینه‌ها ارائه کردند [۱۸]. فو و زینگ دو مدل در زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز ارائه کردند. در مدل اول (مدل مدیر پروژه)، با هدف تعیین مقادیر سفارش، پارامتر مشوق، تاریخ سررسید و تاریخ سفارش و در مدل دوم (مدل تأمین‌کنندگان)، عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان به‌منظور متعادل‌سازی زمان تحویل و هزینه‌ها را تعیین کردند [۱۹]. سید و ال رایز یک مدل برنامه‌ریزی لجستیک ساخت‌وساز را پیشنهاد کردند که به‌طور مشترک تصمیمات برنامه‌ریزی تهیه مواد و ذخیره‌سازی مواد در سایت‌های ساخت‌وساز را بهینه می‌کند [۲۰]. سید و ال رایز در مطالعه‌ی بعدی چارچوب خود را برای توسعه یک سیستم خودکار بهینه‌سازی لجستیک ساخت‌وساز چندهدفه توسعه دادند، که قادر به برنامه‌ریزی همزمان تأمین و ذخیره‌سازی مواد، برنامه‌ریزی فعالیت‌ها و چیدمان امکانات است [۲۱]. لیو و همکاران مدلی به‌منظور برنامه‌ریزی تولید و خرید با هدف تعیین هزینه مالک، سازنده، تعیین سطح خدمات و کاهش ریسک‌های ناشی از عدم قطعیت تقاضا، زمان تأخیر و مدیریت عملیات محصولات پیش‌ساخته ارائه کردند [۲۲]. هشیم و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا، ظرفیت تولید، هزینه تولید و هزینه حمل‌ونقل و با هدف برنامه‌ریزی تولید و توزیع و بهینه‌سازی هزینه‌ها در ساخت یک نیروگاه بزرگ آبی را ارائه کردند [۲۳].

۲-۲. زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز و کنترل موجودی

باتوجه به اینکه صنعت ساخت‌وساز یک محرک رشد برای اقتصاد جهانی است، مسأله طراحی کارآمد زنجیره‌های تأمین ساخت‌وساز با درنظر گرفتن مباحث مدیریت موجودی بسیار پیچیده است. تحقیقات در مورد مدل‌های زنجیره‌تأمین که مباحث موجودی را در صنعت ساخت‌وساز پوشش دهد محدود بود، لذا در ادامه به بررسی پاره‌ایی از مطالعات در این حیطه پرداخته شده است. لیو و تائو یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در شرایط عدم قطعیت زمان تحویل، تعیین مقادیر بهینه سفارش‌دهی، نقطه سفارش‌دهی مجدد و زمان تدارک با هدف کاهش هزینه‌ها تحت سیاست بازپرسازی مرور دائم ارائه کردند [۲۴]. کولکارنی و هالدر یک مدل شبیه‌سازی تحت شرایط عدم قطعیت زمان فعالیت‌ها، تعیین نقطه سفارش‌دهی مجدد و مقدار سفارش با هدف کاهش میانگین سطح موجودی و زمان توقف به‌دلیل در دسترس نبودن مواد و تحت سیاست بازپرسازی مرور دائم ارائه کردند [۲۵]. السادات سالاری و همکاران یک مدل ریاضی دوهدفه عدد صحیح مختلط در شرایط عدم قطعیت تقاضا و تحت سیاست بازپرسازی مرور دائم و با هدف مسأله مسیریابی، موجودی، مکانیابی و حمل‌ونقل و به‌حداقل رساندن هزینه کل، دستیابی به زمان تحویل مطلوب و متعادل‌کردن بار کاری راننده در مرحله مسیریابی ارائه کردند، در این مطالعه برای مقابله با تقاضای تصادفی در مناطق مشتری همه‌ی انبارهای تأمین‌کننده مقدار مشخصی از هر منبع را به‌عنوان ذخیره ایمنی نگهداری خواهند کرد. همچنین، محدودیت‌های ظرفیت تصادفی انبارها را با مقدار مشخصی از منابع برای سطح ریسک درنظر خواهند گرفت که مانع از فرارفتن موجودی انبار از حداکثر مقدار گردد [۲۶]. سید و ال رایز یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط تحت سیاست بازپرسازی مرور دائم و با هدف حداقل‌کردن هزینه‌ها و برنامه‌ریزی تهیه مواد، ذخیره‌سازی مواد و چیدمان مواد در

سایت‌های ساخت‌وساز ارائه کردند [۲۷]. زو و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی در شرایط عدم قطعیت موجودی اولیه و سطح تأمین تحت دو سیاست بازپرسازی مرور دوره‌ایی و دائم و با هدف مقایسه ارزش اطلاعات به اشتراک‌گذاری شده در یک زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز دوسطحی ارائه کردند [۲۸]. گل‌پیرا در مطالعه‌ی خود یک مدل برنامه-ریزی عدد صحیح مختلط به‌منظور طراحی و مدیریت موجودی منابع در یک شبکه زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز چندمنبعی، چندپروژه‌ای و چندتأمین‌کننده‌ای ارائه کردند [۲۹]. در جدول (۱) خلاصه‌ایی از مطالعات اصلی در ادبیات موضوع دسته‌بندی شده است. در این مطالعه به طراحی یک زنجیره‌تأمین دوسطحی در صنعت ساخت‌وساز با هدف کاهش هزینه‌های خرید کل، انتخاب تأمین‌کننده، افزایش سطح کیفی منابع و کاهش زمان تحویل منابع با درنظرگرفتن ملاحضات مدیریت موجودی منابع پرداخته شده است. باتوجه به مطالعات پیشین، فقدان مدلی که بتواند نوآوری‌های زیر را درنظر بگیرد، وجود دارد. این نوآوری‌ها عبارتند از:

- ✓ حداقل کردن هزینه و جریمه مرتبط با نقض برنامه زمانی تأمین منابع، حداکثرکردن کیفیت منابع دریافتی و انتخاب تأمین‌کننده به‌صورت همزمان با درنظرگرفتن مدیریت موجودی منابع در طراحی زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز

جدول (۱). مروری برگزیده‌ای از مطالعات پیشین

نویسنده	سال انتشار	مدل	انتخاب تأمین‌کننده	تصمیمات کلیدی		رویه حل
				متغیر تصمیم‌گیری	تابع هدف	
سالاری و همکاران [۲۶]	۲۰۲۲	اندازه انباشته		مقدار موجودی	حداقل‌سازی هزینه‌ها	هیورستیک
لو و همکاران [۱۳]	۲۰۱۸	مقدار سفارش اقتصادی		مقدار سفارش	حداقل‌سازی هزینه‌ها	دقیق و متاهیورستیک
لیو و تائو [۲۴]	۲۰۱۵	مقدار سفارش اقتصادی		مقدار سفارش زمان تدارک نقطه سفارش‌دهی مجدد	حداقل‌سازی هزینه‌ها	متاهیورستیک
کولکارنی و هالدر[۲۵]	۲۰۲۰	اندازه انباشته		مقدار سفارش نقطه سفارش‌دهی مجدد	حداقل‌سازی میانگین سطح موجودی	دقیق و شبیه‌سازی
یاشکوفسکی و همکاران [۱۶]	۲۰۱۸	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط		مقدار سفارش	حداقل‌سازی هزینه‌ها	دقیق
هسو و همکاران [۱۷]	۲۰۱۸	برنامه‌ریزی تصادفی		نرخ تولید مقادیر حمل‌ونقل	حداقل‌سازی هزینه‌ها	دقیق
محمد نظری و قنادپور[۳۰]	۲۰۲۱	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط		مقدار سفارش	حداقل‌سازی هزینه‌ها	دقیق
سید و ال رایز [۲۷]	۲۰۱۱	برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط		مقدار سفارش	حداقل‌سازی هزینه‌ها	هیورستیک
فو و زینگ [۱۹]	۲۰۲۱	برنامه‌ریزی خطی		مقدار سفارش زمان سفارش‌دهی	حداقل‌سازی هزینه‌ها	متاهیورستیک
هشیم و همکاران [۳۱]	۲۰۱۳	برنامه‌ریزی دومرحله‌ای		مقدار جابه‌جایی مواد	حداقل‌سازی هزینه‌ها بهبود سطح سرویس‌دهی	دقیق و متاهیورستیک
گل‌پیرا [۲۹]	۲۰۲۰			مقدار جابجایی مواد	حداقل‌سازی هزینه‌ها	دقیق
مدل پیشنهادی		برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	✓		حداقل‌سازی هزینه‌ها حداکثرسازی کیفیت منابع حداقل‌سازی جریمه مرتبط با نقض زمانی پروژه	دقیق

۳. تعریف مسأله

در این مطالعه صنعت ساخت‌وساز در قالب یک زنجیره دوسطحی، شامل تأمین‌کنندگان و پروژه‌ها درنظر گرفته خواهد شد. یک شرکت عمرانی وظیفه پیاده‌سازی و اجرا انواع پروژه‌ها از قبیل سدسازی، راه‌سازی، برج‌سازی، پل‌سازی و.... را در این زنجیره‌تأمین برعهده دارد. در مجاورت محل راه‌اندازی پروژه‌ها، تسهیلاتی (انبارهای موقت) که جزو دارایی‌هایی پروژه است، به‌منظور نگهداری و پیش‌پردازش منابع راه‌اندازی می‌گردد و هر تسهیل مختص یک پروژه است. در این زنجیره شرکت عمرانی منابع موردنیاز خود را برای پاسخگویی به تقاضای پروژه‌ها به تسهیلات سفارش می‌دهند. تقاضا برای هر کدام از منابع موردنیاز در هر پروژه به‌صورت دوره‌ای درنظر گرفته شده است و طول دوره باتوجه به ماهیت پروژه می‌تواند روزانه، هفتگی یا ماهیانه باشد، ازسوی دیگر مقدار تقاضا برای هر پروژه و برای هر دوره زمانی در ابتدای افق برنامه‌ریزی و قبل از اجرای پروژه موردنظر تعیین می‌گردد. بعد از پیش‌بینی مقدار تقاضا برای هر دوره، تسهیل مرتبط با هر پروژه، میزان منابع موردنیاز را به تأمین‌کنندگان سفارش خواهند داد. تأمین‌کنندگان منابع موردنیاز را تهیه و در زمان مقرر به تسهیلات مرتبط ارسال می‌کنند. در ابتدا تعدادی تأمین‌کننده بالقوه و باصلاحیت برای تأمین هر کدام از منابع موردنیاز پروژه‌ها انتخاب خواهند شد، ولی تأمین‌کننده‌ای که ازنظر معیارهای کیفیت، فاصله، قیمت و ظرفیت تأمین مناسب باشد جهت تأمین منابع موردنیاز انتخاب می‌گردد. در این مطالعه فرض شده است که خریدار می‌تواند منابع متعدد را از چندین تأمین‌کننده باصلاحیت تهیه کند که معیارهای ارزیابی آن‌ها عبارت‌اند از: هزینه خرید منبع، هزینه حمل‌ونقل، هزینه نگهداری، هزینه سفارش‌دهی، هزینه ثابت، سطح کیفی منابع خریداری شده، برنامه زمانی تحویل، محدودیت حداقل سفارش برای هر منبع، محدودیت تقاضا برای هر منبع و محدودیت ظرفیت هر تأمین‌کننده. هر معیار، برای ارزیابی قسمتی از عملکرد تأمین‌کنندگان، به‌کار گرفته می‌شود؛ به‌نحوی‌که برخی از آن‌ها به‌عنوان تابع هدف و برخی دیگر به‌عنوان محدودیت در مدل مسأله وارد می‌شوند. درنتیجه یک مدل خطی با سه تابع هدف فرموله می‌شود که شامل دو تابع هدف مینیمم‌سازی و یک تابع هدف ماکزیمم‌سازی است. هدف از این مطالعه، ارائه یک مدل ریاضی جهت حل مسأله انتخاب تأمین‌کننده تحت مکانیزم بازه زمانی نرم و طراحی شبکه زنجیره‌تأمین دوسطحی، با اهداف کاهش هزینه‌ها، جریمه مرتبط با نقض برنامه زمانی تحویل منابع، مدیریت موجودی منابع و انتخاب تأمین‌کننده در صنعت ساخت‌وساز است. در مدل پیشنهادی، مهم‌ترین فاکتورها و معیارهای ارزیابی تأمین‌کنندگان درنظر گرفته شده است، زیرا تصمیمات انتخاب تأمین‌کننده یک بخش مهم از مدیریت تأمین است که منجربه کاهش هزینه‌ها و بهبود شرایط رقابتی می‌گردد، در ادامه به بیان سایر مفروضات مسأله به‌شرح زیر، پرداخته شده است:

- ✓ تقاضا منابع گسسته است.
- ✓ افق زمانی محدود و شامل تعدادی دوره زمانی است.
- ✓ زنجیره شامل پروژه‌ها، منابع و تسهیلات است.
- ✓ انتخاب تأمین‌کننده براساس معیارهای قیمت منابع، فاصله تأمین‌کننده تا محل احداث پروژه، ظرفیت تأمین‌کننده و کیفیت منابع صورت می‌پذیرد. سه معیار اول در محدودیت‌های مدل و معیار چهارم در تابع هدف قرار گرفته شده است.
- ✓ مدیریت موجودی منابع در این زنجیره‌تأمین درنظر گرفته شده است.
- ✓ خط‌مشی دریافت منابع از نوع خط‌مشی تحویل یک‌باره منابع (SSSD) درنظر گرفته شده است، به‌عبارت دیگر تمام منابع موردنیاز برای یک دوره، یک‌باره برای آن دوره تحویل داده خواهد شد.

در این بخش، فرمول‌بندی شبکه زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز مورد بحث قرار گرفته شده است.

۳-۱. مدل‌سازی ریاضی

ابتدا نمادهای به‌کار رفته در مدل‌سازی معرفی می‌گردند.

مجموعه‌ها

مجموعه تأمین‌کنندگان	$s \in S = \{1, 2, \dots, S\}$
مجموعه پروژه‌ها	$p \in P = \{1, 2, \dots, P\}$
مجموعه منابع	$r \in R = \{1, 2 \dots, R\}$
مجموعه تسهیلات	$f \in F = \{1, 2, \dots, F\}$
مجموعه دوره‌های زمانی	$t \in T = \{1, 2, \dots, T\}$
مجموعه منابع ($r \in R$) که در نقاط پروژه ($P \in P$) مورد نیاز است.	R_P
مجموعه تسهیلات که به نقاط پروژه تخصیص داده می‌شود.	F_p

پارامترها

α_{rft}	مقدار تقاضا برای تسهیل f در دوره t برای منبع نوع r
φ_{sf}	فاصله بین تأمین‌کننده s و تسهیل f
Cp_{rft}	هزینه کمبود برای منبع r در تسهیل f در دوره t
$C_{rst}^{purchase}$	قیمت خرید برای منبع نوع r از تأمین‌کننده s در دوره t
B_P	بودجه کلی پروژه P
A_{rst}	حداقل مقدار قابل‌پذیرش برای منبع نوع r از تأمین‌کننده s در دوره t
Cap'_s	ظرفیت تأمین‌کننده s
Cap''_f	ظرفیت تسهیل f
Cap'''_p	ظرفیت پروژه p
$\mathbb{C}'_s$	هزینه راه‌اندازی تأمین‌کننده s
$\mathbb{C}''_f$	هزینه راه‌اندازی تسهیل f
$\mathbb{C}'''_p$	هزینه راه‌اندازی پروژه p
Ctr_{rsft}	هزینه حمل‌ونقل برای منبع نوع r از تأمین‌کننده s به‌سمت تسهیل f در دوره t
Ch_{rft}	هزینه نگهداری برای منبع نوع r در تسهیل f در دوره

t

$\mathbb{C}_{fp}^{Fix}$ هزینه ثابت تخصیص تسهیل f به پروژه p

C_{rsf}^{Ord} هزینه سفارش‌دهی برای منبع نوع r از تأمین‌کننده s در دوره t

ε_{rsft} درصد منبع خراب از نوع r از تأمین‌کننده s در دوره t که برای تسهیل f فرستاده می‌شود.

L_{rs} Lead time برای منبع r تحویل توسط تأمین‌کننده s

$L\chi_{rs}$ حد پایین برای زودترین تاریخ تحویل برای منبع r از تأمین‌کننده s

χ_{rs} زودترین تاریخ تحویل برای منبع r از تأمین‌کننده s

$U\psi_{rs}$ حد بالا برای دیرترین تاریخ تحویل برای منبع r از تأمین‌کننده s

ψ_{rs} دیرترین تاریخ تحویل برای منبع r از تأمین‌کننده s

$C\chi_{rs}$ هزینه واحد جریمه وارد شده درصورتی‌که منبع r بین $L\chi_{rs}$ و χ_{rs} توسط تأمین‌کننده s تحویل داده شود.

$C\psi_{rs}$ هزینه واحد جریمه وارد شده درصورتی‌که منبع r بین ψ_{rs} و $U\psi_{rs}$ توسط تأمین‌کننده s تحویل داده شود.

متغیرها

$\mathcal{M}_{\text{rsft}}$ مقدار سفارش برای منبع نوع r از تأمین‌کننده s برای تسهیل f در دوره t

I_{rft}^{-} باقی‌مانده پس‌افت برای منبع نوع r در تسهیل f برای دوره زمانی t

I_{rft}^{+} موجودی در دسترس برای منبع نوع r در تسهیل f برای دوره زمانی t

γ_s' متغیر صفر و یک که بیان‌کننده این است که آیا تأمین‌کننده s راه‌اندازی شده است یا خیر؟

γ_f'' متغیر صفر و یک که بیان‌کننده این است که آیا تسهیل f راه‌اندازی شده است یا خیر؟

γ_p''' متغیر صفر و یک که بیان‌کننده این است که آیا پروژه p راه‌اندازی شده است یا خیر؟

μ_{ftp} متغیر صفر و یک که بیان‌کننده این است که آیا تسهیل f منابع را به‌سمت پروژه p در دوره t منتقل می‌کند یا خیر؟

β_{rsft} متغیر صفر و یک که بیان‌کننده این است که آیا منبع نوع r توسط تأمین‌کننده s برای تسهیل f و دوره زمانی t منتقل می‌شود یا خیر؟

π_{rsft} مقدار کمبود برای منبع نوع r از تأمین‌کننده s در دوره t برای تسهیل f

ϑ_{fp} متغیر صفر و یک که بیان‌کننده این است که آیا تسهیل f منابع را به‌سمت پروژه p منتقل می‌کند یا خیر؟

η_{frtp} متغیر صفر و یک که بیان‌کننده این است که آیا تسهیل f منبع نوع r به‌سمت پروژه p در زمان t منتقل می‌کند یا خیر؟

در این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز باهدف مدیریت موجودی منابع ارائه شده است. در این مدل، نه‌تنها هزینه‌های پروژه بلکه رویکردی نوین به‌منظور جلوگیری از نقض برنامه زمانی تحویل منابع از سوی تأمین‌کنندگان به‌عنوان یکی از توابع هدف مسأله افزوده شده است. برای مدل‌سازی آن، پنجره‌های زمانی نرم تعریف شده است. در حالت ایده‌آل، اگر منابع بین χ_{rs} و ψ_{rs} تحویل داده شوند، پذیرفته خواهند شد و تمام منابع تحویل شده قبل از $L\chi_{rs}$ و بعد از $U\psi_{rs}$ رد می‌شوند و به تأمین‌کننده بازگردانده می‌شوند. با این حال، منابع تحویل داده شده در بازه زمانی بین $L\chi_{rs}$ و χ_{rs} و همچنین L_{rs} و $U\psi_{rs}$ به‌همراه جریمه پرداخت شده توسط تأمین‌کننده پذیرفته می‌شوند. در این مطالعه تابع جریمه ارائه شده توسط تأمین‌کنندگان مطابق رابطه شماره (۱) است [۳۲]:

$$P_{rs}=\begin{cases}\infty & L_{rs}<L\chi_{rs}\\ C\chi_{rs}(\chi_{rs}-L_{rs}) & L\chi_{rs}\le L_{rs}<\chi_{rs}\\ 0 & \chi_{rs}\le L_{rs}\le\psi_{rs}\\ C\psi_{rs}(L_{rs}-\psi_{rs}) & \psi_{rs}\le L_{rs}<U\psi_{rs}\\ \infty & U\psi_{rs}<L_{rs}\end{cases} \quad (۱)$$

ازسوی دیگر همان‌طور که پیش‌تر بیان گردید، معیار کیفیت در انتخاب تأمین‌کننده حائز اهمیت است؛ لذا حداکثرسازی معیار کیفیت نیز در یکی از توابع هدف ارائه شده است.

مدل‌سازی توابع هدف و محدودیت‌ها

در این بخش به فرمول‌بندی مسأله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز از طریق یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط پرداخته شده است، اختصاص دارد.

$$\text{Min Cost: } \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\mathcal{M}_{rsft}\times C_{rst}^{purchase}+\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}Ctr_{rsft}\times\mathcal{M}_{rsft}\times\varphi_{sf}+\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}C_{rsf}^{ord}\times\beta_{rsft}+\sum_{s=1}^{S}\mathbb{C}_s'\,\gamma_s'+\sum_{f=1}^{F}\mathbb{C}_f''\,\gamma_f''+\sum_{p=1}^{P}\mathbb{C}_p'''\gamma_p'''+\sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}Cp_{rft}\times I_{rft}^{-}+\sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}Ch_{rft}\times I_{rft}^{+}+\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\vartheta_{fp}\times\mathbb{C}_{fp}^{Fix} \quad (۲)$$

$$\text{Max Quality: } \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\mathcal{M}_{rsft}\times(1-\varepsilon_{rsft}) \quad (۳)$$

$$\text{Min Penalty: } \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\mathcal{M}_{rsft}\times C\chi_{rs}(\chi_{rs}-L_{rs})+\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\mathcal{M}_{rsft}\times C\psi_{rs}\,(L_{rs}-\psi_{rs}) \quad (۴)$$

$$\text{St: } \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\mathcal{M}_{rsft}\times C_{rst}^{purchase}+\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}Ctr_{rsft}\times\mathcal{M}_{rsft}\times\varphi_{sf}+\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}C_{rsf}^{ord}\times\beta_{rsft}+\sum_{s=1}^{S}\mathbb{C}_s'\,\gamma_s'+\sum_{f=1}^{F}\mathbb{C}_f''\,\gamma_f''+\sum_{p=1}^{P}\mathbb{C}_p'''\gamma_p'''+\sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}Cp_{rft}\times I_{rft}^{-}+\sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}Ch_{rft}\times I_{rft}^{+}+\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\vartheta_{fp}\times\mathbb{C}_{fp}^{Fix}\le Bp\,,\forall p \quad (۵)$$

$$\sum_{f\in F_p}\vartheta_{fp}=1,\qquad\forall p \quad (۶)$$

$$\sum_{p=1}^{P} \vartheta_{fp} = 1, \qquad \forall f \qquad (۷)$$

$$\eta_{frtp} = \mu_{ftp} \ , \qquad \forall f, r \in R_p, t, p \qquad (۸)$$

$$\sum_{s=1}^{S} \mathcal{M}_{r,s,f,t} \geq \alpha_{rft} \qquad \forall r, f, t \qquad (۹)$$

$$\mathcal{M}_{r,s,f,t} \geq A_{rst} \times \beta_{rsft} \qquad \forall r, s, f, t \qquad (۱۰)$$

$$\mathcal{M}_{r,s,f,t} \leq \beta_{rsft} \, M' \qquad \forall r, s, f, t \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{r=1}^{R} \sum_{s=1}^{S} \sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{r,s,f,t} \leq M' \sum_{p=1}^{P} \vartheta_{fp} \qquad \forall f \qquad (۱۲)$$

$$I_{rft}^{+} = I_{rf(t-1)}^{+} + \sum_{s=1}^{S} \mathcal{M}_{r,s,f,t} - \sum_{s=1}^{S} \pi_{rsft} \qquad \forall r, f, t \qquad (۱۳)$$

$$I_{rft}^{-} = I_{rf(t-1)}^{-} + \alpha_{rft} - \pi_{rsft} \qquad \forall r, s, f, t \qquad (۱۴)$$

$$\pi_{rsft} \leq I_{rf(t-1)}^{-} \qquad \forall r, s, f, t \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{r=1}^{R} \sum_{f=1}^{F} \sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{r,s,f,t} \leq Cap_s' \times \gamma_s' \qquad \forall s \qquad (۱۶)$$

$$\mathcal{M}_{r,s,f,t} \leq \beta_{rsft} \times Cap_s' \qquad \forall r, s, f, t \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{r=1}^{R} \sum_{s=1}^{S} \sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{r,s,f,t} \leq Cap_f'' \times \gamma_f'' \qquad \forall f \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{r=1}^{R} \sum_{f=1}^{F} \sum_{t=1}^{T} I_{rft}^{+} \leq Cap_p''' \times \gamma_p''' \qquad \forall p \qquad (۱۹)$$

$$\beta_{rsft} \times \ L_{rs} \leq U\psi_{rs} \qquad \forall r, s, f, t \qquad (۲۰)$$

$$\beta_{rsft} \ \times (L_{rs} - L\chi_{rs}) \geq 0 \qquad \forall r, s, f, t \qquad (۲۱)$$

$$\vartheta_{fp}, \mu_{ftp}, \eta_{frtp}, \beta_{rsft}, \gamma_s, \gamma_f, \gamma_p \in \{0,1\}$$
$$I_{rft}^{+} \ , \ I_{rft}^{-} \ , \ \mathcal{M}_{r,s,f,t}, \pi_{rsft} \geq 0$$

تابع هدف اول برای به‌حداقل‌رساندن هزینه خرید کل شبکه طراحی شده است که شامل ۷ عبارت اساسی است: ۱) هزینه خرید منابع ۲) هزینه حمل‌ونقل، ۳) هزینه سفارش‌دهی ۴)هزینه راه‌اندازی ۵) هزینه کمبود ۶) هزینه نگهداری ۷) هزینه ثابت تخصیص پروژه p به تسهیلات f

تابع هدف دوم، تابع هدف حداکثرسازی است که برای به‌حداکثر رساندن سطح تضمین کیفیت استفاده می‌شود. تابع هدف سوم، یک تابع هدف کمینه‌سازی است که برای به‌حداقل رساندن جریمه مربوط به نقض برنامه زمانی تحویل منابع استفاده می‌شود. محدودیت (۵) بیانگر این است که کل هزینه‌های شبکه نباید از بودجه پروژه تجاوز کند. محدودیت‌های (۶) و (۷) تعریف می‌کنند که فقط یک تسهیل f به یک پروژه p اختصاص داده می‌شود و بالعکس. محدودیت (۸) نشان می‌دهد که یک منبع باید از طریق تسهیلات انتخابی f اختصاص داده شده به پروژه انتخاب شده منتقل شود. علاوه‌بر این، منبعی که با تسهیل انتخابی مرتبط است فقط باید انتخاب شود. محدودیت (۹) بیان می‌کند که مقدار تقاضا برای هر منبع تجدیدناپذیر باید برآورده شود. محدودیت (۱۰) حداقل مقدار موردنیاز سفارش برای هر تأمین‌کننده را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) بیانگر این است که مقدار سفارش تنها زمانی می‌تواند مثبت باشد که متغیر صفر و یک مربوط به آن مقدار ۱ را بگیرد. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که فقط مقادیر مناسبی از منابع موردنیاز از طریق یک تسهیلات معتبر به هر پروژه منتقل می‌شود. محدودیت (۱۳) بیانگر میزان موجودی در دسترس از نوع منبع r برای تسهیل f در پایان دوره زمانی t است. باقی‌مانده پس‌افت در هر دوره برابر است با باقی‌مانده پس‌افت دوره قبل به‌اضافه تقاضا برای منبع در این دوره منهای مقدار کمبود برای منبع در هر دوره است و توسط محدودیت (۱۴) نمایش داده شده است. محدودیت (۱۵) تضمین می‌کند که در هر دوره حداکثر، سفارش‌های باقی‌مانده از دوره قبل تحویل داده می‌شود. محدودیت (۱۶) ظرفیت هر تأمین‌کننده را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۷) نماینده ظرفیت کل تأمین‌کننده است. محدودیت (۱۸) ظرفیت مرکز توزیع را برای هر دوره محدود می‌کند. محدودیت (۱۹) ظرفیت پروژه‌ها را برای هر دوره محدود می‌کند. محدودیت (۲۰) حداکثر زمان تحویل را برای تأمین‌کنندگان برای تحویل قطعات در هر دوره تضمین می‌کند. محدودیت (۲۱) نشان می‌دهد که زمان تحویل نباید زودتر از پایین‌ترین حد زمان تحویل باشد.

۴. روش حل (الگوریتم تجزیه بندرز)

الگوریتم تجزیه بندرز یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح را به یک مسأله اصلی و یک مسأله فرعی تجزیه می‌کند که به‌طور تکراری با استفاده از راه‌حل‌های یکدیگر حل می‌شوند. مسأله فرعی شامل متغیرهای پیوسته و محدودیت‌های مرتبط با آن است، درحالی‌که مسأله اصلی شامل متغیرهای عدد صحیح و یک متغیر پیوسته است. حل مسأله اصلی به‌طور بهینه یک حد پایین برای هدف موردنظر فراهم می‌کند. با استفاده از راه‌حل به‌دست آمده از مسأله اصلی و ثابت‌کردن متغیرهای عدد صحیح به‌عنوان ورودی، یک مسأله دوگان برای مسأله فرعی حل می‌شود. این راه‌حل می‌تواند برای تعریف یک کران بالایی برای مسأله کلی استفاده شود. علاوه‌بر این، حل مسأله فرعی دوگان به ایجاد یک برش بندرز کمک می‌کند که شامل واردکردن متغیرهای پیوسته اضافی به مسأله اصلی است. در تکرار بعدی، این برش به مسأله اصلی اضافه می‌شود و با حل آن، یک کران پایین جدید برای مسأله کلی به‌دست می‌آید که از بدتر نبودن آن از کران پایین فعلی اطمینان حاصل می‌شود. این فرآیند به‌طور مکرر تکرار می‌شود تا به‌سمت یک راه‌حل بهینه برای مسأله برنامه‌نویسی عدد صحیح اصلی همگرا شود [۳۳]. باتوجه به اینکه مسأله ما چندهدفه است، برای استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز ابتدا باید خطی‌سازی گردد و به‌دنبال آن، مسأله فرعی (BSP)، مسأله اصلی (MP) و دوگان مسأله فرعی (DBSP) فرموله می‌شوند.

۴-۱. تک‌هدفه کردن مدل پیشنهادی

باتوجه به اینکه مدل پیشنهادی مورد مطالعه چندهدفه است، لازم است مدل ریاضی با استفاده از روش‌های موجود به‌فرم تک‌هدفه تبدیل شود و سپس مسأله حل شود. برای تبدیل توابع چندهدفه به تک‌هدفه و حل مسائل چندهدفه رویکردهای مختلفی وجود دارد و در این تحقیق از روش برنامه‌ریزی آرمانی برای تبدیل مسأله چندهدفه به

تک‌هدفه استفاده شده است. در این روش تصمیم‌گیرنده به اهداف مختلف براساس اهمیت آن‌ها وزن می‌دهد و با ضرب توابع هدف در وزن‌های تعیین شده، درنهایت تابع تک‌هدفی به‌دست می‌آید [۳۳]. تک‌هدفه‌ی مسأله جاری به‌صورت رابطه شماره (۲۲) بیان می‌شود.

$$(\emptyset_1 \times \text{Min Cost}) - (\emptyset_2 \times \text{Max Quality}) + (\emptyset_3 \times \text{Min Penalty}) \quad (۲۲)$$

۴-۲. مسأله فرعی

$$\text{BSP}(I^+_{rft},\ I^-_{rft},\ \mathcal{M}_{r,s,f,t}, \pi_{rsft} | \overline{\vartheta_{fp}}, \overline{\mu_{fp}}, \overline{\eta_{frtp}}, \overline{\beta_{rsft}}, \overline{\gamma'_s}, \overline{\gamma''_f}, \overline{\gamma'''_p})$$

یک مسأله بهینه‌سازی است که مقادیر بهینه متغیرهای پیوسته I^+_{rft} و $\pi_{rsft} I^-_{rft},\ \mathcal{M}_{r,s,f,t}$ به‌ازای متغیرهای ثابت شده $(\overline{\vartheta_{fp}}, \overline{\mu_{fp}}, \overline{\eta_{frtp}}, \overline{\beta_{rsft}}, \overline{\gamma'_s}, \overline{\gamma''_f}, \overline{\gamma'''_p})$ را تعیین می‌کند. این مسأله را می‌توان به‌صورت رابطه شماره (۲۳) فرموله کرد:

$$\begin{aligned}
&\text{Min } Z_{Bsp} = \\
&\emptyset_1 \times (\textstyle\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{rsft} \times C^{purchase}_{rst} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} Ctr_{rsft} \times \mathcal{M}_{rsft} \times \varphi_{sf} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} C^{ord}_{rsf} \times \overline{\beta_{rsft}} + \sum_{s=1}^{S} \mathbb{C}'_S \overline{\gamma'_s} + \sum_{f=1}^{F} \mathbb{C}''_f \overline{\gamma''_f} + \sum_{p=1}^{P} \mathbb{C}'''_p \overline{\gamma'''_p} \\
&+ \sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} Cp_{rft} \times I^-_{rft} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} Ch_{rft} \times I^+_{rft} + \sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P} \overline{\vartheta_{fp}} \times \mathbb{C}^{Fix}_{fp}) \\
&- \emptyset_2 \times (\textstyle\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{rsft} \times (1 - \varepsilon_{rsft})) \\
&+ \emptyset_3 \times (\textstyle\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{rsft} \times C\chi_{rs}(\chi_{rs} - L_{rs}) + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{rsft} \times C\psi_{rs} \times (L_{rs} - \psi_{rs}))
\end{aligned} \quad (۲۳)$$

محدودیت‌هایی که حداقل یک متغیر پیوسته را شامل می‌شوند به‌عنوان محدودیت‌های مسأله فرعی معرفی می‌شوند و در این محدودیت‌ها تمام متغیرهای صفر و یک و عدد صحیح ثابت می‌شوند و این محدودیت‌ها با بررسی مسأله اصلی عبارت‌اند از محدودیت‌های شماره (۵) و محدودیت‌های شماره (۱۹-۹).

محدودیت‌های مسأله فرعی عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned}
&\textstyle\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{rsft} \times C^{purchase}_{rst} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} Ctr_{rsft} \times \mathcal{M}_{rsft} \times \varphi_{sf} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} C^{ord}_{rsf} \times \beta_{rsft} \\
&+ \textstyle\sum_{s=1}^{S} \mathbb{C}'_S \overline{\gamma'_s} + \sum_{f=1}^{F} \mathbb{C}''_f \overline{\gamma''_f} + \sum_{p=1}^{P} \mathbb{C}'''_p \overline{\gamma'''_p} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} Cp_{rft} \times I^-_{rft} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} Ch_{rft} \times I^+_{rft} + \\
&\textstyle\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P} \overline{\vartheta_{fp}} \times \mathbb{C}^{Fix}_{fp} \le Bp, \qquad \forall p
\end{aligned} \quad (۵)$$

$$\textstyle\sum_{s=1}^{S} \mathcal{M}_{r,s,f,t} \ge \alpha_{rft}, \qquad \forall r,f,t \quad (۹)$$

$$\mathcal{M}_{r,s,f,t} \ge A_{rst} \times \overline{\beta_{rsft}}, \qquad \forall r,s,f,t \quad (۱۰)$$

$$\mathcal{M}_{r,s,f,t} \le \overline{\beta_{rsft}}\, M', \qquad \forall r,s,f,t \quad (۱۱)$$

$$\textstyle\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{r,s,f,t} \le M' \sum_{p=1}^{P} \overline{\vartheta_{fp}} \quad \forall f \quad (۱۲)$$

$$I^+_{rft} - I^+_{rf(t-1)} - \textstyle\sum_{s=1}^{S} \mathcal{M}_{r,s,f,t} + \sum_{s=1}^{S} \pi_{rsft} = 0, \quad \forall r,f,t \quad (۱۳)$$

$$I^-_{rft} - I^-_{rf(t-1)} + \pi_{rsft} = \alpha_{rft} \qquad \forall r,s,f,t \quad (۱۴)$$

$$\pi_{rsft} - I^-_{rf(t-1)} \le 0 \qquad \forall r,s,f,t \quad (۱۵)$$

$$\textstyle\sum_{r=1}^{R}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{r,s,f,t} \le Cap'_s \times \overline{\gamma'_s} \quad \forall s \quad (۱۶)$$

$$\mathcal{M}_{r,s,f,t} \le \overline{\beta_{rsft}} \times Cap'_s \qquad \forall r,s,f \quad (۱۷)$$

$$\textstyle\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{t=1}^{T} \mathcal{M}_{r,s,f,t} \le Cap''_f \times \overline{\gamma''_f} \quad \forall f \quad (۱۸)$$

$$\textstyle\sum_{r=1}^{R}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} I^+_{rft} \le Cap'''_p \times \overline{\gamma'''_p}, \quad \forall p \quad (۱۹)$$

الگوریتم تجزیه بندرز از یک رویکرد صفحه برش برای یافتن بردارهای راه‌حل بهینه استفاده می‌کند. رویکرد صفحه برش شامل دو مرحله است: ۱) نمایش مسأله برنامه‌ریزی خطی به‌عنوان یک تابع ناپارامتریک از متغیرهایی که قبلاً ثابت شده‌اند. ۲) تعیین مقادیر بردار پارامتر که مسأله برنامه‌ریزی خطی برای آن‌ها امکان پذیر است.

تعریف این برش‌ها برگرفته از نظریه دوگان است. پس‌از آن، خود مسأله برنامه‌ریزی خطی برای ایجاد به‌اصطلاح عمیق‌ترین برش‌ها استفاده می‌شود. برای ایجاد برش برای مسأله اصلی از دوگان BSP استفاده می‌شود. به‌دست‌آوردن دوگان این مسأله شامل معرفی متغیرهای

$$u^{۱۵}_{rsft}, u^{۱۶}_{s}, u^{۱۷}_{rsft}, u^{۱۸}_{f}, u^{۱۹}_{p}$$
$$u^{۵}_{p}, u^{۹}_{rft}, u^{۱۰}_{rsft}, u^{۱۱}_{rsft}, u^{۱۲}_{f}, u^{۱۳}_{rft}, u^{۱۴}_{rsft}$$

برای هریک از محدودیت‌های (۵) و (۹-۱۹) است. در این محدودیت‌ها، همه متغیرها به‌سمت چپ منتقل می‌شوند و سمت راست فقط شامل پارامترها یا پارامتر و متغیرهای فیکس شده $(\overline{\vartheta_{fp}}, \overline{\mu_{fp}}, \overline{\eta_{frtp}}, \overline{\beta_{rsft}}, \overline{\gamma'_s}, \overline{\gamma''_f}, \overline{\gamma'''_p})$ است.

با درنظرگرفتن این متغیرها، مسأله دوگان زیر مسأله

$$\text{DBSP}\ (u^{۵}_{p},, u^{۹}_{rft}, u^{۱۰}_{rsft}, u^{۱۱}_{rsft}, u^{۱۲}_{f}, u^{۱۳}_{rft}, u^{۱۴}_{rsft} | \overline{\vartheta_{fp}}, \overline{\mu_{fp}}, \overline{\eta_{frtp}}, \overline{\beta_{rsft}}, \overline{\gamma'_s}, \overline{\gamma''_f},, u^{۱۵}_{rsft}, u^{۱۶}_{s}, u^{۱۷}_{rsft}, u^{۱۸}_{f}, u^{۱۹}_{p} \overline{\gamma'''_p})$$

به‌صورت روابط شماره (۲۹) – (۲۴) خواهد بود.

$$\begin{aligned}
&\text{Max } Z_{DBSP} = \textstyle\sum_{p=1}^{P} Bu(p) \times u^{۵}_{p} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} u^{۹}_{rft} \times \alpha_{rft} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} u^{۱۰}_{rsft} \times A_{rst} \times \overline{\beta_{rsft}} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{t} u^{۱۱}_{rsft} \times \overline{\beta_{rsft}} \times \\
&M' + \textstyle\sum_{f=1}^{F}\sum_{P=1}^{P} M' \times u^{۱۲}_{f} \times \overline{\vartheta_{fp}} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} \alpha_{rft} \times u^{۱۴}_{rsft} \\
&\textstyle\sum_{s=1}^{S} u^{۱۶}_{s} \times \mathbb{C}'_s \times \overline{\gamma'_s} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} u^{۱۷}_{rsft} \times \overline{\beta_{rsft}} \times \\
&Cap'_s + \textstyle\sum_{f=1}^{F} u^{۱۸}_{f} Cap''_f \times \overline{\gamma_f} + \sum_{p=1}^{P} u^{۱۹}_{p} \times Cap''_p \times \overline{\gamma_p} \\
&(\textstyle\sum_{p=1}^{P} C^{purchase}_{rft} +
\end{aligned} \quad (۲۴)$$

$$\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} Ctr_{rsft}\times\varphi_{sf})\times u_p^{۵} + u_{rft}^{۹}+u_{rsft}^{۱۰}+u_{rsft}^{۱۱}+u_f^{۱۲} - u_{rft}^{۱۳}+u_s^{۱۶}+u_{rsft}^{۱۷}+u_f^{۱۸} \le \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{t=1}^{T}\emptyset_1\times C_{rst}^{purchase} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\emptyset_1\times Ctr_{rsft}\times\varphi_{sf} - \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}\emptyset_2\times(1\text{-}\varepsilon_{rsft}) + \sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\emptyset_3\times[C\chi_{rs}(\chi_{rs}\text{-}L_{rs}) + C\psi_{rs}\times(L_{rs}\text{-}\psi_{rs})] - u_{rft}^{۱۳} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} Ch_{rft}\times u_p^{۵} \le + u_{rft-۱}^{۱۳} \quad (۲۶)$$

$$\sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} Ch_{rft}\emptyset_1\times \sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} Cp_{rft}\times u_p^{۵} + u_{rsft}^{۱۴}\text{-}u_{rsft-۱}^{۱۴}\text{-}u_{rsft}^{۱۵} \le \emptyset_1\times\sum_{r=1}^{R}\sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} Cp_{rft} \quad (۲۷)$$

$$u_{rsft}^{۱۴}+u_{rsft}^{۱۵} \le 0+u_{rft}^{۱۳} \quad (۲۸)$$

Positive variables: $u_{rft}^{۹}, u_{rsft}^{۱۰}$

Negative variables: $u_p^{۵}, u_{rsft}^{۱۱}, u_f^{۱۲}, u_{rsft}^{۱۵}, u_s^{۱۶}, u_{rsft}^{۱۷}, u_f^{۱۸}, u_p^{۱۹}$ (۲۹)

Free variables: $u_{rft}^{۱۳}, u_{rsft}^{۱۴}$

۴-۳. مسأله اصلی

مسأله اصلی الگوریتم تجزیه بندرز یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح است، که به‌صورت معادلات (۳۰) تا (۳۷) ارائه شده است.

$$\text{Min } Z_{MP} = \emptyset_1\times[\sum_{r=1}^{R}\sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} C_{rsf}^{ord}\times\beta_{rsft} + \sum_{s=1}^{S}\mathbb{C}_{\boldsymbol{s}}'\,\bar{\gamma}_s' + \sum_{f=1}^{F}\mathbb{C}_{\boldsymbol{f}}''\,\bar{\gamma}_f'' + \sum_{p=1}^{P}\mathbb{C}_{\boldsymbol{p}}'''\,\bar{\gamma}_p''' + \sum_{f\in F_p}\sum_{p=1}^{P}\vartheta_{fp}\times\mathbb{C}_{fp}^{Fix}] \quad (۳۰)$$

$$\sum_{f\in F_p}\vartheta_{fp}=1, \qquad \forall p \quad (۳۱)$$

$$\sum_{p=1}^{P}\vartheta_{fp}=1, \qquad \forall f \quad (۳۲)$$

$$\eta_{frtp}=\mu_{ftp} \qquad \forall f,r,t,p \quad (۳۳)$$

$$\beta_{rsft}\times L_{rs}\le U\psi_{rs} \qquad \forall r,s,f,t \quad (۳۴)$$

$$\beta_{rsft}\times(L_{rs}-L\chi_{rs})\ge 0 \qquad \forall r,s,f,t \quad (۳۵)$$

$$Z_{MP}\ge (B_P\times\bar{u}_p^{۵}) + (\alpha_{rft}\times\bar{u}_{rft}^{۹}) + (A_{rst}\times\beta_{rsft}\times\bar{u}_{rsft}^{۱۰}) + (\beta_{rsft}\times M'\times\bar{u}_{rsft}^{۱۱}) + (M'\times\sum_{p=1}^{P}\vartheta_{fp}\times\bar{u}_f^{۱۲}) + (\alpha_{rft}\times u_{rsft}^{۱۴}) + (Cap_s'\times\bar{\gamma}_s'\times\bar{u}_s^{۱۶}) + (\overline{\beta_{rsft}}\times Cap_s'\times\bar{u}_{rsft}^{۱۷}) + (Cap_f''\times\bar{\gamma}_f''\times u_f^{۱۸}) + (Cap_p'''\times\bar{\gamma}_p'''\times u_p^{۱۹}) + \overline{Z_{dual}} \quad (۳۶)$$

$$\overline{Z_{dual}}\le 0 \quad (۳۷)$$

معادله (۳۰) مسأله اصلی را نشان می‌دهد که در آن تابع هدف مسأله اصلی شامل اجزای صفر و یک تابع هدف نهایی است و معادله (۳۵)-(۳۱) محدودیت‌های مسأله اصلی است که شامل محدودیت صفر و یک مسأله اصلی است. $\overline{Z_{DBSP}}$ مقادیر متغیر دوگان به‌دست آمده از حل زیرمسأله را با استفاده از تجزیه بندرز نشان می‌دهد. این مقدار به‌عنوان یک ثابت در محدودیت‌های برش درنظر گرفته می‌شود. معادله (۳۶) برش‌های بهینه را نشان می‌دهد که پس‌از رسیدن به جواب بهینه، به مسأله فرعی اضافه می‌شوند تا مسأله اصلی را تقویت کنند. معادله (۳۷) برش‌های بهینه را نشان می‌دهد و در صورتی‌که مسأله فرعی غیرممکن باشد فعال می‌شوند.

۵. نتایج محاسباتی

در این بخش، به تحلیل مطالعه عددی از مسأله طراحی زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز پرداخته شده است و مدل و روش حل پیشنهادی ارزیابی می‌گردد. با استفاده از سه مثال عددی ارائه شده، در جدول (۴) به حل مدل در محیط نرم‌افزار GAMS V25.1.2 پرداخته شده است. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک سیستم با مشخصات Core (TM) i5-1035G1 CPU @ 1.00 GHz با ۴ گیگابایت حافظه اجرا شده است. مسأله به دو طریق حل شده است: روش کلاسیک و روش الگوریتم تجزیه بندرز. به‌منظور حل مدل از داده‌های جداول (۲) و (۳) استفاده شده است.

در ابتدا مدل به روش کلاسیک و بااستفاده از الگوریتم CPELX برای ۳ اندازه مسأله حل گردید. روش کلاسیک برای اندازه ۱ و ۲ قادر به حل مدل ارائه شده در این مطالعه بود؛ ولی برای اندازه ۳، روش کلاسیک نتوانست تا زمان ۳۶۰۰۰ ثانیه مدل را حل نماید، لذا از روش دیگری یعنی روش الگوریتم تجزیه بندرز استفاده گردید و مدل با استفاده از این روش کدنویسی و حل گردید. نتایج ارائه شده در جدول (۳)، حاکی از حل مدل در زمان بسیار کوتاهی بااستفاده از روش الگوریتم تجزیه بندرز است، لذا این الگوریتم دارای کارایی بالا به‌عنوان یک روش دقیق برای حل این مدل در ابعاد بزرگ است.

با پیاده‌سازی مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های نمونه، مقادیر توابع هدف برای اندازه ۱ مسأله توسط دو روش در جدول (۵) نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، مقادیر تابع هدف اول با استفاده از دو حلگر ۰/۰۱۹٪ تغییر کردند. مقادیر توابع هدف دوم و سوم با استفاده از دو روش ثابت مانده است. باتوجه به نتایج ذکر شده و درصد بسیار ناچیز تغییرات هزینه، همراه با دستیابی به مقادیر ثابت برای توابع هدف ۲ و ۳ با حل‌کننده‌های دوگانه، می‌توان از این الگوریتم به‌طور مؤثر برای حل مسأله در ابعاد مختلف استفاده کرد.

پس‌از ارائه نتایج اولیه، اکنون زمان جمع‌آوری نتایج دقیق است. بدیهی است تمامی منابع موردنیاز پروژه‌ها به‌طور کامل توسط تأمین‌کنندگان تأمین می‌شود. اما همان‌طور که در مفروضات بیان شد، کمبود مجاز است، بنابراین متغیرهای π_{rsft} و I_{rft}^{-} معرفی شدند. ذکر این نکته ضروری است که باتوجه به حجم گسترده نتایج به‌دست آمده

در این مطالعه، جداول چندبعدی متعددی برای ارائه نمایش‌های بصری بهتر و قابل درک‌تر و همچنین تسهیل بحث‌های تحلیلی عمیق‌تر در مورد یافته‌ها ارائه شده است. برای انجام این کار، مقادیر بهینه $I^{+}_{r,f,t}$، $I^{-}_{r,f,t}$، π_{rsft}، $\mathcal{M}_{r,s,f,t}$ ارائه شده است. تمام پروژه‌ها با درنظرگرفتن منابع و ظرفیت‌های ازپیش تعریف شده در بازه‌های زمانی اختصاص داده شده به‌دقت برنامه‌ریزی می‌شوند. با این حال، در موارد کمبود منابع، برنامه ممکن است از محدودیت‌های زمانی ازپیش تعریف شده فراتر رود. از جدول (۶) (الف)، مشهود است که اکثر منابع بلافاصله برای پروژه‌ها در دسترس هستند. با این حال، جدول (۶) (ب) و (د) نشان می‌دهد که برخی از منابع با تأخیر تحویل داده می‌شوند.

جدول (۲). تعدادی از مقادیر پارامترهای ورودی تحت‌تأثیر اندازه مسأله

$S/R/F/P/T$	B_P	φ_{sf}	χ_{rs}	ψ_{rs}	L_{rs}	$L\chi_{rs}$	$U\psi_{rs}$	$C\chi_{rs}$	$C\psi_{rs}$
۱/۱/۱/۱/۳	۳× ۱۰^۶	۹۹۰	۱۶	۱۸	۲۰	۱۴	۱۹	۰.۰۲	۰.۰۷
۱/۲/۱/۱/۵	۴× ۱۰^۷	۹۹۰	{۱۶, ۱۴}	{۱۸, ۱۷}	{۲۰, ۱۸}	{۱۴, ۱۲}	{۱۹, ۱۸}	{۰.۰۲, ۰.۱۳}	{۰.۰۷, ۰.۱۸}
۱/۳/۱/۱/۵	۴× ۱۰^۷	۹۹۰	{۱۶, ۱۴, ۱۵}	{۱۸, ۱۷, ۱۶.۵}	{۲۰, ۱۸, ۱۶.۵}	{۱۴, ۱۲, ۱۰}	{۱۹, ۱۸, ۱۹.۵}	{۰.۰۲, ۰.۱۳, ۰.۱۵}	{۰.۰۷, ۰.۱۸, ۰.۲۹}

جدول (۳). سایر داده‌های استفاده شده در مسأله

پارامتر	Ctr_{rsft}	α_{rft}	$\mathbb{C}'_S$	$\mathbb{C}''_f$	$\mathbb{C}''_p$
مقدار	U (۱,۱۰)	U (۱۰,۱۰۰)	U (۴,۴۵)	U (۱,۱۵)	U (۱,۱۵)
پارامتر Cap'_s		Ch_{rft}	Cp_{rft}	$\mathbb{C}^{Fix}_{fp}$	C^{ord}_{rsf}
مقدار	U (۵۵۰۰۰,۷۰۰۰۰)	U (۱,۵)	U (۱,۵)	U (۱,۲)	U (۱,۵)
پارامتر ε_{rsft}		A_{rst}	Cap''_f	Cap'''_s	
مقدار	U (۰,۰/۰۲)	U (۱۰,۲۵)	U (۱۰۰۰,۱۳۰۰)	U (۹۰۰,۱۰۰۰)	

جدول (۴). زمان حل مدل با استفاده از دو روش پیشنهادی

#	زمان حل مدل	
۱	الگوریتم تجزیه بندرز	کلاسیک
	۰:۰۰:۰۸	۰:۰۰:۴۶
۲	الگوریتم تجزیه بندرز	کلاسیک
	۰۱:۰۲:۰	۱۲:۱۲:۰
۳	الگوریتم تجزیه بندرز	کلاسیک
	۰:۰۰:۲۹	حل نشد.

جدول (۵). مقادیر توابع هدف با استفاده از دو روش

الگوریتم بندرز			کلاسیک		
تابع هدف سوم	تابع هدف دوم	تابع هدف اول	تابع هدف سوم	تابع هدف دوم	تابع هدف اول
۱۱/۵۳۱	۱۷۰/۸۸۵	۸۰۲۹۴۰/۴۹۵	۱۱/۵۳۱	۱۷۰/۸۸۵	۸۰۳۰۹۹/۸۴۹

جدول (۶). مقادیر بهینه $\mathcal{M}_{r,s,f,t}$، $D'_{r,s,f,t}$، $I^{+}_{r,f,t}$ و $I^{-}_{r,f,t}$ برای مطالعه حاضر

$\mathcal{M}_{\text{rsft}}$	
t_1	۹۹۰
t_2	۱۰۴
t_3	۸۴

(الف)

$D'_{r,s,f,t,o}$	
t_1	۰
t_2	۱۰۴
t_3	۸۴

(ب)

$I^{+}_{r,f,t}$	
t_1	۰
t_2	۰
t_3	۰

(ج)

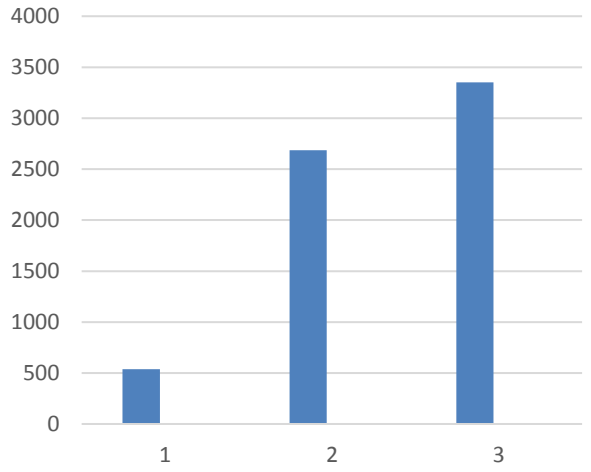
$I^{-}_{r,f,t}$	
t_1	۵۲
t_2	۸۹۴.۸۵
t_3	۱۰۳.۴۲۸

(د)

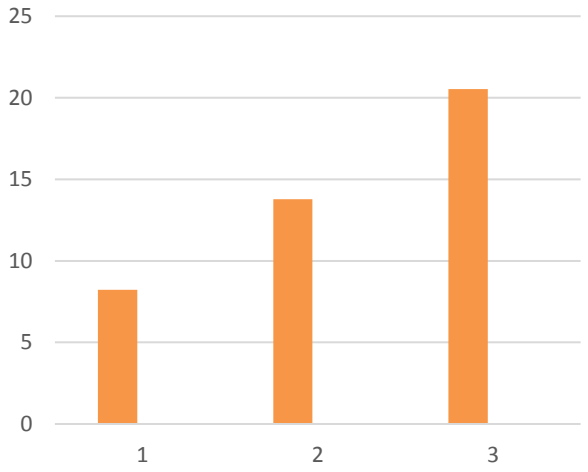
یکی از جنبه‌های حیاتی در کنترل موجودی، درنظرگرفتن هزینه‌ها است؛ بنابراین، در اینجا به تحلیل حساسیت هزینه‌های زنجیره برای هریک از اندازه‌های مختلف مسأله پرداخته شده است. به‌منظور اعتبار بیشتر رویکرد پیشنهادی در مورد هزینه‌ها، آزمایش‌های اضافی و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها برای ارزیابی اثربخشی و قابلیت اطمینان روش انجام شده است. هدف از این آزمایش‌های دقیق، حمایت از شواهدی بود که از کاربرد این رویکرد پشتیبانی می‌کردند و درنهایت به درک جامع‌تری از مزایا و محدودیت‌های بالقوه آن کمک می‌کردند. مقادیر بهینه برای اجزای مختلف هزینه در زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز، باتوجه به سه اندازه مختلف در جدول (۷) ارائه شده است، همچنین مقادیر هر نوع هزینه باتوجه به‌اندازه مسأله در شکل‌های (۵-۱) و مجموع کل هزینه‌ها باتوجه به‌اندازه مسأله در شکل (۶) نمایش داده شده است.

جدول (۷). انواع هزینه‌های زنجیره باتوجه به ابعاد زنجیره

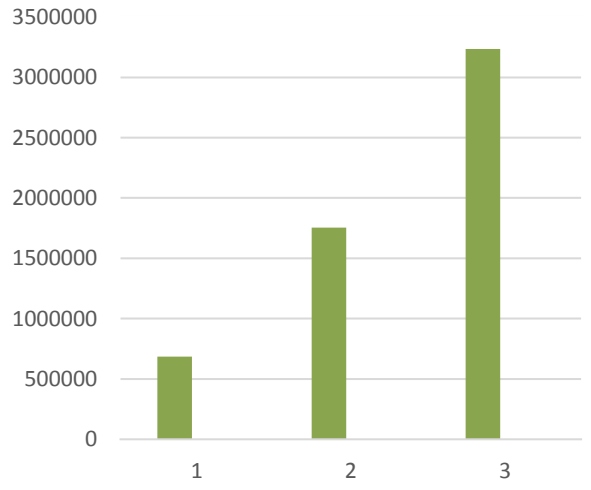
اندازه مسأله	۱	۲	۳
مجموع کل هزینه‌های موجودی و نگهداری (A)	۰	۰	۰
مجموع کل هزینه‌های کمبود (B)	۵۳۶/۱۷۰	۲۶۸۵/۰۹۰	۳۳۵۱/۱۴۶
مجموع کل هزینه‌های حمل‌ونقل (C)	۶۸۴۱۲۲/۵۳۹	۱۷۵۳۶۸۱/۵۰۲	۳۲۳۵۸۵۳/۷۰۷
مجموع کل هزینه‌های سفارش‌دهی (D)	۸/۲۲۴	۱۳/۷۷۹	۲۰/۵۲۶
مجموع کل هزینه‌های ثابت (H)	۶/۷۶۰	۱۰/۳۸۶	۴/۹۸۲
مجموع کل هزینه‌های خرید (G)	۷۹۴۸۱/۰۶۷	۸۹۹۶۶۴۱/۴۷۴	۱۰۳۵۴۷۶۰
مجموع کل هزینه‌ها (I)	۷۶۴۱۵۴/۷۶	۱۰۷۵۳۰۳۲/۲۳۱	۱۳۵۹۳۹۹۰/۳۶۱



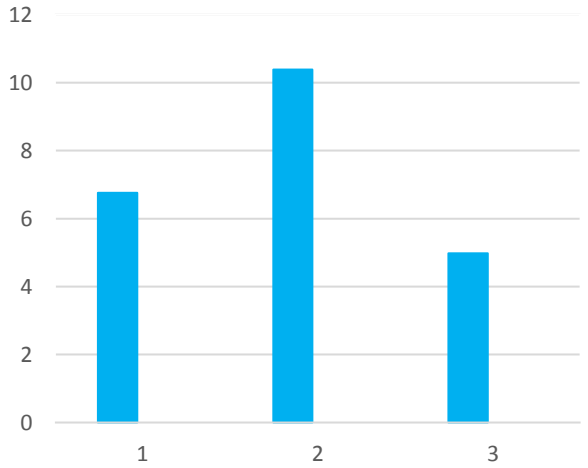
شکل (۱). مجموع کل هزینه‌های کمبود (B) باتوجه به اندازه مسأله



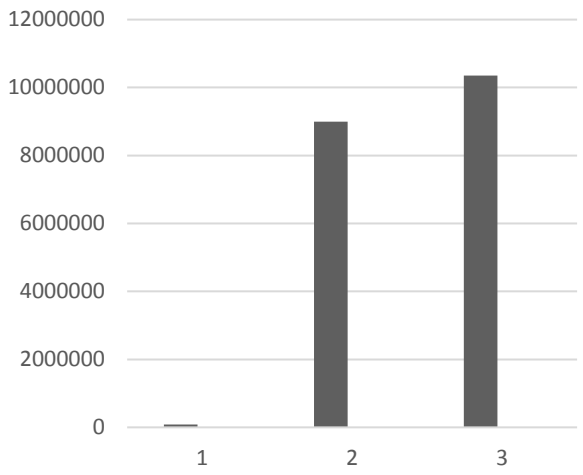
شکل (۳). مجموع کل هزینه‌های سفارش‌دهی (D) باتوجه به اندازه مسأله



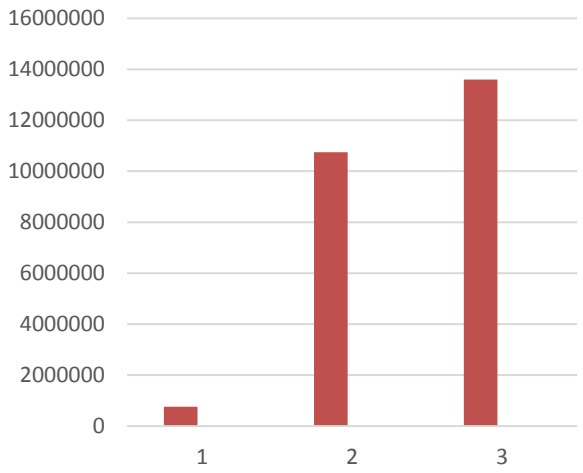
شکل (۲). مجموع کل هزینه‌های حمل‌ونقل (C) باتوجه به اندازه مسأله



شکل (۴). مجموع کل هزینه‌های ثابت (H) باتوجه به اندازه مسأله



شکل (۵). مجموع کل هزینه‌های خرید (G) باتوجه به اندازه مسأله



شکل (۶). مجموع کل هزینه‌ها (I) باتوجه به اندازه مسأله

مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و خرید که ۹۹ درصد یا بیشتر از کل هزینه‌های شبکه را تشکیل داده است، ثبات قابل‌توجهی را در اندازه‌های مختلف مسأله را دارا است. باتوجه به نتایج به‌دست آمده از اندازه‌های ۲ و ۳، بدیهی است که افزایش تعداد منابع، با تعداد دوره‌های زمانی ثابت، منجربه افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل خواهد شد. دلیل این امر افزایش تعداد منابع است. همان‌طور که در بیان مسأله ذکر شده است، کمبود مجاز است، لذا انتظار مواجه با هزینه‌های کمبود وجود خواهد داشت. با بررسی جدول (۶) می‌توان این هزینه‌های کمبود را مشاهده کرد. ازسوی دیگر بر طبق جدول (۵)، سطح موجودی در دسترس برای اندازه نمونه ۱، برابر با صفر شده است، لذا وقتی سطح موجودی در دسترس برابر با صفر باشد هزینه نگهداری نداریم. این امر به‌وضوح بر طبق جداول (۵) و (۶) قابل مشاهده است.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ضرورت کاهش هزینه‌های زنجیره‌تأمین، مجریان پروژه‌های عمرانی را جهت طراحی زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز مؤثر بیش‌ازپیش ترغیب کرده است. به‌این ترتیب، زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز که به‌عنوان یک جزء حیاتی اقتصاد شناخته شده است، علاقه قابل‌توجهی را در حوزه بهینه-سازی سیستم‌ها به‌خود جلب کرده است. بااین‌حال، بررسی ادبیات مربوطه نشان داده است که محققان عمدتاً بر حداقل کردن هزینه‌ها و تعیین مقادیر سفارش‌دهی تمرکز کرده‌اند و سایر زمینه‌های مرتبط در صنعت ساخت‌وساز ازقبیل توجه به انتخاب تأمین‌کننده مناسب برای تهیه منابع موردنیاز براساس معیارهای مناسب (قیمت، فاصله، ظرفیت و کیفیت) و توجه به حداقل کردن هزینه‌ها و تعیین مقادیر متغیرهای کلیدی (مقادیر سفارش‌دهی، میزان موجودی در دسترس، باقی‌مانده پس‌افت و مقدار کمبود) توجه نشده است؛ بنابراین توجه به سیستمی که بتواند چالش‌های ذکر شده را به‌همراه طراحی بهینه زنجیره‌تأمین در صنعت ساخت‌وساز برعهده بگیرد حائز اهمیت است. علی‌رغم اهمیت این موضوع، تحقیقات جامعی وجود ندارد که همه این ویژگی‌ها را در یک مدل ریاضی مناسب ادغام کند. پژوهش حاضر این شکاف در ادبیات را با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و دو رویکرد راه‌حل دقیق برای آن برطرف می‌کند. همان‌گونه که در شکل‌های (۲) و (۵) نمایش داده شده است، با افزایش اندازه شبکه هزینه‌های خرید و حمل‌ونقل افزایش‌یافته است. در مقابل، هنگامی‌که شبکه کوچک است، تغییر اندازه آن منجربه تغییرات بسیار بزرگی در اجزای هزینه‌ها می‌شود؛ بنابراین باید کنترل بهتری بر تغییرات هزینه‌ها وجود داشته باشد. در این مطالعه یک مدل سه‌هدفه جدید برای طراحی زنجیره‌تأمین دوسطحی در صنعت ساخت‌وساز ارائه شده است که به‌صورت همزمان به حداقل‌سازی هزینه‌های زنجیره و جریمه مرتبط با نقض زمانی تحویل منابع از سوی تأمین‌کنندگان و حداکثرسازی کیفیت منابع تحویلی از سوی تأمین‌کنندگان پرداخته خواهد شد. در این مطالعه تقاضاها به‌صورت قطعی درنظر گرفته شده است و از رویکرد تحقیق در عملیات برای فرموله‌کردن مدل مسأله پیشنهادی استفاده گردیده است و درنهایت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده است. در مسأله ارائه شده علاوه‌بر تعیین مقادیر سفارش‌ها در هر دوره و حداقل کردن هزینه‌های زنجیره به برآورد مقادیر موجودی در دسترس و مقادیر کمبود به حداقل کردن جریمه مرتبط با نقض برنامه زمانی تحویل منابع و انتخاب تأمین‌کننده نیز پرداخته شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از دو روش کلاسیک و بندرز به‌گونه مجزا به حل مدل پرداخته است. نتایج محاسباتی بیانگر عملکرد بالای الگوریتم تجزیه بندرز در حل مدل در کم‌ترین زمان ممکن است.

مراجع

[1] Ghahremani nahr, J., et al., (2019). Design of multi-objective multi-product multi period green supply chain network with considering discount under uncertainty, Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, 6(13), pp. 119-137.

[2] Bashiri, M., and Sherafati, M., (2013). Advanced Bi-objective closed loop supply chain network design considering correlated criteria in fuzzy environment,

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, 1(1): pp. 25-36.

[3] Abdi, F., et al., (2021). Location-inventory- redundancy allocation optimization problem in a multi-objective single- period supply chain network with stochastic demand, Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, 8(17): pp. 377-397.

[4] Robinson, G., Leonard, J., and Whittington, T., (2021). Future of Construction. A Global Forecast for Construction to 2030, https://www.oxfordeconomics.com/resource/future-of-construction/(English) .

[5] Golpîra, H., Sadeghi, H., and Khan, S.A.R., (2021). Time –Cost Trade-off Optimal Approaches, in Application of Mathematics and Optimization in Construction Project Management, H. Golpîra, Editor, Springer International Publishing, pp. 119-140.

[6] Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., and Simchi-Levi., E., (2003). Designing & Managing the Supply Chain, McGraw-Hill Higher Education, New York .

[7] Mozdgir Mobbarhan, A., Sadeghi, H.O. and Arbabi, S., (2022). Determining the Replenishment Policy and Supplier Selection in Integrated Supply Chain for Deteriorating Products, Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems,. 20(10), pp. 133-151.

[8] Nanaware, M., and Saharkar, U., (2017). Application of inventory control technique in construction, International Journal of Engineering Research and General Science, 5(4), pp.49-54.

[9] Sadeghi, H., A. Mahmoodi, and Z. Rajabi, (2022). Economic Order Quantity with Discrete Demand and Delivery Orders, Journal of Industrial Management Perspective, 12(2): pp. 113-133.

[۱۰] فخرزاد، محمدباقر، مرادیان بروجنی، پگاه، صادقیه، احمد. (۱۳۹۳). "تولید و توزیع در زنجیره‌تامین سه‌سطحی براساس تفکر ناب با رویکرد GA" نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۵(۳): ۳۶۵-۳۷۵.

[11] Koskela, L., (1992). Application of the new production philosophy to construction, Vol. 72, Stanford university Stanford.

[12] Obrien, W.J., and Fischer, M., (1993). Construction supply-chain management: a research framework.

[13] Lu, H., et al., (2018). Study on construction material allocation policies: A simulation optimization method, Automation in Construction, 90, pp.201-212.

[14] Vidalakis, C., Tookey, J.E. and Sommerville, J., (2013). Demand uncertainty in construction supply chains: a discrete event simulation study, Journal of the Operational Research Society, 64(8): pp. 1194-1204.

[15] Zhang, X., Xiong, R., and Tao. S., (2019). Research on model algorithms of supply chain of material scheduling with elastic variables in construction site for giant projects, in Application of Intelligent Systems in Multi-modal Information Analytics, Springer.

[16] Jaśkowski, P., Sobotka, A., and Czarnigowska, A., (2018). Decision model for planning material supply channels in construction. Automation in Construction, 90: pp. 235-242.

[17] Hsu, P.Y., Angeloudis, P., and Aurisicchio, M., (2018). Optimal logistics planning for modular construction using two-stage stochastic programming. Automation in Construction, 94: pp. 47-61.

[18] Mohammadnazari, Z., and Ghannadpour, S.F., (2021). Sustainable construction supply chain management with the spotlight of inventory optimization under uncertainty. Environment, Development and Sustainability, 23: pp. 10937-10972.

[19] Fu, F., and Xing, W., (2021). An agent-based approach for project-driven supply chain problem under information asymmetry and decentralized decision-making. Computers & Industrial Engineering, 158: pp. 107410.

[20] Said, H., and El-Rayes, K., (2013). Optimal utilization of interior building spaces for material procurement and storage in congested construction sites. Automation in construction, 31: pp. 292-306.

[21] Said, H. and El-Rayes, k., (2014). Automated multi-objective construction logistics optimization system. Automation in Construction, 43: pp. 110-122.

[22] Liu, Q., Xu, J., and Qin, F., (2017). Optimization for the integrated operations in an uncertain construction supply chain. IEEE transactions on engineering management, 64(3): pp. 400-414.

[23] Hashim, M., Nazim, M., and Nadeem, A.H., (2013). Production-distribution planning in supply chain management under fuzzy environment for large-scale hydropower construction projects. in Proceedings of the Sixth International Conference on Management Science and Engineering Management: Focused on Electrical and Information Technology, Springer.

[24] Liu, Q., and Tao. Z., (2015). A Multi-Objective Optimization Model for the Purchasing and Inventory in a Three-Echelon Construction Supply Chain, in Proceedings of the Ninth International Conference on Management Science and Engineering Management, Springer Berlin Heidelberg, Berlin.

[25] Kulkarni, A., and Halder, S., (2020). A simulation-based decision-making framework for construction supply chain management (SCM), Asian Journal of Civil Engineering, 21(2): pp. 229-241.

[26] Salari, S.A.S., et al., (2022). Off-Site construction Three-Echelon supply chain management with stochastic constraints: A modelling approach. Buildings, 12(2): pp. 119.

[27] Said, H., and El-Rayes, k., (2011). Optimizing material procurement and storage on construction sites, Journal of Construction Engineering and Management,. 137(6): pp. 421-431.

[28] Xue, X., et al., (2011). Comparing the value of information sharing under different inventory policies in construction supply chain, International Journal of Project Management, 29(7): pp. 867-876.

[29] 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: pp. 112841.

[30] Mohammadnazari, Z. and Ghannadpour, S.F., (2021). Sustainable construction supply chain management with the spotlight of inventory optimization under uncertainty. Environment, Development and Sustainability. 23(7): pp. 10937-10972.

[31] Hashim, M., Nazim, M., and Nadeem, A.H., (2013). Production-Distribution Planning in Supply Chain

Management Under Fuzzy Environment for Large-Scale Hydropower Construction Projects. in Proceedings of the Sixth International Conference on Management Science and Engineering Management, Springer London, London.

[32] Babaei, M., and Omrani, H., (2017). Robust optimization approach for supplier selection under lean procurement. International journal of industrial engineering and production management, 28(3): pp. 459-469.

[33] Rezaei, E., Paydar, M.M., and Safaei, A.S., (2020). Implementation of accelerating benders decomposition algorithm for supply chain considering new product development and customer relationship management, Journal of Industrial Mnagment Perspective, 10(1): pp. 41-63.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Autumn and Winter 2023, Volume 11., No. 23., pp. 105-119
www.ier.basu.ac.ir

DOI: https://dx.doi.org/10.22084/IER.2024.5568

Designing a Construction Supply Chain Network for Resource Inventory Management Using Benders Decomposition Algorithm

Samin Arbabi[1], Heibatolah Sadeghi[2*], Hêriş Golpîra[3]

[1.] Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
[2.] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
[3.] Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 27 September 2023
Accepted 20 February 2024

***Keywords*:**

Construction Supply Chain
Inventory Management
Benders Decomposition Algorithm
Supplier Selection

ABSTRACT

Designing an efficient construction supply chain involves numerous complexities. Therefore, the imperative of designing an appropriate supply chain, considering the high diversity of resources (nonrenewable), holds significant importance. Given the variable nature of the project environment, the dynamic progress of the project, and the risks associated with construction projects, the project may deviate from the scheduled timeline. On the other hand, the quality of resources plays a crucial role in the construction quality of construction projects. Therefore, in this study, a multi-objective mixed-integer programming model is proposed for the design of a two-echelon supply chain network in the construction industry. The objectives of the model include minimizing supply chain costs, minimizing deviation from resources time delivery, and maximizing the quality of resources. This framework is capable of dynamically scheduling resources in terms of timing and delivery, as well as selecting appropriate suppliers restricted to authorized facilities within a network. Both classical methods and the Benders Decomposition Algorithm are employed to solve the presented model. The problem was solved for three sizes. The Benders Decomposition Algorithm was able to efficiently solve the problem for all three sizes in a very short amount of time.

[*] Corresponding author. H. Sadeghi
Tel.:087-33660073; E-mail address: h.sadeghi@uok.ac.ir