مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال هفدهم، شماره چهارم (پیاپی ۶۷)،زمستان ۹۹، ص ص ۸۸-۶۳
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

ارایه یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر روش‌های تجزیه و الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مساله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین

علی پاپی[۱]، فرناز برزین‌پور[۲]، میرسامان پیشوایی[۳*]

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، ایران

۲- دانشیار، مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، ایران

۳- دانشیار، مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، ایران

رسید مقاله: ۲۷ خرداد ۱۳۹۸

پذیرش مقاله: ۳۰ مرداد ۱۳۹۹

چکیده

طراحی شبکه زنجیره‌تأمین (SCND) از مسایل استراتژیک مدیریت زنجیره‌تأمین است که پیکربندی آن را معین می‌سازد. این مساله به طور عمده بر مکان و تعداد تسهیلات، ظرفیت‌ها، انتخاب تکنولوژی، انتخاب تأمین‌کنندگان، تخصیص تسهیلات تولید و توزیع به بازار و ... تمرکز دارد. اگرچه حل بهینه مساله SCND موجب کاهش قابل توجه در هزینه‌های زنجیره‌تأمین می‌گردد، اما قرار گرفتن این مساله در رده NP_Hard باعث می‌شود که در برخی از شبکه‌ها (به‌خصوص در ابعاد بزرگ) دستیابی به پاسخ بهینه با استفاده از الگوریتم‌های کلاسیک مقدور نباشد. در این تحقیق، به مدل‌سازی و ارایه رویکرد حل ترکیبی دقیق مبتنی بر روش تجزیه بندرز و الگوریتم ژنتیک برای مساله SCND چهارسطحی پرداخته می‌شود. رویکرد پیشنهادی سرعت حل را از الگوریتم‌های فراابتکاری و تجزیه مساله، و تضمین همگرایی به جواب بهینه را از روش بندرز به ارث می‌برد. در مساله SCND مورد نظر تحقیق، عمده تصمیمات طراحی و برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است تا مدل و رویکرد حل پیشنهادی فراگیری بیشتری از مسایل واقعی مدیریت زنجیره‌تأمین داشته باشد. در بخش پایانی، چندین مساله آزمایشی در ابعاد مختلف به صورت تصادفی تولید شده و کارایی رویکرد حل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج عددی نشان می‌دهد رویکرد حل پیشنهادی می‌تواند بر ضعف کندبودن روش کلاسیک تجزیه بندرز و ضعف بهینگی محلی الگوریتم‌های فراابتکاری غلبه کند و مساله SCND را در مدت زمان قابل قبول حل نماید.

کلمات کلیدی: طراحی شبکه زنجیره‌تأمین، تجزیه بندرز، متغیرهای پیچیده‌ساز، فراابتکاری، روش حل ترکیبی.

۱ مقدمه

در محیط‌های کسب و کار امروزی، مدیریت زنجیره‌تأمین به موضوعی استراتژیک برای هر شرکتی تبدیل‌شده است که دستیابی به اهدافی چون رقابت‌پذیری در هزینه، سرعت و کیفیت در ارایه خدمات را دنبال می‌کند [۱].

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی:pishvaee@iust.ac.ir

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

یک زنجیره‌تأمین، شبکه‌ای از تأمین‌کنندگان، کارخانجات تولیدی، انبارها و کانال‌های توزیع سازمان یافته‌ای است که جهت دستیابی به مواد خام، تبدیل مواد خام به محصولات نهایی و توزیع محصولات بین مشتریان، در یک ناحیه جغرافیایی وسیع و یا حتی به وسعت جهانی، مجموعه‌ای از اقدامات به هم مرتبط را از طریق شبکه، هماهنگ می‌سازند [۲، ۳].

طراحی شبکه زنجیره‌تأمین (SCND[1])، بخشی از فرآیند برنامه‌ریزی در مدیریت زنجیره‌تأمین است که زیرساخت و پیکربندی فیزیکی یک زنجیره‌تأمین را معین می‌سازد. معمول‌ترین تصمیمات استراتژیک در این سطح، بر مکان و تعداد تسهیلات، ظرفیت‌ها، تکنولوژی و سایز تسهیلات، انتخاب تأمین‌کنندگان، تخصیص فروشگاه‌های خرده‌فروشی به انبارها و ... تمرکز دارد [۱، ۴]. در سطوح تاکتیکی و عملیاتی زنجیره‌تأمین، عملکرد مناسب در برنامه‌ریزی جریان مواد و سفارش مقادیر بین سطوح متوالی زنجیره‌تأمین، سیاست‌های کنترل موجودی، انتخاب ظرفیت و مدهای حمل‌ونقل و مسیریابی وسایل نقلیه، به طور قابل ملاحظه‌ای متاثر از تصمیمات استراتژیک همچون محل استقرار تسهیلات تولید و توزیع و اندازه ظرفیت آنها است؛ و این مساله، ارزش طراحی بهینه شبکه زنجیره‌تأمین را آشکار می‌سازد [۵].

علاوه بر تأثیر تصمیمات طراحی شبکه بر عملیات زنجیره‌تأمین، اقدام به اجرای این تصمیمات معمولاً به سرمایه‌گذاری‌های بالا نیازمند بوده و بسیار زمان‌بر می‌باشند. بنابراین مساله طراحی شبکه زنجیره از دو منظر حایز اهمیت است؛ اول آنکه عموماً نمی‌توان ساختار یک زنجیره‌تأمین را در کوتاه‌مدت تغییر داد و اقدامات مربوط به آن سرمایه و زمان زیادی نیاز دارد (و بعضا تغییر آن‌ها بسیار سخت می‌باشد)، و درثانی، حل بهینه مساله SCND موجب به پیکربندی کارای شبکه زنجیره‌تأمین می‌شود و به تبع آن تصمیمات عملیاتی زنجیره‌تأمین با هزینه و زمان کمتر انجام می‌شود و نهایتاً رضایت‌مندی بیشتری حاصل می‌گردد [۶].

با توجه به اهمیت مساله SCND، ارایه مدل و روش‌های حل به منظور یافتن پاسخ بهینه آن مورد توجه محققان بسیار زیاد قرار گرفته است. به‌خصوص، زمانی که مساله طراحی زنجیره‌تأمین در شبکه‌های ابعاد بزرگ مورد بررسی باشد. مساله SCND معمولا تصمیمات مکان‌یابی را در بر می‌گیرد که مکان‌های بهینه باید از مجموعه مکان‌های بالقوه انتخاب شوند. بنابراین، SCND جزء مسایل ترکیباتی قرار می‌گیرد و در دسته مسایل NP-Hard طبقه‌بندی می‌شوند [۷]. با توجه به اهمیت پاسخ مساله SCND و پیچیدگی این مساله، ارزش رویکردهای کارا برای حل آن دوچندان می‌شود.

عمده مدل‌های بهینه‌سازی برای مساله SCND، مدل‌های خطی آمیخته (MILP[2]) هستند که می‌توان با استفاده از نرم‌افزارها و حل‌کننده‌های تجاری پاسخ بهینه را در ابعاد کوچک به‌دست آورد. در صورتی که اندازه شبکه بزرگ باشد (تعداد متغیرهای طراحی زیاد شود) یافتن پاسخ موجه و بهینه (نزدیک به بهینه) مستلزم ارایه رویکردهای مبتنی بر روش‌های ابتکاری/ فراابتکاری و یا روش‌های تجزیه است.

[1] Supply Chain Network Design (SCND)
[2] Mixed Integer Linear Programming

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

اخیراً، مقالات متعددی به چاپ رسیده است که به حل مساله SCND بر مبنای روش‌های دقیق و یا الگوریتم‌های فراابتکاری پرداخته‌اند [۸-۱۷]. عمده روش‌های دقیق مبتنی بر روش تجزیه بندرز (BD[1]) است. در صورتی که روش BD برای حل مساله SCND (و مدل‌های MILP متناظر با آن) به‌کارگرفته شود، آنگاه مساله به زیرمسایل ساده‌تر تجزیه می‌شود. با این وجود، زیر مساله گسسته (که معمولا یک مساله بهینه‌سازی ترکیباتی و عددصحیح محض است) کماکان پیچیده است و اگر BD نیاز به تکرارهای زیادی داشته باشد، آنگاه زمان حل ممکن است بسیار زیاد شود و نتوان مسایلی با ابعاد بزرگ را حل کرد. در صورتی که الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل این مساله به‌کار گرفته شوند، گرچه معمولا در زمان قابل قبولی پاسخ شدنی به‌دست آورده می‌شود، هیچ تضمینی بر بهینگی آن نیست. ایده‌هایی که برای رفع مشکلات مذکور روش BD و الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی می‌شود، به ترتیب شتاب دادن به BD با اضافه کردن برش‌های قوی‌تر و قیود مختلف، و هیبرید کردن الگوریتم‌های فراابتکاری است.

ترکیب روش‌های دقیق (مثل BD) مبتنی بر تجزیه با الگوریتم‌های فراابتکاری ایده مناسبی است تا بتوان هم کیفیت و بهینگی پاسخ را تضمین کرد و هم زمان حل مساله را تسریع بخشید. در این تحقیق، یک رویکرد حل جدید مبتنی بر این ایده پیشنهاد می‌شود. بنابراین، مهم‌ترین نوآوری این تحقیق، ارایه یک روش حل جدید مبتنی بر روش تجزیه بندرز و الگوریتم ژنتیک (GA[2]) (به اختصار HBDGA[3]) برای حل مساله SCND و ارزیابی عملکرد آن است. از دیگر نوآوری‌های این تحقیق آن است که عمده تصمیمات سطح استراتژیک در مساله SCND (از جمله تعیین مکان استقرار تسهیلات و اندازه ظرفیت، انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش، و همچنین تعیین جریان بهینه محصولات از مراکز تولید تا بازار) به طور هم‌زمان مورد توجه قرار می‌گیرد. نهایتاً، ارایه چند تحلیل حساسیت روی پارامترها و ابعاد مساله SCND بر جذابیت این تحقیق افزوده است.

محتوای این تحقیق در ۶ بخش سازماندهی شده است؛ مقدمه تحقیق (اهمیت مساله SCND و حل آن) در این بخش مورد بررسی قرار گرفت، در بخش ۲ به مرور ادبیات در حوزه SCND و مقالات مهم و جدید مرتبط با آن پرداخته می‌شود. در بخش ۳ مساله SCND مورد نظر این تحقیق به طور کامل تبیین و مفروضات و مدل ریاضی آن ارایه می‌شود. در بخش ۴ به عنوان بخش اصلی این تحقیق، روش HBDGA پیشنهادی برای حل مساله SCND به طور کامل تشریح و دو شیوه اجرای مختلف آن توضیح داده می‌شود، در بخش ۵ به نتایج عددی و تحلیل روش حل پیشنهادی و همچنین چند تحلیل حساسیت پرداخته می‌شود، و نهایتاً در بخش ۶، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری آورده می‌شود.

۲ مرور ادبیات

تحقیق در زمینه SCND را می‌توان با ردیابی در اولین مطالعه بر مکان‌یابی در کتابی که تحت عنوان " تئوری مکان‌یابی صنایع" در سال ۱۹۰۹ به چاپ رسید، جستجو نمود [۱۸]. پس از آن زمان، در حوزه مدیریت

[1] Benders Decomposing
[2] Genetic Algorithm
[3] Hybrid Benders Decomposition and Genetic Algorithms (HBDGA)

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

زنجیره‌تأمین و کاربردهای لجستیک، به علت اهمیت بالای کاربرد مسایل مکان‌یابی، تدریجاً مدل‌های مکان‌یابی اولیه در مدل‌های بزرگ‌تر گنجانده شدند به طوری که در حال حاضر، مجموعه مدل‌های ارایه شده، خانواده بزرگ مسایل "طراحی شبکه زنجیره‌تأمین" را تشکیل می‌دهند [۱۱]. در پژوهش های مروری برجسته که توسط مراجع [۱۹-۲۲] که طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۵ به انجام رسیده است، مدل‌های گوناگون مکان‌یابی تسهیلات و مسایل طراحی شبکه زنجیره‌تأمین، به خوبی مورد کاوش و بررسی قرار گرفته‌اند.

توجه به مساله SCND در صنایع مختلف مورد توجه سازمان‌ها و بنگاه‌های تجاری فراوانی است. در پژوهش‌های متعددی سعی شده است که به طور خاص یک صنعت و یا یک/ چند محصول/ خدمت مورد توجه قرار گیرد و با ارایه مدل بهینه‌سازی مناسب به حل مساله طراحی زنجیره‌تأمین متناظر با آن پرداخته شود. به عنوان مثال، می‌توان به پژوهش‌های صورت گرفته در طراحی شبکه زنجیره‌تأمین خون [۲۳]، محصولات پرخطر [۲۴]، آب [۲۵]، نفت [۲۶]، سوخت بیوماس [۲۷] و سوخت بیودیزل [۱۰] اشاره داشت. از آنجا که تمرکز این تحقیق بر حل مساله SCND است، از توضیح این پژوهش‌ها صرف‌نظر کرده و در ادامه به روش‌های حل، پرداخته می‌شود.

در طول زمان، طیف گسترده‌ای از تکنیک‌های حل دقیق و تقریبی برای حل مسایل SCND پیشنهاد شده است. روش‌های حل کلاسیک (بدون استفاده از رویکردهای تجزیه و الگوریتم‌های فراابتکاری) غالباً قادر به حل مثال‌ها در سایز کوچک و یا متوسط هستند؛ از این رو، طی دهه‌های اخیر بسیاری از روش‌های حل دقیق و تقریبی (فراابتکاری) توسعه یافته‌اند [۸-۱۷].

از بین روش‌های فراابتکاری ارایه‌شده برای حل تقریبی مساله SCND می‌توان به شبیه‌سازی تبرید (SA[1]) [۲۸, ۲۹]، جستجوی ممنوعه (TS[2]) [۳۰، ۳۱]، جستجوی نزدیک‌ترین همسایگی متغیر (VNS[3]) [۳۲، ۳۳]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO[4]) [۳۴، ۳۵]، الگوریتم ممتیک[5] [۳۶، ۳۷] و الگوریتم ژنتیک (GA[6]) [۸، ۳۸، ۳۹] اشاره داشت.

وقتی مدل‌های SCND کامل‌تر می‌شوند و تصمیمات بیشتری در مساله مورد توجه است (مانند مساله SCND در شبکه‌های بزرگ)، برای بهبود عملکرد الگوریتم (از منظر سرعت و کیفیت جواب ارایه شده) نیاز است که در ساختار الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی، تغییراتی اعمال گردد [۱۱، ۱۴، ۱۶، ۱۷، ۴۰-۴۲].

از جمله مقالات اخیر که به توسعه و بهبود عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مساله SCND پرداخته‌اند می‌توان به پژوهش ذوحل و سلیمانی [۱۷] اشاره داشت که با توسعه در الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO[7]) به حل مساله طراحی زنجیره‌تأمین حلقه بسته سبز در صنعت طلا پرداخته‌اند. همچنین اسکندرپور و همکاران در سال ۲۰۱۷، با رویکرد جستجوی همسایگی بزرگ (LNS[8]) به حل مساله طراحی

[1] Simulated Annealing
[2] Tabu Search
[3] Variable Neighborhood Search
[4] Particle Swarm Optimization
[5] Memetic Algorithm
[6] Genetic Algorithm
[7] Ant Colony Optimization
[8] Large Neighborhood Search

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

شبکه زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند که در این تحقیق، مکان‌یابی مراکز تولید و توزیع در یک زنجیره‌تأمین ۴ سطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد و همچنین ظرفیت تسهیلات و جریان مواد و محصول در کل زنجیره تعیین می‌گردد [۱۱]. در مقاله دیگری که اخیراً توسط سلیمانی و کانان به چاپ رسیده، استفاده از رویکرد حل ترکیبی PSO و GA برای حل مساله طراحی یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته چندسطحی، چندمحصولی و چنددوره‌ای با تصمیمات مکان‌یابی- تخصیص در اندازه‌های مختلف پیشنهاد شده است [۱۴]. همچنین مشابه پژوهش اخیر، مقاله دیگری در سال ۲۰۱۹ به چاپ رسیده که با استفاده از الگوریتم ممتیک به طراحی زنجیره‌تأمین حلقه بسته می‌پردازد [۱۶].

در بین الگوریتم‌های حل دقیق ارایه شده تا به اکنون، روش BD یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌ها است. محققان برای استفاده از این روش در مواجهه با مسایل بزرگ و پیچیده، به بهبود و توسعه آن پرداخته‌اند که از بین مقالات ارایه شده در این حوزه می‌توان به مراجع [۹، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۴۳-۴۷] اشاره نمود.

بهبود و ایجاد شتاب در روش BD تجزیه بندرز از طرق مختلف قابل انجام است؛ به عنوان مثال در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۳ به چاپ رسیده است، محققان از مجموعه‌ای از نامساوی‌های معتبر به منظور بهبود کیفیت کران پایین و همچنین شتاب‌دهی به همگرایی روش BD کلاسیک، به مساله طراحی زنجیره‌تأمین بازتولید پرداخته‌اند [۴۷]. همچنین در مقاله رحمانیانی و همکاران، از صفحات برش، تجزیه جزیی، برش‌های قوی‌تر و ... به منظور تسریع روش BD برای حل مساله SCND ظرفیت‌دار و چند محصولی در مسایل با ابعاد بزرگ استفاده شده است [۱۳]. در مقاله ارایه شده توسط وحدت و وحدت‌زاده، مساله طراحی شبکه لجستیک روبه جلو/ معکوس تک محصولی، چند دوره‌ای و چندسطحی، با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز شتاب‌یافته با تعیین تصمیمات استراتژیک بر تعداد، مکان، ظرفیت تسهیلات در سطح اول و تصمیمات عملیاتی مانند تعیین سطح موجودی در سطح دوم، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. در مقاله دیگری که به چاپ رسیده است، از همین رویکرد حل، به منظور تعیین مکان و ظرفیت بهینه تسهیلات بازتولید جهت تصمیم‌گیری بر تعداد و نوع مدل های حمل و نقل در طراحی شبکه زنجیره‌تأمین معکوس استفاده شده است [۹]. به عنوان دو پژوهش چاپ‌شده به زبان فارسی نیز می‌توان به تحقیقات [۴۸،۴۹] اشاره کرد که به حل مسایل طراحی شبکه زنجیره‌تامین به ترتیب با روش‌های فرابتکاری GA و SA پرداخته‌اند.

پس از مرور منابع و مقالات منتشرشده در حوزه SCND، ملاحظه می‌شود که می‌توان تحقیقات صورت گرفته را در حالت کلی به دو دسته افراز نمود: دسته اول به تعریف کلی مساله SCND کفایت کرده و به طور عمده به پیچیدگی آن و ارایه یک روش برای حل کارا این مساله در ابعاد بزرگ تمرکز دارند [۸-۱۷]. دسته دوم نیز مقالاتی هستند که به طور خاص به مطالعه موردی زنجیره‌تأمین یک شرکت پرداخته‌اند و به منظور اخذ تصمیمات بهینه در طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین مورد نظر، یک مدل ریاضی ارایه داده‌اند [۱۰، ۲۳-۲۷]. با توجه به دسته‌بندی مذکور، این پژوهش در دسته اول قرار می‌گیرد چراکه ما به طور کلی به تعریف یک مساله SCND می‌پردازیم و با استفاده از روش HBDGA پیشنهادی خود به دنبال حل بهینه آن هستیم. همان‌طور که پیش‌تر در نوآوری‌های تحقیق اشاره شد، علاوه بر ارایه یک روش حل ترکیبی جدید و ارزیابی عملکرد آن، در این تحقیق عمده تصمیمات مرتبط با SCND نیز به طور همزمان در تعریف مساله مورد توجه قرار می‌گیرد تا

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

مساله تعریف شده با درصد بیشتری از مسایل واقعی SCND تطابق داشته و کاربردپذیری بیشتری داشته باشد. در جدول ۱ به طور اختصار به مقایسه این پژوهش با مقالات اخیر پرداخته شده است.

جدول ۱. مقایسه پژوهش حاضر با مقالات اخیر در حوزه مدل‌سازی و حل مساله SCND

پژوهش‌های مرتبط و سال چاپ		تصمیمات دیده شده در تعریف مساله SCND									روش حل				
		انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش	مکان‌یابی مراکز تولید	تعیین اندازه ظرفیت مراکز تولید	مکان‌یابی مراکز توزیع	تعیین اندازه ظرفیت مراکز توزیع	تخصیص تسهیلات تولید و توزیع به مشتریان و تعیین جریان زنجیره	تعداد سطوح SC	مطالعه موردی/محصول	کلاسیک (بدون تجزیه و بدون فراابتکاری)	مبتنی بر روش تجزیه	مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری	ترکیب الگوریتم‌های دقیق (تجزیه) و فراابتکاری	مقایسه روش‌ها و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی
بیدهندی و همکاران [۵۰]	۲۰۰۹	✓	✓	×	✓	✓	✓	4	×	✓	BD	×	×	✓
پیشوایی و همکاران [۳۷]	۲۰۱۰	×	✓	✓	✓	✓	✓	3	×	×	×	MA	×	✓
پیشوایی و همکاران [۴۹]	۲۰۱۰	×	✓	✓	×	✓	✓	3	×	×	×	SA	×	✓
سنتیبانز و همکاران [۵۲]	۲۰۱۳	×	✓	✓	✓	✓	✓	3	×	✓	BD	×	×	✓
پیشوایی و همکاران [۵۳]	۲۰۱۴	×	✓	✓	✓	✓	✓	4	تجهیزات پزشکی	✓	BD	×	×	✓
خاتمی و همکاران [۵۴]	۲۰۱۵	×	✓	✓	✓	✓	✓	4	×	✓	BD	×	×	✓
سلیمانی و کانان [۱۴]	۲۰۱۵	×	✓	✓	✓	✓	✓	4	×	×	×	GAPSO	×	✓
جبارزاده و همکاران [۲۶]	۲۰۱۶	×	✓	✓	×	×	✓	4	نفت خام	✓	×	×	×	×
جیهونیان و همکاران [۵۵]	۲۰۱۶	×	✓	✓	✓	✓	✓	4	×	✓ ×	BD	×	×	✓
محسنی و همکاران [۲۷]	۲۰۱۶	×	✓	✓	×	×	✓	3	بیوماس	✓	×	×	×	×
ذوحل و سلیمانی [۱۷]	۲۰۱۶	×	✓	✓	✓	✓	✓	4	صنعت طلا	×	×	ACO	×	×

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

اسکندر پور و همکاران [۱۱]	۲۰۱۷	×	✓	×	✓	∘	×	✓	4	×	✓	∘	×	LNS	×	✓
وحدت و وحدت-زاد [۱۵]	۲۰۱۷	×	✓	✓	✓		✓	✓	4	×	✓		BD	×	×	✓
فهیم‌نیا و همکاران [۲۳]	۲۰۱۷	×	✓	✓	✓		✓	✓	4	خون	✓		×	×	×	×
الشمسی و دیابت [۹]	۲۰۱۸	×	✓	✓	✓		✓	✓	4	×	✓		BD	×	×	✓
خدایی فر و همکاران [۱۲]	۲۰۱۸	×	×	×	✓		✓	✓	4	×	✓		BD	×	×	✓
یادگاری و همکاران [۱۶]	۲۰۱۹	×	✓	✓	✓		✓	✓	3	×	×		×	MA	×	✓
بابا زاده و همکاران [۱۰]	۲۰۱۹	×	✓	✓	✓		✓	✓	4	بیودیزل	✓		BD	×	×	✓
پژوهش جاری		✓	✓	✓	✓	∘	✓	✓	**4**	×	✓		**BD**	**GA**	**HBDGA**	✓

۳ بیان مساله SCND و مدل‌سازی

۳-۱ تعریف مساله و مفروضات

در مساله SCND مورد نظر این تحقیق، یک شبکه زنجیره‌تأمین چهارسطحی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱). سطح اول، تأمین‌کنندگان مواد اولیه هستند و سطح دوم، تولیدکنندگان محصول می‌باشند که جریان مواد اولیه بین آن‌ها صورت می‌پذیرد. سطح سوم، مراکز توزیع محصول را شامل می‌شود که جریان محصولات تولیدشده از کارخانه‌ها به آن‌ها صورت می‌گیرد. سطح چهارم، مشتریان/ بازار محصولات است که جریان نهایی محصولات از مراکز توزیع به آن‌ها صورت می‌پذیرد.

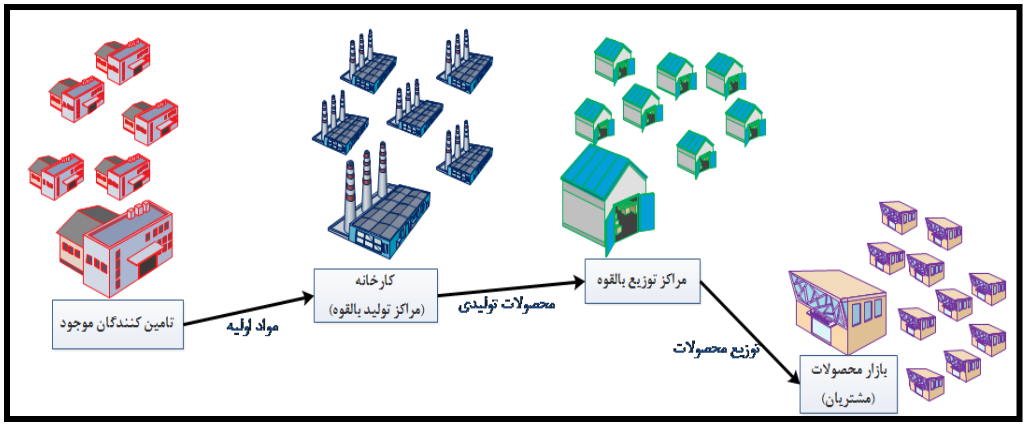
اخذ بهینه تصمیمات استراتژیک از جمله انتخاب تأمین‌کنندگان مواد اولیه و تخصیص سفارش به آن‌ها، تعیین مکان احداث کارخانه‌ها و مراکز توزیع و اندازه ظرفیت آنها و نهایتاً نحوه تخصیص بهینه مراکز تولید به مراکز توزیع و مراکز توزیع به مشتریان و جریان محصولات بین آن‌ها مورد توجه است.

در طراحی و برنامه‌ریزی این زنجیره‌تأمین، هزینه‌ها شامل هزینه احداث تسهیلات تولید و توزیع، هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان و خرید مواد اولیه، هزینه تولید، و نهایتاً هزینه‌های حمل و نقل و توزیع محصولات، به عبارت دیگر هزینه پیکربندی شبکه و هزینه جریان مواد و محصولات در شبکه با هدف اقتصادی کمینه کردن مجموع هزینه‌ها می باشد. مهم‌ترین مفروضات مساله SCND مورد نظر این تحقیق عبارتند از:

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

- مکان استقرار تأمین‌کنندگان مواد اولیه، ظرفیت مشخص شده است.
- هزینه تدارکات/تأمین (خرید و حمل‌ونقل) به دو بخش هزینه ثابت سفارش‌دهی (انتخاب تأمین‌کننده و قرارداد تأمین مواد اولیه) و هزینه متغیر میزان سفارش افراز می‌شود.
- برای احداث کارخانه‌ها و استقرار مراکز توزیع مکان‌های بالقوه مشخص شده است.
- محدودیت حداکثر احداث کارخانه و مراکز توزیع وجود دارد.
- مشتریان در مکان‌های مختلف مستقر هستند و مقدار تقاضا آنها برآورد شده است.
- هزینه ثابت ایجاد ظرفیت مراکز تولید و توزیع به صورت پله‌ای و فزاینده است.
- هزینه متغیر تولید و مکان‌های مختلف لزوما برابر نیست.
- یک مد/نوع حمل و نقل برای جریان محصولات در زنجیره‌تأمین در نظر گرفته می‌شود.
- منبع‌یابی هر سطح زنجیره از سطح قبل می‌تواند چندگانه باشد.
- کمبود مجاز نیست و کل تقاضا بازار باید عرضه شود.



شکل ۱. تصویر شماتیک زنجیره‌تأمین چهارسطحی مورد نظر تحقیق برای مساله SCND

۳-۲ فرمولاسیون مساله و مدل بهینه‌سازی ریاضی

- نماد و علایم ریاضی

مجموعه و اندیس	
$S=\{1,2,\ldots,s,\ldots,\lvert S\rvert\}$	مجموعه تأمین‌کنندگان مواد اولیه
$M=\{1,2,\ldots,m,\ldots,\lvert M\rvert\}$	مجموعه مواد اولیه
$F=\{1,2,\ldots,f,\ldots,\lvert F\rvert\}$	مراکز تولید بالقوه (مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث کارخانه)
$D=\{1,2,\ldots,d,\ldots,\lvert D\rvert\}$	مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز توزیع
$C=\{1,2,\ldots,c,\ldots,\lvert C\rvert\}$	مجموعه مشتریان/بازارهای متقاضی محصول
$U=\{1,2,\ldots,u,\ldots,\lvert U\rvert\}$	مجموعه اندازه ظرفیت برای احداث کارخانه
$V=\{1,2,\ldots,v,\ldots,\lvert V\rvert\}$	مجموعه اندازه ظرفیت برای احداث مراکز توزیع
پارامترها/داده‌های مساله	

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

A_s	هزینه ثابت انتخاب و عقد قرارداد تأمین مواد اولیه از تأمین‌کننده s
$fc^F_{f,u}$	هزینه ثابت احداث کارخانه در مکان f با اندازه ظرفیت u
$fc^D_{d,v}$	هزینه ثابت احداث مرکز توزیع در مکان d با اندازه ظرفیت v
$rc^S_{m,s}$	هزینه واحد خرید مواد اولیه m از تأمین کننده s
$cap^S_{m,s}$	ظرفیت تأمین‌کننده m در عرضه مواد اولیه m
$tr^{S\to F}_{m,s,f}$	هزینه واحد حمل و نقل از مواد اولیه m از تأمین‌کننده s به کارخانه بالقوه در مکان f
pc^F_f	هزینه واحد تولید محصول در کارخانه بالقوه در مکان f
r^F_m	مقدار مواد اولیه نوع m مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول نهایی
cap^F_u	ظرفیت تولید در اندازه u
$tr^{F\to D}_{fd}$	هزینه واحد حمل و نقل محصول از کارخانه بالقوه در مکان f به مرکز توزیع بالقوه در مکان d
cap^D_v	ظرفیت مراکز توزیع اندازه v
$tr^{D\to C}_{d,c}$	هزینه واحد حمل و نقل محصول از مرکز توزیع بالقوه در مکان d به بازار/مشتری c
dem^C_c	مقدار تقاضای بازار c
N^F	حداکثر تعداد کارخانه که می‌تواند احداث شود.
N^D	حداکثر تعداد مرکز توزیع که می‌تواند احداث شود.
	متغیرها/خروجی‌های مساله
x^S_s	اگر تأمین‌کننده s برای تأمین مواد اولیه انتخاب شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است.
$x^F_{f,u}$	اگر در مکان f یک کارخانه با اندازه ظرفیت u احداث شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است.
$x^D_{d,v}$	اگر در مکان d یک مرکز توزیع با اندازه ظرفیت v احداث شود برابر با ۱؛ در غیر این صورت ۰ است.
$y_{m,s,f}$	مقدار جریان مواد اولیه نوع m از تأمین کننده s به کارخانه بالقوه در مکان f
$Q^{F\to D}_{f,d}$	مقدار جریان محصول از کارخانه بالقوه در مکان f به مراکز توزیع بالقوه در مکان d
$Q^{D\to c}_{d,c}$	مقدار جریان محصول از مراکز توزیع بالقوه در مکان d به بازار c

- تابع هدف

$$\min Z = \left[\sum_{s\in S} A_s . x^S_s + \sum_{f\in F}\sum_{u\in U} fc^F_{f,u} . x^F_{f,u} + \sum_{d\in D}\sum_{v\in V} fc^D_{d,v} . x^D_{d,v}\right] + \left[\sum_{s\in S}\sum_{f\in F}\sum_{m\in M}\left(rc^S_{m,s} + tr^{S\to F}_{m,s,f}\right) y_{m,s,f}\right] + \left[\sum_{f\in F}\sum_{d\in D}\left(pc^F_f + tr^{F\to D}_{fd}\right) Q^{F\to D}_{f,d}\right] + \left[\sum_{d\in D}\sum_{c\in C} tr^{D\to C}_{d,c} . Q^{D\to c}_{d,c}\right] \quad (۱)$$

- قیود

s.t.

$$\sum_{f\in F} y_{m,s,f} \le cap^S_{m,s} . x^S_s ;\ \forall\ m\in M, s\in S \quad (۲)$$

$$\sum_{d\in D} Q^{F\to D}_{f,d} \le cap^F_u . x^F_{f,u} \ ;\ \forall\ f\in F, u\in U \quad (۳)$$

$$r^F_m \sum_{d\in D} Q^{F\to D}_{f,d} = \sum_{s\in S} y_{m,s,f} \ ;\ \forall\ f\in F, m\in M \quad (۴)$$

$$\sum_{f\in F} Q^{F\to D}_{f,d} \le cap^D_v . x^D_{d,v} \ ;\ \forall\ d\in D, v\in V \quad (۵)$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

$$\sum_{f\in F} Q_{f,d}^{F\to D} = \sum_{c\in C} Q_{d,c}^{D\to C} \;;\; \forall\, d\in D \qquad (۶)$$

$$\sum_{d\in D} Q_{d,c}^{D\to C} = dem_c^C \;;\; \forall\, c\in C \qquad (۷)$$

$$\sum_{u\in U} x_{f,u}^F \le ۱ \;;\; \forall\, f\in F \qquad (۸)$$

$$\sum_{v\in V} x_{d,v}^D \le ۱ \;;\; \forall\, d\in D \qquad (۹)$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{u\in U} x_{f,u}^F \le N^F \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{d\in D}\sum_{v\in V} x_{d,v}^D \le N^D \qquad (۱۱)$$

$$\begin{cases} x_s^S, x_{f,u}^F, x_{d,v}^D \in \{۰,۱\} & \forall s\in S, \in F, u\in U, d\in D, v\in V \quad : Desiging\,Var. \\ y_{m,s,f}, Q_{f,d}^{F\to D}, Q_{d,c}^{D\to c} \ge ۰ & \forall m\in M\, s\in S, \in F, u\in U, d\in D, v\in V, c\in C \quad : Planning\,Var. \end{cases} \qquad (۱۲)$$

رابطه (۱) تابع هدف مساله را نشان می‌دهد که کمینه کردن مجموع هزینه‌ها است. هزینه‌ها از ۴ جزء اصلی تشکیل می‌شود؛

I- هزینه ثابت پیکربندی شبکه زنجیره‌تأمین (شامل هزینه قرارداد و انتخاب تأمین‌کننده، هزینه احداث مراکز تولید و توزیع در اندازه‌های مختلف)،

II- هزینه تأمین مواد اولیه (هزینه خرید مواد اولیه انتقال آن‌ها به مراکز تولید)،

III- هزینه تولید و حمل و نقل محصولات به مراکز توزیع، و نهایتاً

IV- هزینه توزیع محصولات به مشتریان.

رابطه (۲) بیان می‌کند که تأمین مواد اولیه از هر تأمین‌کننده مستلزم انتخاب و عقد قرارداد با تأمین‌کننده است. همچنین در این رابطه ظرفیت تأمین‌کنندگان نیز کنترل می‌شود. رابطه (۳) محدودیت ظرفیت تولید کارخانه‌های احداث‌شده در هر مکان بالقوه را اعمال می‌کند. رابطه (۴) تضمین می‌کند که تولید محصول مستلزم مواد اولیه مورد نیاز آن است. این رابطه همچنین، تعادل بین جریان مواد اولیه وارد شده به هرکارخانه و محصول تولیدشده و خروجی از کارخانه را نشان می‌دهد. در رابطه (۵)، محدودیت ظرفیت هر مرکز توزیع احداث شده اعمال می‌شود. رابطه (۶) تضمین می‌کند که جریان محصول ورودی به هر مرکز توزیع برابر است با جریان محصول خروجی از آن مرکز توزیع به مشتریان. بر اساس رابطه (۷)، کل تقاضای مشتریان باید بدون کمبود عرضه شود. رابطه (۸) نشان می‌دهد که در هر مکان بالقوه برای احداث کارخانه، فقط یک کارخانه با یک اندازه ظرفیت قابل احداث است. رابطه (۹)، قید قبل را به طور مشابه برای مراکز توزیع بیان می‌کند. در روابط (۱۱-۱۰) به ترتیب قیود حداکثر تعداد کارخانه و مرکز توزیع که می‌تواند احداث شود، اعمال شده است. نهایتاً در رابطه (۱۲)، دامنه متغیرهای مساله طراحی و برنامه‌ریزی شبکه زنجیره‌تأمین مورد نظر این تحقیق آورده شده است.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

٤ رویکرد حل پیشنهادی ترکیب تجزیه بندرز و الگوریتم ژنتیک (HBDGA)

مدل بهینه‌سازی ارایه‌شده برای حل مساله SCND (روابط ۱۲-۱)، یک مدل MILP است. همان‌طور که اشاره شد، مسایل SCND بر مبنای مدل‌های MILP قابل حل در ابعاد کوچک هستند و می‌توان با استفاده از نرم‌افزارها و حل‌کننده‌های تجاری (همچون CPLEX) پاسخ بهینه را در ابعاد کوچک به‌دست آورد. که در صورت بزرگ بودن شبکه (زیاد بودن تعداد متغیرهای طراحی)، یافتن پاسخ موجه و بهینه (نزدیک به بهینه) مستلزم ارایه رویکردهای مبتنی بر روش‌های ابتکاری/ فراابتکاری و یا روش‌های تجزیه است. در این بخش رویکرد حل پیشنهادی این تحقیق (به اختصار HBDGA) ارایه می‌شود که مبتنی بر ترکیب تعاملی روش تجزیه بندرز (BD) و الگوریتم ژنتیک (GA) است. در ادامه، ابتدا به طور مختصر روش‌های BD و GA برای حل مسایل بهینه‌سازی در حالت کلی مرور می‌شوند. سپس، روش حل HBDGA پیشنهادی این تحقیق و دو شیوه مختلف برای اجرای آن به طور کامل توضیح داده می‌شود.

٤-١ بهینه‌سازی مبتنی بر GA

در میان الگوریتم‌های فراابتکاری، GA از جمله روش‌های جمعیت محور و تکاملی است که ایده کلی آن ادغام جواب‌های مطلوب به منظور دست‌یابی به جوابی مطلوب‌تر است. برای توضیح کلیات GA، مساله بهینه‌سازی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \min z = f(x) \\ s.t.\ x \in X \end{cases} \qquad (۱۳)$$

در GA، ابتدا اندازه جمعیت (Npop) مشخص می‌شود. مجموعه‌ای به اندازه Npop از جواب‌ها (معمولا موجه) به صورت تصادفی و یا مبتنی بر یک روش ابتکاری دیگر تولید می‌شود. برازندگی یا کیفیت هر یک از جواب‌ها با محاسبه مقدار تابع هدف به‌دست آورده می‌شود. سپس دو نوع عملگر ادغام و جهش به ترتیب با نرخ‌های pc و pm برای تولید جواب‌های جدید (فرزندان) از جواب‌های فعلی (والدین) تعریف می‌شود. با استفاده از یک مکانیزم مشخص (معمولا تصادفی و یا مبتنی بر چرخه رولت (RW)) به تعداد pc*Npop عضو مجموعه والدین انتخاب می‌شود. مجموعه والدین به pc*Npop/2 زوج تقسیم می‌شوند و مبتنی بر عملگرهای مختلف ادغام از جمله ادغام تک/دو نقطه‌ای، OX ، PMX و ... تعداد pc*Npop جواب جدید تولید می‌شود (خواننده می‌تواند برای آشنایی بیشتر با این عملگرهای ادغام به منبع [۱۶] رجوع نماید). پس از ادغام، از مجموعه (1+pc)Npop عضو موجود، تعداد pm*Npop جواب با مکانیزم تصادفی و یا RW انتخاب می‌شوند و این بار مبتنی بر عملگرهای جهش از جمله تعویض، جابجایی، درج و ... تعداد pm*Npop جواب جدید به مجموعه جواب‌ها اضافه می‌شد.

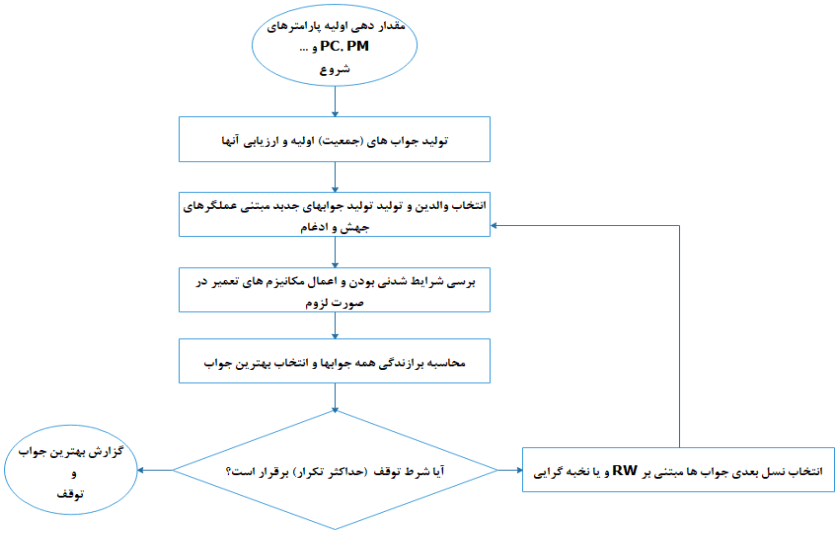
پس از اعمال عملگرهای ادغام و جهش، تعداد (pm+pc)Npop جواب جدید تولید می‌شود. اگر جواب‌های جدید $c \in X$ نباشد، از استراتژی‌های مختلفی از جمله تعمیر (موجه نمودن جواب) و یا جریمه ($z = f(c) + penalty(c)$)استفاده می‌شود به طوری که $penalty(c) = \mu V(c)$ است؛ جایی که μ

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

ضریب هر واحد نقض قیود و $V(c)$ میزان نقض یا ناموجه بودن جواب c است. همچنین اگر جواب جدید $c \in X$ باشد، آنگاه $V(c)=0 \rightarrow penalty(c)=0$ است.

نهایتاً، برازندگی هر یک از Npop $(1+pc+pm)$موجود محاسبه می‌شود. از این تعداد جواب فقط Npop جواب برای نسل/ تکرار بعد انتخاب می‌شوند. انتخاب جواب‌ها برای نسل بعد (بروز رسانی والدین) مبتنی بر مکانیزم‌های انتخاب از جمله RW و یا نخبه‌گرایی انجام می‌شود. در کل انتخاب جواب‌ها برای نسل بعد، شانس انتخاب هر عضو از جمعیت فعلی باید تابعی صعودی/ نانزولی از مقدار برازندگی آن باشد. به این ترتیب، خصیصه‌های مطلوب جواب‌ها در هر نسل ادغام می‌شوند و در نسل بعد جواب‌هایی مطلوب‌تر در دسترس است. این پروسه تا شرط توقف مشخص (مثلا حداکثر تکرار (MaxIt) ادامه می‌یابد و نهایتاً بهترین جواب از آخرین نسل جواب‌ها به عنوان پاسخ/خروجی GA گزارش می‌شود که یک پاسخ موجه و نزدیک به بهینه یا ممکن است دقیقا پاسخ بهینه مساله نیز باشد. فلوچارت GA در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. فلوچارت GA

٤-۲ بهینه‌سازی مبتنی بر BD

روش BD از جمله رویکردهای حل مسایل بهینه‌سازی و قابل به‌کارگیری برای مسایلی است که بتوان با آزادسازی یک یا مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری (که اصطلاحا متغیرهای پیچیده‌ساز نامیده می‌شوند)، مساله را به زیرمسایل ساده‌تر تجزیه نمود و با مکانیزمی مشخص مقدار بهینه متغیرهای بغرنج را نیز به‌دست آورد [۵۵].

یک مساله کمینه‌سازی را به عنوان مساله اصلی (MP[۱])در نظر بگیرید. برای حل این مساله بهینه‌سازی مبتنی بر BD، ابتدا متغیرهای بغرنج مشخص می‌شود. سپس MP به یک زیرمساله (SP[۲]) که جواب آن کران بالای مساله اصلی است و یک مساله آزادشده (RMP[۳]) که جواب آن کران پایین مساله اصلی است، تجزیه می‌گردد.

[1] Master problem
[2] Sub Problem
[3] Relaxed Master problem

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

پس از تجزیه، برای متغیرهای پیچیده یک جواب اولیه در نظر گرفته و SP با توجه به مقدار در نظر گرفته شده برای متغیرهای بغرنج حل می‌شود با استفاده از جواب SP (یا معمولا مدل دوگان آن (DSP[1]) که فضای حل آن مستقل از مقدار متغیرهای بغرنج است)، تحدید در فضای جستجوی RMP اعمال (اضافه‌شدن قیود برش شدنی بودن و برش بهینگی) و RMP حل می‌شود و از آن مقدار جدیدی برای متغیرهای بغرنج به‌دست آورده می‌شود. به طور مشابه، SP (یا DSP) با ثابت نگه داشتن متغیرهای بغرنج جدید حل می‌شود. این پروسه ادامه می‌یابد تا جایی که اختلاف مقدار هدف RMP (به عنوان کران پایین MP) از مقدار هدف SP (به عنوان کران بالای MP) از حد مشخصی کمتر باشد.

به منظور توضیح دقیق‌تر روش BD، فرض کنید مدل MILP یک مساله SCND به صورت زیر بیان شده باشد:

$$\begin{cases} MP \\ min\ \mathrm{c}^t x + \mathrm{f}^t y \\ s.t. \\ Ax + Dy \geq b \\ Ky \geq e \\ x \geq 0\ ,\ y \in S = \{0,1\} \end{cases} \qquad (۱۴)$$

که y بردار متغیرهای بغرنج مساله هستند و در صورت آزاد/ثابت بودن آن‌ها مساله در زمان بسیار سریع تر قابل‌حل است. با در نظر گرفتن طراحی $y = \bar{y} \in S : K\bar{y} \geq e$؛ زیرمساله زیر حاصل می‌شود که مطمئنا مقدار بهینه آن کران بالای (UB) مساله اصلی SCND است.

$$\begin{cases} SP: \\ \mathrm{f}^t\bar{\mathrm{y}} + (\min_{\mathrm{x}} \mathrm{c}^t\mathrm{x} \mid Ax \geq b - D\bar{\mathrm{y}}\ \ x \geq 0) \end{cases} \qquad (۱۵)$$

واضح است فضای شدنی SP به مقدار $\bar{y}$ وابسته است؛ این در صورتی است که فضای مدل DSP مستقل از $\bar{y}$ است.

$$\begin{cases} DSP: \\ UB = \mathrm{f}^t\bar{\mathrm{y}} + (\mathrm{Max}_{\mathrm{u}}\ \ \mathrm{u}^t\left(\mathrm{b} - \mathrm{D}\bar{\mathrm{y}}\right)\ \ \mid\ \ \mathrm{A}^t u \geq c,\ u \geq 0) \end{cases} \qquad (۱۶)$$

به ازای هر $\bar{y}$ ، مدل (۱۶) یک مدل برنامه‌ریزی خطی است که حل آن بسیار سریع‌تر از MILP است. مدل MP به صورت نقطه‌گوشه ای زیر نیز قابل تبدیل است:

$$\begin{cases} MP: \\ \mathrm{Min}_{\mathrm{y}\in\mathrm{S}}\ \ \left(\mathrm{f}^t\mathrm{y} + \mathrm{Max}\left\{\mathrm{u}^{*t}\left(\mathrm{b} - \mathrm{Dy}\right) \mid \mathrm{u}^* \in \mathrm{E}\left(\mathrm{U}\right)\right\} \mid \mathrm{Ky} \geq \mathrm{e}\right) \end{cases} \qquad (۱۷)$$

که $\mathrm{E}(\mathrm{U}) = \left\{\mathrm{u}_1^*, \mathrm{u}_2^*, \ldots, \mathrm{u}_K^*\right\}$ مجموعه نقاط گوشه‌ای چندوجهی ($\mathrm{A}^t\mathrm{u} \geq \mathrm{c}, \mathrm{u} \geq 0$) است. فرض کنید $\mathrm{e}(\mathrm{U}) = \left\{\mathrm{u}_1^*, \mathrm{u}_2^*, \ldots, \mathrm{u}_{k\leq K}^*\right\} \subseteq \mathrm{E}(\mathrm{U})$ باشد. در این صورت واضح است جواب بهینه مدل (۱۸) زیر یک کران پایین (LB) برای MP است که آن را به عنوان RMP در نظر می‌گیریم.

[1] Dual Sub Problem

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

$$\begin{cases} RMP: \\ Min \;\; LB = \mathrm{f}^{\mathrm{t}} y + \Psi \\ \Psi \geq \mathrm{u}_{\mathrm{i}}^{*\mathrm{t}} \left(\mathrm{b} - \mathrm{DY}\right) \forall i = ۱, ۲, \ldots, k \\ Ky \geq e \\ y \in S \end{cases} \qquad (۱۸)$$

فرض کنید در تکرار k از روش BD، مقدار تابع هدف RMP برابر با $\mathrm{LB}^{(k)}$، و مقدار تابع هدف SP برابر با $\mathrm{UB}^{(k)}$ باشند. اگر شرط $\left|\frac{\mathrm{UB}^{(k)} - \mathrm{LB}^{(k)}}{\mathrm{LB}^{(k)}}\right| < \delta$ برقرار باشد (δ حداکثر خطای نسبی است)، الگوریتم متوقف می‌شود. شکل ۳ روش BD را در ۳ فاز خلاصه می‌کند.

در صورتی که روش BD برای حل مساله SCND (و مدل‌های MILP متناظر با آن) به‌کارگرفته شود، آنگاه عمده سختی و پیچیدگی حل مساله، به یافتن جواب بهینه RMP مربوط می‌شود. معمولا SP یک مدل برنامه‌ریزی خطی ساده است و در زمان بسیار کم حل می‌شود ولی RMP یک مساله بهینه‌سازی ترکیباتی و عددصحیح محض است و حل آن در ابعاد بزرگ مستلزم زمان زیاد است. از این رو، اگر BD نیاز به تکرارهای زیادی داشته باشد، آنگاه زمان حل (به واسطه حل MP در هر تکرار) بسیار زیاد می‌شود. برای این منظور، به منظور تسریع در زمان حل مساله، نسخه‌های مختلف دیگری از روش BD (تحت عنوان تجزیه بندرز شتاب‌یافته) توسعه یافته‌اند که از استراتژی‌های مختلف برای ایجاد برش‌های قوی‌تر در RMP استفاده می‌شود تا اولا مساله RMP در هر تکرار سریع‌تر حل شود و درثانی با تعداد تکرار کمتری شرط توقف برقرار شود.

فاز ۱ : تجزیه مسئله و مقداردهی اولیه به متغیرهای بغرنج/پیچیده‌ساز

- با در نظر گرفتن متغیرهای پیچیده‌ساز y (متغیرهای گسسته/باینری و ...) مدل SP از MP استخراج شود.
- مدل DSP یا دوگان SP، که فضای جواب آن مستقل از متغیرهای پیچیده‌ساز y است، تشکیل شود.
- مدل RMP از MP استخراج شود.
- در مدل RMP، مجموعه قیود حاصل از برش‌های بهینگی (OC) و برش‌های شدنی (FC) آن تهی باشد ($OC = \emptyset$, $FC = \emptyset$).
- $y = \overline{y^{r}} \in S : K\overline{y^{r}} \geq e$ به عنوان مقدار اولیه شدنی متغیرهای پیچیده‌ساز y باشد.
- مقدار حداکثر خطا (δ) به عنوان شرط توقف الگوریتم مشخص شود.
- قرار بده k=۱ و فاز ۲ شروع شود.

فاز ۲ : حل DSP و بدست آوردن برش شدنی یا بهینگی

مدل DSP شود؛

- اگر مدل DSP نشدنی است، مدل SP نیز یا نشدنی است و یا جواب نامتناهی دارد؛ توقف.
- اگر جواب بهینه DSP متناهی باشد، آنگاه برش بهنگی $\Psi \geq \mathrm{u}_k^{*\mathrm{t}}(\mathrm{b} - \mathrm{Dy})$ به مجموعه OC اضافه شود. به فاز ۳ برو.
- اگر جواب بهینه DSP نامتناهی باشد مدل MDSP (مدل همگن DSP و نرمال‌شده) تشکیل شود و از حل بهینه آن برش شدنی $\mathrm{u}_k^{*\mathrm{t}}(\mathrm{b} - \mathrm{Dy}) \leq ۰$ به مجموعه FC اضافه شود. به فاز ۳ برو.

فاز ۳ : حل RMP و بررسی شرط توقف (همگرایی)

- مدل RMP مشروط به قیود اصلی $\{\mathrm{Ky} \geq \mathrm{e}, \mathrm{y} \in \mathrm{S}\}$ و مجموعه برش‌های بهینگی و شدنی OC و OF حل شود.
- اگر مدل RMP نشدنی است، MP نیز نشدنی است و مسئله پاسخ شدنی ندارد. توقف.
- اگر جواب بهینه RMP در شرط توقف ($\left|\frac{\mathrm{UB}^{(k)} - \mathrm{LB}^{(k)}}{\mathrm{LB}^{(k)}}\right| < \delta$) صدق می‌کند توقف.
- اگر شرط توقف برقرار نیست،
- قرار بده $y = \overline{y^{(k)}}$ که از حل RMP بدست آورده شده است.
- قرار بده k=k+۱ و به شروع فاز ۲ برگرد.

شکل ۳. شبه کد روش تجزیه بندرز (BD) در سه فاز اصلی

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

۳-٤ رویکرد HBDGA پیشنهادی برای حل مساله SCND

در حالت کلی، در ادغام روش فراابتکاری به منظور بهبود عملکرد BD باید به دو نکته توجه کرد؛ اول آنکه برش‌های قوی در RMP ایجاد شود تا همگرایی در تعداد تکرارهای کمتری ایجاد شود، و دوم آن‌که در هر تکرار RMP سریع‌تر حل شود. در ادامه، رویکرد پیشنهادی این تحقیق برای ترکیب GA با BD به منظور تسریع در روش BD و ارتقاء عملکرد آن برای حل مساله SCND توضیح داده می‌شود.

$$\mathrm{RMP}(\mathrm{SCND}):$$

$$\min \left[\sum_{s\in S} A_s . x_s^S + \sum_{f\in F}\sum_{u\in U} fc_{f,u}^F . x_{f,u}^F + \sum_{d\in D}\sum_{v\in V} fc_{d,v}^D . x_{d,v}^D\right] + \text{penalty}$$

$$\sum_{u\in U} x_{f,u}^F \le ۱ ;\ \forall\ f \in F$$

$$\sum_{v\in V} x_{d,v}^D \le ۱ ;\ \forall\ d \in D$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{u\in U} x_{f,u}^F \le N^F \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{d\in D}\sum_{v\in V} x_{d,v}^D \le N^D$$

$$\text{penalty} = \begin{cases} ۰ ; OC\, is\, Satisfied \\ M\,(\text{A large Number}); else \end{cases}$$

$$x_s^S ,\ x_{f,u}^F , x_{d,v}^D \in \{۰,۱\} \qquad \forall\ s\in S, \in F, u\in U,\ d\in D, v\in V$$

$$\mathrm{SP}(\mathrm{SCND}):$$

$$\min \left[\sum_{s\in S} A_s . \overline{x_s^S} + \sum_{f\in F}\sum_{u\in U} fc_{f,u}^F . \overline{x_{f,u}^F} + \sum_{d\in D}\sum_{v\in V} fc_{d,v}^D . \overline{x_{d,v}^D}\right] +$$

$$\left[\sum_{s\in S}\sum_{f\in F}\sum_{m\in M}\left(rc_{m,s}^S + tr_{m,s,f}^{S\to F}\right) y_{m,s,f}\right] + \left[\sum_{f\in F}\sum_{d\in D}\left(pc_f^F + tr_{fd}^{F\to D}\right) Q_{f,d}^{F\to D}\right] + \left[\sum_{d\in D}\sum_{c\in C} tr_{d,c}^{D\to C} . Q_{d,c}^{D\to c}\right]$$

.

$$\sum_{f\in F} y_{m,s,f} \le\ cap_{m,s}^S . \overline{x_s^S};\ \forall\ m\in M, s\in S$$

$$\sum_{d\in D} Q_{f,d}^{F\to D} \le cap_u^F . \overline{x_{f,u}^F}\ ;\ \forall\ f\in F, u\in U \qquad (۲۰)$$

$$r_m^F \sum_{d\in D} Q_{f,d}^{F\to D} = \sum_{s\in S} y_{m,s,f}\ ;\ \forall\ f\in F, m\in M$$

$$\sum_{f\in F} Q_{f,d}^{F\to D} \le cap_v^D . \overline{x_{d,v}^D}\ ;\ \forall\ d\in D, v\in V$$

$$\sum_{f\in F} Q_{f,d}^{F\to D} = \sum_{c\in C} Q_{d,c}^{D\to C}\ ;\ \forall\ d\in D$$

$$\sum_{d\in D} Q_{d,c}^{D\to C} = dem_c^C\ ;\ \forall\ c\in C$$

$$y_{m,s,f} , Q_{f,d}^{F\to D}, Q_{d,c}^{D\to c} \ge ۰ \quad \forall m\in M\ s\in S, \in F, u\in U,\ d\in D, v\in V,\ c\in C$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

- ***انتخاب تامین‌کننده***
  - برای هر تامین‌کننده، یک عدد تصادفی بین 0 تا 1 تولید می‌شود.
  - تامین‌کنندگان با توجه به اعداد تصادفی تولید شده برای آنها به صورت نزولی مرتب می‌شوند.
  - P تامین کننده اول که مجموع ظرفیت آنها در تامین مواد اولیه می‌تواند مجموع تقاضا را تامین کند انتخاب می‌شوند و برای آنها $x_s^S = 1$ می‌شود.
    - شرط موجه بودن تامین‌کنندگان منتخب:

$$\sum_{s\in S} cap_{m,s}^{S}.x_s^S \geq r_m^F \sum_{c\in C} dem_c^C \quad \forall m \in M$$

- ***مکان‌یابی کارخانه‌ها و اندازه ظرفیت آنها***
  - یک عددصحیح به تصادف از 1 تا N^F تولید می‌شود (T).
  - برای هر مکان بالقوه احداث کارخانه، یک عدد تصادفی بین 0 تا 1 تولید می‌شود.
  - مکان‌های بالقوه با توجه به اعداد تصادفی تولید شده برای آنها به صورت نزولی مرتب می‌شوند.
  - T مکان اول برای احداث کارخانه در نظر گرفته می‌شود.
  -
  - برای هر مکان احداث، یک عددصحیح تصادفی بین 1 تا |U| به تصادف انتخاب می‌شود و ظرفیت کارخانه تعیین می‌شود. برای T مکان احداث با توجه به اندازه ظرفیت در نظر گرفته شده، $x_{f,u}^F = 1$ می‌شود.
    - شرط موجه بودن محل احداث و اندازه ظرفیت کارخانه‌ها:

$$\sum_{f\in F}\sum_{u\in U} cap_u^F.x_{f,u}^F \geq \sum_{c\in C} dem_c^C$$

- ***مکان‌یابی مراکز توزیع و اندازه ظرفیت آنها***
  - یک عددصحیح به تصادف از 1 تا N^D تولید می‌شود (G).
  - برای هر مکان بالقوه احداث مرکز توزیع، یک عدد تصادفی بین 0 تا 1 تولید می‌شود.
  - مکان‌های بالقوه با توجه به اعداد تصادفی تولید شده برای آنها به صورت نزولی مرتب می‌شوند.
  - G مکان اول برای احداث مراکز توزیع در نظر گرفته می‌شود.
  - برای هر مکان احداث، یک عددصحیح تصادفی بین 1 تا |V| به تصادف انتخاب می‌شود و ظرفیت مرکز توزیع تعیین می‌شود. برای G مرکز توزیع با توجه به اندازه ظرفیت در نظر گرفته شده، $x_{d,v}^D = 1$ می‌شود.
    - شرط موجه بودن محل احداث و اندازه ظرفیت مراکز توزیع:

$$\sum_{d\in D}\sum_{v\in V} cap_v^D.x_{d,v}^D \geq \sum_{c\in C} dem_c^C$$

شکل ٤. مکانیزم تولید جمعیت اولیه برای متغیرهای پیچیده ساز در رویکرد HBDGA پیشنهادی

- ***ناموجه بودن در تامین:*** $\exists\, m \in M : \sum_{s\in S} cap_{m,s}^{S}.x_s^S < r_m^F \sum_{c\in C} dem_c^C$
  - در این صورت مکانیزم تعمیر به اینصورت است که به تصادف به تامین‌کنندگان افزوده می‌شود تا شرط موجه بدن جواب برقرار گردد.
- ***ناموجه بودن اندازه ظرفیت کارخانه‌ها:*** $\sum_{f\in F}\sum_{u\in U} cap_u^F.x_{f,u}^F < \sum_{c\in C} dem_c^C$
  - دو مکانیزم می‌توان برای تعمیر این نوع جواب‌ها در پی گرفت:
  - ۱- برای مکان‌های منتخب احداث کارخانه، اندازه ظرفیت کارخانه‌ها به تصادف افزایش یابد.
  - ۲- به طور تصادفی چند کارخانه در مکان های دیگر احداث شود ا شرط موجه بودن جواب برقرار گردد.
- ***ناموجه بودن اندازه ظرفیت مراکز توزیع:*** $\sum_{d\in D}\sum_{v\in V} cap_v^D.x_{d,v}^D < \sum_{c\in C} dem_c^C$
  - مکانیزم تعمیر شبیه با حالت ناموجه بودن اندازه کارخانه است.

شکل ٥. مکانیزم بررسی موجه بودن جواب متغیرهای پیچیده‌ساز و تعمیر جواب در رویکرد HBDGA پیشنهادی

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

ابتدا توجه کنید RMP و SP به ترتیب به صورت مدل (۱۹) و (۲۰) هستند و به ترتیب کران‌های پایین و بالای مساله SCND از آن‌ها به‌دست آورده می‌شود. در رویکرد HBDGA پیشنهادی برای حل مساله‌SCND، ابتدا به اندازه یک جمعیت مشخص متغیرهای باینری(طراحی شبکه) به صورت تصادفی مقدار می‌گیرند (مکانیزم تولید جواب‌های اولیه برای این متغیرها به صورتی است که RMP در مساله SCND (مدل (۱۹)) موجه باشد). سپس به ازای هر یک از این جواب‌ها، مقدار بهینه SP در مساله SCND (مدل (۲۰)) حل می‌شود و برازندگی آن‌ها بر اساس مقدار بهینه SP سنجیده می‌شود.

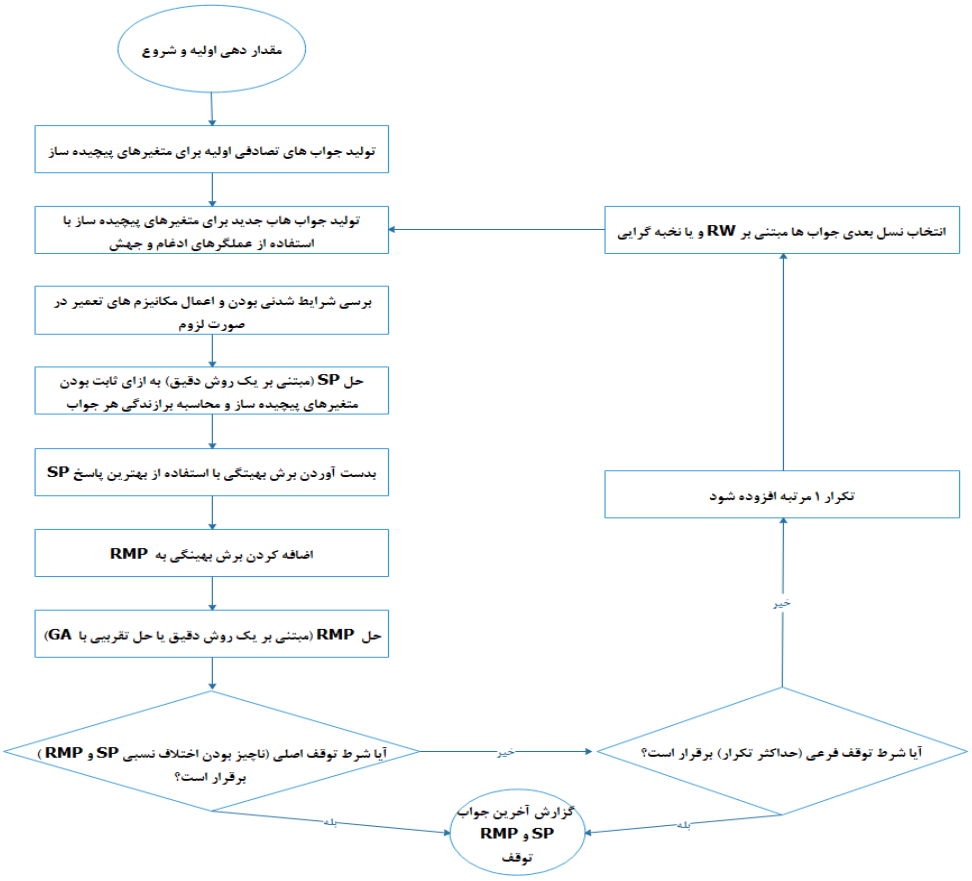
پس از تولید نسل اول جواب‌ها و محاسبه برازندگی آنها، به صورت تصادفی و یا مبتنی بر RW، تعدادی از جواب‌های موجود انتخاب می‌شود و بر اساس عملگرهای ادغام و جهش، جواب‌های جدید تولید می‌شود. عملگرها جهش و ادغام را طوری تعریف می‌کنیم که جواب‌ها موجه باشند (یعنی هم در مدل (۱۹) صدق کنند و هم مدل (۲۰) با ثابت نگه داشتن این متغیرها، جواب شدنی داشته باشد) و در صورت نیاز با استفاده از مکانیزم تعمیر، موجه شوند.

از میان تمام جواب‌های موجود، با استفاده از برازنده‌ترین جواب، که SP کمترین مقدار را دارد، یک برش بهینگی ایجاد می‌شود که باید به صورت یک قید در RMP اضافه شود. نحوه اعمال این قید در RMP بر اساس تابع جریمه انجام می‌شود؛ به این صورت که اگر جواب‌های نسل بعد این قید را ارضاء نکنند یک جریمه به تابع هدف RMP اعمال می‌شود. پس از اعمال این برش/ جریمه، RMP با استفاده از یک رویکرد دقیق، ابتکاری و یا فراابتکاری حل می‌شود.

پس از حل RMP ، در صورت برقراری شرط توقف اصلی (ناچیز بودن اختلاف نسبی RMP از SP)، روش HBDGA پیشنهادی متوقف می‌شود؛ در غیر این‌صورت، اگر شرط توقف فرعی (حداکثر تکرار) نیز برقرار نباشد، مبتنی برRW و یا نخبه‌گرایی به اندازه جمعیت مشخص اولیه، از میان جواب‌های موجود انتخاب و نسل بعدی جواب‌ها تشکیل می‌شود. پس از به‌روزرسانی مجموعه جواب‌های موجود برای متغیرهای پیچیده‌ساز، مجددا پروسه مذکور تکرار می‌شود تا نهایتاً شرط توقف اصلی یا فرعی به‌وقوع بپیوندد. مکانیزم تولید جواب‌های موجه اولیه، مکانیزم تعمیر جواب‌های ناموجه، و نهایتاً فلوچارت رویکرد HBDGA پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های ۴ ، ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]



شکل ٦. فلوچارت رویکرد حل HBDGA پیشنهادی

۵ نتایج عددی و تحلیل

در این بخش، به حل مسایل آزمایشی و ارزیابی رویکرد HBDGA پیشنهادی برای حل مساله SCND پرداخته می‌شود. نخست چندین مساله آزمایشی مختلف در ابعاد مختلف به صورت تصادفی تولید می‌شود هر یک از مسایل آزمایشی توسط CPLEX، روش BD کلاسیک و دو شیوه رویکرد حل پیشنهادی این تحقیق حل می‌شوند و نتایج ارزیابی می‌شود. در بخش پایانی نیز چند تحلیل حساسیت ارایه می‌شود. لازم به ذکر است که برای پیاده‌سازی رویکرد حل HBDGA پیشنهادی، از تعامل نرم‌افزارهای GAMS نسخه 24.7.1 و نرم‌افزار MATLAB نسخه 2018b استفاده شده است. برای اجرای نرم‌افزارهای مذکور از یک کامپیوتر شخصی استفاده شده‌است که CPUآن Core™ i5 2.5 GHz و RAM آن 4.0 GB می‌باشد.

۵-۱ تولید تصادفی مسایل SCND در ابعاد مختلف

افزایش $|F|$، $|D|$، $|U|$، $|V|$ و $|S|$ موجب رشد متغیرهای پیچیده‌ساز مساله **SCND** می‌شود و حل آن را دشوارتر می‌کند. در جدول ۲، اندازه شبکه در مسایل آزمایشی ابعاد کوچک و بزرگ مشخص شده است. $|F|$ و $|D|$ از جمله مواردی هستند که در مسایل **SCND** ابعاد بزرگ، معمولا مقدار زیادی دارند. بنابراین، در تولید

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

مسایل آزمایشی، افزایش بعد مساله را عمدتا به افزایش این دو مقدار وابسته نموده‌ایم. جدول ۳ دامنه تولید پارامترهای مساله **SCND** را نشان می‌دهد. در این تولید تصادفی پارامترها باید دو نکته مورد توجه باشد؛ اول آنکه مساله آزمایشی موجه باشد، و دوم آنکه قیود مساله زاید نباشند.

جدول ۲. مسایل SCND آزمایشی در اندازه کوچک و بزرگ

مسایل آزمایشی		|F|	|D|	|U|	|V|	|S|	|M|	|C|
اندازه کوچک	۱	۵	۱۰	۲	۲	۳	۲	۱۵
	۲	۷	۱۵	۲	۲	۴	۲	۲۰
	۳	۱۰	۲۰	۳	۳	۵	۳	۲۵
	۴	۲۰	۳۰	۳	۳	۷	۳	۳۰
	۵	۲۵	۳۵	۴	۴	۸	۴	۳۵
اندازه متوسط	۶	۴۰	۵۰	۵	۵	۱۰	۷	۴۰
	۷	۵۰	۶۰	۶	۶	۱۲	۸	۵۰
	۸	۶۰	۷۰	۷	۷	۱۴	۹	۶۰
	۹	۷۰	۸۰	۸	۸	۱۶	۱۰	۷۰
	۱۰	۸۰	۹۰	۹	۹	۱۸	۱۰	۸۰
اندازه بزرگ	۱۱	۹۰	۱۰۰	۱۰	۱۰	۲۰	۱۲	۹۰
	۱۲	۱۰۰	۱۲۰	۱۲	۱۲	۲۵	۱۲	۱۰۰
	۱۳	۱۲۰	۱۵۰	۱۴	۱۴	۲۵	۱۵	۱۲۰
	۱۴	۱۵۰	۱۸۰	۱۶	۱۸	۳۰	۱۵	۱۳۰
	۱۵	۱۸۰	۲۰۰	۱۸	۱۸	۴۰	۱۵	۱۵۰

جدول ۳. دامنه تولید تصادفی پارامترهای مسایل SCND آزمایشی

پارامتر	دامنه تولید تصادفی	پارامتر	دامنه تولید تصادفی
A_s	[۵۰-۱۰۰]	r_m^F	۱
$c_{f,u}^F$	[۵۰۰-۷۰۰]	cap_u^F	[۱۰۰-۵۰۰]
$fc_{d,v}^D$	[۱۰۰-۱۵۰]	$tr_{fd}^{F\to D}$	[۱-۳]
$rc_{m,s}^S$	[۱-۳]	cap_v^D	[۵۰-۲۰۰]
$cap_{m,s}^S$	[۱۰۰۰-۱۵۰۰]	dem_c^C	[۱۰۰-۳۰۰]
$tr_{m,s,f}^{S\to F}$	[۰/۵-۰/۸]	N^F	$\frac{\lvert F\rvert}{۲}$
pc_f^F	[۲-۵]	N^D	$\frac{\lvert D\rvert}{۲}$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

۵-۲ حل مسایل آزمایشی و ارزیابی عملکرد رویکرد حل HBDGA پیشنهادی

در این بخش، هر یک از مسایل SCND آزمایشی توسط CPLEX ، روش BD (به صورت کلاسیک) و دو شیوه HBDGA_I و HBDGA_II رویکرد پیشنهادی حل و نتایج عددی مقایسه می‌شوند. می‌دانیم که CPLEX می‌تواند مسایل آزمایشی ابعاد کوچک را به صورت بهینه حل کند. در این مسایل، پاسخ رویکرد حل پیشنهادی با استفاده از معیار درصد انحراف نسبی از بهینگی ($RE = \frac{Z_{HBDGA} - Z_{CPLEX}}{Z_{CPLEX}} * ۱۰۰$) با CPLEX مقایسه می‌شوند. در مسایل آزمایشیSCND ابعاد متوسط و بزرگ ابتدا روش BD برای حل مسایل آزمایشی به‌کار گرفته شده (با حداکثر زمان اجرا ۷۲۰۰S معادل با ۲ ساعت) و سپس رویکرد پیشنهادی HBDGA نسبت به BD از دو منظر، درصد بهبود کیفیت (PQI[1]) و درصد بهبود/تسریع زمان حل (PTI[2]) به ترتیب با استفاده از معیارهای $PQI = \frac{Z_{BD} - Z_{HBDGA}}{Z_{BD}} * ۱۰۰$ و $PTI = \frac{Time_{BD} - Time_{HBDGA}}{Time_{BD}} * ۱۰۰$ محاسبه می‌شوند.

رویکرد HBDGA پیشنهادی برای حل مساله SCND به دو شیوه قابل اجرا است. در شیوه اول، مطابق با آنچه که تا کنون گفته شد، جواب همه متغیرهای طراحی با استفاده از GA تولید و بهبود داده می‌شود و در SP فقط متغیرهای جریان شبکه قرار می‌گیرند (HBDGA_I). در شیوه دوم، تعیین اندازه ظرفیت نیز علاوه بر جریان شبکه در SP تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر، در شیوه دوم پیاده‌سازی، GA و RMP فقط به متغیرهای انتخاب تأمین‌کننده و تعیین مکان برای کارخانه‌ها و مراکز توزیع محدود می‌شوند، و اندازه ظرفیت با حل SP به‌دست آورده می‌شود (HBDGA_II). واضح است که در حل مساله SCND، زمان اجرای SP مبتنی بر HBDGA_I کمتر است. ولی مبتنی بر HBDGA_II هم زمان حل RMP کمتر می‌شود و سهم جستجوی جواب از طریق روش دقیق بیشتر می‌شود که این خود می‌تواند موجب برش‌های قوی‌تر برای RMP و تسریع بیشتر در روند همگرایی شود. در بخش بعدی، با استفاده از مسایل آزمایشی به ارزیابی روش حل پیشنهادی پرداخته می‌شود.

جدول ٤. حل مسایل SCND آزمایشی در ابعاد کوچک و ارزیابی رویکرد HBDGA پیشنهادی

	مسایل آزمایشی	CPLEX		HBDGA_I			HBDGA_II		
		Z	Time (s)	Z	Time (s)	RE (%)	Z	Time (s)	(%) RE
اندازه کوچک	۱	۱۰۷۲۳	۱۲۳/۱۱	۱۰۷۲۳	۲۰۵/۱۳	۰	۱۰۷۲۳	۳۳۲/۶۰	۰
	۲	۱۴۶۹۳	۳۲۹/۰۳	۱۵۰۷۲	۴۰۱/۳۱	۱/۱۲	۱۴۶۹۳	۳۷۳/۵۶	۰
	۳	۲۲۴۵۴	۷۷۲/۱۷	۲۲۴۵۴	۵۳۲/۵۴	۰	۲۲۴۵۴	۴۴۰/۸۰	۰
	۴	۲۸۹۵۴	۱۰۵۶/۴۳	۲۹۸۷۵	۶۰۹/۴۵	۰/۹۳	۲۹۳۲۰	۶۵۲/۶۵	۰/۸۷
	۵	۳۱۰۴۳	۱۴۳۱/۷۰	۳۲۹۵۰	۹۴۲/۰۵	۱/۳۵	۳۲۵۰۱	۵۲۱/۷۴	۰

[1] Percentage of Quality Improvement
[2] Percentage of Time Improvement

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

جدول ۵. حل مسایل SCND آزمایشی در ابعاد متوسط و بزرگ و ارزیابی رویکرد HBDGA پیشنهادی

مسایل آزمایشی		BD		HBDGA_I		HBDGA_II	
		Z	Time (s)	PQI (%)	PTI (%)	PQI (%)	PTI (%)
اندازه متوسط	۶	۷۶/۵۴۳	۲۱۲۰/۱۲	-۰/۸۴	۱۲/۴۳	۰	۸/۱۲
	۷	۸۷/۵۴۹	۳۵۹۴/۴۳	۰	۱۰/۶۵	۰	۹/۴۵
	۸	۹۲/۴۵۴	۵۴۰۲/۱۲	-۱/۵۲	۱۴/۱۳	-۰/۹۳	۷/۱۲
	۹	۱۰۴/۵۴۷	+۷۲۰۰	۰/۸۷	۲۲/۷۸	۰/۸۷	۱۶/۱۱
	۱۰	۱۲۰/۰۴۳	+۷۲۰۰	۱/۳۲	۱۹/۳۰	۲/۵۶	۱۱/۳۹
اندازه بزرگ	۱۱	۱۸۷/۳۲۳	+۷۲۰۰	۴/۳۱	۸/۱۲	۴/۱۳	۴/۱۲
	۱۲	۲۳۱/۴۳۱	+۷۲۰۰	۲/۱۴	۵/۴۳	۳/۹۸	۳/۴۳
	۱۳	۲۷۸/۳۰۱	+۷۲۰۰	۱/۵۴	۱۳/۳۱	۲/۷۸	۸/۲۳
	۱۴	۳۰۰/۴۳۰	+۷۲۰۰	۳/۶۵	۹/۱۲	۴/۱۲	۰
	۱۵	۳۴۱/۸۹۰	+۷۲۰۰	۵/۱۲	۰	۴/۸۷	۰

جدول ۴ نتایج اجرای مسایل آزمایشی ابعاد کوچک را توسط CPLEX و دو رویکرد پیشنهادی این تحقیق را نشان می‌دهد. جواب بهینه این مسایل توسط CPLEX به‌دست آمده است. در رویکرد HBDGA_I پیشنهادی با خطای ناچیزی به جواب بهینه نزدیک است و در رویکرد HBDGA_II پیشنهادی نیز این خطا بسیار ناچیز و در برخی مسایل آزمایشی برابر با صفر است. در ابعاد متوسط و بزرگ نیز دو شاخص PQI و PTI برای ارزیابی رویکرد حل پیشنهادی محاسبه شده‌اند. بر اساس جدول ۵، در مسایل ابعاد متوسط و بزرگ ملاحظه می‌شود که روش BD گرچه قادر به یافتن پاسخ برای مساله SCND است، ولی دو معیار PQI و PTI برای پاسخ دو رویکرد HBDGA_I و HBDGA_II اکثراً نامنفی است که این خود نتیجه می‌دهد که هم از منظر بهبودکیفیت جواب و هم از منظر بهبود زمان حل مساله، رویکردهای پیشنهادی نسبت به روش BD عملکرد بهتری داشته است. همچین واضح است که گرچه هر دو رویکرد پیشنهادی قادر به حل مساله SCND در ابعاد مختلف هستند و پاسخی بهینه یا بسیار نزدیک به بهینه می‌دهند، اما رویکرد HBDGA_I زمان کمتری نسبت به HBDGA_II صرف می‌کند ولی معمولا کیفیت جواب HBDGA_II بهتر است.

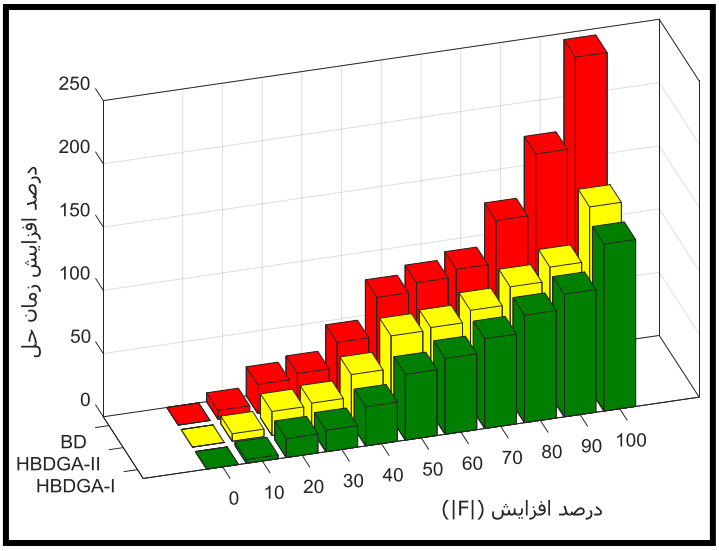
۵-۳ تحلیل حساسیت

همان‌طور که اشاره شد، سختی حل مساله SCND مورد نظر این تحقیق متاثر از اندازه $|F|$ و $|D|$ است که تعداد مکان‌های بالقوه برای مکان یابی تسهیلات تولید و مراکز توزیع را بیان می‌کنند. علاوه بر این دو، تعداد مشتری‌های ($|C|$) نیز اندازه شبکه زنجیره‌تأمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در ادامه به تحلیل حساسیت زمان حل مساله نسبت به افزایش این مجموعه‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور، اندازه/کاردینالیتی هر یک از این مجموعه، با ثابت نگه داشتن سایر مجموعه‌ها، با درصدهای مختلفی افزایش یافته و درصد تغییرات (افزایش) زمان حل روش BD و دو رویکرد HBDGA_I و HBDGA_II مقایسه شده‌اند. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نشان

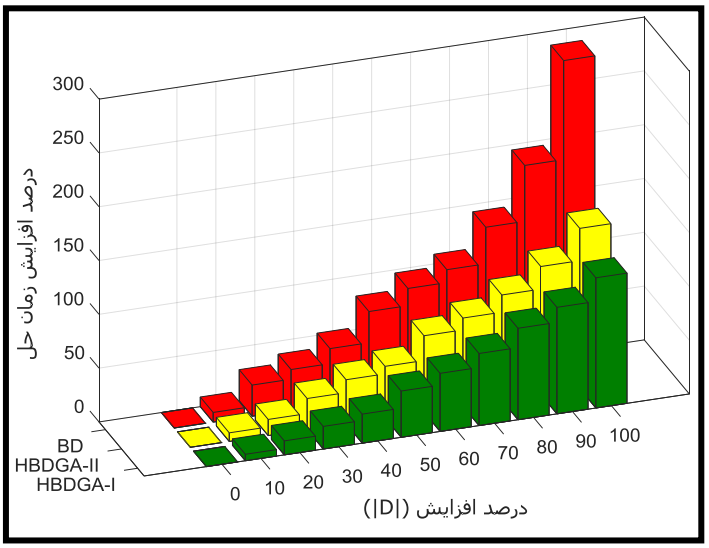
[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

می‌دهند که با افزایش اندازه $|F|$ و $|D|$ گرچه زمان حل هم در روش BD و هم رویکردهای پیشنهادی تحقیق افزایش می‌یابد، اما درصد افزایش زمان حل در رویکردهای پیشنهادی بسیار کمتر است. همچنین از شکل ۹ ملاحظه می‌شود که با افزایش اندازه $|C|$ (با توجه به آنکه متغیرهای بغرنج تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند) تفاوت معناداری بین رویکردهای پیشنهادی تحقیق و روش BD نیست.



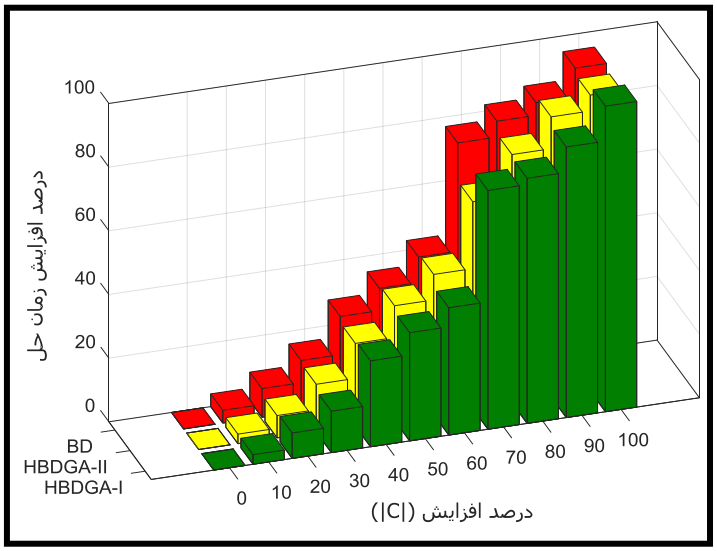
شکل ۷. مقایسه درصد افزایش زمان حل روش BD و رویکرد HBDGA پیشنهادی نسبت به درصد افزایش مکان بالقوه تسهیلات تولید (F)



شکل ۸. مقایسه درصد افزایش زمان حل روش BD و رویکرد HBDGA پیشنهادی نسبت به درصد افزایش مکان بالقوه مراکز توزیع (D)

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]



شکل ۹. مقایسه درصد افزایش زمان حل روش BD و رویکرد HBDGA پیشنهادی نسبت به درصد افزایش مشتریان (C)

٦ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مدیریت زنجیره‌تأمین، مساله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین (SCND) از مسایل بسیار با اهمیت است و حل بهینه آن موجب کاهش قابل توجه‌ای در هزینه‌ها می‌گردد. این مساله مهم مدیریتی که پیکربندی زنجیره‌تأمین را مشخص می‌کند و زیرمسایلی همچون مکان‌یابی تسهیلات، تعیین اندازه ظرفیت و ... را در بر می‌گیرد در رده مسایل NP-Hard قرار می‌گیرد.

اهمیت یافتن پاسخ بهینه مساله SCND از یک سو و NP-Hard بودن این مساله از سوی دیگر موجب شده است که این مساله مورد توجه محققان فراوانی قرار گیرد و برای حل آن رویکردهای مختلفی توسعه داده شود. روش‌های فراابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک (GA) و روش‌های مبتنی بر تجزیه مانند تجزیه بندرز (BD) از جمله رویکردهایی هستند که برای حل این مساله توسعه داده شده‌اند. عدم تضمین بهینگی پاسخ GA (با وجود زمان حل قابل قبول آن) و کند شدن BD در مسایل ابعاد بزرگ (با وجود تضمین بهینگی)، انگیزه ارایه یک رویکرد ترکیبی را ایجاد می‌کند که با استفاده از GA به تسریع پروسه حل BD پرداخته شود به طوری که هم زمان حل اجرای BD کاهش یابد و هم بهینگی تضمین گردد.

در حل مساله SCND توسط BD مساله به دو زیر مساله تجزیه می‌شود که یک زیر مساله در هر تکرار به سرعت حل می‌شود، ولی زیر مساله دیگر (RMP) چون بهینه‌سازی ترکیبی است وبه کندی حل می‌شود. بنابراین، در ادغام روش‌های فراابتکاری با روش BD باید اولاً مدت زمان حل RMP را در هر تکرار کاهش داد و در ثانی برش‌های قوی در RMP ایجاد شود تا همگرایی در تعداد تکرارهای کمتری ایجاد شود. در رویکرد HBDGA پیشنهادی این تحقیق، مبتنی بر جستجوی GA در حل مساله RMP در هر تکرار تسریع ایجاد می‌شود و همچنین با توجه به جمعیت محور بودن GA مجموعه‌ای از برش‌های بهینگی در هر تکرار ایجاد می‌شود که با اعمال آنها حل مساله سریع‌تر می‌شود. نتایج حل مسایل SCND آزمایشی نشان می‌دهد که رویکرد حل پیشنهادی این

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

تحقیق قادر است در زمان قابل قبولی پاسخ بهینه (نزدیک به بهینه با خطای ناچیز) را به‌دست آورده و روش کلاسیک BD را هم از منظر زمان حل و هم از منظر کیفیت جواب بهبود دهد. دو شیوه مختلف برای اجرای رویکرد HBDGA ارایه شده است که نتایج نشان می‌دهد HBDGA_I زمان کمتری نسبت به HBDGA_II صرف می‌کند ولی معمولا کیفیت جواب HBDGA_II بهتر است.

منابع

[۴۸] چراغعلی پور، آ.، پایدار، م.، حاجی آقائی کشتلی، م.، (۱۳۹۶). طراحی شبکه زنجیره‌تأمین چند دوره‌ای و سه سطحی برای محصولات زراعی فاسد شدنی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن. ۱۴(۳)، ۱۵-۳۴.

[۴۹] زارع مهرجردی، ی.، برقی، ش.، مومنی، ح.، (۱۳۹۰). به کارگیری روش فوق ابتکاری- شبیه‌سازی تبرید تدریجی برای حل مسایل زنجیره‌تأمین. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن. ۸ (۳)، ۱-۲۴.

[1] Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. Omega, 54, 11-32.

[2] Christopher, M. (1999). Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service Financial Times: Pitman Publishing. London, 1998.

[3] Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., & Shapiro, A. (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. European Journal of Operational Research, 167(1), 96-115.

[4] Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2004). Managing The Supply Chain: Definitive Guide. Tata McGraw-Hill Education.

[5] Lemmens, S., Decouttere, C., Vandaele, N., & Bernuzzi, M. (2016). A review of integrated supply chain network design models: Key issues for vaccine supply chains. Chemical Engineering Research and Design, 109, 366-384.

[6] Schütz, P., Tomasgard, A., & Ahmed, S. (2009). Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition. European journal of operational research, 199(2), 409-419.

[7] Gupta, A., & Könemann, J. (2011). Approximation algorithms for network design: A survey. Surveys in Operations Research and Management Science, 16(1), 3-20.

[8] Alshamsi, A., & Diabat, A. (2017). A Genetic Algorithm for Reverse Logistics network design: A case study from the GCC. Journal of Cleaner Production, 151, 652-669.

[9] Alshamsi, A., & Diabat, A. (2018). Large-scale reverse supply chain network design: An accelerated Benders decomposition algorithm. Computers & Industrial Engineering, 124, 545-559.

[10] Babazadeh, R., Ghaderi, H., & Pishvaee, M. S. (2019). A benders-local branching algorithm for second-generation biodiesel supply chain network design under epistemic uncertainty. Computers & Chemical Engineering, 124, 364-380.

[11] Eskandarpour, M., Dejax, P., & Péton, O. (2017). A large neighborhood search heuristic for supply chain network design. Computers & Operations Research, 80, 23-37.

[12] Khodayifar, S., Raayatpanah, M. A., & Pardalos, P. M. (2018). An accelerating Benders' decomposition approach to the integrated supply chain network design with distributed generation. Energy Systems, 9(3), 647-667.

[13] Rahmaniani, R., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Rei, W. (2018). Accelerating the Benders decomposition method: Application to stochastic network design problems. SIAM Journal on Optimization, 28(1), 875-903.

[14] Soleimani, H., & Kannan, G. (2015). A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks. Applied Mathematical Modelling, 39(14), 3990-4012.

[15] Vahdat, V., & Vahdatzad, M. A. (2017). Accelerated Benders' Decomposition for Integrated Forward/Reverse Logistics Network Design under Uncertainty. Logistics, 1(2), 11.

[16] Yadegari, E., Alem-Tabriz, A., & Zandieh, M. (2019). A memetic algorithm with a novel neighborhood search and modified solution representation for closed-loop supply chain network design. Computers & Industrial Engineering, 128, 418-436.

[17] Zohal, M., & Soleimani, H. (2016). Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry. Journal of Cleaner Production, 133, 314-337.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

[18] Varsei, M., & Polyakovskiy, S. (2017). Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in Australia. Omega, 66, 236-247.

[19] Alumur, S. A., Kara, B. Y., & Melo, M. T. (2015). Location and logistics. In Location science (pp. 419-441). Springer, Cham.

[20] Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management–A review. European journal of operational research, 196(2), 401-412.

[21] Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. European journal of operational research, 111(3), 423-447.

[22] Revelle, C. S., Eiselt, H. A., & Daskin, M. S. (2008). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. European journal of operational research, 184(3), 817-848.

[23] Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A., Ghavamifar, A., & Bell, M. (2017). Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters. International Journal of Production Economics, 183, 700-709.

[24] Ma, H., & Li, X. (2018). Closed-loop supply chain network design for hazardous products with uncertain demands and returns. Applied Soft Computing, 68, 889-899.

[25] Medina-González, S., You, F., & Espuña, A. (2017). Optimal design and operation of water supply chain networks using scenario-based dynamic negotiation and multiple negotiation terms. In Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 40, pp. 1921-1926). Elsevier.

[26] Jabbarzadeh, A., Pishvaee, M., & Papi, A. (2016). A multi-period fuzzy mathematical programming model for crude oil supply chain network design considering budget and equipment limitations. Journal of Industrial and Systems Engineering, 9(special issue on supply chain), 88-107.

[27] Mohseni, S., Pishvaee, M. S., & Sahebi, H. (2016). Robust design and planning of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain: A case study in Iran. Energy, 111, 736-755.

[28] Chibeles-Martins, N., Pinto-Varela, T., Barbósa-Póvoa, A. P., & Novais, A. Q. (2012). A simulated annealing algorithm for the design and planning of supply chains with economic and environmental objectives. In Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 30, pp. 21-25). Elsevier.

[29] Subramanian, P., Ramkumar, N., Narendran, T. T., & Ganesh, K. (2013). PRISM: PRIority based SiMulated annealing for a closed loop supply chain network design problem. Applied soft computing, 13(2), 1121-1135.

[30] Lee, D. H., & Dong, M. (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 44(3), 455-474.

[31] Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2012). A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon. International Journal of Production Economics, 136(1), 218-230.

[32] Eskandarpour, M., Nikbakhsh, E., & Zegordi, S. H. (2014). Variable neighborhood search for the bi-objective post-sales network design problem: A fitness landscape analysis approach. Computers & Operations Research, 52, 300-314.

[33] Eskandarpour, M., Zegordi, S. H., & Nikbakhsh, E. (2013). A parallel variable neighborhood search for the multi-objective sustainable post-sales network design problem. International Journal of Production Economics, 145(1), 117-131.

[34] Kadadevaramath, R. S., Chen, J. C., Shankar, B. L., & Rameshkumar, K. (2012). Application of particle swarm intelligence algorithms in supply chain network architecture optimization. Expert Systems with Applications, 39(11), 10160-10176.

[35] Prasanna Venkatesan, S., & Kumanan, S. (2012). A multi-objective discrete particle swarm optimisation algorithm for supply chain network design. International Journal of Logistics Systems and Management, 11(3), 375-406.

[36] Fahimnia, B., Farahani, R. Z., & Sarkis, J. (2013). Integrated aggregate supply chain planning using memetic algorithm–A performance analysis case study. International Journal of Production Research, 51(18), 5354-5373.

[37] Pishvaee, M. S., Farahani, R. Z., & Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. Computers & operations research, 37(6), 1100-1112.

[38] Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., & Karaoglan, I. (2009). A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design. Computers & Industrial Engineering, 56(2), 521-537.

[39] Wang, H. F., & Hsu, H. W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. Computers & operations research, 37(2), 376-389.

[40] Cardona-Valdés, Y., Álvarez, A., & Pacheco, J. (2014). Metaheuristic procedure for a bi-objective supply chain design problem with uncertainty. Transportation Research Part B: Methodological, 60, 66-84.

[41] Olivares-Benitez, E., Ríos-Mercado, R. Z., & González-Velarde, J. L. (2013). A metaheuristic algorithm to solve the selection of transportation channels in supply chain design. International Journal of Production Economics, 145(1), 161-172.

[42] Sadjady, H., & Davoudpour, H. (2012). Two-echelon, multi-commodity supply chain network design with mode selection, lead-times and inventory costs. Computers & Operations Research, 39(7), 1345-1354.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]

[43] Easwaran, G., & Üster, H. (2009). Tabu search and benders decomposition approaches for a capacitated closed-loop supply chain network design problem. Transportation Science, 43(3), 301-320.
[44] Jiang, W., Tang, L., & Xue, S. (2009, August). A hybrid algorithm of tabu search and benders decomposition for multi-product production distribution network design. In 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics (pp. 79-84). IEEE.
[45] Keyvanshokooh, E., Ryan, S. M., & Kabir, E. (2016). Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition. European Journal of Operational Research, 249(1), 76-92.
[46] Poojari, C. A., & Beasley, J. E. (2009). Improving Benders decomposition using a genetic algorithm. European Journal of Operational Research, 199(1), 89-97.
[47] Santibanez-Gonzalez, E. D., & Diabat, A. (2013). Solving a reverse supply chain design problem by improved Benders decomposition schemes. Computers & Industrial Engineering, 66(4), 889-898.
[50] Bidhandi, H. M., Yusuff, R. M., Ahmad, M. M. H. M., & Bakar, M. R. A. (2009). Development of a new approach for deterministic supply chain network design. European Journal of Operational Research, 198(1), 121-128.
[51] Pishvaee, M. S., Kianfar, K., & Karimi, B. (2010). Reverse logistics network design using simulated annealing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 47(1-4), 269-281.
[52] Santibanez-Gonzalez, E. D., & Diabat, A. (2013). Solving a reverse supply chain design problem by improved Benders decomposition schemes. Computers & Industrial Engineering, 66(4), 889-898.
[53] Pishvaee, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2014). An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supply chain. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 67, 14-38.
[54] Khatami, M., Mahootchi, M., & Farahani, R. Z. (2015). Benders' decomposition for concurrent redesign of forward and closed-loop supply chain network with demand and return uncertainties. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 79, 1-21.
[55] Jeihoonian, M., Zanjani, M. K., & Gendreau, M. (2016). Accelerating Benders decomposition for closed-loop supply chain network design: Case of used durable products with different quality levels. European Journal of Operational Research, 251(3), 830-845.
[56] G Raidl, G. R. (2015). Decomposition based hybrid metaheuristics. European journal of operational research, 244(1), 66-76.
[57] Rahmaniani, R., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Rei, W. (2017). The Benders decomposition algorithm: A literature review. European Journal of Operational Research, 259(3), 801-817.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.7.9]