مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال شانزدهم، شماره اول (پیاپی ۶۰)، بهار ۹۸، ص ص ۴۹-۲۹
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی احتمالی با در نظر گرفتن تخفیف و حل به کمک الگوریتم کرم شب‌تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت

میثم جعفری اسکندری[1*]، ندا مقدم شبیلو[2]
۱- استادیار، دانشگاه پیام نور، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران
۲- کارشناس ارشد، دانشگاه پیام نور، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

رسید مقاله: ۵ دی ۱۳۹۵
پذیرش مقاله: ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۷

چکیده
زنجیره تأمین حلقه بسته به دلیل عامل‌های زیست‌محیطی و کسب‌وکار در حال تبدیل‌شدن به یکی از مهم‌ترین حوزه‌های صنعت است. برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته مناسب، سود بیش‌تر، رضایت مشتری و یک تصویر اجتماعی خوب برای شرکت به ارمغان می‌آورد. درحالی‌که بیش‌تر شبکه‌های زنجیره تأمین، مجهز به کانال‌های برگشت کالا نیستند، این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای کمینه‌سازی، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های عملیاتی، هزینه خرید کالا و هزینه‌های ثابت احداث در یک شبکه زنجیره تأمین احتمالی چند محصولی را ارایه می‌کند. مدل پیشنهادی، یک مدل زنجیره تأمین چند محصولی احتمالی با امکان تخفیف خرید کالا از تأمین‌کننده می‌باشد. ازآنجایی‌که مسایل طراحی شبکه در دسته مسایل NP-سخت قرار می‌گیرند، در این مقاله از الگوریتم کرم شب‌تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت برای یافتن جواب بهینه نزدیک استفاده‌شده است. برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم پیشنهادی با پنج الگوریتم (الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جنگل، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم زنبورعسل) در هفت معیار مورد مقایسه قرارگرفته است. مقایسه نتایج عددی مرتبط از طریق راه‌حل دقیق و همچنین پنج الگوریتم پیشنهادی در مجموعه‌ای از مسایل نمونه، از ارایه عملکرد باکیفیت بالای الگوریتم کرم شب‌تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت نشان دارد.

کلمات کلیدی: طراحی شبکه زنجیره تأمین، تخفیف خرید کالا، الگوریتم کرم شب‌تاب، رمزگشایی بر پایه اولویت.

۱ مقدمه
زنجیره تأمین، نگرشی است که در سال‌های اخیر موردتوجه سازمان‌ها و شرکت‌ها قرارگرفته است. در این نگرش کلیه اجزا و حلقه‌هایی که برای ارایه محصول و یا خدمت به مشتری در کنار هم قرار دارند، موردتوجه قرارگرفته

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: Meisam_Jafari@pnu.ac.ir

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

و سعی می‌شود تصمیمات راهبردی به‌گونه‌ای اتخاذ گردد که کل زنجیره تأمین در مقابل زنجیره‌های رقیب از کارایی و اثربخشی بیش‌تری برخوردار باشد. یک زنجیره تأمین محدود به اجزا و مکان‌های تولید نبوده؛ بلکه کلیه اجزای تولیدی و خدماتی را از تأمین‌کننده اولیه تا مشتری نهایی در برمی‌گیرد. عدم هماهنگی و یکپارچگی بین بخش‌های مختلف زنجیره تأمین منجر به افزایش هزینه تمام‌شده کالا و به‌تبع آن افزایش قیمت، عدم تحویل به‌موقع محصولات و ... می‌گردد که این امر درنهایت افزایش نارضایتی مصرف‌کنندگان را در پی دارد. اصطلاح مدیریت زنجیره تأمین در اواخر دهه هشتاد میلادی مطرح شد و در دهه نود میلادی به‌صورت گسترده‌تری مورداستفاده قرار گرفت. بیش از این از عباراتی همچون زنجیره تأمین و مدیریت عملیات به‌جای مدیریت زنجیره تأمین استفاده می‌شد.

مدیریت زنجیره تأمین در لغت‌نامه (APICS) به‌عنوان طراحی، برنامه‌ریزی، اجرا، کنترل و نظارت بر فعالیت‌های زنجیره تأمین، باهدف ساخت ارزش خالص، ایجاد یک زیرساخت جامع، اعمال‌نفوذ تدارکات در سراسر جهان، هماهنگی عرضه و تقاضا و اندازه‌گیری عملکرد آن در سطح جهانی تعریف‌شده است. یک زنجیره تأمین نوعی جریان مواد و اطلاعات بین سطوح مختلف یک شبکه تولیدی یا خدماتی است که این شبکه شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده، عمده‌فروش، خرده‌فروش و مشتری نهایی می‌باشد. در سال‌های اخیر، سازمان‌ها و شرکت‌ها بنا به ماهیت محصولات، الزامات قانونی و زیست‌محیطی و همچنین کسب ارزش مجدد، مسئولیت محصولات دورریز را بر عهده می‌گیرند. با در نظر گرفتن موارد اشاره‌شده، شبکه زنجیره تأمین گسترده‌تر و شامل مراکز جمع‌آوری محصولات، بازرسی، تعمیر، بازیافت و انهدام شده است.

طراحی شبکه زنجیره تأمین یکی از مهم‌ترین تصمیمات راهبردی در مدیریت زنجیره تأمین تلقی می‌گردد و شامل تصمیم‌گیری برروی تعداد و مکان تسهیلات، ظرفیت و مقدار جریان بین آن‌ها، تأثیرات هم‌زمان هزینه و سطوح سرویس مشتری می‌باشد. بدون شک مساله تصمیم‌گیری در خصوص مکان‌یابی تسهیلات جزء تصمیمات راهبردی بوده و تغییرات آن در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر نیست. این امر بدین خاطر می‌باشد که تصمیمات عملیاتی بعد از تصمیمات راهبردی اتفاق می‌افتد و پیکربندی شبکه‌های زنجیره تأمین باید برای سطوح عملیاتی تشکیل شود. درگذشته طراحی شبکه زنجیره تأمین بر اساس توابع اقتصادی در نظر گرفته می‌شد؛ امّا امروزه با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، بحث محیط زیست مورد توجه جدی قرار گرفته و به‌عنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده در مدیریت زنجیره تأمین مورد نظر محققان قرار گرفته است. امروزه سرمایه‌گذاری در ساختار زنجیره تأمین با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی، یک موضوع به‌روز و بسیار مهم برای محققان شده و این امر به خاطر خروج عمده‌ای از مخرب‌های زیست‌محیطی از محیط می‌باشد که پیامدهایی ازجمله افزایش گرمای کره زمین را در پی دارد. با وجود این طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن عوامل زیست‌محیطی، صرفاً به خاطر حفاظت از محیط‌زیست و افزایش هزینه سرمایه‌گذاری در این خصوص نبوده؛ بلکه یک کسب‌وکار خوب با سود بیش‌تر محسوب می‌شود [۱].

در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت روزافزون مسایل طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته و معکوس، مقالات متعددی در این زمینه منتشرشده است. اراوندان و پنرسلوام یک مقاله مروری در سال ۲۰۱۴ برای طراحی

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

شبکه‌های لجستیک معکوس و حلقه بسته ارایه دادند. آن‌ها ۳۸۲ مقاله منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۳ را بر اساس سال و مجله منتشرشده، روش حل، توابع هدف و غیره دسته‌بندی و بیان کردند، حدود ٪ ۴۹/۷ از کل مسایل زنجیره تأمین انجام‌شده مربوط به طراحی شبکه‌های لجستیک حلقه بسته و ٪۳۹/۷ از آن‌ها مربوط به طراحی شبکه‌های لجستیک معکوس می‌باشد و تنها ٪۱۰/۶ از مقالات درزمینه‌ی شبکه‌های زنجیره تأمین سبز و پایدار منتشرشده‌اند. همچنین در این تحقیق تنها ٪۱۲/۴ از مقالات منتشرشده، مدل‌هایی با اهداف چندگانه و ٪۸۷/۶ از آن‌ها، مدل‌های تک هدف را شامل می‌شود [۲].

یکی از عمده‌ترین تحقیقاتی که در زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته بیش‌تر موردتوجه قرارگرفته است، پیکربندی شبکه زنجیره تأمین می‌باشد. این زمینه شامل هماهنگی و یکپارچه‌سازی فعالیت‌های کلیدی تجاری از فعالیت‌های خرید مواد اولیه تا توزیع محصولات نهایی به مشتریان است که فرآیند برنامه‌ریزی زنجیره تأمین را ایجاب می‌کند [۳]. در فرآیندهای تصمیم‌گیری عامل اصلی که ممکن است اثربخشی پیکربندی و هماهنگی را در طول زنجیره تأمین تحت تأثیر قرار دهد، عدم قطعیت است. اکثر نویسندگان از مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات برای فرمول‌بندی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته استفاده کرده‌اند. همچنین نویسندگان متعددی برای فرمول‌بندی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز از مدل‌های چندهدفه که می‌توان به حداقل کردن هزینه یا حداکثر کردن سود، پاسخگویی به مشتریان و با توجه به اهمیت مسایل زیست‌محیطی، به بعضی از اهداف که به محیط‌زیست ربط دارند، اشاره کرد که این اهداف متعارض، پیچیدگی حل مدل‌های طراحی شبکه را افزایش می‌دهند. در این بخش به‌مرور ادبیات مربوط به مدل‌های ارایه‌شده در پیکربندی شبکه زنجیره تأمین در مدل‌های قطعی و غیرقطعی توسط نویسندگان مختلف اشاره‌شده است.

فلش‌من و همکاران در سال ۲۰۰۱ یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارایه نمودند. آن‌ها برای بررسی کارایی مدل خود از دو مثال بازسازی دستگاه‌های کپی و بازیافت کاغذ استفاده کردند [۴]. اسچالتمن و همکاران در سال ۲۰۰۳ یک مدل لجستیک معکوس برای جمع‌آوری و بازیافت باتری در آلمان طراحی کردند. آن‌ها از یک‌رویه ترکیبی برای استقرار زنجیره تأمین حلقه بسته استفاده کردند که حاصل یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی شبکه لجستیک معکوس و مدل فرآیند جریان برای بازیافت باتری بود [۵]. ایندرفورس در سال ۲۰۰۵ یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته را که بر اساس برنامه‌ریزی احتمالی در نظر گرفته شده بود مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و نرخ برگشتی محصولات، پارامتری را برای اندازه‌گیری عدم قطعیت در کیفیت تعریف نمودند [۶]. کوینارد و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک مدل ریاضی احتمالی را برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با حل به کمک الگوریتم ژنتیک ارایه نمودند [۷]. لی و چن در سال ۲۰۰۹ یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای تعیین مکان تسهیلات برای بیشینه کردن رضایت مشتریان ارایه کردند. آن‌ها از سیستم ID برای شمارش اقلام جمع‌آوری‌شده در مراکز جمع‌آوری و ارسال آن به مرکز بازسازی‌شده بهره جستند [۸].

ساسیکومار و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای بیشینه‌سازی سود یک شبکه لجستیک معکوس چند سطحی ارایه نمودند. آن‌ها یک مطالعه موردی از بازیافت تایر برای بازار

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

دست‌دوم در این مدل استفاده کردند [۹]. پیشوایی و ترابی در سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته دو هدفه را گسترش دادند که اهداف آن کمینه کردن هزینه کل شبکه و بیشینه کردن پاسخگویی را در شبکه لجستیک شامل می‌شد. آن‌ها از الگوریتم تقلیدی برای حل مساله استفاده نمودند [۱۰]. خواجوی و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک مدل دو هدفه برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه روبه‌جلو و معکوس چند مرحله‌ای با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت ارایه کردند که در آن دو هدف حداقل کردن کل هزینه‌ها و حداکثرسازی پاسخگویی شبکه به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته‌شده است [۱۱]. داس و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عددصحیح آمیخته برای شبکه لجستیک معکوس در سطح تصمیم‌گیری راهبردی ارایه نمودند. آن‌ها در مدل پیشنهادی خود خرده‌فروش‌ها را به‌عنوان یک کانال دوطرفه برای ساخت محصولات جدید، جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده و بازاریابی دوباره محصولات بازیافت شده معرفی کردند [۱۲]. محمود زاده و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک شبکه لجستیک سه سطحی برای عمر محصولات وسایل نقلیه گسترش دادند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح آمیخته برای تعیین مکان‌های اسقاطی در ایران و مقدار بهینه تخصیص مواد بین مراکز ارایه نمودند [۱۳]. دونمز و تورکای نیز در سال ۲۰۱۳یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس ارایه دادند. این مدل جمع‌آوری، دسته‌بندی، بازیافت و انهدام مواد زاید باتری در محل دفن زباله را در برمی‌گرفت و هدف مدل کمینه‌سازی هزینه‌های بازیافت مواد بود [۱۴]. اوزجیلان و همکاران، در سال ۲۰۱۴ یک مدل یکپارچه برای بهینه‌سازی تصمیمات راهبردی مربوط به مقدار جریان کالا در زنجیره‌های روبه‌جلو و معکوس و بهینه‌سازی تصمیمات راهبردی در بالانس خط تولید در زنجیره تأمین معکوس ارایه دادند. آن‌ها مدل غیرخطی عدد صحیح آمیخته را باهدف کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، خرید، بازسازی و عملیات دمونتاژ گسترش دادند [۱۵]. جارج و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک مدل دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های شبکه و بیشینه‌سازی عملکرد خدمات برون‌سپاری گسترش دادندکه به بهینه‌سازی جریان مابین تسهیلات نیز می‌پردازد [۱۶]. سردار و آشحاب در سال ۲۰۱۶ به ارایه یک مدل زنجیره تامین حلقه بسته چند دوره‌ای و چند محصولی پرداختند [۱۷]. کشاورز و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک مدل زنجیره تامین حلقه بسته چند دوره‌ای، چند محصولی و چند هدفه را در شرایط عدم قطعیت مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. فرخی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به توسعه‌یک رویکرد برنامه ریزی فازی استوار برای طراحی زنجیره‌تأمین حلقه بسته پرداختند. آن‌ها در این پژوهش توسعه یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی فازی استوار با استفاده از مفاهیم برنامه‌ریزی با محدودیت های اعتبار و میانگین انحراف مطلق برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت ترکیبی را مورد نظر قرار دادند [۱۹]. در تحقیق دیگری در سال ۱۳۹۶، قهرمانی نهر و همکارانش به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چندهدفه چند محصولی و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت پرداختند. آن‌ها در این مقاله یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته دو هدفه، چند دوره‌ای، چند محصولی با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی و اعمال مفاهیم کمبود قابل جبران و تخفیف، گسترش داده‌اند [۲۰]. با توجه به تحقیقات متعددی

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

که در این حوزه صورت گرفته است، در ادامه به دسته‌بندی تحقیقات حاضر در این زمینه از نظر تابع هدف، نوع زنجیره، روش حل و نوع تقاضا پرداخته و نوآوری تحقیق حاضر را مورد نظر قرار خواهیم داد.

جدول ۱. خلاصه پیشینه تحقیق

ردیف	سال	محققین	تابع هدف		نوع زنجیره		روش حل		تقاضا		
			تک هدفه	چند هدفه	معکوس	حلقه بسته	روش‌های دقیق	فرابتکاری	قطعی	عدم قطعیت	احتمالی
۱	۲۰۱۰	ساسیکومار و همکاران	*		*		*		*		
۲	۲۰۱۰	پیشوایی و همکاران		*		*		*		*	
۳	۲۰۱۲	داس و همکاران	*		*		*		*		
۴	۲۰۱۳	محمودزاده و همکاران		*		*	*			*	
۵	۲۰۱۴	اوزجیلان و همکاران	*		*		*		*		
۶	۲۰۱۵	جارج و همکاران		*	*		*		*		
۷	۲۰۱۶	سردار و آشحاب	*		*		*		*		
۸	۲۰۱۷	کشاورز و همکاران		*		*		*		*	
۹	۱۳۹۵	فرخ و همکاران		*		*		*		*	
۱۰	۱۳۹۶	قهرمانی نهر و همکاران		*		*		*		*	
		پژوهش حاضر	*			*		*		*	*

همان‌طور که در بررسی تحقیقات پیشینه ملاحظه می‌گردد، این تحقیق از جنبه‌های زیر دارای نوآوری می‌باشد:

۱) مدل مساله غیرخطی عدد صحیح آمیخته می‌باشد که تحقیقات محدودی در این حوزه صورت گرفته است.

۲) طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته هفت سطحی

۳) در این مدل مبحث تخفیف کالا به‌عنوان یکی از مولفه‌ها در شرایط واقعی با توجه به چند محصولی که از یک تامین کننده دریافت می‌شود، مدل‌سازی گردیده است.

۴) تقاضا در این مدل به‌صورت احتمالی در نظر گرفته شده است که تاکنون در هیچ تحقیقی این بحث مورد نظر قرار گرفته نشده است.

۵) شاید مهم‌ترین چالش در بهینه‌یابی خصوصاً بهینه‌یابی توسط الگوریتم‌های فراابتکاری، انتخاب الگوریتم مناسب باشد. انتخاب هر الگوریتم به نوع مساله، الگوریتم‌های در دسترس، ابزارهای محاسباتی و قیدهای مساله وابسته است. در مقاله‌ای که توسط شهروزی و صالحی در سال ۱۳۹۶ انجام گرفت، آن‌ها با بررسی هفت الگوریتم بهینه‌یابی به بررسی نحوه عملکرد آن‌ها در حل چهار مساله آزمون پرداختند و به کمک شاخص‌های عملکردی مقایسه‌ای از کیفیت آن‌ها ارایه دادند. نتایج تحلیل نشان داد که الگوریتم‌هایی که شاخص پراکندگی جمعیت در آن‌ها با تکرار برنامه کاهش پیدا کرده؛ امّا به صفر نمی‌رسد، پاسخ-های مناسب‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌ها از خود نشان می‌دهند [۲۱]. در این مقاله نیز الگوریتم مورد استفاده برای حل این مدل، الگوریتم کرم شب‌تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت می‌باشد که علاوه بر

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

اینکه برای اولین بار از این الگوریتم در حل مسایل زنجیره تامین استفاده شده است، پراکندگی جمعیت در آن با تکرار برنامه کاهش پیدا کرده امّا به صفر نمی‌رسد. ما همچنین برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم پیشنهادی را با پنج الگوریتم (الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جنگل، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم زنبورعسل) در هفت معیار مورد مقایسه قرار داده‌ایم.

در بخش بعد به مدل‌سازی شبکه زنجیره‌تأمین پیشنهادی پرداخته‌شده است. به دلیل NP- سخت بودن مساله با افزایش متغیر و ابعاد، مساله پیچیده می‌باشد و حل آن با روش‌های مرسوم دشوار است. برای رفع این مشکل از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده می‌گردد. در بخش سوم الگوریتم کرم شب‌تاب و رمزگشایی بر پایه اولویت تشریح شده است. بخش چهارم به نتایج محاسباتی می‌پردازد و درنهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی بیان خواهد شد.

۲ شرح مساله و مدل پیشنهادی

در این مقاله یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته هفت سطحی در نظر گرفته‌شده است. شبکه روبه‌جلو شامل سطوح تأمین‌کننده محصولات نیمه ساخته، مراکز تولیدی، مراکز توزیع‌کننده محصولات و مشتریان نهایی هستند. شبکه معکوس نیز شامل سطوح مراکز جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده، مراکز تعمیر و مراکز انهدام می‌باشد. مطابق شکل ۱ در مسیر جریان روبه‌جلو، تأمین‌کننده، محصول نیمه ساخته موردنیاز را به مراکز تولیدی ارسال می‌کند. محصولات پس از تولید در مراکز تولیدی برای فروش به مراکز توزیع ارسال می‌شود. مراکز توزیع‌کننده محصولات، پس از دریافت محصولات از مراکز تولیدی، آن‌ها را به مشتریان نهایی ارسال می‌کنند. در مسیر بازگشت نیز، مقداری از محصولات مصرف‌شده توسط مشتری، توسط مرکز جمع‌آوری، جمع‌آوری می‌شود و به مرکز تعمیر ارسال می‌گردد. در مرکز تعمیر پس از بازرسی محصولات، آن دسته از محصولات که قابل تعمیر باشد، پس از تعمیر به مراکز توزیع ارسال می‌شود و مابقی محصولات به‌عنوان محصول قراضه روانه مرکز انهدام می‌گردد. ما همچنین در این مقاله براساس تحقیقی که توسط لیااو و ریچر در سال ۲۰۰۷ میلادی با در نظر گرفتن سیاست تخفیف و استفاده از توزیع نرمال برای تقاضا در نظر گرفته‌اند [۲۲]، در این مقاله تقاضای مشتری از هر محصول و همچنین مقدار محصولات مصرف‌شده توسط مشتریان را به‌صورت احتمالی در نظر گرفته و از توزیع نرمال برای تعریف آن‌ها به‌عنوان پارامتر در مدل استفاده نموده‌ایم.

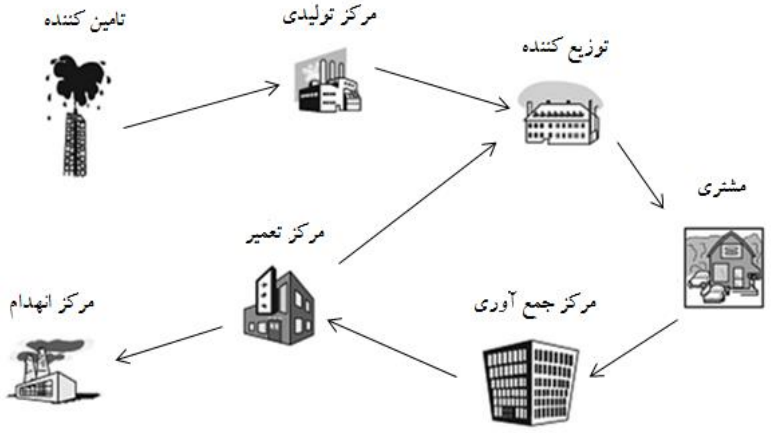
فرض‌های مساله شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی شامل موارد ذیل می‌باشد:

- مدل پیشنهادی شامل چندین محصول متفاوت مرتبط با یک تامین‌کننده می‌باشد.
- تقاضای مشتری از هر محصول امکان‌پذیر بوده و کمبود مجاز نیست.
- تأمین‌کننده، محصولات نیمه ساخته موردنیاز برای تولید محصولات را با یک تخفیف مقداری به فروش می‌رساند.
- ظرفیت تمامی تسهیلات بالقوه محدود و مشخص می‌باشد.

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

- پارامترهای تقاضا، میزان نرخ برگشت محصولات، هزینه‌های حمل‌ونقل و عملیاتی، غیرقطعی و احتمالی در نظر گرفته‌شده است.



شکل ۱. مدل پیشنهادی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

با در نظر گرفتن فرض‌های فوق، مهم‌ترین موضوع اشاره‌شده در این پژوهش، انتخاب و مکان‌یابی مراکز تأمین‌کننده، مراکز تولیدی، مراکز توزیع‌کننده محصولات، مراکز تعمیر و مراکز انهدام و همچنین تعیین مقدار بهینه جریان بین مراکز و سطح مناسب تخفیف می‌باشد.

- **مجموعه، پارامتر و متغیرهای تصمیم**

برای مدل‌سازی مساله، مجموعه پارامتر و متغیرهای تصمیم به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

- **مجموعه‌ها**

I مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز تأمین‌کننده

J مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز تولیدی

K مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز توزیع‌کننده محصولات

C مجموعه نقاط ثابت مشتری

L مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز جمع‌آوری محصولات

M مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز انهدام

N مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز تعمیر

P مجموعه محصول

T مجموعه وسایل نقلیه

H مجموعه سطوح تخفیف

- **پارامترها**

$Dem_{cp} \sim N(\mu_{Dem}, Var_{Dem})$ تقاضای مشتری c از محصول p

$R_{cp} \sim N(\mu_R, Var_R)$ مقدار محصولات مصرف‌شده p از مشتری c

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

φ_{np} ظرفیت تعمیر محصول p در مرکز تعمیر n

F_i هزینه ثابت احداث تأمین‌کننده i

F_i هزینه ثابت احداث مرکز تولیدی j

F_k هزینه ثابت احداث مرکز توزیع k

F_l هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری l

F_n هزینه ثابت احداث مرکز تعمیر n

F_m هزینه ثابت احداث مرکز انهدام m

TC_{ijpt} هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول p توسط وسیله نقلیه tبین مراکز iو j

TC_{jkpt} هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول p توسط وسیله نقلیه t بین مراکز j و k

TC_{kcpt} هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول p توسط وسیله نقلیه tبین مراکز kو c

TC_{clpt} هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول p توسط وسیله نقلیه tبین مراکز c و l

TC_{nkpt} هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول p توسط وسیله نقلیه tبین مراکز nو k

TC_{nmpt} هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول p توسط وسیله نقلیه tبین مراکز nو m

TC_{lnpt} هزینه حمل‌ونقل یک واحد محصول p توسط وسیله نقلیه tبین مراکز l و n

C_{jp} هزینه تولید یک واحد محصول p در مرکز تولیدی j

C_{kp} هزینه توزیع یک واحد محصول p در مرکز توزیع k

C_{lp} هزینه جمع‌آوری یک واحد محصول p در مرکز جمع‌آوری l

C_{np} هزینه تعمیر بازرسی یک واحد محصول p در مرکز تعمیر n

C_{mp} هزینه انهدام یک واحد محصول p در مرکز انهدام m

Cap_{ip} ظرفیت تأمین‌کننده iاز محصول p

Cap_{jp} ظرفیت مرکز تولیدی j از محصول p

Cap_{kp} ظرفیت مرکز توزیع K از محصول p

Cap_{lp} ظرفیت مرکز جمع‌آوری lاز محصول p

Cap_{np} ظرفیت مرکز تعمیر nاز محصول p

Cap_{mp} ظرفیت مرکز انهدام mاز محصول p

VA_{ihp} حد پایین بازه تخفیف محصول p از سوی تأمین‌کننده iدر سطح تخفیف h

P_{ihp} قیمت خرید محصول p از تأمین‌کننده iدر سطح تخفیف h

- **متغیرهای تصمیم**

$X1_{ijpt}$ مقدار محصول p انتقال‌یافته بین مراکز iو j توسط وسیله نقلیه t

$X2_{jkpt}$ مقدار محصول p تولیدشده و انتقال‌یافته بین مراکز j و k توسط وسیله نقلیه t

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

$X3_{kcpt}$ مقدار محصول p انتقال‌یافته بین مراکز k و c توسط وسیله نقلیه t

$X4_{clpt}$ مقدار محصول p برگشتی و انتقال‌یافته بین مراکز c و l توسط وسیله نقلیه t

$X5_{lnpt}$ مقدار محصول p انتقال‌یافته بین مراکز l و n توسط وسیله نقلیه t

$X6_{nmpt}$ مقدار محصول p قراضه و انتقال‌یافته بین مراکز n و m توسط وسیله نقلیه t

$X7^{r}_{nkpt}$ مقدار محصول p تعمیر شده و انتقال‌یافته بین مراکز n و k توسط وسیله نقلیه t

$X8^{r}_{kcpt}$ مقدار محصول p تعمیر شده و انتقال‌یافته بین مراکز k و c توسط وسیله نقلیه t

Q_{ip} مقدار کل خرید محصول p از تأمین‌کننده i

Z_i اگر تأمین‌کننده i احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر

Z_j اگر مرکز تولیدی j احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر

Z_k اگر مرکز توزیع k احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر

Z_l اگر مرکز جمع‌آوری l احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر

Z_n اگر مرکز تعمیر n احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر

Z_m اگر مرکز انهدام m احداث گردد، یک و در غیر این صورت صفر

A_{ihp} اگر تأمین‌کننده i در سطح تخفیف h برای محصول p انتخاب گردد، یک و در غیر این صورت صفر

با توجه به مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم بیان‌شده، مساله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی به‌عنوان یک مدل احتمالی برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی عدد صحیح آمیخته به‌صورت ذیل مدل‌سازی می‌شود:

$$
\begin{aligned}
Min\ E[\mathrm{W}] = {} & \sum_{i=1}^{I} F_i Z_i + \sum_{j=1}^{J} F_j Z_j + \sum_{k=1}^{K} F_k Z_k + \sum_{l=1}^{L} F_l Z_l + \sum_{n=1}^{N} F_n Z_n + \\
& \sum_{m=1}^{M} F_m Z_m + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[Tc]_{ijpt} X1_{ijpt} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[Tc]_{jkpt} X2_{jkpt} + \\
& \sum_{k=1}^{K}\sum_{c=1}^{C}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[Tc]_{kcpt} (X3_{kcpt} + X8^{r}_{kcpt}) + \sum_{c=1}^{C}\sum_{l=1}^{L}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[Tc]_{clpt} X4_{clpt} + \\
& \sum_{l=1}^{L}\sum_{n=1}^{N}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[\widetilde{Tc}]_{lnpt} \widetilde{X} 5_{lnpt} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[\widetilde{Tc}]_{nkpt} \widetilde{X} 7^{r}_{nkpt} + \\
& \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[\widetilde{Tc}]_{nmpt} \widetilde{X} 6_{nmpt} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[\widetilde{C}]_{jp} \widetilde{X} 2_{jkpt} + \\
& \sum_{k=1}^{K}\sum_{c=1}^{C}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[\widetilde{C}]_{kp} (\widetilde{X} 3_{kcpt} + \widetilde{X} 8^{r}_{kcpt}) + \sum_{c=1}^{C}\sum_{l=1}^{L}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[\widetilde{C}]_{lp} \widetilde{X} 4_{clpt} + \\
& \sum_{l=1}^{L}\sum_{n=1}^{N}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[\widetilde{C}]_{np} \widetilde{X} 5_{lnpt} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} E[\widetilde{C}]_{mp} \widetilde{X} 6_{nmpt} + \\
& \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{h=1}^{H} E[\widetilde{P}]_{ihp} A_{ihp} X1_{ijpt}
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

s.t.

$$P\{\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X3_{kcpt} + \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X8^{r}_{kcpt} \geq Dem_{cp}\} \geq 1-\alpha \qquad \forall c, p \tag{2}$$

$$P\{\sum_{l=1}^{L}\sum_{t=1}^{T} X4_{clpt} \geq R_{cp}\} \geq 1-\beta \qquad \forall c, p \tag{3}$$

$$\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T} X4_{clpt} = \sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} X5_{lnpt} \qquad \forall l, p \tag{4}$$

$$\varphi_{np}\sum_{l=1}^{L}\sum_{t=1}^{T} X5_{lnpt} = \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X7^{r}_{nkpt} \qquad \forall n, p \tag{5}$$

$$(1-\varphi_{np})\sum_{l=1}^{L}\sum_{t=1}^{T} X5_{lnpt} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} X6_{nmpt} \qquad \forall n, p \tag{6}$$

$$\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T} X8^{r}_{kcpt} = \sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} X7^{r}_{nkpt} \qquad \forall k, p \tag{7}$$

$$\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T} X3_{kcpt} = \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X2_{jkpt} \qquad \forall j, p \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} X1_{ijpt} = \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X2_{jkpt} \qquad \forall j, p \tag{9}$$

$$A_{ihp} VA_{ihp} \leq Q_{ip} \qquad \forall i, p, h \tag{10}$$

$$\sum_{h=1}^{H} A_{ihp} = Z_i \qquad \forall i, p \tag{11}$$

$$Q_{ip} = \sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T} X1_{ijpt} \qquad \forall i, p \tag{12}$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T} X1_{ijpt} \leq Cap_{ip} Z_i \qquad \forall i, p \tag{13}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X2_{jkpt} \leq Cap_{jp} Z_j \qquad \forall j, p \tag{14}$$

$$\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T} X3_{kcpt} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T} X8^{r}_{kcpt} \leq Cap_{kp} Z_k \qquad \forall k, p \tag{15}$$

$$\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T} X4_{clpt} \leq Cap_{lp} Z_l \qquad \forall l, p \tag{16}$$

$$\sum_{l=1}^{L}\sum_{t=1}^{T} X5_{lnpt} \leq Cap_{np} Z_n \qquad \forall n, p \tag{17}$$

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} X6_{nmpt} \leq Cap_{mp} Z_m \qquad \forall m, p \tag{18}$$

$$X1_{ijpt}, X2_{jkpt}, X3_{kcpt}, X4_{clpt}, X5_{lnpt}, X6_{nmpt}, X7^{r}_{nkpt}, X8^{r}_{kcpt}, Q_{ip} \geq 0 \tag{19}$$

$$A_{ihp}, Z_i, Z_j, Z_k, Z_l, Z_n, Z_m \in [0,1] \tag{20}$$

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

تابع هدف اول ارزش انتظاری هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی را کمینه می‌کند. این هزینه‌ها به ترتیب شامل هزینه ثابت احداث مراکز و تسهیلات، هزینه‌های حمل‌ونقل محصولات، هزینه خرید محصول و هزینه‌های عملیاتی در هرکدام از مراکز می‌باشد. محدودیت (۲) بیان کننده میزان برآورده شدن تقاضای مشتری از همه محصولات درخواستی با احتمال $\alpha-1$ می باشد. محدودیت (۳) میزان برگشت محصولات مصرف‌شده به مرکز جمع‌آوری را با احتمال $\beta-1$ نشان می‌دهد. محدودیت (۴) نشان می‌دهد مرکز جمع‌آوری تمامی محصولات جمع شده را به مرکز تعمیر ارسال می‌کند. محدودیت‌های (۵) و (۶) به ترتیب درصدی از محصولات قابل تعمیر و قراضه را مشخص می‌کند. محدودیت (۷) نشان می‌دهد تمامی محصولات تعمیر شده توسط مرکز توزیع، برای فروش به مشتری ارسال می‌شود. محدودیت (۸) میزان تولید محصولات برای برآورده کردن تقاضا را نشان می‌دهد. محدودیت (۹) میزان ارسال محصولات را از تأمین‌کننده به مرکز تولیدی نشان می‌دهد که این محصولات بدون کسری به مرکز توزیع ارسال می‌گردد. محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۲) محدودیت‌های اعمال تخفیف را از سوی تأمین‌کننده نشان می‌دهد. به‌طوری‌که محدودیت (۱۰) کل میزان خرید محصول را از هر تأمین‌کننده و تنها در یک بازه تخفیف نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند درصورتی‌که تأمین‌کننده‌ای انتخاب گردد، تنها از یک سطح تخفیف آن می‌توان محصولات نیمه ساخته خریداری کرد. محدودیت (۱۲) میزان انتقال محصولات را به هر مرکز تولیدی نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۳) تا (۱۸) نیز محدودیت‌های ظرفیت مراکز و تسهیلات را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند تا زمانی که تسهیلی انتخاب‌نشده باشد، نمی‌توان از ظرفیت معادل آن استفاده نمود. محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) نیز نوع متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

برای قطعی‌سازی محدودیت‌های (۲) و (۳) معادل آن‌ها را در حالت قطعی در نظر می‌گیریم. برای این منظور برای محدودیت (۲) معادلات زیر را انجام می‌دهیم (علامت فلش بیان‌کننده معادل بودن رابطه قبل با رابطه روبه‌روی فلش می‌باشد).

$$P\{\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X3_{kcpt} + \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X\lambda_{kcpt}^{r} \geq Dem_{cp}\} \geq 1-\alpha$$

$$\rightarrow P\{\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X3_{kcpt} + \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X\lambda_{kcpt}^{r} - Dem_{cp} \geq 0\} \geq 1-\alpha$$

$$\rightarrow Dem_{cp} - \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X3_{kcpt} - \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X\lambda_{kcpt}^{r} \leq 0$$

$$\sim N(\mu_{Dem} - \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X3_{kcpt} - \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X\lambda_{kcpt}^{r}, Var_{Dem})$$

$$\rightarrow P\{Z \leq \frac{\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X3_{kcpt} + \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X\lambda_{kcpt}^{r} - \mu_{Dem}}{\sqrt{Var_{Dem}}}\} \geq 1-\alpha$$

$$\rightarrow \frac{\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X3_{kcpt} + \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X\lambda_{kcpt}^{r} - \mu_{Dem}}{\sqrt{Var_{Dem}}} \geq Z_{1-\alpha}$$

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

$$\rightarrow \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X\mathfrak{r}_{kcpt} + \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} X\lambda_{kcpt}^{r} \geq Z_{1-\alpha}\sqrt{Var_{Dem}} + \mu_{Dem}$$

همین مراحل را نیز برای محدودیت (۳) انجام داده تا دو محدودیت فوق به صورت قطعی در مدل مورد نظر قرار گیرند.

مدل پیشنهادی این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته غیرخطی با $(IJ + JK + KC + CL + LM + MK + KN) * PT$ متغیر پیوسته و $(I + J + K + L + M + N + A)$ متغیر صفر و یک می‌باشد. NP–سخت بودن مسایل طراحی شبکه زنجیره تأمین در بسیاری از مقالات اثبات‌شده است. مدل پیشنهادی در این مقاله شامل دو مساله کلی است، مساله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار و بهینه‌سازی جریان؛ بنابراین مدل به یک مساله مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار تبدیل می‌شود. درحالی‌که این مساله نیز یک مساله ان پی کامل است [۲۳]. با توجه به موارد ذکرشده، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی این مقاله نیز یک مدل NP–سخت می‌باشد. حل این مساله در اندازه بزرگ به روش دقیق بسیار زمان‌بر می‌باشد؛ بنابراین الگوریتم‌های فرا ابتکاری بسیاری برای این نوع مساله توسعه داده شده است تا جواب نزدیک به جواب بهینه را در زمان کم‌تر را ارایه نماید. در این مقاله یک الگوریتم کرم شب‌تاب بر اساس رمزگشایی بر پایه اولویت استفاده‌شده است. در پایان جهت بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم پیشنهادی با پنج الگوریتم (الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جنگل، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم زنبور عسل) در هفت معیار مورد مقایسه قرار گرفته است.

۳ الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب به‌عنوان یکی از جدیدترین الگوریتم‌های الگوبرداری شده از طبیعت مطرح است که توانسته در عین سادگی و جذابیت توانایی خود را در حل مسایل بهینه‌سازی به اثبات برساند. بعضی از کرم‌های شب‌تاب مناطق گرمسیری می‌توانند عمل چشمک‌زدنشان را به‌طور هم‌زمان انجام دهند، بدین ترتیب رفتار خودسازمان‌دهی زیستی خود را نمایان می‌کنند. می‌دانیم که شدت نور در فاصله مشخص r از منبع نور از قانون مربع معکوس پیروی می‌کند. درواقع می‌توان گفت با توجه به عبارت $I\propto 1/r^{2}$ شدت نور I با افزایش فاصله r، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هوا نور را جذب می‌کند که باعث ضعیف شدن نور با افزایش فاصله می‌گردد. ادغام این دو عامل باعث می‌شود که کرم‌های شب‌تاب، قدرت دیداری را در یک‌فاصله محدودی داشته باشند. با کشف ارتباط بین میزان نور کرم‌های شب‌تاب و تابع هدف مساله می‌توان در جهت بهینه‌سازی آن مساله اقدام نمود. آنچه در الگوریتم کرم شب‌تاب بسیار مهم است، تغییر شدت نور و فرمول‌بندی میزان جذابیت می‌باشد. برای سادگی، می‌توان فرض کرد که میزان جذابیت یک کرم شب‌تاب به‌وسیله میزان روشنایی آن، که به‌نوبه خود با مقدار تابع هدف متناظر آن جواب در ارتباط است، مشخص شود. بر اساس منطق الگوریتم کرم شب‌تاب، می‌توان گام‌های پایه‌ای این الگوریتم را طبق شبه کد زیر خلاصه کرد:

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

- تعریف تابع هدف، متغیرها و پارامترهای الگوریتم $f(x), x=(x_1, x_2, x_3, ..., x_d)^T$

تعریف جمعیت اولیه از کرم‌های شب‌تاب $i = 1, ..., n$ x_i

محاسبه میزان درخشندگی هر کرم شب‌تاب (I_i) توسط رابطه $f(x_i)$

تعریف ضریب تأثیر γ

- تا زمانی که شرط توقف ایجاد نشده است

به ازای همه کرم‌های شب‌تاب $i = 1, ..., n$

به ازای همه کرم‌های شب‌تاب $j = 1, ..., n$

اگر $I_i \leq I_j$ ، کرم شب‌تاب i به سمت کرم شب‌تاب j حرکت می‌کند.

اتمام شرط

محاسبه تأثیر فاصله r به کمک رابطه $exp[-\gamma^r]$

اتمام حلقه J، اتمام حلقه I

مرتب کردن کرم‌های شب‌تاب بر اساس میزان درخشندگی و انتخاب بهترین کرم شب‌تاب (g^*)

اتمام حلقه

- مشاهده نتایج

شکل ۲. شبه کد الگوریتم کرم شب‌تاب

۳-۱ ایجاد جواب اولیه بر مبنای رمزگشایی بر پایه اولویت و نحوه نمایش جواب

روش‌های متفاوتی برای حل مسایل زنجیره تأمین توسعه داده‌شده است که یکی از آن‌ها روش رمزگشایی ماتریس است که توسط میشلویچ، توسعه داده‌شده است. رویکرد این روش یک ماتریس $|J|.|K|$ می‌باشد که J تعداد منابع و K تعداد انبارها را نشان می‌دهد [۲۴].

در این مقاله روش حل بر پایه الگوریتم کرم شب‌تاب و الگوریتم ارایه شده توسط ژن و همکاران [۲۵]، بر پایه اولویت و الگوریتم رمزگشایی مساله زنجیره تأمین حلقه بسته بر اساس آرایه‌هایی با اندازه $|J|+|K|$ و موقعیت همه سلول‌ها تعداد منابع و انبارها، به ارایه یک الگوریتم فراابتکاری جدید برای این مساله پرداختیم. در این الگوریتم در هر تکرار، گره (منبع یا انبار) با بزرگ‌ترین اولویت انتخاب می‌شود و به گره دیگر (انبار یا منبع) با کم‌ترین هزینه حمل‌ونقل وصل می‌شود. پس از آن کم‌ترین مقدار (ظرفیت منبع یا تقاضای انبار) به‌عنوان مقدار انتقال تخصیص داده می‌شود. این مساله تا زمانی که همه تقاضای انبارها برآورده نشده است ادامه می‌یابد، سپس منابعی که به انبارها متصل شده‌اند به‌عنوان تسهیلات بالفعل انتخاب می‌شود. در شکل ۳ الگوریتم پیشنهادی در این مقاله با رمزگشایی در مساله زنجیره تأمین حلقه بسته بر پایه اولویت مورد نظر قرار گرفته است.

Step 1:
$$Z_i = 0, Z_j = 0, Z_k = 0, Z_l = 0, Z_n = 0, Z_m = 0$$
$$, X1_{ijpt} = 0, X2_{jkpt} = 0, X3_{kcpt} = 0, X4_{clpt} = 0, X5_{lnpt} = 0,$$
$$X6_{nmpt} = 0, X7^r_{nkpt} = 0, X8^r_{kcpt} = 0, A_{ihp} = 0,$$
$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, c \in C, l \in L, m \in M, n \in N, h \in H$$

Step 2: For $p = 1$ to $p = P$

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

calculate $X\lambda_{kcpt}^{T} = (X\lambda_{kcpt}^{r} + X\mathrm{٣}_{kcpt}), \forall k \in K, c \in C, t \in T$ using Gen and Cheng's decoding algorithm

For $k = \mathrm{١}$ to $k = K$

if $\sum_{c=\mathrm{١}}^{C}\sum_{p=\mathrm{١}}^{P}\sum_{t=\mathrm{١}}^{T} X\lambda_{kcpt}^{T} \geq \mathrm{٠}$ then $Z_k = \mathrm{١}$

Step 3: For $p = \mathrm{١}$ to $p = P$

calculate $X\mathrm{٤}_{clpt}, \forall c \in C, l \in L, t \in T$ using Gen and Cheng's decoding algorithm

For $l = \mathrm{١}$ to $l = L$

if $\sum_{c=\mathrm{١}}^{C}\sum_{p=\mathrm{١}}^{P}\sum_{t=\mathrm{١}}^{T} X\mathrm{٤}_{clpt} \geq \mathrm{٠}$ then $Z_l = \mathrm{١}$

Step 4: For $p = \mathrm{١}$ to $p = P$

calculate $X\mathrm{٥}_{lnpt}, \forall l \in L, \mathrm{n} \in N, t \in T$ using Gen and Cheng's decoding algorithm

For $n = \mathrm{١}$ to $n = N$

if $\sum_{l=\mathrm{١}}^{L}\sum_{p=\mathrm{١}}^{P}\sum_{t=\mathrm{١}}^{T} X\mathrm{٥}_{lnpt} \geq \mathrm{٠}$ then $Z_n = \mathrm{١}$

Step 5: For $p = \mathrm{١}$ to $p = P$

calculate $X\mathrm{٧}_{nkpt}^{r}, \forall n \in N, \mathrm{k} \in K, t \in T$ using Gen and Cheng's decoding algorithm

Step 6: For $p = \mathrm{١}$ to $p = P$

calculate $X\mathrm{٢}_{jkpt} = (\mathrm{X}\lambda_{kcpt}^{T} - X\mathrm{٧}_{nkpt}^{r}), \forall j \in J, \mathrm{k} \in K, t \in T$ using Gen and Cheng's decoding algorithm

For $j = \mathrm{١}$ to $j = J$

if $\sum_{k=\mathrm{١}}^{K}\sum_{p=\mathrm{١}}^{P}\sum_{t=\mathrm{١}}^{T} X\mathrm{٢}_{jkpt} \geq \mathrm{٠}$ then $Z_j = \mathrm{١}$

Step 7: For $p = \mathrm{١}$ to $p = P$

calculate $X\mathrm{١}_{ijpt}, \forall i \in I, \mathrm{j} \in J, t \in T$ using Gen and Cheng's decoding algorithm

For $i = \mathrm{١}$ to $i = I$

if $\sum_{j=\mathrm{١}}^{J}\sum_{p=\mathrm{١}}^{P}\sum_{t=\mathrm{١}}^{T} X\mathrm{١}_{ijpt} \geq \mathrm{٠}$ then $Z_i = \mathrm{١}$

Step 8: For $p = \mathrm{١}$ to $p = P$

calculate $X\mathrm{٦}_{nmpt}, \forall n \in N, \mathrm{m} \in M, t \in T$ using Gen and Cheng's decoding algorithm

For $m = \mathrm{١}$ to $m = M$

if $\sum_{n=\mathrm{١}}^{N}\sum_{p=\mathrm{١}}^{P}\sum_{t=\mathrm{١}}^{T} X\mathrm{٦}_{nmpt} \geq \mathrm{٠}$ then $Z_m = \mathrm{١}$

Step 9: For $h = \mathrm{١}$ to $h = H$

For $p = \mathrm{١}$ to $p = P$

if $VA_{iht} \leq \sum_{i=\mathrm{١}}^{I}\sum_{j=\mathrm{١}}^{J}\sum_{t=\mathrm{١}}^{T} X\mathrm{١}_{ijpt} \leq VA_{ih+\mathrm{١}t}$ then $A_{ihp} = \mathrm{١}$

شکل ۳. الگوریتم رمزگشایی مساله زنجیره تأمین حلقه بسته بر پایه اولویت مبتنی بر تحقیق چن و همکاران

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

بدین‌صورت شکل کلی جواب اولیه به‌کار رفته برای رمزگشایی به‌صورت یک ماتریس به‌صورت شکل ۴ می‌باشد. بخش‌های اشاره‌شده در شکل ۴ متناسب با الگوریتم رمزگشایی‌شده در شکل ۳ می‌باشد.

تکرار	بخش۱	بخش۲	بخش۳	بخش۴	بخش۵	بخش۶	بخش۷
P	$\|K\|+\|C\|$	$\|C\|+\|L\|$	$\|L\|+\|N\|$	$\|N\|+\|K\|$	$\|K\|+\|J\|$	$\|I\|+\|J\|$	$\|N\|+\|M\|$

شکل ٤. جواب اولیه به‌کاررفته برای رمزگشایی بر پایه اولویت

٤ نتایج حل

در این بخش نتایج محاسباتی به‌منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی ارایه می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته توسط محققان این مقاله، اطلاعات واقعی در این زمینه برای اعلام به‌عنوان ورودی‌های مدل فوق به‌دست نیامد، از این رو برای اجرای مدل با ایجاد داده‌های تصادفی برای بررسی و صحت مدل پرداختیم. در گام اوّل جهت تایید مدل، یک مثال عددی کوچک شبیه‌سازی گردید و به کمک نرم افزار *GAMS* نتایج مدل تحلیل و اعتبار مدل مورد تایید قرار گرفت.

در ادامه ما به شبیه‌سازی ۱۵ مساله در ۱۰ اندازه با تکرار ۱۰۰ مرتبه از هر مساله (براساس پیشنهاد روش تاگوچی به جای انجام ۱۰۰۰ مرتبه تکرار) و انتخاب میانگین نتایج به اجرای مدل به کمک نرم‌افزار *MATLAB* پرداختیم. ابعاد مسایل طراحی‌شده به همراه جدول پارامترهای موردنیاز به ترتیب در جدول ۲ و ۳ نشان داده‌شده است.

جدول ۲. پارامترها و حدود داده‌های اسمی استفاده‌شده در مدل‌سازی

$Dem_{cp} \sim N(\mu_{Dem}, Var_{Dem})$	~((۳۰۰،۴۰۰)،(۳۰،۴۰))	TC_{ijpt}	~(۱۰،۲۰)
$R_{cp} \sim N(\mu_R, Var_R)$	~((۳۰،۴۰)،(۳،۴))	TC_{jkpt}	~(۱۰،۲۰)
φ_{np}	~(۰/۵،۰)	TC_{kcpt}	~(۱۰،۲۰)
F_i	~(۱۰۰۰۰۰۰،۱۲۰۰۰۰۰)	TC_{clpt}	~(۱۰،۲۰)
F_i	~(۱۰۰۰۰۰۰،۱۲۰۰۰۰۰)	TC_{nkpt}	~(۱۰،۲۰)
F_k	~(۱۰۰۰۰۰۰،۱۲۰۰۰۰۰)	TC_{nmpt}	~(۱۰،۲۰)
F_l	~(۱۰۰۰۰۰۰،۱۲۰۰۰۰۰)	TC_{lnpt}	~(۱۰،۲۰)
F_n	~(۱۰۰۰۰۰۰،۱۲۰۰۰۰۰)	C_{jp}	~(۵،۸)
F_m	~(۱۰۰۰۰۰۰،۱۲۰۰۰۰۰)	C_{kp}	~(۵،۸)
Cap_{ip}	~(۳۶۰۰،۴۵۰۰)	C_{lp}	~(۵،۸)
Cap_{jp}	~(۳۶۰۰،۴۵۰۰)	C_{np}	~(۵،۸)
Cap_{kp}	~(۳۶۰۰،۴۵۰۰)	C_{mp}	~(۵،۸)
Cap_{lp}	~(۳۶۰،۴۵۰)	Cap_{np}	~(۳۶۰،۴۵۰)
Cap_{mp}	~(۳۶۰،۴۵۰)	P_{ihp}	~(۸/h،۹/h)

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

جدول ۳. اندازه مسایل تولیدشده

مساله نمونه		مساله نمونه	
$(\|I\|,\|J\|,\|K\|,\|C\|,\|L\|,\|M\|,\|N\|,\|P\|,\|T\|,\|H\|)$		(۱۱،۱۰،۷،۱۴،۷،۶،۶،۶،۵،۴)	۸
(۳،۳،۳،۶،۲،۲،۲،۲،۲،۲)	۱	(۱۲،۱۰،۷،۱۵،۸،۶،۸،۷،۶،۴)	۹
(۳،۳،۳،۶،۲،۲،۴،۲،۲،۲)	۲	(۱۲،۱۰،۹،۱۸،۸،۷،۸،۷،۶،۴)	۱۰
(۵،۴،۴،۷،۴،۲،۴،۳،۲،۳)	۳	(۱۳،۱۲،۱۱،۱۹،۸،۸،۸،۷،۶،۵)	۱۱
(۶،۴،۵،۸،۵،۲،۵،۴،۲،۳)	۴	(۱۴،۱۲،۱۲،۱۹،۹،۸،۸،۸،۷،۵)	۱۲
(۹،۸،۵،۱۱،۵،۳،۵،۵،۴،۴)	۵	(۱۳،۱۳،۱۲،۲۴،۹،۸،۹،۹،۸،۵)	۱۳
(۱۰،۸،۵،۱۱،۵،۳،۵،۵،۴،۴)	۶	(۱۴،۱۴،۱۵،۲۵،۹،۹،۹،۹،۸،۵)	۱۴
(۱۱،۹،۶،۱۴،۷،۵،۶،۶،۵،۴)	۷	(۱۵،۱۵،۱۶،۲۷،۹،۹،۹،۹،۹،۶)	۱۵

شاید مهم‌ترین چالش در بهینه‌یابی توسط الگوریتم های فراابتکاری، انتخاب پارامترهای مناسب باشد. ما در این مقاله برای بهبود کارایی الگوریتم پیشنهادی به تنظیم پارامترهای اولیه به کمک روش طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی پرداختیم. براین اساس پیشنهاد روش تاگوچی برای این مساله $L_{100}(10^{81})$ است که به معنی انجام ۱۰۰ آزمایش (به‌جای ۱۰۰۰ آزمایش کلی) با تعداد کرم شبتاب ۱۰ و ضریب تاثیر ۱ است که طبق جدول ۴ مورد نظر قرار گرفته است.

جدول ٤. تنظیم پارامتر الگوریتم کرم شب‌تاب به روش تا گوچی

تعداد تکرار	۱۰۰
تعداد کرم شب‌تاب	۱۰
ضریب معادله جذب	۰/۳
ضریب تأثیر	۱

طبق داده‌های جدول ۲ و ابعاد مساله جدول ۳، ۱۵ مساله نمونه در ۱۰ اندازه با تکرار ۱۰۰ مرتبه تولید و توسط نرم‌افزار $GAMS$ و الگوریتم کرم شب‌تاب حل‌شده است. نتایج حاصل از حل این دو راه‌حل در جدول ۵ مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه هر مساله ۱۰۰ بار تکرار گردیده است؛ لذا در این جدول از میانگین نتایج تابع هدف و زمان حل برای مقایسه ۱۰ مساله نمونه استفاده‌شده است. برای مقایسه اختلاف بین دو راه‌حل از رابطه $\%gap = \frac{FA_{answer} - GAMS_{answer}}{GAMS_{answer}} \times ۱۰۰$ استفاده‌شده است.

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

جدول ۵. میانگین نتایج به‌دست‌آمده از انجام محاسبات

شکاف	میانگین زمان حل		میانگین هزینه‌ها		مساله
	GAMS	الگوریتم کرم شب‌تاب پیشنهادی	GAMS	الگوریتم کرم شب‌تاب پیشنهادی	نمونه
۰	۱/۰۳۸	۱/۱۷	۶۶۰۹۴۸۵/۶	۶۶۰۹۴۸۵/۶	۱
۰/۰۵۴	۵/۲۶	۳/۱۲	۹۱۲۵۴۷۵/۵	۹۱۳۰۴۸۵/۵	۲
۰/۷۶	۲۷/۹	۱۲/۵	۱۲۴۴۸۴۰۹/۷	۱۲۵۴۴۰۸۲/۳	۳
۰/۴۴	۱۲/۶۴	۷/۴	۱۲۵۵۴۵۸۸/۲	۱۲۶۱۰۲۵۹/۴	۴
۰/۶۹	۲۵/۴۶	۱۰/۳۶	۱۲۸۹۰۰۶۹/۳	۱۲۹۷۹۸۲۶/۰	۵
۰/۴۵	۴۰/۶۹	۱۸/۹۸	۱۳۴۶۰۰۸۶/۲	۱۳۵۲۱۸۷۲/۶	۶
۰/۹۱	۸۶/۰۲	۲۵/۷	۱۴۴۶۱۶۴۱/۲	۱۴۵۹۴۲۶۸/۳	۷
۰/۹۴	۱۰۱/۲۳	۴۱/۰۲	۱۵۳۸۲۴۵۸/۹	۱۵۵۲۷۶۴۲/۸	۸
۰/۷۹	۴۰۳/۵۰	۵۵/۱۵	۱۷۳۲۱۲۵۸۹/۷	۱۷۴۵۹۱۲۶/۱	۹
۰/۸۵	۵۱۲/۶۹	۹۷/۴۵	۱۸۰۹۶۵۱۰/۲	۱۸۲۵۱۶۴۹/۱	۱۰
۱/۰۳	۱۲۵۹/۶	۱۵۸/۴۵	۱۹۲۹۲۰۶۸/۸	۱۹۴۹۲۶۱۸/۳	۱۱
۱/۸۹	۲۶۴۸/۸۸	۲۱۰/۲۱	۲۰۰۵۵۸۲۹/۹	۲۰۴۴۲۱۸۷/۲	۱۲
۱/۳۲	۴۶۹۸/۳	۴۵۶/۲۳	۲۱۲۱۵۰۱۱/۲	۲۱۴۹۵۷۴۵/۶	۱۳
۱/۱۳	۶۴۷۸/۰	۶۰۲/۳۱	۲۴۸۳۲۴۲۲/۸	۲۵۱۱۳۶۹۶/۲	۱۴
۱/۸۳	۷۶۹۵/۲۵	۷۸۴/۹۹	۲۷۹۵۸۶۸۲/۴	۲۸۴۷۱۵۹۸/۲	۱۵

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم کرم شب‌تاب بسیار نزدیک به جواب‌های دقیق بوده و حتی در مساله نمونه (۱) نیز با آن برابر است. حداکثر اختلاف بین نتایج ٪ ۱/۸۹ می‌باشد، این در حالی است که زمان حل مساله توسط الگوریتم کرم شب‌تاب کم‌تر از ۱۰ درصد نرم‌افزار *GAMS* بوده است، که نشان از کارایی بالای الگوریتم کرم شب‌تاب پیشنهادی دارد.

٤-١ مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم های مشابه

در این مقاله از ۷ معیار مطابق با جدول ۶ برای مقایسه روش پیشنهادی با سایر الگوریتم های مشابه استفاده شده است. الگوریتم‌های مورد مقایسه با الگوریتم پیشنهادی در این مقاله عبارتند از: الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جنگل، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم زنبور عسل.

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

جدول ٦. معیار ارزیابی پژوهش

معیار ارزیابی	توضیحات	رابطه
نرخ موفقیت[1]	تعداد اجراهایی که بعد از آنها تمامی نقاط بهینه محلی و سراسری به دست می‌آیند.	–
معیار کارایی موفق[2]	هر چقدر مقدار کارایی موفق کمتر باشد، الگوریتم عملکرد بهتری داشته است.	$Success\ Performancep = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} N_{FE}}{N_R \times SR}$
میانگین تعداد نقاط بهینه یافت شده[3]	تعداد نقاط بهینه سراسری و محلی در اجراهای مشخص	–
نزدیکی جواب‌های یافت شده[4]	نزدیکی جواب های یافت شده به جواب‌های اصلی	$SA = \frac{1}{\sum_{r=1}^{N_R} Ex(N_{op_r}^M)} \sum_{r=1}^{N_R} Ex(N_{OP_r}^M) \frac{1}{N_{OP_r}^M} \sum_{i=1}^{N_{OP_r}^M} \left\| F_i^M - f_i^M \right\|$
بیشینه بهینه یافت شده[5]	مجموع برازندگی نقاط بهینه تا r امین اجرا بر مجموع مقدار برازندگی نقاط بهینه اصلی تا r امین اجرا	$MPR = \frac{1}{N_R} \sum_{r=1}^{N_R} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{OP_r}} f_i}{\sum_{i=1}^{N_{AP}} F_i} \right)$
نقاط بهینه یافت شده[6]	نقاط بهینه به دست آمده تا r امین اجرا بر نقاط بهینه اصلی تا r امین اجرا	$FPR = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{N_R} \frac{N_{OP_r}}{N_{AP}}$
زمان اجرا[7]	زمان بین شروع و پایان کار الگوریتم	–

یافته‌های مندرج در جدول ۷ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقوله بهترین هزینه اجرا نسبت به دیگر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری داشته است.

جدول ۷. مقایسه روش پیشنهادی و روش های مشابه براساس خروجی بهترین هزینه

الگوریتم زنبورعسل	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم مورچگان	الگوریتم جنگل	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم پیشنهادی	
رتبه پنجم	رتبه ششم	رتبه چهارم	رتبه سوم	رتبه دوم	رتبه اول	نرخ موفقیت
رتبه چهارم	رتبه ششم	رتبه پنجم	رتبه دوم	رتبه سوم	رتبه اول	معیار کارایی موفق
رتبه دوم	رتبه ششم	رتبه پنجم	رتبه چهارم	رتبه سوم	رتبه اول	میانگین تعداد نقاط بهینه یافت شده
رتبه ششم	رتبه پنجم	رتبه چهارم	رتبه سوم	رتبه اول	رتبه دوم	نزدیکی جواب های یافت شده
رتبه چهارم	رتبه ششم	رتبه سوم	رتبه پنجم	رتبه دوم	رتبه اول	بیشینه بهینه یافت شده
رتبه دوم	رتبه ششم	رتبه پنجم	رتبه سوم	رتبه چهارم	رتبه اول	زمان اجرا
رتبه پنجم	رتبه ششم	رتبه چهارم	رتبه سوم	رتبه دوم	رتبه اول	نقاط بهینه یافت شده

[1] Success rate
[2] Performance
[3] Average Number of Optima Found
[4] Success Accuracy
[5] Maximum Peak Ratio
[6] Found Peak Ratio
[7] Run time

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

یافته‌های مندرج در جدول ۸ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقوله زمان نخستین اجرا نسبت به دیگر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری داشته است. جدول ۸ روش‌های بررسی شده را به ترتیب خروجی زمان نخستین اجرا برای هر یک از معیارهای ارزیابی مرتب‌سازی کرده است.

جدول ۸. مقایسه روش پیشنهادی و روش های مشابه براساس خروجی زمان

	الگوریتم زنبور عسل	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم مورچگان	الگوریتم جنگل	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم پیشنهادی
نرخ موفقیت	سومی	پنجمی	ششمی	بیش‌ترین	دومی	بیش‌ترین
معیار کارایی موفق	ششمی	پنجمی	چهارمی	سومی	دومی	بیش‌ترین
میانگین تعداد نقاط بهینه یافت شده	پنجمی	ششمی	چهارمی	سومی	دومی	بیش‌ترین
نزدیکی جواب‌های یافت شده	ششمی	پنجمی	چهارمی	سومی	بیش‌ترین	دومی
بیشینه بهینه یافت شده	ششمی	پنجمی	چهارمی	سومی	دومی	بیش‌ترین
زمان اجرا	ششمی	پنجمی	چهارمی	سومی	بیش‌ترین	بیش‌ترین
نقاط بهینه یافت شده	پنجمی	بیش‌ترین	چهارمی	ششمی	دومی	سومی

یافته‌های مندرج در جدول ۹ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقوله بهترین گره نسبت به دیگر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری داشته است. جدول ۹ روش‌های بررسی شده را به ترتیب خروجی بهترین گره برای هر یک از معیارهای ارزیابی مرتب‌سازی کرده است.

جدول۹. مقایسه روش پیشنهادی و روش‌های مشابه براساس خروجی بهترین گروه

	الگوریتم زنبور عسل	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم مورچگان	الگوریتم جنگل	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم پیشنهادی
نرخ موفقیت	سومی	پنجمی	چهارمی	ششمی	دومی	بیش‌ترین
معیار کارایی موفق	ششمی	پنجمی	چهارمی	سومی	دومی	بیش‌ترین
میانگین تعداد نقاط بهینه یافت‌شده	پنجمی	ششمی	چهارمی	سومی	دومی	بیش‌ترین
نزدیکی جواب‌های یافت‌شده	سومی	ششمی	پنجمی	چهارمی	بیش‌ترین	دومی
بیشینه بهینه یافت‌شده	ششمی	پنجمی	چهارمی	سومی	دومی	بیش‌ترین
زمان اجرا	پنجمی	ششمی	چهارمی	سومی	دومی	بیش‌ترین
نقاط بهینه یافت‌شده	پنجمی	سومی	چهارمی	ششمی	دومی	بیش‌ترین

۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته غیرخطی عدد صحیح آمیخته چند محصولی احتمالی با امکان ارایه تخفیف خرید کالا مطرح گردید. به دلیل NP-سخت بودن مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین، از یک الگوریتم کرم شب‌تاب با رمزگشایی بر پایه اولویت به‌عنوان یک الگوریتم ترکیبی جدید استفاده شد. نتایج محاسباتی از حل ۱۵ مساله نمونه در ۱۰ اندازه متفاوت با اجرای ۱۰۰ مرتبه از هر مساله (بر مبنای پیشنهاد روش تاگوچی) به‌دست‌آمد. نتایج حاصل نشان داد که الگوریتم به‌کاررفته از کارایی بالایی برخوردار می‌باشد و زمان

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

حل توسط الگوریتم پیشنهادی کم‌تر از ۱۰ درصد زمان محاسباتی نرم‌افزار *GAMS* گزارش شده است. ما در مرحله آخر الگوریتم پیشنهادی را با پنج الگوریتم براساس هفت تابع معیار مورد مقایسه قرار دادیم که نتایج نشان-دهنده عملکرد مناسب الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های پیشنهادی می‌باشد.

منابع

[۱۹] فرخ، مجتبی، آذر، عادل، جندقی، غلامرضا. (۱۳۹۵). توسعه‌یک رویکرد برنامه ریزی فازی استوار برای طراحی زنجیره‌تأمین حلقه بسته. فصلنامه چشم انداز مدیریت صنعتی، شماره ۲۲، ۹-۴۳.

[۲۰] قهرمانی نهر، جاوید، قدرت نما، علی، ایزدبخش، حمیدرضا، توکلی مقدم، رضا. (۱۳۹۷). طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چندهدفه چند محصولی و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۶ (۱۳)، ۱۱۹-۱۳۷.

[۲۱] شهروزی، محسن، صالحی، علیرضا. (۱۳۹۶). شاخصهای عملکردی برای مقایسه الگوریتمهای فراابتکاری با تفاوتهای پایه در عملگرها. اولین کنفرانس بین المللی محاسبات نرم، گیلان، ایران.

[1] Bouzembrak, Y., Allaoui, H., Goncalves, G., & Bouchriha, H. (2011). A multi-objective green supply chain network design. 4th International Conference on Logistics. (pp. 357-361). IEEE.

[2] Aravendan, M., & Panneerselvam, R. (2014). Literature Review on Network Design Problems in Closed Loop and Reverse Supply Chains. Intelligent Information Management, 2014 .

[3] Kannan, G., Noorul Haq, A., & Devika ,M. (2009). Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation. International Journal of Production Research, 47(5), 1175-1200 .

[4] Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-ruwaard, J. M., & Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. Production and operations management, 10(2), 156-173 .

[5] Schultmann, F., Engels, B., & Rentz, O. (2003). Closed-loop supply chains for spent batteries. Interfaces, 33(6), 57-71 .

[6] Inderfurth, K. (2005). Impact of uncertainties on recovery behavior in a remanufacturing environment: a numerical analysis. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 35(5), 318-336 .

[7] Chouinard, M., D'Amours, S., & Aït-Kadi, D. (2008). A stochastic programming approach for designing supply loops. International Journal of Production Economics, 113(2), 657-677 .

[8] Lee, C., & Chan, T. (2009). Development of RFID-based reverse logistics system. Expert Systems with Applications, 36(5), 9299-9307 .

[9] Sasikumar, P., Kannan, G., & Haq, A. N. (2010). A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery—a case of truck tire remanufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 49(9-12), 1223-1234.

[10] Pishvaee, M., & Torabi, S. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. Fuzzy Sets and Systems, 161(20), 2668-2683 .

[11] Khajavi, L. T., Seyed-Hosseini, S.-M., & Makui, A. (2011). An integrated forward/reverse logistics network optimization model for multi-stage capacitated supply chain. iBusiness, 3(02), 229 .

[12] Das, K., & Chowdhury, A. H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. International Journal of Production Economics, 135(1), 209-221 .

[13] Mahmoudzadeh, M., Mansour, S., & Karimi, B. (2013). To develop a third-party reverse logistics network for end-of-life vehicles in Iran. Resources, Conservation and Recycling, 78, 1-14 .

[14] Donmez, I., & Turkay, M. (2013). Design of reverse logistics network for waste batteries with an application in Turkey. Chemical Engineering Transactions, 35, 1393-1398 .

[15] Özceylan, E., Paksoy, T., & Bektaş, T. (2014). Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 61, 142-164 .

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]

[16] Garg, K., Agarwal, V., & Jha, P. (2015). Transportation Decision Making Through Logistics Outsourcing and 3PL Selection in an Integrated Closed-Loop Supply Chain. 4th International Conference on Soft Computing for Problem Solving.

[17] Serdar, E., Ashhab, M.S. (2016). Supply Chain Network Design Optimization Model for Multi-period Multi-product. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 16(1), 122-140.

[18] Keshavarz Ghorabaee, M., Amiri, M., Ohfat, l., Firouzabadi, A. (2017). Designing a multi-product multi-period supply chain network with reverse logistics and multiple objectives under uncertainty. Journal Technological and Economic Development of Economy, 23 (3).

[22] Liao, Z., Rittscher, J, (2007). Integration of supplier selection, procurement lot sizing and carrier selection under dynamic demand conditions. Int. J. Production Economics, 107, 502–510.

[23] Davis, P., & Ray, T. (1969). A branch-bound algorithm for the capacitated facilities location problem. Naval Research Logistics Quarterly, 16(3), 331-344 .

[24] Michalewicz, Z., Vignaux, G. A., & Hobbs, M. (1991). A nonstandard genetic algorithm for the nonlinear transportation problem. ORSA Journal on Computing, 3(4), 307-316 .

[25] Gen, M., Altiparmak, F., & Lin, L. (2006). A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding. OR spectrum, 28(3), 337-3 .

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

[DOR: 20.1001.1.22517286.2019.16.1.3.2]