مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال هجدهم، شماره چهارم (پیاپی ۷۱)،زمستان ۰۰، ص ص ۲۰-۱
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

# مکان‌یابی تسهیلات و تعیین سیاست‌های حمل و نقل در زنجیره‌تأمین حلقه بسته با در نظرگرفتن هزینه نگهداری

**علی نادی‌زاده اردکانی[1*]، میترا موبد[2]، فاطمه قصابیان[3]**

۱-استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران
۳- کارشناس مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

رسید مقاله: ۱۹ اسفند ۱۳۹۸
پذیرش مقاله: ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۰

## چکیده

در سال‌های اخیر زنجیره‌تأمین سبز به یک راهبرد کلیدی برای رقابت‌پذیری سازمان‌ها تبدیل‌شده که زنجیره‌تأمین معکوس و حلقه بسته یکی از راه‌های دستیابی به آن است. در محیط رقابتی کنونی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی از طریق کاهش ضایعات و طولانی‌تر کردن دوره عمر محصولات، به کاهش هزینه‌ها با استفاده مجدد از کالاهای برگشتی کمک می‌کنند. در این پژوهش یک شبکه لجستیک یکپارچه حلقه بسته به صورت چنددوره‌ای- چندمحصولی در هفت سطح مختلف مطالعه‌شده و یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های استقرار تسهیلات، حمل‌و نقل و هزینه‌های نگهداری مواد و محصولات ارایه شده است. با استفاده از این مدل، تعداد و مکان استقرار هر یک از تسهیلات در هر سطح، جریان مناسب مواد و محصولات مختلف بین آن‌ها توسط وسایل نقلیه با ظرفیت متفاوت و مقدار بهینه نگهداری اقلام مختلف در انبارهای مربوطه با توجه به تقاضای مشتریان مشخص می‌شود. به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، یک مثال عددی طراحی و توسط نرم‌افزار GAMS حل و نتایج آن تحلیل شده است.

**کلمات کلیدی:** مکان‌یابی، هزینه‌های نگهداری، زنجیره‌تأمین حلقه بسته، چند سطحی.

## ۱ مقدمه

امروزه رقابت شدید در بازارهای جهانی، شرکت‌ها را وادار به طراحی و مدیریت بهتر زنجیره‌های تأمین کرده است. یک زنجیره‌تأمین شامل مجموعه و شبکه‌ای از تأمین‌کنندگان، تسهیلات، محصولات، مشتریان و روش‌های اداره کردن خرید، موجودی و توزیع می‌شود، که مواد خام توسط تأمین‌کنندگان، تأمین و محصولات نهایی توسط مشتریان نهایی مصرف می‌شوند [۱]. اداره یک زنجیره‌تأمین موفق بستگی به چگونگی طراحی شبکه دارد.

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: nadizadeh@ardakan.ac.ir



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

طراحی شبکه تعداد، موقعیت و ظرفیت انواع کارخانه‌ها، انبارها و مراکز توزیع مورد استفاده را مشخص می‌کند. همچنین کانال‌های توزیع، مقدار مواد و اقلام برای مصرف، تولید و حرکت از تولیدکنندگان به مشتریان را تعیین می‌کند. در طی دهه گذشته، زنجیره‌های تأمین معکوس به دلیل قوانین زیست‌محیطی، افزایش اهمیت اقتصادی و آگاهی‌های مشتریان مورد توجه روزافزونی قرار گرفته‌اند [۲]. هدف اصلی این زنجیره‌ها، طولانی‌تر کردن دوره عمر محصولات است. این کار با روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که به طورکلی گزینه‌های بازیابی نامیده می‌شوند و برخی از معمول‌ترین آن‌ها عبارتند از فروش و استفاده مجدد[۱]، به‌روز کردن محصول[۲]، تغییر وضعیت[۳]، نوسازی[۴]، بازتولید[۵]، بازیابی مواد[۶]، بازیافت[۷]، انهدام و مدیریت ضایعات[۸]. گروه‌های مختلفی از محصولات در زنجیره‌تأمین معکوس حرکت می‌کنند که عبارتند از بازگشتی‌ها در چرخه عمر (شامل بازگشتی‌های تجاری، ضمانت و تعمیر)، بازگشتی‌ها در پایان استفاده و بازگشتی‌ها در پایان عمر محصول. فرآیندهای اصلی این زنجیره‌ها عبارتند از: جمع‌آوری، بازرسی، انتخاب و مرتب‌سازی، لجستیک (حمل و نقل)، بازیابی و توزیع مجدد. این زنجیره‌ها ممکن است به صورت جداگانه از زنجیره پیشرو کار کنند (زنجیره‌های حلقه باز) یا با زنجیره پیشروی یکپارچه باشند و بازگشتی‌ها را به همان زنجیره معمول ارسال کنند (زنجیره حلقه بسته) [۳].

طراحی شبکه یک تصمیم راهبردی و حیاتی در انواع زنجیره‌های تأمین محسوب می‌شود. طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته شامل تصمیمات متعددی از جمله تعیین نوع و تعداد اجزای شبکه، مسئولیت‌ها و محل‌های آن‌هاست [۳]. مسلماً این تصمیمات بر تصمیمات مراحل بعد، مانند مقدار و مسیرهای حمل مواد و بازگشتی‌ها تأثیرگذار است. در مسایل مکان‌یابی- مسیریابی[۹]، تعداد، ظرفیت و مکان اجزای مختلف زنجیره همراه با مسیرهای مسیرهای بهینه حمل و نقل مواد و محصولات در میان آن‌ها تعیین می‌شود. در دنیای واقعی اهداف متنوعی برای طراحی شبکه وجود دارد، اما مهم‌ترین آن‌ها معمولاً کمینه کردن هزینه‌های کل زنجیره‌تأمین است.

در این تحقیق یک شبکه تأمین حلقه بسته به صورت چندرده‌ای- چندمحصولی در هفت سطح شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان، مراکز جمع‌آوری، بازیابی و دفع مطالعه‌شده و یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای آن ارایه شده است. از آن‌جا که روبه‌رو شدن با کمبود مواد و قطعات مختلف در هر سطح از زنجیره‌تأمین، مشکلات متعددی مانند توقف تولید، از دست‌دادن مشتری، کاهش اعتبار شرکت و غیره را در پی دارد، لذا نگهداری موجودی یک امر اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین در این مدل که به صورت چند دوره‌ای[۱۰] طراحی‌شده، طبق سیاست‌هایی که به منظور کاهش هزینه‌های کل اتخاذ می‌شود، امکان نگهداری موجودی در برخی دوره‌ها در تسهیلات گوناگون فراهم شده است. تسهیلات در این مدل به جز مشتریان و مرکز دفع، به صورت بالقوه هستند و با توجه به هزینه‌های احداث و راه‌اندازی هر کدام، برای تأسیس

[1] Resell and Direct Reuse
[2] Product Upgrade
[3] Recondition
[4] Refurbish
[5] Remanufacturing
[6] Material Recovery
[7] Recycling
[8] Disposal and waste management
[9] Location-Routing Problems (LRP)
[10] Multi-period



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

انتخاب می‌شوند. از جمله خروجی‌های مدل این مقاله، تعداد و مکان مراکز تأمین، تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیابی و مقدار جریان بهینه وسایل نقلیه بین سطوح مختلف این شبکه با توجه به تقاضای مشتریان است. هدف مدل، کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت راه‌اندازی تسهیلات و همچنین انبارهای نگهداری مواد، هزینه‌های متغیر وسایل حمل‌ونقل و هزینه‌های متغیر نگهداری مواد و محصولات است.

ادامه مقاله بدین صورت تنظیم شده است که در بخش دوم به‌صورت مختصر ادبیات موضوع بررسی‌شده است. جزییات مساله و مدل‌سازی آن در بخش سوم به تفصیل آورده شده است. در بخش چهارم به منظور نشان دادن عملکرد مدل پیشنهادی و همچنین اعتبارسنجی آن، یک مثال عددی ایجاد و در نرم‌افزار GAMS حل‌شده است. در بخش پنجم تحلیل حساسیت مدل ارایه شده است. در بخش آخر پژوهش نیز نتیجه‌گیری به همراه ارایه پیشنهادهای آتی تحقیق آورده شده است.

## ۲ پیشینه تحقیق

بررسی‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌های کمی زنجیره‌تأمین نشان می‌دهد که اغلب مدل‌های مورد استفاده در طراحی شبکه‌های حلقه بسته، مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته هستند که هدف آنها کمینه‌سازی هزینه‌هاست. در برخی از این مدل‌های مکان‌یابی ظرفیت در نظر گرفته نشده و تنها یک محصول بررسی می‌شود و در موارد پیچیده‌تر، چند محصول و با اعمال ظرفیت محدود تسهیلات مدل‌سازی شده‌اند. در ادامه برخی از این تحقیقات شرح داده شده‌اند.

طلایی و همکاران یک مدل دو هدفی عدد صحیح آمیخته برای مکان‌یابی تسهیلات یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته ارایه دادند. در این مدل هر دو جریان پیشرو و پسرو برای اجتناب از زیربهینگی در هم ادغام شده‌اند. با کمک این مقاله مدیران می‌توانند با استفاده از لجستیک سبز و بهبود عملکرد زیست‌محیطی به عنوان یک راهبرد مکمل، به یک مزیت رقابتی پایدار دست یابند [۴].

آذر و همکاران یک روش یکپارچه برای انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص کالاها در زنجیره‌تأمین حلقه بسته ارایه کردند. روش نویسندگان شامل دو مرحله است؛ در ابتدا چارچوبی برای معیارهای انتخاب تأمین‌کننده برحسب قطعات ارایه کرده و سپس به ارزیابی فازی آن‌ها براساس معیارهای کمی و کیفی پرداخته‌اند. در مرحله دوم، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چند هدفی عدد صحیح آمیخته چند دوره‌ای ارایه داده‌اند. از خروجی‌های این مدل، انتخاب تأمین‌کننده و پیمانکار و اختصاص کالا به آن‌ها و تعیین تعداد بهینه قطعات و محصولات در زنجیره‌تأمین حلقه بسته بوده است [۵].

کرباسیان و همکاران مقاله‌ای با عنوان مکان‌یابی و تعیین ظرفیت عناصر زنجیره‌تأمین حلقه بسته ارایه دادند و مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته را بررسی کردند. این مدل تمام جریان‌های مربوط به جریان قطعات، مجموعه‌ها و محصولات برگشتی را دربرگرفته و همچنین با درنظر گرفتن چهار هدف فازی که در آن موارد کمی و کیفی حضور دارند، می‌کوشد اختیارات تصمیم‌گیرنده را افزایش دهد. از اهداف این مطالعه بررسی هزینه، سود، اثرات زیست‌محیطی، زمان تحویل، وزن‌دهی اعضا، نرخ معیوبی و رضایت مشتری بوده است [۶].



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

محمدنژاد و همکاران یک مدل توأم قیمت‌گذاری و مسیریابی موجودی در زنجیره‌تأمین دوسطحی حلقه بسته ارایه دادند. در این مقاله یک مدل ریاضی غیرخطی برای مسایل با ابعاد کوچک پیشنهاد شده است. به دلیل پیچیدگی شرایط مساله در ابعاد بزرگ، از دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات برای حل استفاده شده است. از اهداف این مدل، اختصاص مکان برای مراکز جمع‌آوری و جداسازی، مسیریابی وسایل نقلیه و سفارش‌دهی مواد به منظور حداکثر رساندن سود بوده است [۷].

در پژوهش تارین و همکاران مساله کنترل موجودی و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی محصول در شبکه لجستیک معکوس یکپارچه، طی دو مرحله در نظر گرفته شده است. در مرحله اول محصولات برگشتی با استفاده از آستانه‌های کیفی تعریف شده، جهت تفکیک و ارسال به خطوط مناسب بازیافت و یا دفع، با بازرسی کیفی قرار می‌گیرند. در مرحله دوم با در اختیار داشتن مقادیر ارسالی به خط‌های مختلف، یک الگوریتم بهینه‌سازی عدد صحیح آمیخته را برای کاهش هزینه‌های کل شبکه شکل می‌دهد. محققین با توجه به سخت بودن مسأله[1] از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای حل مدل استفاده کرده‌اند [۸].

رشیدی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای یک شبکه لجستیک یکپارچه پیشرو- پسرو به صورت چندسطحی- چندمحصولی ارایه کردند. در این مدل محدودیت‌هایی مانند ظرفیت محدود تسهیلات و ایجاد تعادل بین تسهیلات و حمل‌و نقل بررسی‌شده و هدف، کمینه‌کردن هزینه‌های کل شامل احداث تسهیلات، خرید قطعات و محصولات و حمل‌و نقل در نظر گرفته شده است. این مدل مکان و تعداد انواع تسهیلات برای احداث و همچنین میزان کالا و قطعاتی که بین سطوح مختلف زنجیره توسط وسایل نقلیه جابه‌جا می‌شوند را مشخص می‌کند [۹].

فیلیشمن و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه‌های لجستیک حلقه بسته تک‌محصولی ارایه کردند که در آن به ظرفیت محدود تسهیلات توجه نشده بود [۱۰]. سالما و همکاران مدل فیلیشمن را با چندمحصولی کردن آن و ایجاد ظرفیت محدود برای تسهیلات، همراه با پارامترهای تصادفی توسعه دادند. در این مدل مکان‌یابی تسهیلاتی از قبیل کارخانه‌ها، انبارها و واحدهای جداسازی صورت می‌گرفت [۱۱].

یوستر و همکاران یک شبکه زنجیره عرضه چندمحصولی حلقه بسته طراحی کردند، که شبکه لجستیک مستقیم، موجود و تنها مرکز جمع‌آوری و بازیافت تعیین مکان، و هر دو جریان مستقیم و معکوس بهینه‌سازی می‌شود [۱۲]. لیستس یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای طراحی یکپارچه زنجیره لجستیک مستقیم و معکوس که امکان اعمال سناریوهای مختلف برای پارامترهای تقاضا و میزان برگشتی‌ها در آن وجود دارد، ارایه کرده است. روش حل آن نیز روش تجزیه در نمونه‌های با اندازه بزرگ بر اساس روش شاخه و کران بود [۱۳].

کو و ایوانز یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی هم‌زمان شبکه مستقیم و معکوس ارایه کردند که در آن از تسهیلات ترکیبی استفاده شد. برای حل مدل نیز الگوریتم ژنتیک[2] را به‌کار

[1] NP-Hard
[2] Heuristic



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

گرفتند [۱۴]. لی و دونگ یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه برای رایانه‌های مستعمل ارایه کردند [۱۵]. مین و کو یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای یک شبکه حلقه بسته چند دوره‌ای-چند محصولی جهت فراهم‌کنندگان خدمات لجستیک طرف سوم[1] ارایه کردند. به این صورت که محصولات بازگشتی از مشتریان نهایی برای توزیع مجدد، بازرسی، تعمیر و بازسازی می‌شوند. در این مدل مکان‌یابی تسهیلات تعمیر و انبارها صورت می‌گیرد و برای حل از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است [۱۶].

لو و بوستل یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته دو سطحی در لجستیک مستقیم و معکوس ارایه کردند که تسهیلاتی مانند تولید- تعمیر و مراکز جمع‌آوری را پوشش می‌داد. یک الگوریتم لاگرانژی ابتکاری نیز برای حل آن ایجاد کردند [۱۷]. پیشوایی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته ارایه کردند، که دو هدف به حداکثر رساندن معیار پاسخ‌دهی شبکه به تقاضای مشتریان و به حداقل رساندن هزینه‌های کل در شبکه حلقه بسته را دنبال می‌کند. مدل آن‌ها مراکز ترکیبی تولید- بازیافت، توزیع، جمع‌آوری، بازرسی و انهدام را مکان‌یابی می‌کند. هم‌چنین برای حل این مدل یک الگوریتم تقلیدی[2] توسعه‌یافته پیشنهاد شد [۱۸].

یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته تک محصولی و با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های احداث تسهیلات شامل مراکز تولید، توزیع و بازیافت و همچنین هزینه‌های متغیر حمل‌ونقل در کل شبکه حلقه بسته توسط وانگ و هسو ارایه شده است. در این مدل به ظرفیت محدود تسهیلات و ایجاد تعادل بین تسهیلات مختلف توجه شده است [۱۹]. کانان و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی چند دوره‌ای و چند محصولی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های خرید، حمل و نقل و نگهداری موجودی ارایه کرده‌اند. در این مدل نیز به ظرفیت تسهیلات، زمان در دسترس کارخانه‌ها و محدودیت‌های تعادلی بین تسهیلات توجه شده و از الگوریتم ژنتیک برای حل استفاده شده است [۲۰].

یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته استوار برای یک شبکه لجستیک حلقه بسته توسط پیشوایی و همکاران ارایه شد که هدف آن کمینه‌سازی هزینه راه‌اندازی تسهیلات، هزینه حمل‌و نقل و هزینه جریمه برآورده نشدن تقاضای مشتریان بود و محدودیت‌های جریان ظرفیت تسهیلات و تعادل بین تسهیلات را شامل می‌شد [۲۱]. پاکسوی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی در شبکه لجستیک حلقه بسته ارایه کردند که هدف آن کمینه کردن هزینه حمل، هزینه تشعشع $CO_2$ و هزینه خرید محصولات و هم‌چنین حداکثر کردن سود به دست آمده از بازیابی محصولات است. محدودیت‌های این مدل شامل ظرفیت‌های تسهیلات و میزان حمل در هر مسیر، ظرفیت‌های تعادلی بین تسهیلات و تأمین تقاضای مشتریان است [۲۲]. حسن‌زاده و بیکی یک مدل مکان‌یابی تسهیلات برای طراحی یک شبکه زنجره‌تأمین حلقه بسته ارایه دادند، که یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته با تقاضای احتمالی است [۲۳].

[1] Third part logistic service provider
[2] Memetic



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

ژاله‌چیان و همکاران یک مدل مکان‌یابی- مسیریابی موجودی برای یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته با عدم قطعیت طراحی کردند [۲۴]. احمدزاده و وحدانی یک مدل قیمت‌گذاری- مکان‌یابی موجودی در یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته با درنظر گرفتن تقاضا و کمبود در یک سیستم بازدید دوره‌ای ارایه کردند [۲۵]. محمدپور تویسرکانی و حسن‌زاده امین یک مدل چندهدفی مکان‌یابی برای یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته به صورت چند دوره‌ای- چند محصولی ارایه کردند [۲۶]. کاود و همکاران یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته تک محصولی را با در نظر گرفتن تجارت الکترونیک بررسی و نشان داده‌اند که با اضافه شدن کانال تجارت الکترونیک به کانال‌های فروش سنتی، هزینه‌های کل کاهش یافته‌اند [۲۷]. در مطالعه دیگری هدف دوم زیست‌محیطی در کنار هدف کاهش هزینه کل برای تصمیم‌گیری درباره مکان و میزان حمل بین تسهیلات در یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته استفاده شده است [۲۸].

در این تحقیق، با افزودن دوره‌های زمانی به مدل رشیدی و همکاران [۹] مدل چند دوره‌ای به دست آمده است. همچنین در نظر گرفتن انبارهای نگهداری مواد و اقلام در محل تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان در مسیر پیشرو، امکان نگهداری موجودی در برخی دوره‌ها را فراهم کرده است. بنابراین مدلی که در این پژوهش ارایه شده، کامل‌تر و به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر شده است. به منظور مشخص کردن وضعیت مطالعات بررسی شده و مقایسه‌ی آن با این پژوهش از سیستم کدینگ جدول ۱ استفاده شده است و خلاصه‌ای از مطالعات قبلی و فعلی در جدول ۲ به نمایش گذارده شده است.

**جدول ۱.** ساختار مدل‌های طراحی شبکه لجستیک و کدینگ مربوطه

<table>
<tr><th colspan="6">اجزای شبکه</th></tr>
<tr><td colspan="3">اجزای زنجیره پیشرو (FC)<br>تأمین‌کنندگان (Y)<br>مراکز تولید (P)<br>مراکز توزیع (D)<br>مشتریان (C)</td><td colspan="3">اجزای زنجیره پسرو (RC)<br>مراکز توزیع مجدد (RD)<br>مراکز جمع‌آوری/ بازرسی (CI)<br>مراکز بازیابی (RY)<br>مراکز جداسازی / مرتب‌سازی (B)<br>مراکز انهدام (DC)</td></tr>
<tr><th colspan="6">ویژگی‌های مساله</th></tr>
<tr><td colspan="2">دوره (PD)<br>تک دوره (S)<br>چند دوره (M)</td><td colspan="2">محصول (PT)<br>تک محصول (I)<br>چند محصول (T)</td><td colspan="2" rowspan="2">تعداد تسهیلات جدید (NF)<br>نامعلوم (N)<br>معلوم (X)</td></tr>
<tr><td colspan="2">جریان ظرفیت (CF)<br>محدود (F)<br>نامحدود (U)</td><td colspan="2">تقاضا (DT)<br>قطعی (D)<br>تصادفی (S)</td></tr>
<tr><th colspan="6">ویژگی‌های مدل</th></tr>
<tr><td colspan="2">خروجی مدل (MO)<br>موجودی (I)<br>میزان تقاضا (D)<br>میزان حمل و نقل (T)<br>مکان‌یابی تخصیص (L)<br>سایر (O)</td><td colspan="2">نوع مدلسازی (MD)<br>برنامه‌ریزی غیرخطی (N)<br>برنامه‌ریزی تصادفی/ استوار(S)<br>برنامه‌ریزی آمیخته (M)<br>برنامه‌ریزی خطی(L)<br>برنامه‌ریزی عدد صحیح (I)<br>برنامه‌ریزی فازی (F)</td><td colspan="2">اهداف (OB)<br>کمینه‌سازی هزینه / بیشینه‌سازی سود (C)<br>سایر (O)</td></tr>
</table>



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

**جدول ۲.** مقایسه شرایط مطالعات پیشین و مقاله فعلی

| | FC | | | | RC | | | | | | PD | | PT | | NF | | CF | | DT | | MO | | | | | MD | | | | | | | OB | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Y | P | D | C | RD | CI | RY | B | DC | S | M | I | T | N | X | F | U | D | S | I | D | T | L | O | N | S | M | L | I | F | C | O |
| [۴] | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ |
| [۵] | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ |
| [۶] | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ |
| [۷] | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | | | ✓ |
| [۸] | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | | ✓ |
| [۹] | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | ✓ |
| [۱۰] | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | | ✓ |
| [۱۱] | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | | | ✓ |
| [۱۲] | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ |
| [۱۳] | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | ✓ |
| [۱۴] | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| [۱۵] | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| [۱۶] | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| [۱۷] | | | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| [۱۸] | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ |
| [۱۹] | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| [۲۰] | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | ✓ |
| [۲۱] | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | | | | | ✓ |
| [۲۲] | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | | | | | | ✓ |
| [۲۳] | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| [۲۴] | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| [۲۵] | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | | | ✓ |
| [۲۶] | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| [۲۷] | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | ✓ |
| [۲۸] | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ |
| این مقاله | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | | | | | | ✓ |

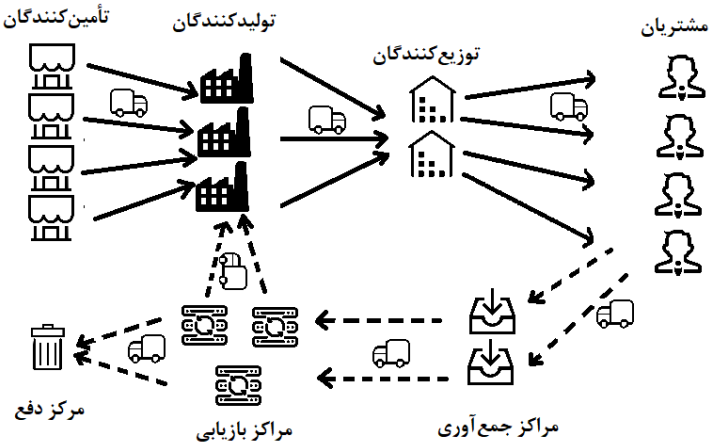
## ۳ بیان مسأله

شبکه حلقه بسته مورد مطالعه شامل هفت سطح است که در ادامه تشریح می‌شود. در زنجیره پیشروی این شبکه، مواد و قطعات از تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان و محصولات تولیدشده به مراکز توزیع و از آن‌جا به مشتریان منتقل می‌شوند. از آنجا که در این مدل کمبود مجاز نیست، لذا تمام تقاضای مشتریان باید تأمین شود. همان‌طور که در مقدمه مقاله تشریح شد، انواع مختلفی از بازگشتی‌ها در زنجیره تأمین پسرو می‌توانند به عقب بازگردند. در این پژوهش بازگشتی‌های پایان عمر محصول در نظر گرفته شده‌اند و فرض بر این است که محصولات بازگشتی



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

از مشتریان به مراکز جمع‌آوری و ازآنجا به مراکز بازیابی ارسال می‌شوند. در این مراکز محصولات جداسازی شده و به قطعات تشکیل دهنده محصول تجزیه می‌شوند. قطعاتی از محصول که پس از بازیافت، بازسازی یا تعمیر قابل استفاده باشند، دوباره به زنجیره (کارخانه) بازگشته و قطعاتی که قابل بازیابی نیستند باید به مرکز دفع منتقل می‌شوند. خروجی‌های مدل شامل تعداد و مکان تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مراکز جمع‌آوری و بازیابی است. همچنین مقدار بهینه انتقال مواد و محصولات در هر دوره توسط وسایل‌نقلیه مخصوص بین دو تسهیل و میزان بهینه نگهداری مواد در هر تسهیل مشخص می‌شود. شمای کلی این زنجیره در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای این زنجیره تأمین حلقه بسته ارایه شده است.




**شکل ۱.** زنجیره حلقه بسته مورد بررسی این پژوهش

## ۳-۱ فرض‌های مسأله

مساله طراحی شبکه در این تحقیق فرض‌هایی به شرح زیر دارد:

۱. کمبود در زنجیره مجاز نیست و تقاضای مشتریان در دوره‌های مختلف تأمین می‌شود.

۲. در مراکز جمع‌آوری و بازیابی توان ورود همه محصولات وجود دارد. یعنی هر محصول می‌تواند به هر یک از این مراکز منتقل شود. در صورتی‌که بقیه تسهیلات چنین نیستند. به‌طور مثال همه تأمین‌کنندگان توانمندی تأمین همه قطعات و همه کارخانه‌ها توانمندی تولید همه محصولات را ندارند. همچنین هر محصول می‌تواند فقط تعداد خاصی از قطعات را دارا باشد نه همه آن‌ها را.

۳. محل مشتریان معلوم است، اما مکان‌های مختلف و نامعلومی برای احداث هر یک از تسهیلات دیگر وجود دارد که خروجی مدل این مکان‌ها را مشخص می‌کند.

۴. بین تسهیلات در یک سطح، جابه‌جایی و انتقال محصول وجود ندارد.

۵. ظرفیت تسهیلات و میزان جریان بین تسهیلات در سطوح مختلف، در یک دوره زمانی محدود است.

۶. نرخ‌های بازیابی و دفع و همچنین نرخ محصولات بازگشتی از مشتریان مشخص است.



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

۷. ظرفیت وسایل نقلیه بین دو سطح مشخص است و محدودیتی در تعداد آن‌ها وجود ندارد.

۸. یک وسیله نقلیه در طول سفر خود فقط به یک مقصد خدمت می‌دهد.

۹. هزینه نگهداری مواد و محصولات در انبارهای نگهداری مشخص است و طبق شرایط مختلف فصلی و غیره ممکن است در دوره‌های مختلف متفاوت باشد.

۱۰. برای نگهداری مواد اولیه در تأمین‌کننده‌ها، و محصولات در مراکز تولید، انبارهایی احداث می‌شوند. اما در مراکز توزیع به این دلیل که خود نوعی انبار به حساب می‌آیند، نیازی به احداث انبار جداگانه نیست.

۱۱. ظرفیت انبارهای نگهداری در تأمین‌کننده‌ها و تولیدکنندگان نامحدود، ولی در مراکز توزیع به اندازه ظرفیت مرکز توزیع فرض شده است.

## ۳-۲ اندیس‌ها و مجموعه‌ها

$I$: مجموعه تأمین‌کنندگان بالقوه با اندیس $i$ که $i \in I$.

$J$: مجموعه تولیدکنندگان بالقوه با اندیس $j$ که $j \in J$.

$K$: مجموعه توزیع‌کنندگان بالقوه با اندیس $k$ که $k \in K$.

$L$: مجموعه مشتریان بالقوه با اندیس $l$ که $l \in L$.

$M$: مجموعه مراکز جمع‌آوری بالقوه با اندیس $m$ که $m \in M$.

$N$: مجموعه مراکز بازیابی بالقوه با اندیس $n$ که $n \in N$.

$T$: مجموعه دوره‌ها با اندیس $t$ که $t \in T$.

$S$: مجموعه قطعات با اندیس $s$ که $s \in S$.

$P$: مجموعه محصول‌ها با اندیس $p$ که $p \in P$.

$P_s$: مجموعه محصول‌هایی که قطعه $s$ در آن به‌کار می‌رود.

$P_j$: مجموعه محصول‌هایی که در کارخانه $j$ تولید می‌شود.

$J_p$: مجموعه کارخانه‌هایی که محصول $p$ را تولید می‌کنند.

$P_k$: مجموعه محصول‌هایی که می‌توانند توسط توزیع‌کننده $k$ توزیع شوند.

$K_p$: مجموعه توزیع‌کنندگانی که محصول $p$ را توزیع می‌کنند.

$K_s$: مجموعه توزیع‌کنندگانی که قطعه $s$ در محصول‌هایی که توزیع می‌کنند وجود دارد.

$I_s$: مجموعه تأمین‌کنندگانی که قطعه $s$ را تهیه می‌کنند.

$J_s$: مجموعه تولیدکنندگانی که از قطعه $s$ استفاده می‌کنند.

$S_i$: مجموعه قطعاتی که از طریق تأمین‌کننده $i$ تهیه می‌شوند.

$S_j$: مجموعه قطعات مورد نیاز تولیدکننده $j$.

$P_l$: مجموعه محصول‌های مورد نیاز مشتری $l$.

$L_p$: مجموعه مشتریان مصرف‌کننده محصول $p$.



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

$V_\alpha$: مجموعه وسایل نقلیه خدمت‌دهنده در مسیر $i$ به $j$ با اندیس $\alpha$ که $\alpha \in V_\alpha$.

$V_\beta$: مجموعه وسایل نقلیه خدمت‌دهنده در مسیر $j$ به $k$ با اندیس $\beta$ که $\beta \in V_\beta$.

$V_\gamma$: مجموعه وسایل نقلیه خدمت‌دهنده در مسیر $k$ به $l$ با اندیس $\gamma$ که $\gamma \in V_\gamma$.

$V_\delta$: مجموعه وسایل نقلیه خدمت‌دهنده در مسیر $l$ به $m$ با اندیس $\delta$ که $\delta \in V_\delta$.

$V_\varepsilon$: مجموعه وسایل نقلیه خدمت‌دهنده در مسیر $m$ به $n$ با اندیس $\varepsilon$ که $\varepsilon \in V_\varepsilon$.

$V_\theta$: مجموعه وسایل نقلیه خدمت‌دهنده در مسیر $n$ به $j$ با اندیس $\theta$ که $\theta \in V_\theta$.

$V_\tau$: مجموعه وسایل نقلیه خدمت‌دهنده در مسیر $n$ به $l$ با اندیس $\tau$ که $\tau \in V_\tau$.

## ۳-۳ پارامترها

$ba_{\alpha t}$: هزینه حمل هر کیلوگرم بار در واحد مسافت بین تأمین‌کننده وتولیدکننده توسط وسیله نقلیه $\alpha$ در دوره $t$.

$bh_{\beta t}$: هزینه حمل هر کیلوگرم بار در واحد مسافت بین تولیدکننده و توزیع‌کننده توسط وسیله نقلیه $\beta$ در دوره $t$.

$by_{\gamma t}$: هزینه حمل هر کیلوگرم بار در واحد مسافت بین توزیع‌کننده و مشتری توسط وسیله نقلیه $\gamma$ در دوره $t$.

$bs_{\delta t}$: هزینه حمل هر کیلوگرم بار در واحد مسافت بین مشتری و مرکز جمع‌آوری توسط وسیله نقلیه $\delta$ در دوره $t$.

$be_{\varepsilon t}$: هزینه حمل هر کیلوگرم بار در واحد مسافت بین مرکز جمع‌آوری و بازیابی توسط وسیله $\varepsilon$ در دوره $t$.

$bo_{\theta t}$: هزینه حمل هر کیلوگرم بار در واحد مسافت بین مرکز بازیابی و تولیدکننده توسط وسیله $\theta$ در دوره $t$.

$bo_{\tau t}$: هزینه حمل هر کیلوگرم بار در واحد مسافت بین مرکز بازیابی و واحد دفع توسط وسیله $\tau$ در دوره $t$.

$spa_{\alpha t}$: ظرفیت وسیله نقلیه $\alpha$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$spb_{\beta t}$: ظرفیت وسیله نقلیه $\beta$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$spy_{\gamma t}$: ظرفیت وسیله نقلیه $\gamma$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$sps_{\delta t}$: ظرفیت وسیله نقلیه $\delta$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$spe_{\varepsilon t}$: ظرفیت وسیله نقلیه $\varepsilon$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$spo_{\theta t}$: ظرفیت وسیله نقلیه $\theta$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$spt_{\tau t}$: ظرفیت وسیله نقلیه $\tau$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$wp_p$: وزن محصول $p$ برحسب کیلوگرم.

$w_s$: وزن قطعه $s$ برحسب کیلوگرم.

$e_{it}$: ظرفیت تأمین‌کننده $i$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$f_{jt}$: ظرفیت تولیدکننده $j$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$g_{kt}$: ظرفیت توزیع‌کننده $k$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$h_{mt}$: ظرفیت مرکز جمع‌آوری $m$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

$u_{nt}$: ظرفیت مرکز بازیابی $n$ برحسب کیلوگرم در دوره $t$.

$pc_{lt}$: درصد محصول‌های بازگشتی مشتری $l$ در دوره $t$.

$cf_i$: هزینه تأسیس تأمین‌کننده $i$.

$cm_j$: هزینه تأسیس تولیدکننده $j$.

$cd_k$: هزینه تأسیس توزیع‌کننده $k$.

$cc_m$: هزینه تأسیس مرکز جمع‌آوری $m$.

$cr_n$: هزینه تأسیس مرکز بازیابی $n$.

$ci_i$: هزینه تأسیس انبار در تأمین‌کننده $i$.

$cj_j$: هزینه تأسیس انبار در تولیدکننده $j$.

$c_{st}$: هزینه دفع هر واحد قطعه $s$ در دوره $t$.

$plf_{snt}$: درصدی از تعداد قطعه $s$ که در مرکز $n$ در دوره $t$ قابل بازیابی نیست.

$b_{ps}$: ضریب مصرف قطعه $s$ از محصول $p$.

$cs_{sit}$: هزینه خرید قطعه $s$ از تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$.

$cp_{pjt}$: هزینه تولید محصول $p$ در کارخانه $j$ در دوره $t$.

$cn_{snt}$: هزینه بازیابی قطعه $s$ در واحد بازیابی $n$ در دوره $t$.

$ck_{pkt}$: هزینه خرید محصول $p$ از توزیع‌کننده $k$ در دوره $t$.

$di_{ij}$: فاصله تأمین‌کننده $i$ تا کارخانه $j$.

$dj_{jk}$: فاصله کارخانه $j$ تا توزیع‌کننده $k$.

$dk_{kl}$: فاصله توزیع‌کننده $k$ تا مشتری $l$.

$dl_{lm}$: فاصله مشتری $l$ تا مرکز جمع‌آوری $m$.

$dmm_{mn}$فاصله مرکز جمع‌آوری $m$ تا مرکز بازیابی $n$.

$dn_{nj}$: فاصله مرکز بازیابی $n$ تا کارخانه $j$.

$d_n$: فاصله مرکز بازیابی $n$ تا واحد دفع.

$hi_{ist}$: هزینه نگهداری هر واحد قطعه $s$ در تأمین‌کنند $i$ در دوره $t$.

$hj_{jpt}$: هزینه نگهداری هر واحد محصول $p$ در کارخانه $j$ در دوره $t$.

$hk_{kpt}$: هزینه نگهداری هر واحد محصول $p$ در مرکز توزیع $k$ در دوره $t$.

$dm_{plt}$: تقاضای مشتری $l$ از محصول $p$ در دوره $t$.

## ۳-٤ متغیرهای تصمیم

- **متغیرهای نامنفی**

$x_{sijat}$: میزان قطعه $s$ که از تأمین‌کننده $i$ به کارخانه $j$ توسط وسیله نقلیه $\alpha$ در دوره $t$ می‌رود.



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]

[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

$y_{pjk\beta t}$: میزان محصول $p$ که از کارخانه $j$ تا توزیع‌کننده $k$ با وسیله نقلیه $\beta$ در دوره $t$ حمل می‌شود.

$z_{pkl\gamma t}$: میزان محصول $p$ که از توزیع‌کننده $k$ تا مشتری $l$ توسط وسیله نقلیه $\gamma$ در دوره $t$ می‌رود.

$ttt_{plm\delta t}$: میزان محصول $p$ که از مشتری $l$ تا مرکز جمع‌آوری $m$ توسط وسیله نقلیه $\delta$ در دوره $t$ می‌رود.

$q_{pmn\varepsilon t}$: میزان محصول $p$ که از مرکز جمع‌آوری $m$ تا مرکز بازیابی $n$ توسط وسیله نقلیه $\varepsilon$ در دوره $t$ می‌رود.

$r_{snj\theta t}$: میزان قطعه $s$ که از مرکز بازیابی $n$ تا کارخانه $j$ توسط وسیله نقلیه $\theta$ در دوره $t$ می‌رود.

$ooo_{sn\tau t}$: میزان قطعه $s$ که از مرکز بازیابی $n$ تا واحد دفع توسط وسیله نقلیه $\tau$ در دوره $t$ می‌رود.

$uu_{pkjt}$: میزان تقاضای محصول $p$ مرکز توزیع $k$ از کارخانه $j$ در دوره $t$.

$A_{pkt}$: میزان موجودی محصول $p$ در توزیع‌کننده $k$ در دوره $t$.

$sss_{pjt}$: میزان تولید محصول $p$ در کارخانه $j$ در دوره $t$.

$ff_{sijt}$: میزان تقاضای قطعه $s$ کارخانه $j$ از تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$.

$gg_{sit}$: میزان تولید قطعه $s$ در تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$.

$ccc_{pjt}$: میزان موجودی مجصول $p$ در کارخانه $j$ در دوره $t$.

$jj_{sit}$ : میزان موجودی قطعه $s$ در تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$.

- **متغیرهای دودویی**

$Tf_i$: اگر تأمین‌کننده $i$ تأسیس شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$Tm_j$: اگر کارخانه $j$ تأسیس شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$Td_k$: اگر توزیع‌کننده $k$ تأسیس شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$Tc_m$: اگر مرکز جمع‌آوری $m$ تأسیس شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$Tr_n$: اگر مرکز بازیابی $n$ تأسیس شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$Ti_i$: اگر انبار نگهداری در تأمین‌کننده $i$ تأسیس شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

$Tj_j$: اگر انبار نگهداری در کارخانه $j$ تأسیس شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

## ۳-۵ مدل ریاضی

- **تابع هدف**

$$Min$$

$$\sum_{s\in S}\sum_{i\in I_s}\sum_{j\in J_s}\sum_{t\in T}\sum_{\alpha\in V_\alpha}\left(ba_{\alpha t}w_s di_{ij}+cs_{sit}\right)x_{sij\alpha t} \quad (۱)$$

$$+\sum_{p\in P}\sum_{j\in J_p}\sum_{k\in K_p}\sum_{t\in T}\sum_{\beta\in V_\beta} bh_{\beta t}WP_p dj_{jk}\ y_{pjk\beta t} \quad (۲)$$

$$+\sum_{p\in P}\sum_{j\in J_s}\sum_{t\in T} sss_{pjt}cp_{pjt} \quad (۳)$$

$$+\sum_{p\in P}\sum_{k\in K_p}\sum_{l\in L_p}\sum_{\gamma\in V_\gamma}\sum_{t\in T}\left(by_{\gamma t}WP_p dk_{kl}+cp_{pk}\right)z_{pkl\gamma t} \quad (۴)$$



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

$$+\sum_{p\in P}\sum_{l\in L_p}\sum_{m\in M}\sum_{\delta\in V_\delta}\sum_{t\in T} bs_{\delta t} WP_p dl_{lm} ttt_{plm\delta t} \quad (۵)$$

$$+\sum_{p\in P}\sum_{m\in M}\sum_{n\in N}\sum_{\varepsilon\in V_\varepsilon}\sum_{t\in T} be_{\varepsilon t} WP_p dmm_{mn} q_{pmn\varepsilon t} \quad (۶)$$

$$+\sum_{s\in S}\sum_{n\in N}\sum_{j\in J_s}\sum_{\theta\in V_\theta}\sum_{t\in T}\left(bo_{\theta t} W_s dn_{nj} + cn_{snt}\right) r_{snj\theta t} \quad (۷)$$

$$+\sum_{s\in S}\sum_{n\in N}\sum_{\tau\in V_\tau}\sum_{t\in T}\left(c_{st} + bt_{\tau t} W_s d_n\right) ooo_{sn\tau t} \quad (۸)$$

$$+\sum_{i\in I} cf_i Tf_i + \sum_{j\in J} cm_j Tm_j + \sum_{k\in K} cd_k Td_k + \sum_{m\in M} cc_m Tc_m + \sum_{n\in N} cr_n Tr_n \quad (۹)$$

$$+\sum_{i\in I} ci_i Ti_i + \sum_{j\in J} cj_j Tj_j \quad (۱۰)$$

$$+\sum_{s\in S}\sum_{i\in I_s}\sum_{j\in J_s}\sum_{t\in T}\sum_{\alpha\in V_\alpha}\left(jj_{si(t-1)} + gg_{sit} - x_{sij\alpha t}\right) Ti_i hi_{ist} \quad (۱۱)$$

$$+\sum_{p\in P}\sum_{j\in J_p}\sum_{k\in K_p}\sum_{t\in T}\sum_{\beta\in V_\beta} Tj_j hj_{jpt}\left(ccc_{pj(t-1)} + sss_{pjt} - y_{pjk\beta t}\right) \quad (۱۲)$$

$$+\sum_{p\in P}\sum_{j\in J_p}\sum_{k\in K_p}\sum_{l\in L_p}\sum_{\gamma\in V}\sum_{\beta\in V_\beta}\sum_{t\in T} hk_{kpt} Td_k\left(A_{pk(t-1)} + y_{pjk\beta t} - z_{pkl\gamma t}\right) \quad (۱۳)$$

- **محدودیت‌ها**

$$dm_{plt} \le \sum_{k\in K}\sum_{\gamma\in V_\gamma} z_{pkl\gamma t} \qquad \forall p,l,t \quad (۱۴)$$

$$A_{pkt} = A_{pk(t-1)} + \sum_{j\in J}\sum_{\beta\in V_\beta} y_{pjk\beta t} - \sum_{l\in L}\sum_{\gamma\in V_\gamma} z_{pkl\gamma t} \qquad \forall p,k,t \quad (۱۵)$$

$$\sum_{p\in P} A_{pkt} wp_p \le g_{kt} Td_k \qquad \forall k,t \quad (۱۶)$$

$$\sum_{\beta\in V_\beta} y_{pjk\beta t} \le uu_{pkjt} \qquad \forall p,k,j,t \quad (۱۷)$$

$$\sum_{p\in P}\sum_{l\in L}\sum_{\gamma\in V_\gamma} z_{pkl\gamma t} wp_p \le g_{kt} Td_k \qquad \forall k,t \quad (۱۸)$$

$$\sum_{m\in M}\sum_{\delta\in V_\delta} ttt_{plm\delta t} = pc_{lt}\sum_{k\in K_p}\sum_{\gamma\in V_\gamma} z_{pkl\gamma t} \qquad \forall p,l,t \quad (۱۹)$$

$$\sum_{p\in P}\sum_{l\in L_p}\sum_{\delta\in V_\delta} wp_p ttt_{plm\delta t} \le h_{mt} Tc_m \qquad \forall m,t \quad (۲۰)$$

$$\sum_{n\in N}\sum_{\varepsilon\in V_\varepsilon}\sum_{t\in T} q_{pmn\varepsilon t} = \sum_{l\in L}\sum_{\delta\in V_\delta}\sum_{t\in T} ttt_{plm\delta t} \qquad \forall p,m \quad (۲۱)$$

$$\sum_{p\in P}\sum_{m\in M}\sum_{\varepsilon\in V_\varepsilon} wp_p\ q_{pmn\varepsilon t} \le u_{nt} Tr_n \qquad \forall n,t \quad (۲۲)$$

$$\sum_{p\in P_s}\sum_{m\in M}\sum_{\varepsilon\in V_\varepsilon}\sum_{t\in T} b_{ps} q_{pmn\varepsilon t} = \sum_{j\in J_s}\sum_{\theta\in V_\theta}\sum_{t\in T} r_{snj\theta t} + \sum_{\tau\in V_\tau}\sum_{t\in T} ooo_{sn\tau t} \qquad \forall n,s \quad (۲۳)$$

$$\sum_{s\in S_i\cap S_j} w_s x_{sij\alpha t} \le spa_{\alpha t} \qquad \forall i,j,\alpha,t \quad (۲۴)$$

$$\sum_{p\in P_j\cap P_k} wp_p\ y_{pjk\beta t} \le spb_{\beta t} \qquad \forall j,k,\beta,t \quad (۲۵)$$

$$\sum_{p\in P_k\cap P_l} wp_p z_{pkl\gamma t} \le spy_{\gamma t} \qquad \forall k,l,\gamma,t \quad (۲۶)$$



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

$$\sum_{p\in P_l} wp_p ttt_{plm\delta t} \le sps_{\delta t} \qquad \forall l,m,\delta,t \qquad (۲۷)$$

$$\sum_{p\in P} wp_p \; q_{pmn\varepsilon t} \le spe_{\varepsilon t} \qquad \forall m,n,\varepsilon,t \qquad (۲۸)$$

$$\sum_{s\in S} w_s r_{snj\theta t} \le spo_{\theta t} \qquad \forall n,j,\theta,t \qquad (۲۹)$$

$$\sum_{s\in S} w_s ooo_{sn\tau t} \le spt_{\tau t} \qquad \forall n,\tau,t \qquad (۳۰)$$

$$plf_{snt} \sum_{p\in P}\sum_{m\in M}\sum_{\varepsilon\in V_\varepsilon} b_{ps} q_{pmn\varepsilon t} = \sum_{\tau\in V_\tau} ooo_{sn\tau t} \qquad \forall s,n,t \qquad (۳۱)$$

$$Ti_i = Tf_i \qquad \forall i \qquad (۳۲)$$

$$Tj_j = Tm_j \qquad \forall j \qquad (۳۳)$$

$$ccc_{pjt} = ccc_{pj(t-1)} + sss_{pjt} - \sum_{k\in K}\sum_{\beta\in V_\beta} y_{pjk\beta t} \qquad \forall p,j,t \qquad (۳۴)$$

$$\sum_{p\in P} wp_p sss_{pjt} \le f_{jt} Tm_j \qquad \forall j,t \qquad (۳۵)$$

$$\sum_{i\in I} ff_{sijt} = \sum_{p\in P} b_{ps} sss_{pjt} - \sum_{n\in N}\sum_{\theta\in V_\theta} r_{snj\theta t} \qquad \forall s,j,t \qquad (۳۶)$$

$$jj_{sit} = jj_{si(t-1)} + gg_{sit} - \sum_{j\in J}\sum_{\alpha\in V_\alpha} x_{sij\alpha t} \qquad \forall s,i,t \qquad (۳۷)$$

$$\sum_{s\in S} w_s \; gg_{sit} \le e_{it} Tf_i \qquad \forall i,t \qquad (۳۸)$$

$$\sum_{\alpha\in V_\alpha} x_{sij\alpha t} = ff_{sijt} \qquad \forall s,i,j,t \qquad (۳۹)$$

عبارت‌های (۱) تا (۱۳) تابع هدف و عبارت‌های (۱۴) تا (۳۹) محدویت‌های مدل را نشان می‌دهند که در ادامه به شرح هر کدام از این عبارت‌ها پرداخته می‌شود. عبارت (۱) شامل هزینه خرید از تأمین‌کنندگان و هزینه حمل‌ونقل به کارخانه‌ها در هر دوره است. عبارت‌های (۲) و (۳) به ترتیب هزینه حمل‌ونقل به مراکز توزیع و هزینه‌های تولید کالا در کارخانه‌ها در هر دوره را نشان می‌دهد. عبارت (۴) هزینه خرید کالا از مراکز توزیع و هزینه حمل‌ونقل کالا به مشتریان را شامل می‌شود. عبارت‌های (۵) و (۶) هزینه حمل‌ونقل از مشتریان به مراکز جمع‌آوری و از آن‌جا به مراکز بازیابی را نشان می‌دهد. عبارت (۷) هزینه عملیات بازیابی و هزینه حمل‌ونقل به کارخانه‌ها در هر دوره را بیان می‌کند. عبارت (۸) شامل مجموع هزینه‌های دفع هر واحد و هزینه‌های حمل به مرکز دفع است. عبارت (۹) مجموع هزینه‌های تأسیس تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مراکز جمع‌آوری، بازیابی و دفع را نشان می‌دهد. عبارت (۱۰) شامل مجموعه هزینه‌های تأسیس انبارهای نگهداری مواد و محصول‌ها در تأمین‌کننده‌ها و مراکز تولید است. عبارت‌های (۱۱) تا (۱۳) هزینه‌های نگهداری موجودی در تأمین‌کننده، تولیدکننده و مراکز توزیع را نشان می‌دهند که به‌صورت غیرخطی هستند و باعث غیرخطی شدن مدل نیز می‌شود.

محدودیت (۱۴) مربوط به تأمین تقاضای مشتریان است. به این صورت که میزان کالایی که از مراکز توزیع به مشتریان منتقل می‌شود، بایستی حداقل به‌اندازه تقاضای مشتریان باشد. محدودیت (۱۵) میزان موجودی مرکز توزیع نشان می‌دهد که برابر است با موجودی دوره قبل به‌علاوه میزان کالایی که در همان دوره برای مرکز توزیع



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

آورده می‌شود منهای مقداری که به مشتریان فرستاده می‌شود. محدودیت (۱۶) مربوط به سطح ظرفیت مراکز توزیع است که میزان موجودی در هر دوره بایستی حداکثر برابر با این مقدار باشد. حداکثر میزان کالایی که می‌تواند از کارخانه به مراکز توزیع در هر دوره انتقال داده شود برابر است با میزان تقاضای هر مرکز توزیع از کارخانه که رابطه‌ی آن در محدودیت (۱۷) نشان داده شده است. محدودیت (۱۸) مربوط به حداکثر خروجی کالا از مرکز توزیع و برابر است با ظرفیت هر مرکز توزیع در هر دوره. رابطه (۱۹) بیان می‌کند که درصد خاصی از محصول نوع $p$ که به مشتری $l$ می‌رسد، بازگشتی و معیوب است که به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شود. محدودیت (۲۰) ظرفیت مراکز جمع‌آوری را نشان می‌دهد. رابطه (۲۱) بیان می‌کند که مقدار کالایی که از مشتریان به مراکز جمع‌آوری منتقل می‌شود برابر است با مقداری که از آن‌جا به مراکز بازیابی منتقل می‌شود. رابطه (۲۲) مربوط به ظرفیت مرکز بازیابی است. محدودیت (۲۳) نشان می‌دهد از بین قطعاتی که به مرکز بازیابی وارد می‌شوند، بعضی قابل بازیابی بوده که به کارخانه‌ها ارسال می‌شوند و بخشی دیگر که قابل بازیابی نیستند به مرکز دفع منتقل می‌شوند. محدودیت‌های (۲۴) تا (۳۰) تضمین‌کننده ظرفیت وسایل نقلیه هستند. محدودیت (۳۱) نشان می‌دهد که از کل قطعات رسیده به یک مرکز بازیابی، تنها درصدی قابل بازیابی نیستند که به محل دفع منتقل می‌شوند. محدودیت (۳۲) و (۳۳) الزام وجود انبار در مراکز تأمین و تولید را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۴) مانند محدودیت (۱۵) موجودی در کارخانه‌ها را بیان می‌کنند.

رابطه (۳۵) مربوط به میزان تولید در کارخانه‌ها در هر دوره است، که حداکثر برابر با ظرفیت کارخانه است. رابطه (۳۶) تعداد قطعه درخواستی در هر دوره از تأمین‌کنندگان را نشان می‌دهد که برابر است با تعداد قطعه مورد نیاز برای تولید در هر دوره منهای مقداری که از مرکز بازیابی به کارخانه‌ها در همان دوره منتقل می‌شود. محدودیت (۳۷) موجودی در مراکز تأمین را بیان می‌کند، که برابر است با موجودی دوره قبل به‌علاوه میزان قطعه‌ای که در همان دوره تولید می‌شود منهای مقداری که به کارخانه‌ها انتقال می‌یابد. رابطه (۳۸) بیان می‌کند که حداکثر قطعه‌ای که می‌تواند در هر دوره در مراکز تأمین تولید شود، برابر با ظرفیت هر مرکز تأمین است. رابطه (۳۹) لزوم برآورده شدن نیاز کارخانه‌ها به هر قطعه را در هر دوره نشان می‌دهد.

## ٤ حل مثال عددی

به منظور اعتبارسنجی مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ارایه‌شده، یک مثال عددی که سعی‌شده داده‌های مورد نیاز آن منطبق با شرایط دنیای واقعی باشد طراحی، و با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده است. در این مثال شبکه‌ای با هفت سطح شامل سه تأمین‌کننده بالقوه، دو تولیدکننده بالقوه، دو توزیع‌کننده بالقوه، چهار مشتری، دو مرکز جمع‌آوری بالقوه، دو مرکز بالقوه بازیابی و یک واحد دفع در نظر گرفته شده است. همچنین این شبکه شامل ۳ نوع محصول متفاوت و ۴ نوع قطعه است و در هریک از مسیرهای بین تسهیلات در هرسطح و در هر دوره از دو نوع وسیله نقلیه برای خدمت‌رسانی استفاده می‌شود. مثال برای سه دوره طبق تقاضای مشتریان برنامه‌ریزی می‌شود. قابل توضیح است که در این مثال، فواصل بین تمام تسهیلات در سطوح مختلف مشخص بوده و از پیش اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که داده‌های کامل این مسأله در مرجع [۲۹] قابل دسترسی است. پس از



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

کدنویسی مدل ارایه‌شده با پارامترهای فوق، در نرم‌افزار GAMS 24.8.5 و استفاده از حل کننده BARON، پس از اجرای برنامه خروجی برخی از متغیرها بصورت ذیل حاصل شده است (لازم به ذکر است با توجه به تعداد زیاد متغیرها، نتایج کامل آن در مرجع [۲۹] قابل مشاهده است):

$$Tf_{۲} = Tm_{۱} = Td_{۱} = Td_{۲} = Tc_{۱} = Tr_{۱} = Ti_{۲} = Tj_{۱} = ۱$$

$$Tf_{۱} = Tf_{۲} = Tm_{۲} = Tc_{۲} = Tr_{۲} = Ti_{۱} = Ti_{۳} = Tj_{۲} = ۰$$

$$x_{۱۲۱۱۱} = ۲۷۹۰, x_{۱۲۱۲۲} = ۱۸۰۶, x_{۱۲۱۲۳} = ۲۴۵۰, x_{۲۲۱۱۱} = ۱۱۵۳, x_{۲۲۱۲۲} = ۱۴۹۰, x_{۲۲۱۲۳} = ۱۳۶۰$$

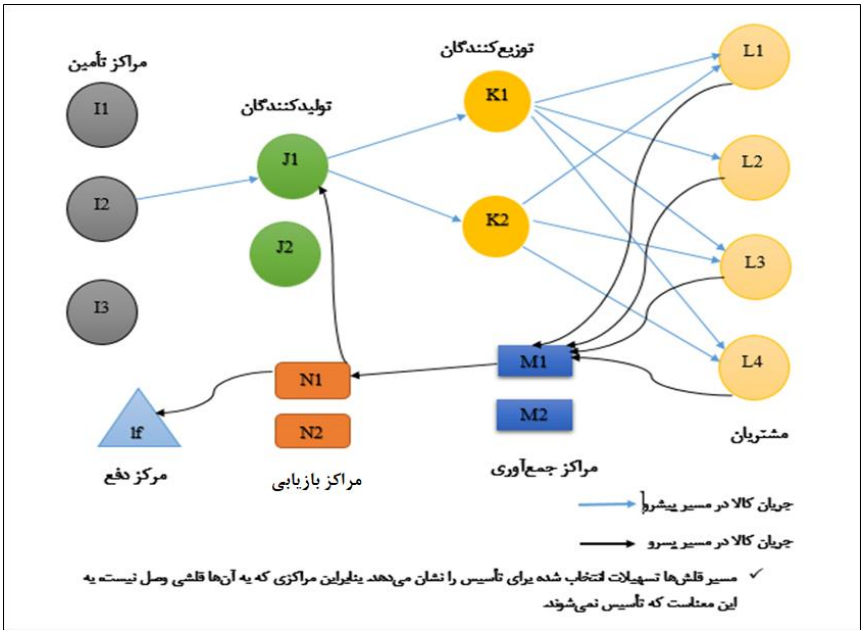
$$x_{۳۲۱۱۱} = ۲۰۱۲, x_{۳۲۱۲۲} = ۲۰۴۰, x_{۳۲۱۲۳} = ۱۴۸۷, x_{۴۲۱۱۱} = ۱۵۰۷, x_{۴۲۱۲۲} = ۲۱۸۰, x_{۴۲۱۲۳} = ۲۰۷۰$$

$$y_{۱۱۱۲۱} = ۵۳۰, y_{۱۱۱۲۲} = ۳۹۰, y_{۱۱۱۲۳} = ۳۵۰, y_{۱۱۲۲۲} = ۱۱۰, y_{۱۱۲۲۳} = ۱۰۰, y_{۲۱۱۲۱} = ۴۴۰$$

$$y_{۲۱۱۲۲} = ۴۲۰, y_{۲۱۱۲۳} = ۴۱۰, y_{۲۱۲۲۱} = ۱۵۰, y_{۲۱۲۲۲} = ۱۴۰ y_{۲۱۲۲۳} = ۱۳۰, y_{۳۱۱۲۱} = ۱۳۰$$

$$y_{۳۱۱۲۲} = ۱۲۰, y_{۳۱۱۲۳} = ۳۶۰, y_{۳۱۲۲۱} = ۴۱۰, y_{۳۱۲۲۲} = ۳۷۰, y_{۳۱۲۲۳} = ۱۰۰$$

این نتایج به صورت شماتیک در شکل ۲ نیز نشان داده شده است؛ مرکز تأمین ۲، کارخانه ۱ و مراکز توزیع ۱ و ۲ در مسیر پیشرو با توجه به هزینه‌های احداث، حمل‌ونقل کالا و هزینه‌های نگهداری قطعات و محصول‌ها، برای تأسیس انتخاب شده‌اند. همچنین انبارهای نگهداری در مراکز تأمین و تولید انتخابی، احداث می‌شوند. در مسیر پسرو نیز مراکز جمع‌آوری و بازیابی ۱ از بین مراکز بالقوه انتخاب شده‌اند. با توجه به هدف کاهش هزینه‌ها، احداث این مراکز حالت بهینه این شبکه است و مقدار تابع هدف ۷،۱۰۲،۳۰۰،۰۰۰ تومان به دست آمد.




**شکل ۲.** نمای کلی از خروجی‌های مثال عددی



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

## ۵ تحلیل حساسیت مدل

به منظور بررسی عملکرد و کارآمدی مدل پیشنهادی، با تغییر مقدار برخی از پارامترهای ورودی مثال عددی و مشاهده نتایج حاصل از این تغییرات، اعتبار و عملکرد صحیح مدل سنجیده شده است. آزمایشات صورت گرفته به‌طور خلاصه در ادامه آورده شده است:

۱. با افزایش هزینه‌های خرید قطعه $s$ از تأمین‌کننده $i$ در دوره ۲، به میزان ۱۰ برابر، انتظار می‌رود که تولیدکنندگان در دوره ۱ تعداد قطعه بیشتری از تأمین‌کننده تقاضا کنند و هزینه نگهداری موجودی متحمل شوند تا در دوره ۲ با توجه به افزایش هزینه‌ها، خرید قطعه کم‌تری داشته باشند. همچنین متناسب با آن تولید در دوره ۲ کاهش و تأمین تقاضای مشتریان در دوره ۱و۲ هر دو با هم در نظر گرفته شود. این نتایج مورد انتظار پس از تغییر ورودی‌ها و بررسی خروجی‌ها در نرم‌افزار به درستی حاصل شده است. مقایسه برخی از خروجی‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

**جدول ۳.** نتایج افزایش هزینه خرید $s$ از تأمین‌کننده‌ها در دوره ۲

| متغیرها | مقدار اولیه | مقدار پس از تغییر |
|---|---|---|
| تابع هدف | $۲/۴۸\times۱۰^{۹}$ | $۲/۵۷\times۱۰^{۹}$ |
| تأمین کننده‌ها | ۲ | ۱ و ۲ |
| تولیدکننده‌ها | ۱ | ۱ |
| توزیع‌کننده‌ها | ۱ و ۲ | ۱ و ۲ |
| مراکز جمع‌آوری | ۲ | ۲ |
| مراکز بازیابی | ۱ و ۲ | ۱و ۲ |
| موجودی کارخانه‌ها در دوره ۱ | ۰ | ۱۱۴۵ |
| مجموع تقاضای قطعه کارخانه‌ها در دوره ۱ | ۷۱۹۱ | ۱۴۶۲۶ |
| تولید در دوره ۳ | ۱۳۷۶ | ۱۴۵۰ |
| تولید در دوره ۲ | ۱۶۲۴ | ۴۰۵ |
| تولید در دوره ۱ | ۱۶۶۰ | ۲۸۰۵ |

۲. با افزایش ۱۰۰ برابری هزینه‌های تولید محصول $p$ در دوره ۳، تولید محصول‌ها در دوره‌های ۱ و ۲ برای نیاز هر سه دوره انجام شده است. علاوه بر این افزایش متغیرهای $x$ و $y$ یعنی انتقال قطعه از تأمین‌کننده و انتقال محصول از کارخانه‌ها به مراکز توزیع در دوره‌های ۱ و ۲ نتیجه این تغییر است. همچنین نگهداری محصول‌ها در مراکز توزیع در دوره ۲ از نتایج حاصله است. همه این نتایج که نشان عملکرد رضایتبخش و مورد انتظار از مدل است باعث افزایش هزینه کل نسبت به حالت اولیه شده است. جدول ۴ به طور خلاصه نتایج این قسمت را نشان می‌دهد.

**جدول ٤.** نتایج حاصل از افزایش هزینه‌های تولید محصول $p$ در دوره ۳

| متغیرها | مقدار اولیه | مقدار پس از تغییر |
|---|---|---|
| تابع هدف | $۷/۱\times۱۰^{۹}$ | $۸/۰۲\times۱۰^{۹}$ |
| تولید محصول‌ها در دوره ۱ | ۱۶۶۰ | ۲۳۲۲ |
| تولید محصول‌ها در دوره ۲ | ۱۵۵۰ | ۲۳۳۸ |



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

| متغیرها | مقدار اولیه | مقدار پس از تغییر |
|---|---|---|
| تولید محصول‌ها در دوره ۳ | ۱۴۵۰ | ۰ |
| انتقال قطعه از تأمین‌کنندگان به کارخانه‌ها در دوره ۱ | ۷۴۶۱ | ۱۰۳۴۸ |
| انتقال قطعه از تأمین‌کنندگان به کارخانه‌ها در دوره ۲ | ۷۵۱۷ | ۱۱۹۹۷ |
| انتقال قطعه از تأمین کنندگان به کارخانه‌ها در دوره ۳ | ۷۳۶۷ | ۰ |
| انتقال محصول از کارخانه‌ها به مراکز توزیع در دوره ۱ | ۱۶۶۰ | ۱۶۶۰ |
| انتقال محصول از کارخانه‌ها به مراکز توزیع در دوره ۲ | ۱۵۵۰ | ۳۰۰۰ |
| انتقال محصول از کارخانه‌ها به مراکز توزیع در دوره ۳ | ۱۴۵۰ | ۰ |
| مجموع موجودی مراکز توزیع در دوره ۲ | ۰ | ۱۴۶۰ |

۳. با کاهش هزینه‌های نگهداری نسبت به مقدار اولیه به نسبت $\frac{۱}{۱۰}$، با توجه به خروجی‌ها ترجیح داده شده است که به جای تولید در هر دوره به اندازه تقاضای همان دوره، در یک دوره تولید بیشتری انجام گرفته و نگهداری کالا در نظر گرفته شود. به دلیل کاهش هزینه‌های نگهداری، مقدار تابع هدف کاهش یافته است. این نتیجه مورد انتظار نیز در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

**جدول ۵.** نتایج کاهش هزینه‌های نگهداری در توزیع‌کننده‌ها

| متغیرها | مقدار اولیه | مقدار پس از تغییر |
|---|---|---|
| تابع هدف | $۷/۱\times۱۰^{۹}$ | $۶/۰۸\times۱۰^{۹}$ |
| تولید محصول $p$ در دوره ۲ | ۱۵۵۰ | ۱۶۶۳ |
| تولید محصول $p$ در دوره ۳ | ۱۴۵۰ | ۱۳۳۷ |
| مجموع موجودی کالای $p$ در توزیع‌کننده | ۰ | ۱۱۳ |
| مجموع موجودی قطعه $s$ در تأمین‌کننده | ۰ | ۴۲۵ |

۴. با افزایش ۱۰ برابری هزینه‌های نگهداری در دوره ۱ در تأمین‌کننده‌ها، میزان موجودی در تأمین‌کننده‌ها به صفر رسیده است که همین نتیجه نیز مورد انتظار بود، و از مجموع هزینه‌ها نیز کاسته شد. نتایج حاصل از این تغییر، به اختصار در جدول ۶ آمده‌است.

**جدول ٦.** نتایج افزایش هزینه‌های نگهداری در تأمین‌کننده‌ها

| متغیرها | مقدار اولیه | مقدار پس از تغییر |
|---|---|---|
| تابع هدف | $۷/۱\times۱۰^{۹}$ | $۷/۰۷\times۱۰^{۹}$ |
| مقدار انتقال قطعه از تأمین‌کننده‌ها به کارخانه‌ها در دوره ۱ | ۷۴۶۰ | ۷۷۵۰ |
| مقدار انتقال قطعه از تأمین‌کننده‌ها به کارخانه‌ها در دوره ۲ | ۷۵۱۷ | ۷۶۵۴ |
| مقدار انتقال قطعه از تأمین‌کننده‌ها به کارخانه‌ها در دوره ۳ | ۷۳۶۸ | ۶۹۵۱ |
| میزان تولید در دوره ۱ | ۱۶۶۰ | ۱۷۲۴ |
| میزان تولید در دوره ۲ | ۱۵۵۰ | ۱۵۰۵ |
| میزان تولید در دوره ۳ | ۱۴۵۰ | ۱۴۳۲ |
| موجودی قطعه $s$ در تأمین‌کننده‌ها | ۲ | ۰ |
| موجودی کالای $p$ در کارخانه‌ها | ۰ | ۶۴ |
| موجودی کالای $p$ در توزیع‌کننده‌ها | ۰ | ۱۸ |



[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

## ٦ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

این پژوهش، یک مدل یکپارچه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته را توسعه داد. مدل ریاضی ارایه‌شده، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته است. در این مدل، یک شبکه هفت سطحی و چند محصولی که شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان، مراکز جمع‌آوری، بازیابی و مرکز دفع است، تسهیلات بالقوه موجود مکان‌یابی و تعداد آن‌ها تعیین شد، همچنین سیاست‌های مناسب حمل‌ونقل برای انتقال مواد و محصولات در شبکه تعیین و با وجود دوره‌های زمانی و اعمال هزینه‌های نگهداری بهترین مقدار برای انتقال این اقلام در هر سطح و در هر دوره مشخص شد. لازم به ذکر است که شبکه موجود به دلیل به‌کارگیری تعداد زیادی از اجزای یک شبکه لجستیک، به صورت کلی بوده و صنایع متنوعی را پشتیبانی می‌کند. همچنین به دلیل نگهداری موجودی که امری اجتناب‌ناپذیر است، کلی‌تر و به شرایط موجود در دنیای واقعی نزدیک‌تر است.

در این تحقیق، ابتدا تمام پارامترها، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌ها شناسایی‌شده و سپس با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها که شامل هزینه‌های احداث تسهیلات، هزینه‌های خرید و حمل‌ونقل کالا و هزینه‌های نگهداری موجودی در زنجیره پیشرو می‌شود، مدل‌سازی انجام گرفت. پس از آن با طراحی یک مثال عددی تمام پارامترها مقداردهی و با کدنویسی در نرم‌افزار GAMS حل و خروجی‌ها در جدولی ثبت شد. در ادامه به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی با تغییراتی در مقدار پارامترها تحلیل حساسیت‌های متنوعی انجام شد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها همگی منطقی و قابل قبول بودند و در نتیجه مدل توسعه داده شده می‌تواند در دنیای واقعی نیز در صنایع متنوع از جمله ساخت لوازم خانگی، خودروسازی و غیره به‌کارگیری شود. برای تحقیقات آتی پژوهش موارد زیر پیشنهاد می‌شود؛ ورود هزینه‌های کمبود اقلام، هزینه‌های تأخیر، سفارش‌دهی به مدل، در نظر گرفتن پارامترهایی مثل نرخ‌های دفع و بازیابی و تقاضای مشتریان به صورت تصادفی، افزودن اهداف بیشتر به مدل مانند کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی و در نظر گرفتن نگهداری موجودی در زنجیره پسرو.

## منابع


[1] Moradi, M. Salahi, M. Bardsiri, M, Jamalian, A. (2014). A New Robust Model in Designing Supply Chain with Uncertainty, Journal of Operational Research and Its Applications. 11 (2), 9-26. [In Persian].

[2] Yadegari, E., Behmanesh, E., Alem Tabriz, A., Farzad, F. (2013). Considering Mixture Facilities in Designing Closed Loop Supply Chain. Journal of Operational Research and Its Applications. 10 (3), 41-50. [In Persian].

[3] Moubed. M. Zare Mehrjerdi, Y. (2017). Reverse Supply Chain: Components, Modeling and Real Examples. Mehrjerd Publication, Tehran. [In Persian].

[4] Talaei, M., Farhangh-moghadam, B., Pishvaei, M., Bozorgi-amiri, A. (2017). A Bi-Objective Facility Location Model for A Green Closed-Loop Supply Chain Network Design. *Journal of Transportation Research*, 13(4), 20-32. [In Persian].

[5] Kolyaei M, Azar A, Amini M, Rajabzadeh Gatari A. (2016) Design of integrated mathematical model for closed-loop supply chain. Management Research in Iran. 20 (1), 1-32. [In Persian].

[6] karbasiyan, S., razavi, S., sfari, H. (2016). Determining Location and Capacity of Members in a Closed Loop Supply Chain. *Iranian Journal of Trade Studies*, 20(78), 1-28. [In Persian].

[7] mohamadnejad, M., nakhaei kama abadi, I., Sadeghian, R., Ahmadi zar, F. (2017). Joint Pricing and Inventory Routing Modeling in a Two Echelon Closed Supply Chain. *Economic Modeling*, 11(37), 101-127. [In Persian].




[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]

[8] Tarin N, Azar A, Ebrahimi S. Integrated reverse logistics network design considering the quality of returned products using genetic algorithms. Journal of Operational Research and Its Applications. 2017; 14 (1). 137-156. [In Persian].
[9] Rashidi Komijan, A. Lotfi, MR. and Taghavi SM. (2015). An Integrated Forward and Reverse Supply Chain to Detrmine Facilities Location and Transportation Policies, International Journal of Industrial Engineering and Production Management. 26 (2). 157-169. [In Persian].
[10] Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-ruwaard, J.M., Wassenhove, L., (2001). The impact of product recovery on logistics network design. Production and Operations Management, 10 (2), 156-173.
[11] Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P., Novaise, A.Q., (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainly, European Journal of Operational Research, 179, 1063-1077.
[12] Üster, H., Easwaran, G., Elif Akçali, E., Sila Çetinkaya, S., (2007). Benders decomposition with alternative multiplecuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. Naval Research Logistics, 54 (8), 890–907.
[13] Listes, O., (2007). A generic stochastic model for supply and-return network design. Computer & Operation Research 34 (2), 417-442.
[14] Ko, H.J., Evans, G.W., (2007). A genetic-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. Computers & Operations Research, 34, 346–366.
[15] Lee, D., Dong, M., (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of- lease computer products recovery. Transportation Research Part E, 44, 455–474.
[16] Min, H., Ko, H.J., (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of thirdparty logistics service providers. International Journal of Production Economics, 113, 176-192.
[17] Lu, Z., Bostel, N., (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities, Computers & Operations Research, 34, 299-323.
[18] Pishvaee, M.S., Zanjirani, R., Dullaert, W., (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design, Computers & Operations Research, 37, 1100-1112.
[19] Wang H-F., Hsu H-W., (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. Computers & Operations Research, 37, 376-389.
[20] Kannan, G., Sasikumar, P., Devika, K., (2010). A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: a case of battery recycling. Applied Mathematical Modelling, 34, 655-670.
[21] Pishvaee, M.S., Rabbani, M., Torabi, S.A., (2011). A robust optimization approach to closedloop supply chain networkdesign under uncertainty. Applied Mathematical Modelling, 35, 637-649.
[22] Paksoy, T., Bektas, T., Özceylan, E., (2011). Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain. Transportation Research Part E, 47, 532-546.
[23] Hasanzade Amin, S., Baki, F., (2017). A Facility location model for global closed-loop supply chain network design. Applied Mathematical Modelling, 41, 316-330.
[24] Zhalechian, M., Tavakoli-Moghadam, R., Zahiri, B., Mohammadi, M., (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainly. Transportation Research Part E. 89, 182-214.
[25] Ahmadzade, E., Behnam V., (2017). A location-inventory-pricing model in a closed-loop supply chain network with correlated demand and shortage under a periodic review system. Computers & Chemical Engineering, 101, 148-166.
[26] Mohammadpour Tosakani, B., Hassanzade Amin, S., (2017). A possibilistic solution to configure a battery closed-loop supply chain: Multi-objective approach. Expert system with Applications, 92, 12-26.
[27] Kaoud, E., Abdel-Aal, M.A.M., Sakaguchi, T., Uchiyama, N., (2020). Design and Optimization of the Dual-Channel Closed Loop Supply Chain with E-Commerce, *Sustainability*, 12(23), 1-21.
[28] Seifbarghy, M., Malekpour Kolbadinejhad, S. (2020). Development of a closed loop supply chain network considering environmental factors and location-inventory decisions under uncertainty. *Iranian Journal of Supply Chain Management*, 22(67), 4-22. [in Persian].
[29] https://nadizadeh.blogsky.com

[ Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22517286.2021.18.4.3.2 ]
[ DOI: 10.52547/jamlu.18.4.1 ]