

مدلی استوار برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته پویا با قابلیت تنظیم ظرفیت

سیامک جبریل زاده^۱، بهنام وحدانی^{۲*}، سید میثم موسوی^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین

۲. استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، گروه مهندسی صنایع،

قزوین، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد

(تاریخ دریافت ۱۳۹۴/۰۵/۰۵ - تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۹۵/۰۳/۱۰ - تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۹/۰۷)

چکیده

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته، یک مدل جدید مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته در حالت چندمحصولی و چنددوره‌ای ارائه می‌شود. سپس با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار مدل پیشنهادی در حالت غیرقطعی گسترش می‌یابد. براساس نتایج، با استفاده از مدل پیشنهادی می‌توان ظرفیت تسهیلات در یک شبکه لجستیکی حلقه‌بسته را تنظیم کرد. به‌علاوه، نتایج حل مسائل آزمایشی نشان می‌دهد هزینه و زمان حل مدل استوار بیشتر از مدل قطعی است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ظرفیت، بهینه‌سازی استوار، شبکه حلقه‌بسته، طراحی زنجیره تأمین، عدم قطعیت.

مقدمه

و از مطلوبیت آن کاسته می‌شود؛ بنابراین، ماهیت راهبردی زنجیره تأمین ایجاب می‌کند در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین، تغییرات ناشی از گذشت زمان در نظر گرفته شود. در نتیجه، شبکه لجستیکی باید به‌صورتی طراحی شود که برای مواجهه با تغییرات احتمالی انعطاف‌پذیری لازم را داشته باشد.

اتخاذ تصمیمات مناسب درمورد مکان و ظرفیت تسهیلات و برخورداری از یک شبکه لجستیکی منعطف ممکن است ضمن افزایش کارایی شبکه، هزینه‌ها را به‌طور شایان توجهی کاهش دهد [۲].

تحقیق حاضر با توجه به عامل زمان و تغییرات ناشی از آن، مکان و ظرفیت تسهیلات را به‌طور هم‌زمان در یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته بررسی کرده است. شبکه‌های حلقه‌بسته شبکه‌هایی هستند که در آن‌ها هم جریان رو به جلو و هم جریان رو به عقب محصولات و اطلاعات به‌طور هم‌زمان دیده می‌شود. محققان تاکنون مدل‌های مختلفی را

در دهه اخیر، به دلایل مختلفی از جمله توانایی بازایی ارزش، قوانین زیست‌محیطی و افزایش آگاهی و انتظارات مشتریان، توجه سازمان‌ها به لجستیک معکوس^۱ افزایش یافته است [۱]. براین اساس، بسیاری از سازمان‌ها مجاب شده‌اند بسترسازی لازم را برای ایجاد فرایندهای لجستیک معکوس در شبکه زنجیره تأمین خود فراهم آورند. در این راستا، بسیاری از سازمان‌ها برای دستیابی به مزایای لجستیک معکوس، باید زنجیره تأمین خود را دوباره طراحی کنند.

از آنجا که طراحی یا طراحی مجدد شبکه‌های زنجیره تأمین هزینه‌های زیادی دارد، منطقی است نحوه طراحی شبکه به‌گونه‌ای باشد که برای مدت قابل قبولی مطلوبیت کافی داشته باشد. طراحی شبکه‌های لجستیکی با استفاده از مدل‌هایی انجام می‌گیرد که ورودی آن‌ها پارامترهایی هستند که ممکن است با گذشت زمان دچار تغییر شوند. به‌این ترتیب، شبکه لجستیکی از حالت بهینه خارج می‌شود

۲. مدل‌های حلقه‌بسته پویا

در مسائل مکان‌یابی پویا تلاش می‌شود تصمیمات زنجیره تأمین در یک افق زمانی از پیش تعیین شده اتخاذ شوند. در این مسائل فرض می‌شود پارامترهای ورودی به مدل، قطعی و از پیش تعیین شده و در دسترس‌اند، درحالی‌که در واقعیت چنین نیست و عدم قطعیت‌های موجود به تغییرات زیادی در پارامترهای تصمیم‌گیری منجر می‌شوند.

کو و ایوان [۱۲] مدلی را برای طراحی شبکه حلقه‌بسته پویا در حالت قطعی و چندمحصولی گسترش دادند. مین و کو [۱۳] مدلی پویا را برای شبکه حلقه‌بسته طراحی کردند. در مدل آن‌ها عدم قطعیت در پارامترها در نظر گرفته نشده است. لی و دانگ [۱۴] یک مدل پویای حلقه‌بسته را پیشنهاد کردند که در آن تقاضا به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. آل ساید و همکاران [۱۵] در تحقیق خود یک مدل چندمحصولی سه سطحی را برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته در یک فضای قطعی پیشنهاد کردند.

با مرور ادبیات مشخص شد در بین مدل‌های تک-دوره‌ای فقط در تحقیق‌های [۶]، [۱۰] و [۱۱] ظرفیت متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. به علاوه، در هیچ‌یک از مدل‌های پویا ظرفیت متغیر تصمیم محسوب نشده است. در تحقیق حاضر، یک مدل پویای چندمحصولی پیشنهاد شده است که در آن برخلاف مدل‌های قبلی امکان کاهش و افزایش ظرفیت برای تسهیلات شبکه وجود دارد. مدل ارائه شده در این تحقیق در راستای کمینه کردن هزینه‌ها، امکان تصمیم‌گیری هم‌زمان در زمینه استفاده کردن یا استفاده نکردن از تسهیلات شبکه و ظرفیت مطلوب برای آن‌ها را در دوره‌های برنامه‌ریزی فراهم می‌آورد. لحاظ کردن هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و امکان تصمیم‌گیری درمورد اندازه تسهیلات نیز از دیگر نوآوری‌های مدل ارائه شده در این تحقیق است. درضمن، برای نزدیک‌تر شدن مدل به واقعیت، با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار، مدل در حالت غیرقطعی نیز گسترش یافته است.

بیان مسئله

شبکه لجستیکی مورد مطالعه در این تحقیق شامل مراکز تولید^۴ باز و بسته، مراکز دریافت^۵ باز و بسته، بازارهای

در حوزه زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته ارائه داده‌اند. در پژوهش پیش رو، این مدل‌ها در دو دسته کلی مدل‌های تک‌دوره‌ای و مدل‌های پویا بررسی شده‌اند.

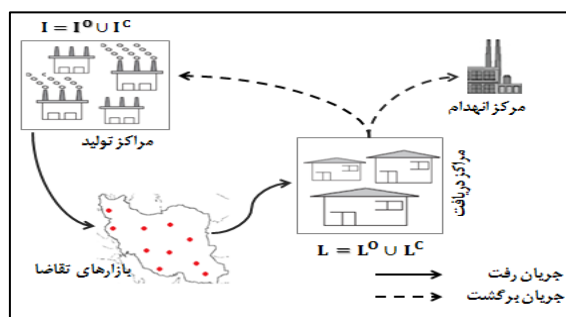
۱. مدل‌های حلقه‌بسته تک‌دوره‌ای

فلشمن و همکاران [۳] برای اولین بار با طراحی یک شبکه حلقه‌بسته نشان دادند طراحی شبکه لجستیک به‌طور یکپارچه^۲ و هم‌زمان موجب کاهش هزینه‌ها نسبت به رویکرد سنتی می‌شود. سالما و همکاران [۴] یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح در حالت چندمحصولی با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و عدم قطعیت در تقاضا و تعداد محصولات برگشتی ارائه کردند. آستر و همکاران [۵] یک مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته چندمحصولی ارائه کردند. در مدل آن‌ها، فقط در زمینه مکان‌های مرکز جمع‌آوری و احیا تصمیم‌گیری می‌شود. پیشوایی و همکاران [۶] مدل دو هدفه به‌منظور کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن سطح پاسخ‌دهی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته پیشنهاد کردند. پیشوایی و همکاران [۷] مدل بهینه‌سازی استوار در برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته در حالت تک‌محصولی ارائه کردند. حسن‌زاده و ژانگ [۸] مدل چندهدفه جامع برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته و انتخاب تأمین‌کننده مطرح کردند. رضانی و همکاران [۹] مدل چندهدفه احتمالی برای طراحی شبکه ترکیبی رو به جلو - معکوس با در نظر گرفتن سطوح کیفیت ارائه کردند. حسن‌زاده و ژانگ [۱۰] مدل مکان‌یابی تسهیلات چندهدفه را برای یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته ارائه دادند. در مدل آن‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی احتمالی (رویکردی مبتنی بر سناریو)^۳ تأثیر عدم قطعیت در تقاضا و محصولات برگشتی روی ساختار شبکه نشان داده شده است. رضانی و همکاران [۱۱] یک طراحی استوار برای شبکه لجستیکی حلقه‌بسته در چند سطح و چند محصول ارائه کردند. در مدل آن‌ها تقاضا و مقدار محصولات بازگشتی به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است که احتمال وقوع آن‌ها به صورت سناریوهای گسسته امکان‌پذیر است.

عملیاتی، کمترین ظرفیتی است که تسهیلات امکان فعالیت در آن را دارند. ظرفیت اولیه، ظرفیت در دسترس در هریک تسهیلات در ابتدای دوره برنامه‌ریزی است. این ظرفیت ممکن است برای هریک از مراکز تولید و هریک از مراکز دریافت، با توجه به شرایط فنی و فناوریانه‌ای متفاوت در نظر گرفته شود. در ضمن، ظرفیت‌های معرفی شده بر حسب واحد محصول در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، با فرض وجود شبکه لجستیکی و با هدف کمینه کردن کل هزینه-های شبکه، پرسش‌های زیر مطرح و پاسخ آن‌ها جست‌وجو می‌شود:

- در هر دوره کدام یک از مراکز تولید و با چه ظرفیتی فعالیت کنند؟
- در هر دوره کدام یک از مراکز دریافت و با چه اندازه و چه ظرفیتی فعالیت کنند؟
- در هر دوره نحوه جریان محصولات بین تسهیلات شبکه به چه صورت باشد؟

تقاضا و یک مرکز انهدام^۶ است. نحوه فعالیت شبکه به این صورت است که به منظور برآورده کردن تقاضای مشتریان، محصولات در مراکز تولید، تولید می‌شوند و از طریق همین مراکز به نقاط تقاضا ارسال می‌شوند. همچنین به صورت هم‌زمان، مراکز جمع‌آوری، محصولات بازگشتی را از نقاط تقاضا دریافت می‌کنند و بخشی از آن را به مرکز انهدام و بخشی دیگر را برای بازتولید^۷ به مراکز تولید ارسال می‌کنند. شکل ۱ ساختار شبکه لجستیکی مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. برای هریک از تسهیلات (مراکز تولید و مراکز دریافت)، سه نوع ظرفیت در نظر گرفته شده است. این ظرفیت‌ها عبارت‌اند از: حداکثر ظرفیت عملیاتی، حداقل ظرفیت عملیاتی و ظرفیت اولیه. منظور از حداکثر ظرفیت عملیاتی، بیشترین ظرفیت ممکن برای ایجاد در هریک از تسهیلات است. حداکثر ظرفیت عملیاتی برای هریک از مراکز دریافت، وابسته به اندازه مرکز دریافت در نظر گرفته شده است. حداقل ظرفیت



شکل ۱. شبکه لجستیکی

- ظرفیت مراکز تولید و مراکز دریافت ممکن است در هر دوره تغییر کند.
- اندازه هریک از مراکز دریافت ممکن است در هر دوره تغییر کند؛ برای مثال، یک مرکز دریافت مجاز است در یک دوره با اندازه کوچک باز باشد و در دوره بعد با اندازه بزرگ باز باشد.
- امکان تغییر وضعیت برای هریک از مراکز تولید و دریافت در طول دوره برنامه‌ریزی حداکثر یک بار است. تغییر وضعیت برای یک تسهیل زمانی رخ می‌دهد که یک تسهیل بسته، باز شود یا یک تسهیل باز، بسته شود.

مدل‌سازی ریاضی

در این بخش، مفروضات، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی می‌شوند و در ادامه، مدل پیشنهادی در دو بخش تابع هدف و محدودیت‌ها مطرح می‌شود.

مفروضات

- تقاضا قطعی است.
- مکان تسهیلات ثابت و مشخص است.
- تقاضای هریک از بازارهای تقاضا ممکن است از سوی یک یا چند مرکز تولید برآورده شود.

مجموعه‌ها

I : مجموعه مراکز تولید (باز و بسته)، $I = I^O \cup I^C$
 L : مجموعه مراکز دریافت (باز و بسته)، $L = L^O \cup L^C$
 K : مجموعه نقاط تقاضا
 J : مجموعه نوع محصولات
 M : اندازه‌های مراکز دریافت (small, medium, big)
 T : مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی

دریافت I ام به مرکز انهدام

$Maxcap_i$: حداکثر ظرفیت مرکز تولید i ام
 $Mincap_i$: حداقل ظرفیت مجاز برای مرکز تولید i ام
 $Scap_i$: ظرفیت اولیه مرکز تولید i ام
 $Maxcap_m$: حداکثر ظرفیت مرکز دریافت با سایز m
 $Mincap_l$: حداقل ظرفیت مجاز برای مرکز دریافت l ام
 $Scap_l$: ظرفیت اولیه در مرکز دریافت l ام

متغیرهای تصمیم

X_{ikt} : مقدار محصول نوع z ام که از طرف مرکز تولید i ام در دوره t ام به بازار تقاضای k ام ارسال می‌شود.
 R_{kljt} : مقدار محصول بازگشتی نوع z ام که در دوره t ام از سوی بازار تقاضای k ام به مرکز دریافت l ام ارسال می‌شود.
 S_{ijjt} : مقدار محصول بازگشتی نوع z ام که در دوره t ام از سوی مرکز دریافت l ام به مرکز تولید i ام ارسال می‌شود.
 N_{ljt} : مقدار محصول بازگشتی نوع z ام که در دوره t ام از طرف مرکز دریافت l ام به مرکز انهدام ارسال می‌شود.
 VP_{it} : مقدار افزایش ظرفیت مرکز تولید i ام در ابتدای دوره t ام.
 WP_{it} : ظرفیت مرکز تولید i ام در ابتدای دوره t ام.
 VD_{lt} : مقدار افزایش ظرفیت مرکز دریافت l ام در ابتدای دوره t ام.
 WD_{lt} : مقدار افزایش ظرفیت مرکز دریافت l ام در ابتدای دوره t ام.
 YP_{it} : اگر مرکز تولید i ام در دوره t ام باز باشد، برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است.
 YD_{lmt} : اگر مرکز دریافت l ام در دوره t ام با سایز m باز باشد، برابر با یک و در غیر این صورت صفر است.
 ZP_{it} : اگر وضعیت مرکز تولید i ام از دوره $(t-1)$ ام به دوره t ام تغییر کرده باشد برابر با یک است.
 ZD_{lmt} : اگر وضعیت مرکز دریافت l ام با سایز m از دوره $(t-1)$ ام به دوره t ام تغییر کرده باشد، برابر با یک است.
 ZS_{lmt} : اگر مرکز دریافت l ام از دوره $(t-1)$ ام به دوره t ام به سایز m تبدیل شده باشد، برابر با یک است.

پارامترها

D_{kjt} : تقاضای بازار تقاضای k ام برای محصول z ام در دوره t ام
 R_{kljt} : مقدار محصول برگشتی نوع z ام توسط بازار تقاضای l ام در دوره t ام
 FPI_i : هزینه ثابت بازکردن مرکز تولید i ام
 EPI_i : هزینه ثابت بستن مرکز تولید i ام
 FD_{lm} : هزینه ثابت بازکردن مرکز دریافت l ام با سایز m
 ED_{lm} : هزینه ثابت بستن مرکز دریافت l ام با سایز m
 DS_m : هزینه ثابت تبدیل مرکز دریافت به سایز m
 A_{jt} : هزینه تولید یک واحد محصول z ام در دوره t ام
 B_{jt} : هزینه صرفه‌جویی حاصل از بازتولید یک واحد محصول z ام در دوره t ام
 H_{jt} : هزینه انهدام هر واحد محصول z ام در دوره t ام
 QP_{it} : هزینه ایجاد هر واحد ظرفیت در مرکز تولید i ام در دوره t ام
 QD_{lt} : هزینه ایجاد هر واحد ظرفیت در مرکز دریافت l ام در دوره t ام
 GP_{it} : هزینه‌های نگهداری و تعمیرات مرکز تولید i ام به‌ازای هر واحد ظرفیت در دوره t ام
 GD_{lt} : هزینه‌های نگهداری و تعمیرات مرکز دریافت l ام به‌ازای هر واحد ظرفیت در دوره t ام
 CX_{ikjt} : هزینه حمل یک واحد محصول z ام از مرکز تولید i ام به بازار تقاضای k ام در دوره t ام
 CR_{kljt} : هزینه حمل یک واحد محصول z ام از بازار تقاضای l ام به مرکز دریافت l ام در دوره t ام
 CS_{ijjt} : هزینه حمل یک واحد محصول z ام از مرکز دریافت l ام به مرکز تولید i ام در دوره t ام
 CN_{ijjt} : هزینه حمل یک واحد محصول z ام از مرکز

به هزینه‌های حمل‌ونقل تمام محصولات از مراکز تولید به بازارهای تقاضا، بازارهای تقاضا به مراکز دریافت، مراکز دریافت به کارخانه‌ها و مراکز دریافت به مراکز تولید هستند. عبارت چهاردهم در تابع هدف مربوط به هزینه‌های ناشی از تغییر سایز مراکز دریافت در طول دوره برنامه‌ریزی است. عبارات پانزده و شانزده نیز به ترتیب مربوط به هزینه‌های تعمیرات و نگهداری تمام مراکز تولید و مراکز دریافت است و وابسته به ظرفیت فعالیت تسهیلات در آن در نظر گرفته شده است. روابط ۲ تا ۲۲ بیانگر محدودیت‌های مدل پیشنهادی است.

$$\sum_{i \in I} X_{ikjt} = D_{k,j,t} \quad \forall k, j, t \quad (2)$$

$$\sum_{l \in L} R_{kljt} = R_{kjt} \quad \forall k, j, t \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} R_{kljt} = \sum_{i \in I} S_{lijt} + N_{ljt} \quad \forall l, j, t \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K, j \in J} X_{ikjt} + \sum_{l \in L, j \in J} S_{lijt} \leq \quad (5)$$

$$Y P_{it} \text{Maxcap}_i \quad \forall i, t$$

$$\sum_{k \in K, j \in J} X_{ikjt} + \sum_{l \in L, j \in J} S_{lijt} \leq W P_{it} \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$W P_{it} \leq Y P_{it} \text{Maxcap}_i \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$W P_{it} \leq S \text{cap}_i + \sum_{u \in T, u \leq t} V P_{iu} \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$W P_{it} \geq Y P_{it} \text{Mincap}_i \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K, j \in J} R_{kljt} \leq \sum_{m \in M} Y D_{lmt} \text{Maxcap}_m \quad \forall l, t \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K, j \in J} R_{kljt} \leq W D_{lt} \quad \forall l, t \quad (11)$$

$$W D_{lt} \leq \sum_{m \in M} Y D_{lmt} \text{Maxcap}_m \quad \forall l, t \quad (12)$$

$$W D_{lt} \leq S \text{cap}_l + \sum_{b \in T, b \leq t} V D_{lb} \quad \forall l, t \quad (13)$$

$$W D_{lt} \geq \sum_{m \in M} Y D_{lmt} \text{Mincap}_l \quad \forall l, t \quad (14)$$

$$\sum_{m \in M} Y D_{lmt} \leq 1 \quad \forall l, t \quad (15)$$

$$Z P_{it} = Y P_{i,t-1} - Y P_{it} \quad \forall i \in I^O, j, t \quad (16)$$

$$Z P_{it} = Y P_{it} - Y P_{i,t-1} \quad \forall i \in I^C, j, t \quad (17)$$

$$Z D_{lmt} \geq Y D_{lm,t-1} - \sum_{m \in M} Y D_{lmt} \quad (18)$$

$$\forall l \in L^O, m, t$$

مدل پیشنهادی

رابطه ۱ نشان‌دهنده تابع هدف مدل پیشنهادی است که شامل ۱۶ عبارت می‌شود.

(۱)

$$\begin{aligned} \text{Min} Z = & \sum_{i \in I^C, t \in T} F P_i Z P_{it} + \sum_{i \in I^O, t \in T} E P_i Z P_{it} \\ & + \sum_{l \in L^C, m \in M, t \in T} E D_{lm} Z D_{lmt} \\ & + \sum_{l \in L^O, m \in M, t \in T} E D_{lm} Z D_{lmt} \\ & + \sum_{i \in I, k \in K, j \in J, t \in T} A_{jt} X_{ikjt} + \\ & \sum_{l \in L, i \in I, j \in J, t \in T} (-B_{jt}) S_{lijt} \\ & + \sum_{l \in L, j \in J, t \in T} H_{jt} N_{ljt} \\ & + \sum_{l \in L, m \in M, t \in T} B S_m Z S_{lmt} \\ & + \sum_{i \in I, t \in T} Q P_{it} V P_{it} \sum_{l \in L, t \in T} Q D_{lt} V D_{lt} \\ & + \sum_{i \in I, k \in K, j \in J, t \in T} C X_{ikjt} X_{ikjt} \\ & + \sum_{k \in K, l \in L, j \in J, t \in T} C R_{kljt} R_{kljt} \\ & + \sum_{l \in L, i \in I, j \in J, t \in T} C S_{lijt} S_{lijt} \\ & + \sum_{l \in L, j \in J, t \in T} C N_{ljt} N_{ljt} \\ & + \sum_{i \in I, j \in J, t \in T} G P_{it} W P_{it} \\ & + \sum_{l \in L, j \in J, t \in T} G D_{lt} W D_{lt} \end{aligned}$$

عبارت‌های اول و دوم به ترتیب نشان‌دهنده کل هزینه‌های ثابت بازکردن و بستن مراکز تولید هستند. عبارت‌های سوم و چهارم به ترتیب نشان‌دهنده کل هزینه‌های ثابت بازکردن و بستن مراکز دریافت هستند. عبارت‌های پنجم و ششم به ترتیب نشان‌دهنده هزینه‌های تولید و بازتولید محصولات هستند. عبارت هفتم مربوط به هزینه انهدام محصولات در طول دوره برنامه‌ریزی است. عبارات هشتم و نهم به ترتیب نشان‌دهنده هزینه‌های ناشی از افزایش ظرفیت در مراکز تولید و مراکز دریافت هستند. عبارات دهم تا سیزدهم نیز در تابع هدف به ترتیب مربوط

یکبار در طول دوره برنامه‌ریزی بسته شود و رابطه ۱۷ تضمین می‌کند یک مرکز تولید بسته حداکثر یک بار در طول دوره برنامه‌ریزی باز شود. رابطه ۱۸ و ۱۹ نیز به ترتیب محدودیت‌های کنترل‌کننده تغییر وضعیت مراکز دریافت بسته و باز هستند. رابطه ۲۰ و ۲۱، به ترتیب نشان‌دهنده محدودیت‌های کنترل‌کننده تغییر ساین مراکز دریافت بسته و باز هستند. رابطه ۲۲ محدودیت حداقل نرخ انهدام است. عبارت ۲۳ نیز قیود نامنفی را نشان می‌دهد.

مدل استوار

وجود عدم قطعیت در پارامترها همواره یکی از چالش‌های زنجیره‌های تأمین بوده است. درکل، سه رویکرد برای مقابله با عدم قطعیت وجود دارد که عبارت‌اند از: رویکرد تصادفی، رویکرد فازی و رویکرد استوار. در این تحقیق از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر جعبه‌های غیرقطعی استفاده شده است. یکی از مزیت‌های این رویکرد نسبت به دو رویکرد دیگر این است که برای استفاده از آن نیازی به تخمین توزیع احتمالی پارامترهای غیرقطعی نیست [۱۶].

براساس سازوکار این روش، فضای جواب با توجه به سطح عدم قطعیت کوچک می‌شود و مدل در فضای محدودشده به دنبال بهترین جواب می‌گردد. در ادامه، توضیحات لازم برای نوشتن همتای استوار مدل ارائه می‌شود.

مدل برنامه‌ریزی را که با استفاده از روابط ۲۴ تا ۲۷ نشان داده شده است در نظر بگیرید که در آن $\tilde{a}_{ij}$ و $\tilde{c}_j$ پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند.

$$\text{Min } \tilde{c}x + dy \quad (24)$$

Subject to:

$$\tilde{a}x \geq b \quad (25)$$

$$ey = f \quad (26)$$

$$x, y \in \{0, 1\} \quad (27)$$

براساس منابع [۱۷] و [۱۸]، می‌توان همتای استوار مدل برنامه‌ریزی خطی فوق را با استفاده از روابط ۲۸ تا ۳۱ نشان داد.

$$\text{Min } z \quad (28)$$

Subject to:

$$\tilde{c}_j x_j + dy \leq z \quad \forall \tilde{c}_j \in u_{Box}^c \quad (29)$$

$$\tilde{a}_{ij} x_j \geq b_i \quad \forall \tilde{a}_{ij} \in u_{Box}^a \quad (30)$$

$$ZD_{lmt} \geq YD_{lmt} - \sum_m YD_{lm,t-1} \quad (19)$$

$$\forall l \in L^C, m, t$$

$$ZS_{lmt} \geq YD_{lmt} - YD_{lm,t-1} - ZD_{lmt} \quad (20)$$

$$\forall l \in L^C, m, t$$

$$ZS_{lmt} \geq YD_{lmt} - YD_{lm,t-1} \quad \forall l \in L^O, m, t \quad (21)$$

$$N_{ljt} \geq \alpha_{jt} \sum_{k \in K} R_{lkjt} \quad \forall l, j, t \quad (22)$$

$$X_{ikjt}, R_{kljt}, S_{lijt}, N_{ljt}, VP_{it}, VD_{lt}, WP_{it}, WD_{jt} \geq 0 \quad (23)$$

رابطه ۲، محدودیت ارضای تقاضاست. رابطه ۳ محدودیت دریافت محصولات بازگشتی است. با استفاده از این محدودیت تضمین می‌شود تمام محصولات بازگشتی از هر نوع و در هر دوره، از سوی مراکز دریافت، از بازارهای تقاضا جمع‌آوری شوند. رابطه ۴ محدودیت تعادل مراکز دریافت است. رابطه ۵ محدودیت حداکثر ظرفیت مراکز تولید است. رابطه ۶ محدودیتی است که تضمین می‌کند در هر دوره، ظرفیت پیشنهادشده از سوی مدل، برای هریک از مراکز تولید، از مجموع کالاهای ارسال‌شده و دریافت‌شده از سوی آن مرکز، کوچک‌تر نباشد. رابطه ۷ تضمین می‌کند در هر دوره، ظرفیت پیشنهادشده از سوی مدل برای هریک از مراکز تولید، در صورت بازبودن آن مرکز، از حداکثر ظرفیت تعریف‌شده برای آن بزرگ‌تر نباشد. رابطه ۸ محدودیتی است که در هر دوره مراکز تولید را مجاز می‌کند از ظرفیت عملیاتی در دسترس در ابتدای دوره برنامه‌ریزی و مجموع افزایش ظرفیت در دوره‌های قبل استفاده کند. رابطه ۹ محدودیتی است که از فعالیت مراکز تولید در ظرفیت‌هایی پایین‌تر از حداقل ظرفیت عملیاتی مجاز برای آن‌ها جلوگیری می‌کند. در محدودیت‌های ۱۰ تا ۱۴ به ترتیب از مکانیزمی شبیه به محدودیت‌های ۶ تا ۱۰، برای مراکز دریافت استفاده شده است. رابطه ۱۵، محدودیت تک‌سایزی بودن هریک از مراکز دریافت در هریک از دوره‌هاست. رابطه ۱۶ و ۱۷ به ترتیب محدودیت‌های کنترل‌کننده تغییر وضعیت مراکز تولید باز و بسته هستند. تغییر وضعیت زمانی رخ می‌دهد که یک تسهیل باز، بسته شود یا برعکس یک تسهیل بسته، باز شود. رابطه ۱۶ تضمین می‌کند یک مرکز تولید باز حداکثر

$$\sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j - \rho_a \sum_{j=1}^n G_{ij}^a |x_j| \geq b_i \quad (39)$$

رابطه ۳۹ ممکن است به صورت رابطه ۴۰ و ۴۱ باز-نویسی شود.

$$\sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j - \rho_a \sum_{j=1}^n G_{ij}^a l_j \geq b_i \quad (40)$$

$$-l_j \leq x_j \leq l_j \quad \forall j (1, 2, \dots, n) \quad (41)$$

به طور مشابه برای نامعادله ۳۱ می‌توان رابطه ۴۲ را در نظر گرفت.

$$e_i y \geq \tilde{f}_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n_f\} \quad (42)$$

$$\forall \tilde{f}_i \in u_{Box}^f | u_{Box}^f = \left\{ \tilde{f}_i \in \mathcal{R}^{n_f} : |\tilde{f}_i - \bar{f}_i| \leq \rho_f G_i^f, \right. \\ \left. i = 1, 2, \dots, n_f \right\}$$

و رابطه ۴۲ را می‌توان به صورت رابطه ۴۳ بازنویسی کرد.

$$e_i y \geq \bar{f}_i + \rho_f G_i^f \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n_f\} \quad (43)$$

با توجه به توضیحات ارائه شده، در همتای استوار مدل پیشنهادی رابطه ۴۴، جایگزین تابع هدف مدل قطعی یعنی رابطه ۱ شده است و در ازای آن محدودیت ۴۵ به مدل اضافه شده است. محدودیت‌های ۴۶ تا ۴۸ نیز به ترتیب جایگزین روابط ۵، ۷، ۱۰ و ۱۲ در مدل قطعی شده‌اند. تمام پارامترهایی که یک خط در بالای آن‌ها وجود دارد، غیرقطعی‌اند و باید به ازای هریک از آن‌ها مانند $\overline{FP}_i$ ، یک جفت محدودیت نظیر روابط ۴۹ و ۵۰ به مدل اضافه شود. محدودیت ۵۱ مربوط به نامنفی بودن متغیرهای اضافه شده به مدل است.

(۴۴)

$$\sum_{i \in I^C, t \in T} \left(\overline{FP}_i ZP_{it} + \eta_i^{FP} \right) + \\ \sum_{i \in I^O, t \in T} \left(\overline{EP}_i ZP_{it} + \eta_i^{EP} \right) + \\ \sum_{l \in L^C, m \in M, t \in T} \left(\overline{FD}_{lm} ZD_{lmt} + \eta_{lm}^{FD} \right) + \\ \sum_{l \in L^O, m \in M, t \in T} \left(\overline{ED}_{lm} ZD_{lmt} + \eta_{lm}^{ED} \right) + \\ \sum_{i \in I, k \in K, j \in J, t \in T} \left(\overline{A}_{jt} X_{ikjt} + \eta_{jt}^A \right)$$

$$e_i y \geq \tilde{f}_i \quad \forall \tilde{f}_i \in u_{Box}^f \quad (31)$$

که در آن‌ها u_{Box} جعبه غیرقطعی^۸ نامیده می‌شود و نمایش کلی آن به صورت رابطه ۳۲ است [۱۹ و ۲۰]:

(۳۲)

$$u_{Box} = \left\{ \xi \in \mathcal{R}^n : |\xi_t - \bar{\xi}_t| \leq \rho G_t, t = 1, 2, \dots, n \right\}$$

در رابطه (۳۲)، $\bar{\xi}_t$ مقدار نرمال ξ_t یا t امین پارامتر بردار ξ و مقدار مثبت G_t نمایانگر «مقیاس عدم قطعیت» و $\rho > 0$ «سطح عدم قطعیت» است. یک مورد خاص که در آن $G_t = \bar{\xi}_t$ ، مرتبط است با حالتی که در آن انحراف نسبی ξ_t از داده اسمی به بزرگی ρ است. براساس تحقیق بن-تال و همکاران [۱۹]، به منظور ارائه فرم رام شده^۹ مدل برنامه‌ریزی ریاضی استوار، روابط ریاضی ۳۱ تا ۳۴ ممکن است به روابط معادل با قابلیت حل تبدیل شوند. برای محدودیت ۲۹ رابطه ۳۳ مورد نظر است:

$$\tilde{c}_j x \leq z - dy, \quad \forall \tilde{c}_j \in u_{Box}^c | u_{Box}^c = \left\{ \tilde{c}_j \in \mathcal{R}^{n_c} : |\tilde{c}_j - \bar{c}_j| \leq \rho_c G_j^c, \right. \\ \left. j = 1, 2, \dots, n_c \right\} \quad (33)$$

فرم رام شده نامعادله شبه نامتناهی ۳۳ را می‌توان با استفاده از روابط ۳۴ تا ۳۶ نشان داد.

$$\sum_j (\bar{c}_j x_j + \eta_j) \leq z - dy \quad (34)$$

$$\rho_c G_j^c x_j \leq \eta_j \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n_c\} \quad (35)$$

$$\rho_c G_j^c x_j \geq -\eta_j \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n_c\} \quad (36)$$

در زمینه محدودیت $\sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j \geq b_i$ فقط به افزایش سمت چپ محدودیت به منظور نمایش مجموعه غیرقطعی در رابطه ریاضی نیاز است. در کل، در محدودیت ارتقایافته به رابطه ریاضی زیر برای یک جواب x نیاز است به [۱۸]:

$$\min_{\tilde{a} \in u_{Box}^a} \left\{ \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} x_j \right\} \geq b_i \quad (37)$$

یا

$$\min_{\tilde{a}_{ij} : |\tilde{a}_{ij} - \bar{a}_{ij}| \leq \rho_a G_{ij}^a} \left\{ \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} x_j \right\} \geq b_i \quad (38)$$

با در نظر گرفتن ساختار u_{Box} ، جواب بهینه روش برنامه‌ریزی ریاضی برای سمت چپ نامعادله به شرح زیر است:

نوع محصول در یک افق زمانی شش دوره‌ای در نظر گرفته شده است. در این مثال فرض شده است مراکز تولید دوم و چهارم در ابتدای دوره برنامه‌ریزی باز و مراکز تولید اول و سوم بسته هستند. همچنین، فرض شده است مرکز دریافت دوم و چهارم در ابتدای دوره برنامه‌ریزی با سائز کوچک، باز و مراکز دریافت اول، سوم و پنجم در ابتدای دوره برنامه‌ریزی بسته هستند. جدول ۱ مقادیر پارامترها را در مثال عددی نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به تقاضا در پیوست موجود است. مقدار محصولات برگشتی از سوی هریک از بازارهای تقاضا، در هر دوره و برای هر نوع محصول، برابر با $0/3$ تقاضا در نظر گرفته شده است. درضمن، مقادیر هزینه‌های حمل‌ونقل یعنی پارامترهای CX_{ikjt} ، CR_{kljt} ، CS_{lijt} و CN_{ljt} به‌ترتیب با استفاده از روابط ۵۲ تا ۵۵ محاسبه شده‌اند.

$$CX_{ikjt} = C_j^{pc} \times d_{ik}^{pc} \quad \forall i, k, j, t \quad (52)$$

$$CR_{kljt} = C_j^{cd} \times d_{kl}^{cd} \quad \forall k, l, j, t \quad (53)$$

$$CS_{lijt} = C_j^{dp} \times d_{li}^{dp} \quad \forall l, i, j, t \quad (54)$$

$$CN_{ljt} = C_j^{dd} \times d_l^{dd} \quad \forall l, j, t \quad (55)$$

در روابط ۵۲ تا ۵۵، C_j^{pc} ، C_j^{cd} و C_j^{dp} به‌ترتیب نشان‌دهنده هزینه حمل یک واحد محصول نوع j از به‌ازای یک واحد مسافت، از مراکز تولید به بازارهای تقاضا، بازارهای تقاضا به مراکز دریافت، مراکز دریافت به مراکز تولید و مراکز دریافت به مرکز انهدام هستند که در این مثال مقادیر آن‌ها به‌ترتیب برابر با $0/0/0/5$ ، $0/0/0/1455$ ، $0/0/0/3$ و $0/0/0/155$ ، در نظر گرفته شده است. درضمن، نشان‌دهنده فاصله مرکز تولید i از بازار تقاضای k d_{ik}^{pc} است و به‌طور مشابه d_{kl}^{cd} ، d_{li}^{dp} و d_l^{dd} نیز به‌ترتیب مربوط به فواصل بازارهای تقاضا از مراکز دریافت، مراکز دریافت از مراکز تولید و مراکز دریافت از مرکز انهدام هستند. مقادیر این فواصل، برای مثال مورد بررسی در پیوست موجود است. این مثال هم برای مدل قطعی و هم برای مدل استوار، با استفاده از نرم‌افزار گمز^{۱۰} حل شده است. سطح عدم قطعیت برای کل پارامترهای غیرقطعی برابر با $0/1$ در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است تمام پارامترهای مربوط به هزینه مقدار تابع هدف به‌دست‌آمده از حل مدل قطعی برابر با 6993863 و زمان حل آن نیز برابر با $0/341$ ثانیه بوده است. این مقادیر در مدل استوار،

$$\begin{aligned} & + \sum_{l \in L, i \in I, j \in J, t \in T} (\overline{B}_{jt} S_{lijt} + \eta_{jt}^B) \\ & + \sum_{l \in L, j \in J, t \in T} (\overline{H}_{jt} N_{ljt} + \eta_{jt}^H) \\ & + \sum_{i \in I, t \in T} (\overline{QP}_{it} VP_{it} + \eta_{it}^{QP}) \\ & + \sum_{l \in L, t \in T} (\overline{QD}_{lt} VD_{lt} + \eta_{lt}^{QD}) \\ & + \sum_{i \in I, k \in K, j \in J, t \in T} (\overline{CX}_{ikjt} X_{ikjt} + \eta_{ikjt}^{CX}) \\ & + \sum_{k \in K, l \in L, j \in J, t \in T} (\overline{CR}_{kljt} R_{kljt} + \eta_{kljt}^{CR}) \\ & + \sum_{l \in L, i \in I, j \in J, t \in T} (\overline{CS}_{lijt} S_{lijt} + \eta_{lijt}^{CS}) \\ & + \sum_{l \in L, j \in J, t \in T} (\overline{CN}_{ljt} N_{ljt} + \eta_{ljt}^{CN}) \\ & + \sum_{l \in L, m \in M, t \in T} (\overline{BS}_m ZS_{lmt} + \eta_m^S) \\ & + \sum_{i \in I, t \in T} (\overline{GP}_{it} WP_{it} + \eta_{it}^{GP}) \\ & + \sum_{l \in L, t \in T} (\overline{GD}_{lt} WD_{lt} + \eta_{lt}^{GD}) \leq W \end{aligned} \quad (45)$$

$$\sum_{k \in K, j \in J} X_{ikjt} + \sum_{l \in L, j \in J} S_{lijt} \leq YP_{it} (\overline{Maxcap}_i - \rho_{Maxcap} \mathcal{G}_i^{Maxcap}) \quad \forall i, t \quad (46)$$

$$WP_{it} \leq YP_{it} (\overline{Maxcap}_i - \rho_{Maxcap} \mathcal{G}_i^{Maxcap}) \quad \forall i, t \quad (47)$$

$$WD_{lt} \leq \sum_m YD_{lmt} (\overline{Maxcap}_m - \rho_{Maxcap} \mathcal{G}_m^{Maxcap}) \quad \forall l, t \quad (48)$$

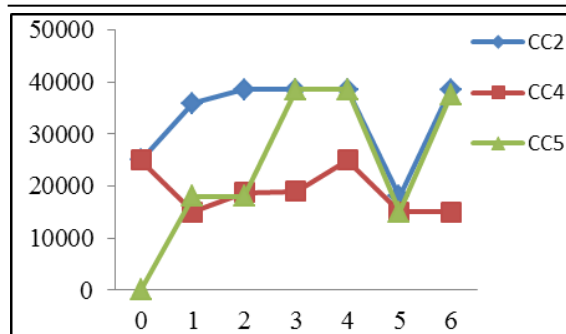
$$\rho_{FP} \mathcal{G}_i^{FP} ZP_{it} \leq \eta_i^{FP} \quad \forall i, t \quad (49)$$

$$\rho_{FP} \mathcal{G}_i^{FP} ZP_{it} \geq -\eta_i^{FP} \quad \forall i, t \quad (50)$$

$$\begin{aligned} & \eta_i^{FP}, \eta_i^{EP}, \eta_{lm}^{FD}, \eta_{lm}^{ED}, \eta_{jt}^A, \eta_{jt}^B, \\ & \eta_{jt}^H, \eta_{it}^{QP}, \eta_{lt}^{QD}, \eta_{ikjt}^{CX}, \\ & \eta_{ljt}^{CN}, \eta_m^{BS}, \eta_{it}^{GP}, \eta_{lt}^{GD} \geq 0 \end{aligned} \quad (51)$$

مثال عددی

به‌منظور نشان‌دادن نحوه عملکرد مدل پیشنهادی و مقایسه مدل قطعی و هم‌تای استوار آن، یک شبکه لجستیکی شامل چهار مرکز تولید، پنج مرکز دریافت، شش بازار تقاضا و دو



شکل ۵. نمودار ظرفیت مراکز دریافت در مدل استوار

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مثال عددی

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۹۰۰۰۰	$Maxcap_i$	۱۰۰۰۰۰	FP_i
۲۰۰۰۰	$Mincap_i$	۲۵۰۰۰۰	EP_i
۴۰۰۰۰	$Scap_i$	۱۵۰۰۰۰	$FD_{l,small}$
۲۰۰۰۰	$Maxcap_{small}$	۲۰۰۰۰۰	$FD_{l,medioml}$
۳۰۰۰۰	$Maxcap_{mediom}$	۳۰۰۰۰۰	$FD_{l,big}$
۵۰۰۰۰	$Maxcap_{big}$	۱۸۷۵۰	$ED_{l,small}$
۱۰۰۰۰	$Mincap_l$	۲۵۰۰۰	$ED_{l,mediom}$
۲۵۰۰۰	$Scap_l$	۳۷۵۰۰	$ED_{l,big}$
۶	GP_{it}	۲۵۰۰۰	DS_{small}
۱	GD_{it}	۵۰۰۰۰	DS_{mediom}
۱۰۰	QD_{it}	۱۰۰۰۰۰	DS_{big}
۲۰۰	QP_{it}	۱۵	A_{jt}
۳	H_{jt}	۸	B_{jt}

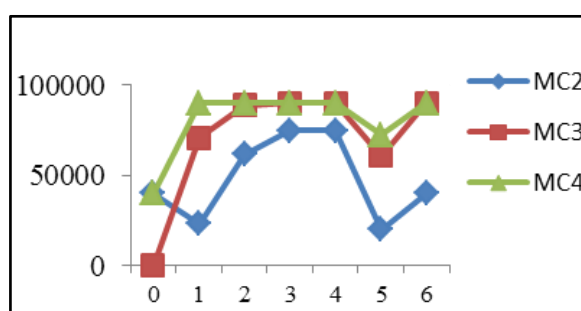
جدول ۲. مقدار متغیرهای تغییر وضعیت و تغییر سایز

مدل استوار	ZP_{it}	ZD_{lmt}	ZS_{lmt}
	$ZP_{13} = 1$	$ZD_{5small1} = 1$	$ZS_{2big1} = 1$
	$ZP_{32} = 1$		$ZS_{4med2} = 1$
			$ZS_{5big3} = 1$
مدل قطعی	ZP_{it}	ZD_{lmt}	ZS_{lmt}
	$ZP_{31} = 1$	$ZD_{5small1} = 1$	$ZS_{2big1} = 1$
			$ZS_{4med3} = 1$
			$ZS_{5med2} = 1$

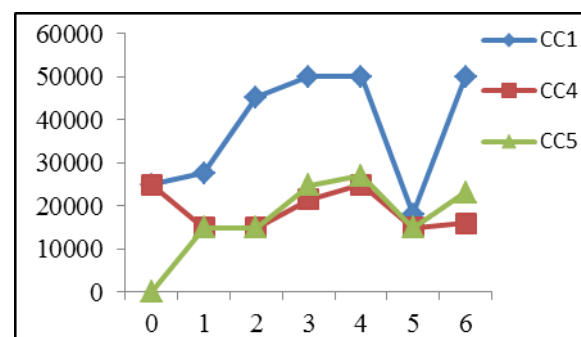
جدول‌های ۳ و ۴ نیز به ترتیب وضعیت بازبودن (O) و بسته‌بودن (C) مراکز تولید، در دوره‌های مختلف را در مدل قطعی نشان می‌دهند. جدول‌های ۵ و ۶ نیز بازبودن و بسته‌بودن مراکز دریافت را به همراه سایز (B, M, S) هر یک از آن‌ها در هر یک از دوره‌ها نشان می‌دهند. B به معنی بزرگ، M به معنی متوسط و S به معنی کوچک است. شکل‌های ۲ تا ۵ تفاوت در ظرفیت تسهیلات مورد استفاده در مدل قطعی و استوار را به طور واضح نشان می‌دهند.

به ترتیب برابر با ۸۷۱۲۰۶۷۰ و ۳/۲۹۱ ثانیه به دست آمده است.

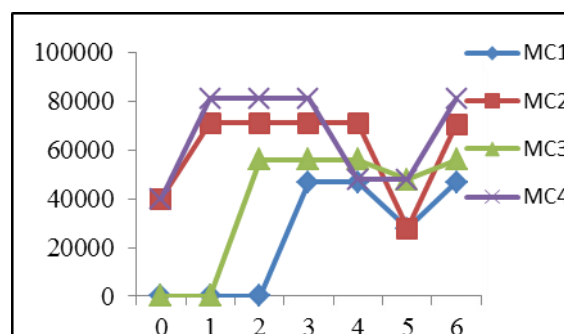
جدول ۲ متغیرهای تغییر وضعیت و تغییر سایز را در هر یک از مدل‌های قطعی و استوار نشان می‌دهد. شکل‌های ۲ و ۳ نیز به ترتیب نحوه تغییر در ظرفیت هر یک از مراکز تولید و مراکز دریافت را در مدل قطعی در طول دوره برنامه‌ریزی نشان می‌دهند. شکل‌های ۴ و ۵ نیز به ترتیب نشان‌دهنده نحوه تغییر ظرفیت در مراکز تولید و مراکز دریافت در مدل استوار در طول دوره برنامه‌ریزی هستند.



شکل ۲. نمودار ظرفیت مراکز تولید در مدل قطعی



شکل ۳. نمودار ظرفیت مراکز دریافت در مدل قطعی



شکل ۴. نمودار ظرفیت مراکز تولید در مدل استوار

جدول ۳. وضعیت مراکز تولید در مدل قطعی در هر دوره

	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
۱	C	C	C	C	C	C	C
۲	O	O	O	O	O	O	O
۳	C	O	O	O	O	O	O
۴	O	O	O	O	O	O	O

جدول ۴. وضعیت مراکز تولید در مدل استوار در هر دوره

	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
۱	C	C	C	O	O	O	O
۲	O	O	O	O	O	O	O
۳	C	C	O	O	O	O	O
۴	O	O	O	O	O	O	O

جدول ۵. وضعیت مراکز دریافت در مدل قطعی در هر دوره

	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
۱	C	C	C	C	C	C	C
۲	O,S	O,B	O,B	O,B	O,B	O,B	O,B
۳	C	C	C	C	C	C	C
۴	O,S	O,S	O,S	O,M	O,M	O,M	O,M
۵	C	O,S	O,M	O,M	O,M	O,M	O,M

جدول ۶. وضعیت مراکز دریافت در مدل استوار در هر دوره

	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
۱	C	C	C	C	C	C	C
۲	O,S	O,B	O,B	O,B	O,B	O,B	O,B
۳	C	C	C	C	C	C	C
۴	O,S	O,S	O,M	O,M	O,M	O,M	O,M
۵	C	O,S	O,S	O,B	O,B	O,B	O,B

تأثیر سطح عدم قطعیت بر مدل استوار

برای بررسی تأثیر سطح عدم قطعیت بر مدل استوار، مثال ارائه شده به ازای سطوح مختلفی از عدم قطعیت در بازه $[0/01 \ 0/3]$ حل شده است. شکل ۶ نمودار مقادیر تابع هدف به ازای سطوح مختلف عدم قطعیت را نشان می دهد.

در مثال مورد نظر، در سطوح بالاتر از $0/3$ از عدم قطعیت، مدل استوار جواب نمی دهد، زیرا در سطوح بالاتر از $0/3$ از عدم قطعیت، فضای جواب به قدری کوچک می شود که فضای موجه از بین می رود. همان طور که در شکل ۶ مشخص است با افزایش سطح عدم قطعیت مقدار تابع هدف افزایش یافته است.

قطعییت ۰/۱، تأثیر این پارامتر بر مقدار تابع هدف در هر دو مسئله قطعی و استوار بررسی شده است. برای این مثال به ازای حداقل نرخ‌های انهدام متفاوت در بازه صفر تا یک هر دو مسئله قطعی و استوار حل شده است که نتایج آن در جدول ۷ ارائه می‌شود.

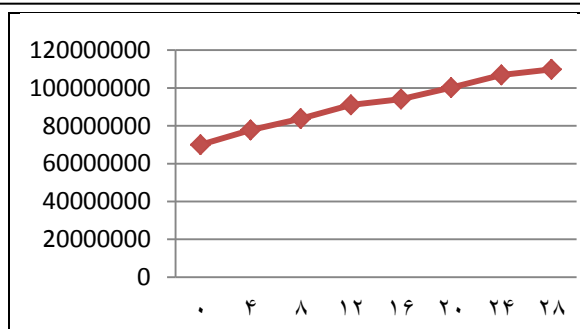
جدول ۷. نتایج حل مثال عددی با حداقل نرخ‌های انهدام مختلف

مدل استوار	مدل قطعی	حداقل نرخ انهدام
۸۸۳۵۲۲۷۱	۶۹۷۱۶۴۹۰	۰
۸۸۳۶۹۷۱۴	۶۹۸۳۲۷۲۳	۰/۱
۸۸۳۲۱۶۰۰	۶۹۸۷۷۳۳۵	۰/۲
۸۷۱۲۰۶۷۰	۶۹۹۹۳۸۶۸	۰/۳
۸۶۷۴۱۶۶۶	۷۰۰۱۲۰۷۹	۰/۴
۸۶۲۸۸۰۹۲	۷۰۱۴۲۹۶۳	۰/۵
۸۶۷۷۱۲۶۰	۷۰۳۴۸۵۹۳	۰/۶
۹۰۸۴۵۴۷۴	۷۲۷۵۴۲۲۴	۰/۷
۸۶۴۰۶۴۸۳	۷۰۵۲۹۱۷۰	۰/۸
۸۸۲۱۵۵۹۵	۷۰۷۲۰۴۹۴	۰/۹
۸۸۷۹۸۷۱۸	۷۰۹۱۶۸۷۱	۱

جدول ۷ نشان می‌دهد الزاماً با کاهش این پارامتر هزینه‌های شبکه کاهش پیدا نمی‌کند. با توجه به جدول ۷، در مسئله قطعی بدترین مقدار ممکن برای مقدار تابع هدف زمانی اتفاق افتاده است که حداقل نرخ انهدام محصولات بازگشتی برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است و بهترین حالت، یعنی کمترین هزینه شبکه زمانی اتفاق افتاده است که نرخ انهدام برابر با صفر در نظر گرفته شده است. این مقدار یعنی بدترین مقدارهای ممکن برای مقدار تابع هدف، در مدل استوار با سطح ۰/۱ از عدم قطعیت، زمانی اتفاق افتاده است که حداقل نرخ انهدام برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است و بهترین حالت در مدل استوار در نرخ انهدامی برابر با ۰/۵ رخ داده است.

تولید مسائل آزمایشی

در این بخش، دوازده مسئله آزمایشی با ابعاد مختلف در نظر گرفته شده و حل شده است که نتایج حل در جدول ۸ مشاهده می‌شود. در مسائل آزمایشی تولیدشده فرض شده است در ابتدای دوره برنامه‌ریزی فقط دو مرکز تولید و آن



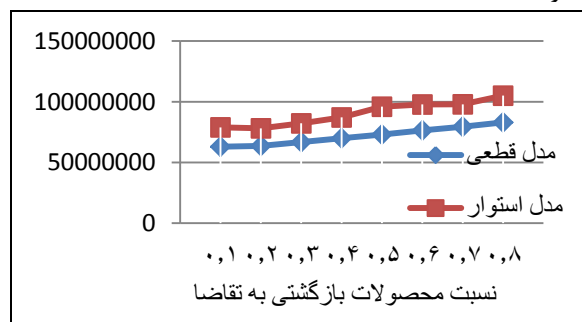
شکل ۶. نمودار تأثیر سطح عدم قطعیت بر تابع هدف

تأثیر مقدار محصولات برگشتی بر تابع هدف

یکی از پارامترهای مهم در لجستیک معکوس، مقدار محصولات برگشتی است. شکل ۶ آنالیز حساسیت این پارامتر را روی مقدار تابع هدف هم در مدل قطعی و هم در مدل استوار نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، در مدل قطعی با افزایش نسبت مقدار محصولات برگشتی به تقاضا، هزینه‌های شبکه نیز افزایش یافته است، در حالی که در مدل استوار چنین اتفاقی رخ نداده است و هزینه‌های شبکه در نرخ ۰/۷ از ۰/۶ کمتر است.

تأثیر حداقل نرخ انهدام بر هزینه‌های شبکه

حداقل نرخ انهدام محصولات برگشتی یکی از فاکتورهای مهمی است که در لجستیک معکوس باید در نظر گرفته شود.



شکل ۷. تأثیر میزان بازگشت محصولات بر تابع هدف مدل قطعی و استوار

در مثال ارائه‌شده این نرخ برای هر دو مسئله قطعی و غیرقطعی برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شد. در این بخش، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف، برای حداقل نرخ انهدام محصولات، مسئله قطعی با مسئله غیرقطعی با سطح عدم

هم مراکز تولید دوم و چهارم در ابتدای دوره برنامه‌ریزی باز هستند و سایر مراکز تولید در حالت بسته قرار دارند. درضمن، در همه این مسائل آزمایش تنها مراکز دریافت دوم و چهارم در ابتدای دوره برنامه‌ریزی باز در نظر گرفته شده‌اند. در همه این مسائل آزمایشی به جز پارامتر تقاضا و فواصل تسهیلات، از پارامترهای مثال عددی ارائه‌شده در بخش مثال عددی استفاده شده است

جدول ۸. مسائل آزمایشی

شماره مسئله	تعداد گره‌ها					مدل استوار		مدل قطعی	
	I	L	K	J	T	ρ	تابع هدف	زمان حل	تابع هدف
۱	۳	۵	۶	۲	۶	۰/۱	۵۲۸۶۰۸۰۶	0:00:02	۴۴۱۶۰۶۹۷
						۰/۲	۶۰۵۴۷۲۶۶	0:00:03	
۲	۴	۷	۱۰	۲	۶	۰/۱	۸۸۱۵۴۸۳۵	0:00:04	۷۳۶۹۲۶۳۹
						۰/۲	۱۰۰۵۱۲۶۲۲	0:00:07	
۳	۵	۸	۱۲	۲	۶	۰/۱	۱۱۴۹۲۰۴۳۲	0:00:07	۹۵۱۵۱۲۸۵
						۰/۲	۱۳۱۵۶۲۲۰۶	0:00:09	
۴	۶	۱۰	۱۵	۲	۶	۰/۱	۱۴۵۷۷۰۹۲۲	0:00:20	۱۲۰۲۱۰۴۰۵
						۰/۲	۱۶۶۸۱۸۶۶۰	0:00:22	
۵	۸	۱۲	۲۰	۲	۶	۰/۱	۱۹۹۵۱۳۶۸۲	0:01:52	۱۶۱۰۷۷۷۳۴
						۰/۲	۲۲۷۳۳۴۶۶۰	0:01:56	
۶	۴	۷	۱۰	۳	۶	۰/۱	۱۴۸۰۴۱۳۷۲	0:00:09	۱۲۲۹۱۱۸۶۲
						۰/۲	۱۶۶۰۶۶۶۵۹	0:00:07	
۷	۵	۸	۱۲	۳	۶	۰/۱	۱۹۷۸۳۸۸۸۰	0:01:12	۱۵۱۴۱۷۲۱۵
						۰/۲	۲۰۶۲۴۹۵۲۹	0:00:53	
۸	۶	۱۰	۱۵	۳	۶	۰/۱	۲۲۵۳۸۰۱۰۹	0:00:48	۱۸۶۸۵۶۸۸۲
						۰/۲	۲۵۵۲۶۰۸۸۳	0:00:56	
۹	۸	۱۲	۲۰	۳	۶	۰/۱	۳۰۷۳۹۱۹۱۴	0:04:06	۲۵۲۰۲۹۴۰۵
						۰/۲	۳۴۶۶۴۵۵۹۶	0:04:21	
۱۰	۱۰	۱۵	۲۰	۳	۶	۰/۱	۲۴۸۹۸۷۰۷۷	0:05:40	۲۰۰۴۹۱۵۹۴
						۰/۲	۲۸۴۶۳۸۹۵۹	0:04:19	
۱۱	۶	۱۰	۱۵	۳	۱۲	۰/۱	۳۶۸۷۰۹۰۸۱	0:12:01	۲۷۴۸۴۱۳۷۴
						۰/۲	۳۹۱۳۸۸۵۴۰	0:08:20	
۱۲	۸	۱۲	۲۰	۳	۱۲	۰/۱	۴۶۰۳۹۴۸۴۱	0:13:40	۳۶۹۹۷۲۵۳۷
						۰/۲	غیر ممکن	-	

نقاط تقاضا از مراکز دریافت، اعداد تصادفی از یک توزیع نرمال با میانگین ۵۰۰ و انحراف استاندارد ۱۰۰، فاصله مراکز دریافت از مراکز تولید اعداد تصادفی از یک توزیع نرمال با میانگین ۴۰۰ و انحراف استاندارد ۱۰۰ و فاصله مراکز دریافت از مرکز انهدام، اعداد تصادفی از یک توزیع

هریک از مشتریان در هریک از دوره‌ها، اعداد تصادفی از توزیع نرمال با میانگین ۲۰۰۰ و انحراف استاندارد ۵۰۰ به‌دست آمده است. درضمن، در همه این مسائل فاصله مراکز تولید از نقاط تقاضا، اعداد تصادفی از یک توزیع نرمال با میانگین ۱۰۰۰ و انحراف استاندارد ۴۰۰، فاصله

مدل پیشنهادی می‌توان ظرفیت تسهیلات را در یک شبکه لجستیکی حلقه‌بسته تنظیم کرد. به‌علاوه، نتایج حل مسائل آزمایشی نشان داد هزینه و زمان حل مدل استوار بیشتر از مسئله قطعی است. از آنجا که مسائل طراحی زنجیره تأمین در حالت چندمحصولی و چنددوره‌ای در زمره مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد، استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری برای مسئله‌هایی در سایزهای متوسط و بزرگ پیشنهاد می‌شود. در نظر گرفتن مباحث موجودی و ترکیب مدل پیشنهادشده با مسئله انتخاب تأمین‌کننده نیز برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود. همچنین، می‌توان اهدافی غیر از هزینه در مدل پیشنهادی را در نظر گرفت که از جنبه‌ای دیگر مدل پیشنهادشده در این تحقیق را بسط می‌دهد.

نرمال با میانگین ۶۰۰ و انحراف استاندارد ۲۰۰ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول ۸ مشخص است، هزینه و زمان حل مسائل آزمایشی تولیدشده برای مدل استوار نسبت به مدل قطعی بیشتر است. به نظر می‌رسد زمان حل مدل استوار برای حل مسائل با سایز متوسط و بزرگ چندان مناسب نیست و با افزایش تعداد گره‌ها زمان حل رشد زیادی دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا با استفاده از یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته، یک مدل جدید مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته در حالت چندمحصولی و چنددوره‌ای ارائه شده و سپس با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار مدل پیشنهادی در حالت غیرقطعی گسترش یافته است. نتایج نشان داد با استفاده از

مراجع

1. Lee, D. and Dong, M. (2008). "A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery", *Transportations Research*, Vol. 44, No. 3, PP. 455– 474.
2. Chopra, S. and Meindel, P. (2004). *Supply chain management: Strategy planning and operations*, Chapter 11, Prentice- Hall Inc.
3. Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J., Van Wassenhove, L. (2001). "The impact of product recovery on logistics network design", *Production and Operations Management*, Vol. 10, No. 2, PP. 156– 173.
4. Salema, M. I. G., Barbosa-Pavoa, A. P. and Navais, A. Q. (2007). "An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty", *Eur. J. Res.*, Vol. 179, No. 3, PP. 1063- 1077.
5. Üster, H., Easwaran, G., Akçali, E. and Çetinkaya, S. (2007). "Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model", *Naval Research. Logistics*, Vol. 54, No. 8, PP. 890– 907.
6. Pishvaei, M. R., Farahani, R. Z. and Dullaert, W. (2010). "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design", *Computer Operational Research*, Vol. 37, No. 6, PP. 1100– 1112.
7. Pishvaei, M. S., Rabbani, M. and Torabi, S. A. (2011). "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 35, No. 2, PP. 637– 649.
8. Hasanzadeh, Amin., S. and Zhang, G. (2012). "An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach", *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 8, PP. 6782– 6791.
9. Ramezani, M., Bashiri, M. and Tavdkoli Moghaddam, R. (2012). "A new multi-objective stochastic model for a forward/ reverse logistic network design with responsiveness and quality level", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 37, No. 1, PP. 328– 344.

10. Hasanzadeh Amin, S. and Zhang, G. (2013). "A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 37, No. 6, PP. 4165– 4176.
 11. Ramezani, M., Bashiri, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). "A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 5- 8, PP. 825- 843.
 12. Ko, H. J. and Evans, G. W. (2007). "A genetic-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs", *Computer Operational Research*, Vol. 34, No. 2, PP. 346– 366.
 13. Min, H. and Ko, H. J. (2008). "The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers", *Int J Prod Econ*, Vol. 113, No. 1, PP. 176– 192.
 14. Lee, D. H. and Dong, M. (2009). "Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty", *Transportation Research*, Vol. 45, No. 1, PP. 61– 71.
 15. El-Sayed, M., Afia, N. and El-Kharbotly, A. (2010). "A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk", *Computer Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 3, PP. 423– 431.
 16. Vahdani, B. (2014). "Vehicle positioning in cell manufacturing systems via robust optimization", *Applied Soft Computing*, Vol. 24, No. 1, PP. 78- 85.
 17. Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (1998). "Robust convex optimization", *Mathematics of Operations Research*, Vol. 23, No. 4, PP. 769– 805.
 18. Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (2000). "Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data", *Mathematical Programming*, Vol. 88, No. 3, PP. 411– 424.
 19. Ben-Tal, A., Golany, B., Nemirovski, A. and Vial, J. P. (20005). "Retailer-supplier flexible commitments contracts: A robust optimization approach", *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol. 7, No. 3, PP. 248– 271.
 20. Ben-Tal, A., El-Ghaoui, L. and Nemirovski, A. (2009). *Robust Optimization*, Princeton University Press.
-

پیوست

تقاضای محصولات در مثال عددی

دوره	بازار اول		بازار دوم		بازار سوم		بازار چهارم		بازار پنجم		بازار ششم	
	یک	دو	یک	دو	یک	دو	یک	دو	یک	دو	یک	دو
۱	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۲۰۰۰
۲	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰
۳	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰
۴	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰
۵	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
۶	۲۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	۱۸۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰

فواصل مراکز تولید از بازارهای تقاضا در مثال ارائه‌شده

	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۱۰۰	۳۰۰	۴۶۰	۳۳۰	۲۲۰	۵۰
۲	۱۱۰	۲۳۰	۴۰۰	۷۰۰	۹۵	۵۰۰
۳	۵۰	۱۵۰	۱۲۰	۴۸۰	۷۲۰	۳۳۰
۴	۲۳۰	۱۰۰	۲۷۰	۸۵	۳۳۰	۲۲۰

فواصل بازارهای تقاضا از مراکز دریافت در مثال ارائه‌شده

	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۴۵۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۶۰	۵۰
۲	۱۰۰	۲۵۰	۴۳۰	۱۷۵	۷۰۰
۳	۴۵	۱۳۰	۳۶۰	۲۰۰	۵۲۰
۴	۲۰۰	۱۲۰	۵۴۰	۴۵	۳۴۰
۵	۳۴۰	۹۰	۸۵	۲۲۵	۱۵۰
۶	۵۰	۳۷۵	۴۳۰	۱۰۰	۳۶۰

فواصل مراکز دریافت از مراکز تولید در مثال ارائه‌شده

	۱	۲	۳	۴
۱	۴۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۳۵۰
۲	۵۰۰	۲۱۰	۳۳۰	۵۰
۳	۵۰	۳۵۰	۴۴۰	۵۸۰
۴	۶۵۰	۲۲۰	۱۱۵	۳۰۰
۵	۱۷۵	۴۵۰	۱۸۰	۶۲۵

فاصله مراکز دریافت از مرکز انهدام در مثال ارائه‌شده

مرکز دریافت	۱	۲	۴	۴	۵
فاصله	۴۵۰	۱۴۰	۲۲۰	۶۸۰	۹۵

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Reverse Logistic
2. Integrated
3. Scenario Biased Approach
4. Manufacturing Centers
5. Collection Centers
6. Disposal Center
7. Remanufacturing
8. Uncertain Box
9. Tractable Form
10. GAMS Software