توسعه مدلی یکپارچه برای مسئله چندمحصولی تولید-مسیریابی-موجودی در زنجیره تأمین سبز دوسطحی

عادل اعظمی

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

(a_aazami@ind.iust.ac.ir)

علی پاپی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

(papimath@hotmail.com)

میرسامان پیشوایی (نویسنده مسئول)

. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

(pishvaee@iust.ac.ir)

چکیده

تصمیم‌گیری شرکت‌های تولیدی پیرامون میزان تولید و موجودی به‌عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی است. تصمیم‌گیری برای انتقال محصولات بصورت مسئله حمل‌ونقل و مسیریابی بیان می‌شود. از ادغام سه مسئله مذکور، مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید-موجودی-مسیریابی (PIRP) حاصل می‌شود که جزء مسائل مهمِ زنجیره تأمین است. شرکت‌هایی که بتوانند PIRP خود را بهتر حل نمایند؛ می‌توانند هزینه نهایی محصولات خود را کاهش داده و مزیت رقابتی بیشتری نسبت به رقیب کسب کنند. بنابر سخت‌گیری‌های کنونی، شرکت‌ها موظفند علاوه بر بعد اقتصادی فعالیت‌های‌شان، ملاحظات زیست‌محیطی را نیز در تمام فرایندهای تولید تا عرضه رعایت کنند. لذا، برنامه‌ریزی مناسب حمل‌ونقل می‌تواند همزمان با جلوگیری از افزایش بیش‌ازحد هزینه‌ها، آلودگی‌های زیست‌محیطی را نیز کاهش دهد. بنابراین، می‌توان مسئله کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی را با PIRP ادغام و مسئله PIRP سبز (GPIRP) را توسعه داد که بطور همزمان دوبعد اقتصادی و اجتماعی تولید و عرضه را لحاظ می‌کند. در این پژوهش، این مسئله پیچیده بصورت یکپارچه به کمک رویکرد MILP، مدل‌سازی شده است. به‌منظور نشان دادن کاربردپذیری مدل توسعه داده شده و نیز عملی بودن لحاظ جنبه زیست‌محیطی، یک مطالعه موردی روی شرکت تولیدی قند و تصفیه شکر اهواز انجام شده است. در نهایت، چند نتایج مدیریتی از نتایج محاسباتی گرفته شده است.

کلید واژه:

برنامه‌ریزی تولید-مسیریابی-موجودی، مسیریابی وسایل نقلیه، زنجیره تأمین سبز، ملاحظات زیست‌محیطی

مقدمه

امروزه به‌دلیل افزایش رقابت و کاهش حاشیه سود، فعالیت‌های کل زنجیره تأمین از استخراج مواد خام تا تولید در مراحل مختلف و رسیدن کالا و خدمات به مشتریان، نیازمند اتخاذ تصمیم‌های مناسب و کاراست. همچنین رشد روزافزون رقابت بین زنجیره‌های عرضه و توجه به هماهنگی و همکاری در مدیریت زنجیره تأمین موجب شده تا پژوهش‌های بیشتری در این مورد انجام شود. اگر هیچ‌گونه هماهنگی در زنجیره تأمین وجود نداشته باشد؛ تولیدکننده و خریدار برای حداکثر کردن سود و یا حداقل نمودن هزینه‌های خود بصورت مستقل تصمیم‌گیری می‌کنند. این نوع تصمیم‌گیری نمی‌تواند در مقابل نگرش یکپارچه به کل سیستم، بهینه باشد.

در سال‌های اخیر با توجه به رویکردهای تسهیم اطلاعات در رابطه با تقاضا و تأمین موجودی در بین شرکای زنجیره تأمین، مسئله توزیع اهمیت بیشتری یافته است. یکی از انواع هماهنگی بین اجزای زنجیره، هماهنگی موجودی و مسیریابی در سیستم‌های توزیع است. مسئله مسیریابی موجودی هنگامی مطرح می‌شود که نیاز به تصمیم‌گیری همزمان در مورد موجودی و مسیریابی وسایل نقلیه بوجود می‌آید. این شرایط بطور معمول در سیستم‌های مدیریت موجودی توسط فروشنده[1] (VMI) رخ می‌دهد. VMIیکی از به‌روزترین نمونه‌ها در ایجاد ارزش‌افزوده از طریق خدمات لجستیک است. این سیاست اغلب به‌عنوان یک شرایط برد-برد برای تأمین‌کننده و مشتری

توصیف می‌شود. VMI، مشتریان را از سرمایه‌گذاری بالا در موجودی و پیچیدگی کنترل موجودی رها می‌سازد. از سوی دیگر تأمین‌کننده نیز از این مزیت برخوردار می‌شود که مقدار و زمان تحویل محصول به مشتریان را تعیین کند.

ارتباط میان اجزاء منفصل در هر زنجیره تأمین از طریق سیستم حمل‌ونقل تحقق می‌یابد. لذا، طراحی یک سیستم حمل مناسب در بهبود کارایی زنجیره تأمین حائز اهمیت است. یکی از چالش‌های اصلی در زمینه طراحی سیستم حمل‌ونقل، انتخاب مناسب نوع وسیله و مسیرهای عبوری است که این مفهوم برای اولین بار در قالب مسئله مسیریابی وسایل نقلیه[۲] (VRP) توسط دَنتزیگ و رامسِر [۱] مطرح شد. مفهوم کنترل موجودی محصولات در محل تأمین‌کننده و مصرف‌کننده، مسئله مسیریابی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این راستا، محققین با ترکیب کنترل موجودی و مسیریابی، مسائل موجودی- مسیریابی[۳] (IRP) را توسعه دادند. این دسته از مسائل دو موضوع مهم کنترل موجودی و مسیریابی وسایل نقلیه را بطور همزمان مورد بررسی قرار می‌دهد. در حالت کلاسیک فرض شده که تعدادی وسیله نقلیه با ظرفیت محدود، عملیات انتقال محصول از تولیدکننده به یک یا چند مشتری را عهده‌دار هستند. در چنین مسائلی، هزینه حمل‌ونقل سیستم متناسب با مسافت طی شده است که این ویژگی مرتبط با مفهوم مسیریابی خواهد بود. تأمین‌کننده بایستی سطح موجودی در محل فروشنده را به‌گونه‌ای کنترل نماید که امکان رخداد کمبود حداقل باشد. بنابراین مفهوم موجودی، بُعد زمان را به ابعاد مسئله مسیریابی می‌افزاید.

هدف دقیق و نهایی مسئله مسیریابی موجودی عبارت است از تعیین استراتژی توزیع به‌نحوی‌که هزینه‌های توزیع در درازمدت کاهش یابد. اکنون بسیاری از صنایع مختلف مانند صنایع هوافضا، پوشاک و خودروسازی با به‌کارگیری مدیریت موجودی توسط فروشنده از مدل‌های مسیریابی موجودی بهره می‌گیرند. از طرفی، صنعت حمل‌ونقل یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان محصولات نفتی است و سهم زیادی در تولید ذرات آلوده‌کننده دارد. آلودگی‌های پرخطر از بخش حمل‌ونقل می‌تواند آسیب‌های جدی به سلامت جهان وارد کند. در سال‌های اخیر، مسئله گرمای جهانی بسیار جدی شده است؛ لذا کاهش تولید کربن، اولویت اول برای بسیاری از دولت‌ها به حساب می‌آید. حمل‌ونقل سبز یکی از سیاست‌هایی است که برای کاهش نشر کربن مناسب است. به همین سبب، بررسی مسائل ذکرشده در حوزه زنجیره تأمین سبز، ضرورت پیدا نموده است.

این پژوهش در ۳ مورد بااهمیت، نوآوری دارد که ادبیات در این موارد، بسیار ضعیف است. اولین و مهمترین نوآوری، درنظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی با لحاظ محدودیت حداکثر مجاز انتشار گازهای گلخانه‌ای است که این تحقیق را بسیار جذاب نموده است. دوم، توسعه مدل یکپارچه جهت برنامه‌ریزی تولید-موجودی-مسیریابی در یک زنجیره تأمین سبز دوسطحی از کارخانه‌ها و مراکز توزیع یک شرکت تولیدی است. این یکپارچگی در چنین تصمیمات تولیدی و در واقع توجه به چند جنبه از یک کسب‌وکار موجب نزدیک‌تر شدن تحقیقات آکادمیک به مسائل دنیای واقعی می‌گردد. سوم، به‌منظور نشان دادن کاربردپذیری مدل توسعه یافته، از داده‌های واقعی یک شرکت تولیدی قند و تصفیه شکر استفاده شده است.

ادامه این پژوهش بدین صورت ساختار یافته است: در بخش دوم، مروری بر مهمترین پژوهش‌های گذشته در زمینه برنامه‌ریزی تولید-موجودی-مسیریابی انجام شده است. در بخش سوم، مسئله GPIRP، تشریح و بصورت خطی مدل‌سازی شده است. در بخش چهارم، به حل یک مطالعه موردی به‌منظور روشن‌تر شدن مسئله مذکور و تحلیل حساسیت آن جهت اعتبارسنجی و نشان دادن عملکرد مدل پیشنهادی، پرداخته شده است. در نهایت در بخش پایانی، نتیجه‌گیری‌های مهم این پژوهش ارائه شده است.

۱. مرور ادبیات

تحقیقات روی PIRP به سرعت در سال‌های اخیر بدلیل اهمیت بالای آن، گسترش یافته است. یکپارچه‌سازی عملیات تولید، موجودی، مسیریابی و توزیع بطور گسترده در زنجیره تامین جهت رسیدن به مزایای رقابتی درنظر گرفته شده است. این موضوع برای شرکت‌هایی با بهره‌گیری پایین از ظرفیت‌شان و نیز هزینه توزیع بالای‌شان، بسیار بااهمیت است [۳-۴].

سیندهوچا و همکاران [۵] یک مسئله IRP یکپارچه را برای بازپرسازی چند محصولی با ظرفیت محدود وسایل، به ادبیات افزودند. آن‌ها یک رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی را جهت یکپارچه‌سازی تصمیمات موجودی و انتقال در سیستم جمع‌آوری و توزیع، معرفی نمودند. لی و همکاران [۶] از اولین کسانی بودند که مسئله PIRP را بصورت عدد صحیح آمیخته مدل‌سازی نمودند. روش ابتکاری پیشنهادی، قابلیت تعیین اندازه سفارش و مسیر را بطور همزمان نداشت. سپس در تحقیقی توسط بویدا و همکاران [۷] با ارائه یک مدل عدد صحیح آمیخته مشابه و الگوریتم ممتیک[۴] با مدیریت جمعیت و روند جست‌وجوی انطباقی تصادفی حریصانه به حل مدل قبل پرداخته شد. بویدا و همکاران [۸] در تحقیق دیگری، مسئله PRP را برای یک محصول در افق زمانی چند دوره‌ای، بررسی نمودند. آن‌ها مسئله را با هدف حداقل‌سازی کل هزینه تولید، موجودی و توزیع درنظر گرفتند. یو و همکاران [۹] یک مسئله IRP را با محدودیت اندازه

ناوگان حمل‌ونقل، مطالعه نمودند. آن‌ها بدلیل پیچیدگی این نوع مسائل از رویکرد تقریبی آزادسازی لاگرانژ استفاده نمودند. بارد و ناناکول [۱۰] با تجزیه‌وتحلیل مجموعه‌ای از روش‌های ابتکاری به سؤال مهم بهترین استراتژی بازپرسازی، پاسخگو بودند.

مسئله جمع‌آوری احشام، نمونه‌ای از مسائل مسیریابی وسایل نقلیه است. هدف آن، تعیین مسیرها جهت جمع‌آوری حیوانات از کشتارگاه‌هاست. این مسئله، محدودیت‌های بسیاری دارد که تعدادی از آن‌ها وابسته به توالی جمع‌آوری حیوانات از کشتارگاه‌ها، هستند. همچنین لازم است دسته‌ای از محدودیت‌های واقعی از قبیل تولید و موجودی در کشتارگاه‌ها درنظر گرفته شوند. اُپِن و همکاران [۱۱] با درنظر گرفتن این دسته از محدودیت‌ها برای مسئله جمع‌آوری احشام، از روش‌های حل دقیق مبنی بر تکنیک تولید ستون[۵] برای حل مسائل با سایز بزرگ بهره گرفتند. بارد و ناناکول [۱۲] یک مدل MIP را با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های تولید، موجودی و تحویل در مراحل مختلف یک سیستم تولیدی ارائه دادند. مدل آن‌ها شامل یک تسهیل تولید و مجموعه‌ای از مشتریان با تقاضاهای متفاوت بود. آن‌ها با ارائه مدل‌شان و روش حل مناسب، گام مهمی در ادبیات PIRP برداشتند. معین و همکاران [۱۳] مسئله IRP را با لحاظ شبکه توزیع چند-به-یک شامل یک کارخانه مونتاژ و چند تامین‌کننده معین، مطالعه نمودند. کوهِلو و همکاران [۱۴] مسئله IRP را با انتقال دریایی معرفی نمودند جایی که مسیریابی وسایل و تصمیمات موجودی باید باهم بطور همزمان توجه شوند. کوهِلو و همکاران [۱۵]، تلفیقی از مسائل تولید، موجودی، توزیع و مسیریابی را مدنظر قرار دادند. آن‌ها، برنامه‌ریزی تولید را در اولویت کار خود قرار دادند تا میزان بهینه تولید را با درنظر گرفتن محدودیت‌های موجودی و مسیریابی تعیین نمایند.

میرزاپور آل‌هاشم و رِکیک [۱۶] مسئله IRP چندمحصولی را در یک زنجیره تأمین سبز دوسطحی تعریف کردند که محصولات از چند تأمین‌کننده به یک انبار مرکزی انتقال می‌یابند. تقاضا را قطعی فرض نموده و محدودیت ظرفیت تولید لحاظ نکردند. هدف مسئله آن‌ها، ارتباط متناسب هزینه‌های حمل‌ونقل با تولید گازهای گلخانه‌ای بود که از برنامه‌ریزی خطی مختلط کمک گرفتند. بِرتازی و همکاران [۱۷] پژوهشی ارائه دادند که مسئله IRP دارای محدودیت ظرفیت تولید بود و هدف، کاهش هزینه‌های کمبود، نگهداری و حمل‌ونقل در یک دوره زمانی بود. آدِلیاسک و همکاران [۱۸] نیز یک مقاله مروری در حوزه مسائل PIRP ارائه دادند. آن‌ها به شرح مسئله و مدل‌سازی-های پایه‌ای آن بدون لحاظ کمبود پرداخته و در ادامه، روش‌های حل مختلف را بررسی کردند.

یانتونگ و همکاران [۱۹] مسئله PIRP را بصورت برنامه‌ریزی خطی برای محصولات غذایی فرموله نمودند. آن‌ها مدل‌سازی را براساس ماکزیمم‌سازی سود و درنظر گرفتن فسادپذیری محصولات انجام دادند. اَگرا و همکاران [۲۰] یک مسئله PIRP تک محصولی را با یک تولیدکننده و چند خرده‌فروش به ادبیات افزودند. آن‌ها پس از مدل‌سازی مناسب مسئله، از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ جهت حل آن استفاده نمودند. اخیراً حَسنی و همکاران [۲۱] مسئله IRP را بصورت چندمحصولی مدل‌سازی نموده و جهت حل مدل پیچیده خود از یک روش حل جست‌وجوی همسایگی[۶] استفاده کردند. چیتساز و همکاران [۲۲] مسئله مسیریابی مونتاژ[۷] (ARP) را شامل برنامه‌ریزی همزمان مونتاژ یک محصول نهایی در یک کارخانه تولیدی و مسیریابی وسایل حمل‌ونقل از تامین‌کننده به کارخانه و سپس مصرف‌کننده، مدل‌سازی نمودند. آن‌ها مسئله ARP را به دو مسئله PRP و IRP تجزیه و جهت حل از الگوریتم تجزیه سه‌مرحله‌ای، استفاده نمودند. به‌عنوان جدیدترین تحقیق انجام شده ولی نه لزوما آخرین آن‌ها، کیو و همکاران [۲۳] مدلی را برای مسئله PIRP با درنظر گرفتن کاهش انتشارات کربنی ارائه دادند و با تجزیه مسئله پیچیده به دو مسئله اساسی، به حل آن پرداختند. آن‌ها جهت حل مسئله از الگوریتمی ابتکاری برمبنای دنتزیک‌ولف[۸] استفاده نمودند.

جدول (۱): برخی از آخرین تحقیقات مرتبط

محققان	موضوع اصلی	نوع مدل‌سازی	قطعی یا غیرقطعی	رویکرد حل	ملاحظات زیستی (انتشار گازهای گلخانه‌ای)	مطالعه موردی
Mirzapour Al-e-hashem & Rekik (۲۰۱٤)	***GIRP***	***MILP***	قطعی	***CPLEX***	☑	☑
Bertazzi et al. (۲۰۱٥)	***IRP***	***MINLP***	غیرقطعی با توزیع گسسته	الگوریتم ریاضی براساس چرخ رولت	☒	☒
Adulyasak et al. (۲۰۱٥)	***PIRP***	مروری	-	-	-	-
Yantong et al. (۲۰۱٦)	***PIRP***	***MILP***	قطعی	***CPLEX***	☒	☒
Agra et al. (۲۰۱٦)	***PIRP***	***LP***	قطعی	آزادسازی لاگرانژ	☒	☒
Hasni et al. (۲۰۱۷)	***IRP***	***LP***	قطعی	الگوریتم جست‌وجوی همسایگی	☒	☒
Chitsaz et al. (۲۰۱۷)	***ARP***	***MILP***	قطعی	***CPLEX*** و هیورستیک	☒	☒
Qiu et al. (۲۰۱۷)	***PIRP***	***MILP***	قطعی	هیورستیک	☒ ناقص	☒
This Research	***GPIRP***	***MILP***	قطعی	***CPLEX***	☑	☑

در این پژوهش، از رویکردهای مدل‌سازی مقالات میرزاپور آل هاشم و رکیک [۱۶]، آدِلیاسک و همکاران [۱۸] و کیو و همکاران [۲۳] برای مسئله جدید GPIRP استفاده و راه‌حل مناسب‌تری ارائه شده است. جدول (۱) جدیدترین تحقیقات انجام شده در این زمینه را به همراه تحقیق حاضر جهت مقایسه، نشان می‌دهد. این جدول به‌وضوح، تحقیق حاضر را از دیگر مقالات موجود، متمایز می‌سازد. بطور کلی همانطور که در بخش مقدمه نیز ذکر شد؛ اصلی‌ترین نوآوری‌های پژوهش حاضر در سه جنبه خلاصه می‌شوند: اول، درنظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی، دوم، توسعه مدل یکپارچه تولید-موجودی-مسیریابی در زنجیره تأمین سبز دوسطحی و درنتیجه تصمیم‌گیری یکپارچه مسائل مذکور و سوم، استفاده از داده‌های واقعی یک شرکت تولیدی.

۲. مدل ریاضی مسئله

۲ .۱. بیان مسئله

یک مسئله زنجیره تأمین دوسطحی وجود دارد که در سطح اول آن، یک کارخانه تولیدکننده و در سطح دوم چند مرکز توزیع هستند. کارخانه قادر است محصولات مختلفی را تولید نماید که البته با توجه به تجهیزات و تسهیلات موجود در آن، در تنوع محصولات و میزان تولید هریک، محدودیت دارد. محصولات تولیدشده، در انبار کارخانه قرار می‌گیرند و توسط یک ناوگان از وسایل نقلیه ناهمگن، عملیات انتقال محصولات از انبار کارخانه به مراکز توزیع انجام می‌شود.

در هر دوره زمانی، کارخانه شروع به تولید محصولات کرده تا تقاضای مشتریان را توسط مراکز توزیع تأمین نماید؛ تمام تولیدات ممکن است به مراکز توزیع عرضه گردد و یا بخشی از آن در انبار کارخانه قرار گیرد و در دوره‌های آینده عرضه شود. در مراکز توزیع، پس از دریافت محصولات از کارخانه، بخشی از آن به بازار عرضه می‌شود و باقیمانده در انبار آن‌ها ذخیره می‌گردد. وسایل نقلیه‌ای که در ناوگان موجود هستند؛ یکسان نبوده و هرکدام، ظرفیت خاص خود را دارند (البته ممکن است از یک نوع وسیله نقلیه بیشتر از یک مورد در دپو موجود باشد). همچنین، علاوه بر ظرفیت بارگیری، ویژگی‌ها و نوع سوخت وسایل نقلیه نیز باهم تفاوت دارند و میزان آلودگی آن‌ها به ازای هر واحد مسافتی که طی می‌کنند؛ ممکن است متفاوت باشد.

کارخانه تولیدکننده محصولات و مراکز توزیع متعلق به یک شرکت تولیدی و پخش است. وسایل نقلیه نیز بصورت اجاره‌ای در هر دوره بکار گرفته می‌شوند. این شرکت قصد دارد که هزینه‌های خود را در هر دوره زمانی (مثلاً هرسال) کنترل نماید تا در پایان یک افق زمانی محدود، هزینه‌های کل آن کمینه گردد. این هزینه‌ها عبارتند از: هزینه‌های مربوط به تولید (هزینه متغیر تولید که برای تولید هر واحد از هر محصول بوجود می‌آید و هزینه ثابت تولید که در صورت فعالیت کارخانه در هر دوره بوجود می‌آید)، هزینه‌های حمل‌ونقل (هزینه متغیر حمل‌ونقل که متناظر با مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه مختلف بوجود می‌آید؛ و هزینه ثابت حمل‌ونقل که در صورت اجاره هر وسیله نقلیه مستقل از مسافت طی شده آن، بوجود می‌آید) و هزینه نگهداری موجودی‌ها در انبار کارخانه و مراکز توزیع.

اگر تولید کارخانه به‌گونه‌ای باشد که سفارش برخی از مراکز توزیع در دوره‌ای پاسخ داده نشود؛ آن‌گاه ممکن است تقاضای مشتریان محصولات این شرکت بطور کامل ارضا نگردد و این امر منجر به ضعف رقابتی شرکت در بازار گردد؛ لذا، علاوه بر هزینه‌های مذکور، شرکت هزینه غیرمستقیمی را نیز تحت عنوان هزینه سفارشات عقب‌افتاده در هر دوره درنظر می‌گیرد. اعمال این هزینه سبب می‌گردد که برنامه‌ریزی تولید بنحو بهینه صورت گیرد و میزان تولید در هر دوره، کنترل گردد.

با رشد روزافزون فعالیت صنایع مختلف، آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز در حال افزایش هستند. انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO, CO_2 ,...) ازجمله این آلودگی‌هاست که با روند گرم شدن کره زمین، رابطه مستقیم دارد. ازاین‌رو، قیود و محدودیت‌هایی برای جلوگیری از انتشار بیش‌ازحد این گازها بر شرکت‌ها اعمال می‌شود. با توجه به آن‌که حمل‌ونقل ازجمله فعالیت‌هایی است که بیشترین سهم را در انتشار این گازها دارد، این شرکت موظف است وسایل حمل‌ونقل و مسیریابی آن‌ها را بنحوی کنترل کند که علاوه بر بعد اقتصادی فعالیت‌ها برای شرکت، بعد زیست‌محیطی آن نیز برای جامعه درنظر گرفته شود. لازم به ذکر است که مسیریابی بهینه با کاهش مسافت‌های جابه‌جایی وسایل نقلیه علاوه بر کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز کاهش می‌دهد. ولی اجاره وسایل نقلیه‌ای که با اهداف زیست‌محیطی هماهنگ باشد؛ ممکن است با اهداف اقتصادی سازگار نباشد و بنابراین باید تبادل مناسبی صورت پذیرد.

هدف شرکت آن است که مجموع تمام هزینه‌هایش ($PC + TC + BC + HC$) در پایان افق زمانی برنامه‌ریزی، کمینه نماید. دستیابی به این هدف، نیازمند حل بهینه یک مسئله برنامه‌ریزی تولید-مسیریابی-موجودی است که محدودیت‌های عملیاتی آن به دسته-های زیر افراز می‌شوند:

- ظرفیت تولید در کارخانه: تنوع محصولات محدود است و میزان تولید هرکدام در هر دوره از حدی بیشتر نمی‌شود.
- ظرفیت انبار کارخانه: تولید کارخانه باید بگونه‌ای باشد که بعد از ارسال سفارشات مراکز توزیع، موجودی کارخانه از ظرفیت انبار کارخانه کمتر گردد.
- ظرفیت انبار مراکز توزیع: موجودی مراکز توزیع نباید از ظرفیت انبار آن‌ها بیشتر گردد.
- ظرفیت حمل‌ونقل: در هر دوره، تنها تعداد مشخصی از هر نوع وسیله نقلیه موجود است و هر وسیله نقلیه، ظرفیت مشخصی جهت بارگیری دارد.
- محدودیت در انتشار گازهای گلخانه‌ای: در هر دوره نباید میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کل فرایند حمل‌ونقل از مقدار مجاز آن بیشتر شود (میزان انتشار این گازها برای هر وسیله نقلیه مشخص است).

۲. ۲. مدل‌سازی مسئله بصورت یک مسئله بهینه‌سازی خطی

در این بخش، مدل مسئله بصورت یک مسئله بهینه‌سازی ریاضی چند دوره‌ای بیان می‌گردد.

نمادها:

مجموعه‌ها:

$\{F\}$	کارخانه تولیدکننده محصولات
$DC=\{1,2,3,...,\lvert DC\rvert\}$	مراکز توزیع
$\{O\}$	ناوگان وسایل نقلیه
$N=D\bigcup\{F\}$	مجموعه تمامی مراکز توزیع و کارخانه
$E=N\times N$	مجموعه یال‌های بین مراکز توزیع و کارخانه
$T=\{1,2,3,...\lvert T\rvert\}$	افق زمانی
$K=\{1,2,3,...,\lvert K\rvert\}$	مجموعه وسایل نقلیه
$P=\{1,2,3,...,\lvert P\rvert\}$	مجموعه محصولات

پارامترها:

vcp_p	هزینه متغیر هر واحد تولید محصول نوع p
fcp_p	هزینه ثابت تولید (ناشی از فعالیت کارخانه در هر دوره)
v_k	هزینه متغیر وسیله نقلیه kام به ازای هر واحد مسافت طی شده
$d_{(i,j)}$	فاصله بین کارخانه و مراکز برای هر $(i,j)\in E$
f_k	هزینه ثابت اجاره وسیله نقلیه k
$hc^t_{p,F}$	هزینه نگهداری هر واحد محصول نوع p در کارخانه F در هر دوره
$hc^t_{p,d}$	هزینه نگهداری هر واحد محصول نوع p در مرکز توزیع d در هر دوره
bc_p	هزینه عقب افتادن سفارش هر واحد محصول p در مراکز توزیع
$capF_p$	ظرفیت تولید محصول نوع p در کارخانه
$capV_k$	ظرفیت بارگیری وسیله نقلیه نوع k
s_p	میزان فضایی اشغال شده توسط هر واحد محصول نوع p
$CapSF$	ظرفیت انبار کارخانه
$CapSD_d$	ظرفیت انبار مرکز توزیع d

$dem^t_{p,d}$ میزان تقاضای محصول p از مرکز توزیع d در دوره t

GH_k میزان گاز گلخانه‌ای تولید شده به ازای هر واحد حمل‌ونقل وسیله نقلیه k

$MaxGH^t$ حداکثر انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر دوره

متغیرهای تصمیم‌گیری:

x^t_p میزان تولید محصول نوع p در دوره t

$sup^t_{p,d}$ میزان عرضه محصول نوع p از مرکز توزیع d در دوره t

$supF^t_p$ میزان عرضه محصول نوع p از کارخانه در دوره t

$supF^t$ حجم کل محصولات عرضه شده از کارخانه در دوره t

$rec^t_{p,d}$ میزان محصول دریافت شده‌ی نوع p از مرکز توزیع d در دوره t

$I^t_{p,d}$ میزان موجودی محصول نوع p در مرکز توزیع d در دوره t

$I^t_{p,F}$ میزان موجودی محصول نوع p در کارخانه در دوره t

$y^t_{(O,F),k}$ متغیر باینری مشخص‌کننده اجاره شدن (۱) یا نشدن (۰) وسیله نقلیه k در دوره t (متغیر باینری مشخص‌کننده حرکت (۱) یا عدم حرکت (۰) وسیله نقلیه k از ناوگان به کارخانه در دوره t)

$y^t_{(i,j),k}$ متغیر باینری مشخص‌کننده عبور (۱) یا عدم عبور (۰) وسیله نقلیه k از یال $(i,j)\in E$ در دوره t

$openF^t$ متغیر باینری مشخص‌کننده فعالیت (۱) یا عدم فعالیت (۰) کارخانه در دوره t

$Total\ Cost$ هزینه در پایان افق زمانی

PC_t هزینه تولید در دوره t

VPC_t هزینه متغیر تولید در دوره t

FPC_t هزینه ثابت تولید در دوره t

TC_t هزینه حمل‌ونقل وسایل نقلیه در دوره t

VTC_t هزینه متغیر حمل‌ونقل وسایل نقلیه در دوره t

FTC_t هزینه ثابت حمل‌ونقل وسایل نقلیه در دوره t

HC_t هزینه نگهداری موجودی در دوره t

BC_t هزینه سفارشات عقب‌افتاده در دوره t

رابطه (۱) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که شامل ٤جزء هزینه‌های ثابت و متغیر تولید (۲)، هزینه نگهداری موجودی در انبار کارخانه و مراکز توزیع (۳)، هزینه سفارشات عقب‌افتاده (٤) و هزینه‌های ثابت و متغیر حمل‌ونقل (۵) است. با جمع این هزینه‌ها در هر دوره، کل هزینه در پایان افق زمانی حاصل می‌شود که باید کمینه گردد.

$$Total\ Cost = \sum_{t\in T} PC_t + TC_t + HC_t + BC_t \qquad (۱)$$

$$PC_t = VPC_t + FPC_t = \sum_{p\in P} vcp_p . x^t_p + fcp . openF^t \quad \forall t \qquad (۲)$$

$$HC_t = \sum_{p\in P} hc^t_{p,F} . I^t_{p,F} + \sum_{p\in P}\sum_{d\in DC} hc^t_{p,d} . I^t_{p,d} \quad \forall t \qquad (۳)$$

$$BC_t = \sum_{p\in P}\sum_{d\in DC} bc_p . (dem^t_{p,d} - sup^t_{p,d}) \quad \forall t \qquad (٤)$$

$$TC_t = VTC_t + FTC_t = \sum_{(i,j)\in E}\sum_{k\in K} v_k . d_{(i,j)} . y^t_{(i,j),k} + \sum_{k\in K} f_k . y^t_{(o,F),k} \quad \forall t \qquad (۵)$$

قیود عملیاتی مسئله شامل ظرفیت تولید، ظرفیت حمل‌ونقل، ظرفیت انبارها، محدودیت‌های زیست‌محیطی و همچنین برخی از قیود حاکم بر سیستم از قبیل تعادل جریان در هر گره، پویایی ارتباط سطح موجودی در دوره‌های مختلف، مسیر مجاز حمل‌ونقل وسایل نقلیه و ... هستند که در روابط زیر توضیح داده می‌شوند:

$$I_{p,F}^{t} = I_{p,F}^{t-1} + x_{p}^{t} - supF_{p}^{t} \qquad \forall t, p \qquad (٦)$$

$$I_{p,d}^{t} = I_{p,d}^{t-1} + rec_{p,d}^{t} - sup_{p,d}^{t} \qquad \forall t, p, d \qquad (٧)$$

$$x_{p}^{t} \le capF_{p}.openF^{t} \qquad \forall t, p \qquad (٨)$$

$$\sum_{d} rec_{p,d}^{t} = supF_{p}^{t} \qquad \forall t, p \qquad (٩)$$

$$supF_{p}^{t} \le I_{p,F}^{t-1} + x_{p}^{t} \qquad \forall t, p \qquad (١٠)$$

$$sup_{p,d}^{t} \le I_{p,d}^{t-1} + rec_{p,d}^{t} \qquad \forall t, p, d \qquad (١١)$$

$$sup_{p,d}^{t} \le dem_{p,d}^{t} \qquad \forall t, p, d \qquad (١٢)$$

$$supF^{t} = \sum_{p} supF_{p}^{t} \qquad \forall t \qquad (١٣)$$

$$\sum_{k} capV_{k}.y_{(O,F),k}^{t} \ge supF^{t} \qquad \forall t \qquad (١٤)$$

$$\sum_{p} s_{p} I_{p,F}^{t} \le CapSF \qquad \forall t \qquad (١٥)$$

$$\sum_{p} s_{p} I_{p,d}^{t} \le CapSD_{d} \qquad \forall t, d \qquad (١٦)$$

$$\sum_{(i,j)\in E^{*}} \sum_{k \in VehType} GH_{k}.d_{(i,j)}.y_{(i,j),k}^{t} \le MaxGH^{t} \quad \forall t \qquad (١٧)$$

$$\sum_{(i,j)\in E} y_{(i,j),k}^{t} \le 1 \qquad \forall t, k \qquad (١٨)$$

$$\sum_{(i,n)\in E} y_{(i,n),k}^{t} = \sum_{(n,j)\in E} y_{(n,j),k}^{t} \qquad \forall t, k, n \qquad (١٩)$$

$$\sum_{(i,j)\in E} y_{(i,j),k}^{t} \le y_{(O,F),k}^{t} \qquad \forall t, k \qquad (٢٠)$$

$$u_{i,k}^{t} - u_{j,k}^{t} + |N| y_{(i,j),k}^{t} \le |N| - 1 \quad \forall t, k, (i,j) \qquad (٢١)$$

$$\begin{cases} x_{p}^{t}, sup_{p,d}^{t}, supF_{p}^{t}, supF^{t}, rec_{p,d}^{t}, I_{p,d}^{t}, I_{p,F}^{t} \ge 0 & \forall All \\ y_{(O,F),k}^{t}, y_{(i,j),k}^{t}, openF^{t} = \{0,1\} & \forall All \end{cases} \qquad (٢٢)$$

روابط (٦) و (٧) سطح موجودی کارخانه و مراکز توزیع را برای هر محصول در هر دوره محاسبه می‌کنند. رابطه (٨) ظرفیت کارخانه را در تولید هر محصول نشان می‌دهد. رابطه (٩) کل محصولات دریافتی را برای هر نوع محصول، در هر دوره محاسبه می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، رابطه (٩) مشخص می‌کند که در هر دوره چه میزان از هر نوع محصول از کارخانه عرضه می‌گردد. رابطه (١٠) اطمینان می‌دهد که حجم هر نوع محصول عرضه شده از کارخانه نمی‌تواند از مجموع موجودی دوره قبل و تولید دوره جاری آن محصول بیشتر باشد. رابطه (١١) الزام می‌کند که میزان محصولی که از هر مرکز توزیع به مشتریان، عرضه می‌شود از مجموع موجودی دوره قبل و دریافتی دوره جاری مرکز توزیع، بیشتر نمی‌گردد. رابطه (١٢) بیان می‌کند که میزان عرضه به هر مشتری از هر مرکز توزیع نمی‌تواند از تقاضای مشتری بیشتر باشد.

رابطه (١٣) حجم کل محصولات عرض شده از کارخانه به مشتریان را محاسبه می‌کند. رابطه (١٤) اطمینان می‌دهد که وسایل نقلیه باید به‌گونه‌ای اجاره شوند که ظرفیت کل آن‌ها بیشتر یا مساوی حجم محصولات عرضه شده از کارخانه باشد.

رابطه (١٥) اطمینان می‌دهد که موجودی کارخانه در هر دوره نباید از کل فضای خالی انبار کارخانه بیشتر باشد و رابطه (١٦) این موضوع را در انبار مراکز توزیع کنترل می‌کند. رابطه (١٧) محدودیت زیست‌محیطی حاکم بر فعالیت‌های حمل‌ونقل است و مانع می‌شود که مجموع گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل شبکه از حداکثر مجاز آن در هر دوره بیشتر شود.

روابط (١٨) تا (٢١) عمدتاً بر بخش مسیریابی مسئله حاکم هستند. بنا بر رابطه (١٨) در هر دوره، حداکثر یک وسیله نقلیه از هر یال می‌تواند عبور کند. رابطه (١٩) پیوستگی مسیر هر وسیله نقلیه را نتیجه می‌دهد؛ طبق این رابطه هرگاه یک وسیله نقلیه به یک گره برسد؛ باید

از آن گره به سمت گره‌ای دیگر ادامه مسیر دهد. رابطه (۲۰) بیان می‌کند که هر وسیله نقلیه در صورتی می‌تواند بین کارخانه و یا مراکز توزیع حرکت داشته باشد که قبلا از ناوگان به سمت کارخانه حرکت کرده باشد (اجاره شده باشد). رابطه (۲۱)، محدودیت‌های حذف زیرتور MTZ را تضمین می‌نماید [۲۴]. در این محدودیت، $u^t_{i,k}$ و $u^t_{j,k}$ متغیرهای کمکی مثبت هستند. نهایتاً، رابطه (۲۲) دامنه متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد.

توجه این‌که، اگرچه اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های این زنجیره تأمین بصورت یک محدودیت در مدل لحاظ شده‌اند؛ اما می‌توان از رویکردهای چندهدفه نیز بهره گرفت؛ در این‌صورت مسئله دوهدفه می‌گردد که هدف اول آن کاهش هزینه‌های اقتصادی و هدف دوم آن کاهش اثرات زیست‌محیطی (گازهای گلخانه‌ای) می‌شود. این دو هدف ممکن است به موازات هم بهبود نیابند؛ لذا با ایجاد توازنی مناسب بین اهداف مسئله، مجموعه جواب‌های بهینه پارتو حاصل می‌شود. در صورت بکارگیری این رویکرد، رابطه (۲۴) حذف می‌گردد و تابع هدف مسئله بصورت رابطه (۲۷) خواهد بود:

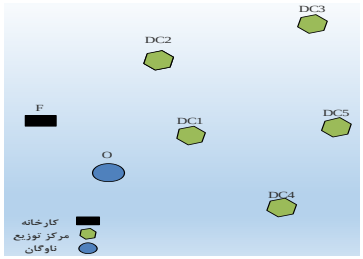
$$Min\{PC+TC+HC+BC\ ,\ \sum_{(i,j)\in E}\sum_{k\in K} GH_k . d_{(i,j)} . y^t_{(i,j),k}\} \qquad (۲۳)$$

۳. آزمایش عددی مسئله GPIRP

مدل ارائه شده، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته (MILP) است. در ابعاد کوچک، حل دقیق مدل از سالور CPLEX موجود در نرم‌افزار GAMS بدست می‌آید.

۳. ۱. توصیف مطالعه موردی

در مطالعه موردی مسئله GPIRP، یک شبکه زنجیره تأمین دوسطحی وجود دارد که در سطح اول آن، یک کارخانه تولیدکننده با سه نوع محصول p۱، p۲ و p۳ و در سطح دوم آن، پنج مرکز توزیع در پنج نقطه مختلف قرارگرفته‌اند (شکل ۱). این کارخانه و مراکز توزیع متعلق به شرکتی بنام "شرکت تولیدی قند و تصفیه شکر اهواز" است که هدف آن، عرضه محصولات از کارخانه به مراکز توزیع با صرف کمترین هزینه است. همچنین، حمل‌ونقل محصولات با وسایل نقلیه‌ای صورت می‌گیرد که از یک ناوگان وسایل نقلیه، تأمین می‌شوند.



شکل (۱): نمای شماتیک مطالعه موردی مسئله GPIRP

جدول (۲) اطلاعات مربوط به محصولات، جدول (۳) اطلاعات مربوط به وسایل نقلیه، جدول (٤) اطلاعات مربوط به ظرفیت انبارهای کارخانه و مراکز توزیع، جدول (٥) اطلاعات مربوط به میزان تقاضای ارائه شده از هر محصول به مراکز توزیع در افق برنامه‌ریزی و جدول (٦) ماتریس فاصله را در این شبکه توزیع، نشان می‌دهد. این اطلاعات مربوط به یک افق زمانی شش دوره‌ای (مثلاً ٦ ماهه) است. همچنین، موجودی فعلی کارخانه و مراکز توزیع ۱۰۰ واحد درنظر گرفته شده و حداکثر انتشار گازهای گلخانه‌ای برای هر دوره ۵۰۰ واحد است

جدول (۲): اطلاعات مربوط به محصولات مطالعه موردی مسئله GPIRP

محصول	ظرفیت تولید کارخانه در هر دوره	هزینه متغیر تولید هر واحد محصول	هزینه ثابت تولید	هزینه نگهداری هر واحد محصول (hoc)	هزینه عقب افتادن هر واحد محصول (bac)	حجم هر واحد محصول
P۱	۳۰۰۰	۱٫۸	٦۰۰	۱٫۸	۲٫۹	۰٫٦
P۲	۲۰۰۰	۲٫۰۵	٦۰۰	۱٫٦	۳٫۱	۰٫۸
P۳	۲۵۰۰	۳٫٦۵	٦۰۰	۲٫۳	۳٫۷	۰٫۵۵

جدول (۳): اطلاعات مربوط به وسایل نقلیه مطالعه موردی مسئله GPIRP

وسیله نقلیه	هزینه متغیر برای هر واحد مسافت	هزینه ثابت اجاره	ظرفیت (گنجایش)	میزان انتشار آلاینده در هر واحد مسافت
K۱	۷	۷۰۰	۱۲۰۰	۰,۸
K۲	٦	۹۰۰	۱۱۰۰	۰,٦٥
K۳	۹	۱۰۵۰	۱۵۰۰	۰,۹
K۴	۱۱	۱۳۰۰	۱۰۰۰	۰,۵

جدول (٤): اطلاعات مربوط به کارخانه و مراکز توزیع مطالعه موردی مسئله GPIRP

تسهیلات	F	DC۱	DC۲	DC۳	DC۴	DC۵
گنجایش/ظرفیت	٤۰۰	۵۰۰	٦۰۰	۳۲۰	۲٦۰	٤۰۰

جدول (۵): اطلاعات مربوط به میزان تقاضای هر محصول در هر دوره برای هر مرکز توزیع مطالعه موردی مسئله GPIRP

محصول برای مرکز توزیع	دوره زمانی					
	T۱	T۲	T۳	T۴	T۵	T۶
P۱.DC۱	۵۹	۲٤۹	٤۸۰	۱۷۰	۲۹۳	۱۱۲
P۱.DC۲	۳۷٦	۱۲۸	۲۵۳	۳۵۰	٤٤۵	٤۸۰
P۱.DC۳	۲۷٤	٦۹	۷۵	۱۲۹	٤۲۰	۱۲۷
P۱.DC۴	٤۰۷	۱۲۲	٤٦۵	۱۷۵	۹۸	۱۲٦
P۱.DC۵	۳۰۸	۲۳۷	۱۷٦	٤۱۵	۲۹۳	۲۷۵
P۲.DC۱	٤۵۹	۱٤۳	۳۷۹	۳۷۷	۱۹۰	۲۸٤
P۲.DC۲	۳۸	۲۷	۲٦۵	۳۹۰	٤٦۷	٦۵
P۲.DC۳	۲۸٤	۲۳۵	٦	۱٦۹	۸۱	۳۹۷
P۲.DC۴	۱۵٦	۲٦٤	۸۳	۳۰۱	۱۳۱	۳۲۷
P۲.DC۵	۳٤۵	۳۷٤	۲۲۵	٤۲	۱۱٤	٤۵۷
P۳.DC۱	۷٦	٤۱۳	۲٦۹	٤۹۸	۳۹	۲۲۱
P۳.DC۲	۵۳	٤۸۱	۲	۳۸۷	٤۰۹	٤۳٤
P۳.DC۳	٤۲	۲۰۰	۱۳۰	٤۰۰	۲۱٦	٤۵۵
P۳.DC۴	۹۱	۱۳۲	۷۳	٦۸	٤۳۵	۲۹۰
P۳.DC۵	۲۷۵	۷۲	٤۲۷	۳۱۱	۱۷۵	۲۵۷

جدول (٦): ماتریس فاصله در مطالعه موردی مسئله GPIRP

	O	F	DC۱	DC۲	DC۳	DC۴	DC۵
O	۰	۱۰۰	۸۰	۲۵۰	٤۸۰	۳۱۰	۲۸۵
F	۱۰۰	۰	۱۲۵	۱٤۰	۳۸۵	۳۰۵	۲۸۰
DC۱	۸۰	۱۲۵	۰	۱۰۰	۲٤۰	۱۸۵	۱۳۳
DC۲	۲۵۰	۱٤۰	۱۰۰	۰	۱٤۲	٤٤۸	۳۱۸
DC۳	٤۸۰	۳۸۵	۲٤۰	۱٤۲	۰	٤۰۰	۲۱۰
DC۴	۳۱۰	۳۰۵	۱۸۵	٤٤۸	٤۰۰	۰	۱٦۵
DC۵	۲۸۵	۲۸۰	۱۳۳	۳۱۸	۲۱۰	۱٦۵	۰

۳ . ۲ . نتایج حاصل از حل مسئله مطالعه موردی

جواب بهینه مطالعه موردی، در سه بخش برنامه‌ریزی تولید، برنامه‌ریزی موجودی و مسیریابی وسایل نقلیه عرضه‌کننده محصولات در یک افق برنامه‌ریزی شش دوره‌ای ارائه شده است.

جدول (۷) وضعیت باز بودن کارخانه در هر دوره و میزان بهینه تولید را در هر دوره نشان می‌دهد. جدول (۸) میزان عرضه بهینه محصولات از کارخانه به مراکز توزیع و از مراکز توزیع به مشتریان و جدول (۹) میزان دریافتی هر مرکز توزیع را از هر محصول در هر دوره نشان می‌دهد. همچنین، در جدول (۱۰) مشخص شده است که میزان موجودی (ذخیره) محصولات در هر دوره در هر مرکز توزیع و کارخانه چقدر بوده است. براساس اعداد و ارقام بهینه در جداول قبلی، برنامه‌ریزی تولید و موجودی، هزینه تولید محصولات، هزینه نگهداری محصولات و هزینه سفارشات عقب‌افتاده هر مرکز توزیع در هر دوره بصورت جدول (۱۱) گزارش می‌گردند.

جدول (۷): میزان بهینه تولید محصولات در هر دوره

میزان تولید محصول P۳ (۱۰۳*)	میزان تولید محصول P۲ (۱۰۳*)	میزان تولید محصول P۱ (۱۰۳*)	باز بودن کارخانه ($openF^t$)	دوره
۸۶۵	۷۴۴	۸۶۵	۱	T۱
۱۱۶۰	۱۰۱۶	۷۶۴	۱	T۲
۹۰۱	۹۲۳	۱۴۴۹	۱	T۳
۱۶۶۴	۱۲۷۹	۱۲۳۹	۱	T۴
۱۲۷۴	۹۸۳	۱۵۴۹	۱	T۵
۱۶۵۷	۱۵۳۰	۱۱۲۰	۱	T۶

جدول (۸): میزان بهینه عرضه محصولات در هر دوره

دوره . محصول	F	DC۱	DC۲	DC۳	DC۴	DC۵
T۱.P۱	۹۶۵	۵۹	۳۷۶	۲۷۴	۴۰۷	۳۰۸
T۱.P۲	۸۴۴	۴۵۹	۳۸	۲۸۴	۱۵۶	۳۴۵
T۱.P۳	۱۷۵	۷۶	۵۳	۴۲	۹۱	۲۷۵
T۲.P۱	۷۶۴	۲۴۹	۱۲۸	۶۹	۱۲۲	۲۳۷
T۲.P۲	۱۰۱۶	۱۴۳	۲۷	۲۳۵	۲۶۴	۳۷۴
T۲.P۳	۱۱۶۰	۴۱۳	۴۸۱	۲۰۰	۱۳۲	۷۲
T۳.P۱	۱۴۴۹	۴۸۰	۲۵۳	۷۵	۴۶۵	۱۷۶
T۳.P۲	۹۲۳	۳۷۹	۲۶۵	۶	۸۳	۲۲۵
T۳.P۳	۹۰۱	۲۶۹	۲	۱۳۰	۷۳	۴۲۷
T۴.P۱	۱۲۳۹	۱۷۰	۳۵۰	۱۲۹	۱۷۵	۴۱۵
T۴.P۲	۱۲۷۹	۳۷۷	۳۹۰	۱۶۹	۳۰۱	۴۲
T۴.P۳	۱۶۶۴	۴۹۸	۳۸۷	۴۰۰	۶۸	۳۱۱
T۵.P۱	۱۵۴۹	۲۹۳	۴۴۵	۴۲۰	۹۸	۲۹۳
T۵.P۲	۹۸۳	۱۹۰	۴۶۷	۸۱	۱۳۱	۱۱۴
T۵.P۳	۱۲۷۴	۳۹	۴۰۹	۲۱۶	۴۳۵	۱۷۵
T۶.P۱	۱۱۲۰	۱۱۲	۴۸۰	۱۲۷	۱۲۶	۲۷۵
T۶.P۲	۱۵۳۰	۲۸۴	۶۵	۳۹۷	۳۲۷	۴۵۷
T۶.P۳	۱۶۵۷	۲۲۱	۴۳۴	۴۵۵	۲۹۰	۲۵۷

جدول (۹): میزان بهینه دریافتی هر مرکز توزیع از هر محصول در هر دوره

دوره . محصول	DC۱	DC۲	DC۳	DC۴	DC۵
T۱.P۱	۰	۲۷۶	۱۷۴	۳۰۷	۲۰۸
T۱.P۲	۳۵۹	۰	۱۸۴	۵۶	۲۴۵
T۱.P۳	۰	۰	۰	۰	۱۷۵
T۲.P۱	۲۰۸	۱۲۸	۶۹	۱۲۲	۲۳۷
T۲.P۲	۱۴۳	۰	۲۳۵	۲۶۴	۳۷۴
T۲.P۳	۳۸۹	۴۳۴	۱۴۲	۱۳۳	۷۲
T۳.P۱	۴۸۰	۲۵۳	۷۵	۴۶۵	۱۷۶
T۳.P۲	۳۷۹	۲۳۰	۶	۸۳	۲۲۵
T۳.P۳	۲۶۹	۲	۱۳۰	۷۳	۴۲۷
T۴.P۱	۱۷۰	۳۵۰	۱۲۹	۱۷۵	۴۱۵
T۴.P۲	۳۷۷	۳۹۰	۱۶۹	۳۰۱	۴۲
T۴.P۳	۴۹۸	۳۸۷	۴۰۰	۶۸	۳۱۱
T۵.P۱	۲۹۳	۴۴۵	۴۲۰	۹۸	۲۹۳
T۵.P۲	۱۹۰	۴۶۷	۸۱	۱۳۱	۱۱۴
T۵.P۳	۳۹	۴۰۹	۲۱۶	۴۳۵	۱۷۵
T۶.P۱	۱۱۲	۴۸۰	۱۲۷	۱۲۶	۲۷۵
T۶.P۲	۲۸۴	۶۵	۳۹۷	۳۲۷	۴۵۷
T۶.P۳	۲۲۱	۴۳۴	۴۵۵	۲۹۰	۲۵۷

جدول (۱۰): میزان موجودی/ذخیره محصولات در هر دوره

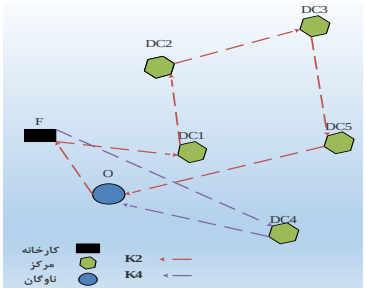
دوره . محصول	F	DC۱	DC۲	DC۳	DC۴	DC۵
T۰.P۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
T۰.P۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
T۰.P۳	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
T۱.P۱	۰	٤۱	۰	۰	۰	۰
T۱.P۲	۰	۰	٦۲	۰	۰	۰
T۱.P۳	۰	۲٤	٤۷	٥۸	۹	۰
T۲.P۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۲.P۲	۰	۰	۳٥	۰	۰	۰
T۲.P۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۳.P۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۳.P۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۳.P۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۴.P۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۴.P۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۴.P۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۵.P۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۵.P۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۵.P۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۶.P۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۶.P۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
T۶.P۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول (۱۱): هزینه تولید و موجودی در هر دوره و در پایان افق برنامه‌ریزی

هزینه‌ها	دوره زمانی					
	T۱	T۲	T۳	T۴	T۵	T۶
هزینه تولید (PC)	۳۹٥٥,۹٥	۸۲۹۲	۸۳۸۹	۱۱٥۲٥,۷٥	۱۰۰٥۳,٤٥	۱۱۸۰۰,٥٥
هزینه سفارشات عقب‌افتاده (BC)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
هزینه نگهداری/موجودی (HC)	٤۹۰,٤	٥٦	۰	۰	۰	۰
مجموع	٤٤٤٦,۳٥	۸۳٥۸	۸۳۸۹	۱۱٥۲٥,۷٥	۱۰۰٥۳,٤٥	۱۱۸۰۰,٥٥
هزینه در پایان افق زمانی	٥٤٥۷۳,۱					

در بخش مسیریابی وسایل نقلیه و عرضه محصولات نیز با توجه به قید زیست‌محیطی حاکم بر مدل و جواب بهینه برنامه‌ریزی تولید و موجودی در جداول قبل در هر شش دوره، وسایل نقلیه شماره ۲و٤ برای تحویل محصولات از کارخانه به مراکز توزیع انتخاب شده‌اند که شکل (۲) مسیر بهینه حرکت هرکدام از آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۱۲) نیز وسیله نقلیه تحویل‌دهنده سفارشات هر مرکز توزیع، هزینه حمل‌ونقل (TC) و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در پایان افق برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مسیریابی بهینه وسایل نقلیه در مثال مسئله GPIRP

جدول (۱۲): برنامه‌ریزی حمل‌ونقل محصولات، هزینه حمل‌ونقل و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای

وسیله نقلیه	مراکز توزیع				
	DC۱	DC۲	DC۳	DC۴	DC۵
K۱	✗	✗	✗	✗	✗
K۲	✓	✓	✓	✗	✓
K۳	✗	✗	✗	✗	✗
K۴	✗	✗	✗	✓	✗
هزینه حمل‌ونقل در پایان افق برنامه‌ریزی					۶۰۶۹۰
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در پایان افق برنامه‌ریزی					۲۸۸۰

۳. ۳. تحلیل حساسیت مطالعه موردی GPIRP

در این قسمت، دلیل بهینگی برخی از مقادیر فوق با توجه به پارامترهای مسئله، تحلیل شده است. براساس جدول (۷) مشخص است که کارخانه در هر یک از شش دوره زمانی، تولید داشته است درحالی‌که براساس جدول (۱۰) در هیچ دوره‌ای محصولات را انبار نکرده است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از عواملی همچون بالا بودن هزینه نگهداری محصولات، پایین بودن ظرفیت تولید در هر دوره و بالا بودن هزینه سفارشات عقب‌افتاده باشد. به‌عنوان مثال، اگر ظرفیت تولید افزایش یابد و هزینه نگهداری و سفارشات عقب‌افتاده کاهش یابد؛ آن‌گاه مطابق جدول (۱۳) در جواب بهینه، کارخانه در هر شش دوره، تولید نکرده و از محصولات ذخیره شده‌ی دوره قبل به مراکز توزیع عرضه می‌نماید.

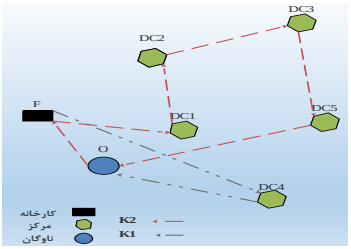
جدول (۱۳): تحلیل حساسیت فعالیت کارخانه نسبت به پارامترهای هزینه نگهداری، ظرفیت انبار و هزینه سفارشات عقب‌افتاده

باز بودن کارخانه ($openF^t$)	*ظرفیت انبار کارخانه*	*هزینه سفارشات عقب‌افتاده هر واحد محصول*	*ظرفیت تولید هر واحد محصول*	*هزینه نگهداری هر واحد محصول*
۱		۲٫۹	۳۰۰۰	۱٫۸
۱	۴۰۰	۳٫۱	۲۰۰۰	۱٫۶
۱		۲٫۷	۲۵۰۰	۲٫۳
۱				
۱				
۱				
۱		۲٫۵	۳۰۰۰	۰٫۵
۰	۱۰۰۰	۲	۳۰۰۰	۱
۱		۲	۳۵۰۰	۰٫۷
۱				
۱				
۰				
۱		۱٫۵	۴۰۰۰	۰٫۳
۰	۱۵۰۰	۱٫۵	۴۰۰۰	۰٫۳
۱		۱٫۵	۴۰۰۰	۰٫۳
۰٫۱				
۰				

براساس شکل (۲) و جدول (۱۲) مشخص است که قید زیست‌محیطی حاکم بر سیستم موجب انتخاب وسایل نقلیه K۲ و K۴ شده است. انتخاب وسیله نقلیه K۲ با توجه به هزینه مناسب آن و داشتن استانداردهای زیست‌محیطی، منطقی است. ازطرف‌دیگر، علی‌رغم آن‌که انتخاب K۴ با توجه به اهداف اقتصادی کاهش هزینه، به‌صرفه نیست؛ اما به علت قید زیست‌محیطی حاکم بر سیستم در اولویت حمل‌ونقل قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال اگر به قید زیست‌محیطی مسئله GPIRP مطرح‌شده ۲۰٪ انعطاف داده شود (یعنی حداکثر انتشار گازهای گلخانه‌ای برای هر دوره از ۵۰۰ واحد به ۶۰۰ واحد افزایش یابد)؛ آن‌گاه هزینه حمل‌ونقل کاهش می‌یابد و K۱ جایگزین K۴ می‌گردد. جدول (۱۴) نحوه حمل‌ونقل محصولات در این حالت را نشان می‌دهد و مسیریابی وسایل نقلیه نیز در شکل (۳) مشخص شده است. این انعطاف موجب کاهش هزینه‌های سیستم از ۶۰۶۹۰ به ۴۷۸۱۰ شده است؛ درحالی‌که به‌موجب کاهش مذکور در هزینه‌ها، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در پایان افق برنامه‌ریزی (نهادهای اتمسفر در زنجیره) از ۲۸۸۰ به ۳۴۲۰ افزایش یافته است. به‌عبارت‌دیگر، میزان انتشار گازهای مضر، ۵۴۰ واحد افزایش یافته است که این میزان افزایش قابل‌توجه در ازای کاهش نه‌چندان چشمگیر برای هزینه‌ها، از نظر تصمیم‌گیرنده در این مطالعه موردی، قابل‌قبول نبوده است. درواقع، اهمیت این مقدار افزایش قابل‌توجه در میزان انتشار گازهای بسیار مضر، از اهمیت آن مقدار کاهش هزینه، بسیار بالاتر است. لذا، جواب بهینه ازنظر تصمیم‌گیرنده، همان جواب با میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برای هر دوره، ۵۰۰ واحد، بوده است.

جدول (١٤): برنامه‌ریزی حمل‌ونقل محصولات، هزینه حمل‌ونقل و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (با انعطاف ٢٠٪)

وسیله نقلیه	مراکز توزیع				
	DC_1	DC_2	DC_3	DC_4	DC_5
K_1	✗	✗	✗	✓	✗
K_2	✓	✓	✓	✗	✓
K_3	✗	✗	✗	✗	✗
K_4	✗	✗	✗	✗	✗
هزینه حمل‌ونقل در پایان افق برنامه‌ریزی				٤٧٨١٠	
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در پایان افق برنامه‌ریزی				٣٤٢٠	



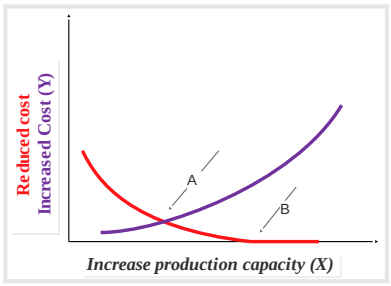
شکل (٣): مسیریابی بهینه وسایل نقلیه در مثال مسئله GPIRP (با انعطاف ٢٠٪)

٣. ٤. نتایج مدیریتی

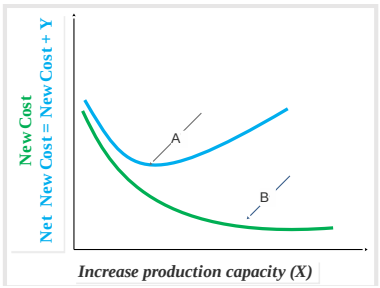
در این بخش، برخی نتایج مدیریتی به طور خلاصه از نتایج محاسباتی گرفته شده است. برای مدیران بخش تولید و موجودی شرکت مربوط به مطالعه موردی ثابت شد که اگر ظرفیت تولید را تا حدی قابل‌قبول افزایش دهند (تا جایی که هزینه نگهداری افزایش چشم‌گیری نداشته باشد)؛ آن‌گاه در جواب بهینه لازم نیست که کارخانه در تمام دوره‌ها، تولید نماید. در نتیجه از محصولات ذخیره شده دوره قبل به مراکز توزیع عرضه می‌نماید و کل هزینه‌ها کاهش خواهد یافت. همچنین، چنانچه قید زیست‌محیطی، انعطاف بیشتری داشته باشد؛ هزینه‌های حمل‌ونقل کارخانه، کاهش بیشتری خواهد داشت. لذا شرکت‌ها باید سعی نمایند از وسیله نقلیه استاندارد با کمترین میزان انتشار استفاده نمایند. نتایج بخش برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی نشان می‌دهد که سه پارامتر ظرفیت تولید، هزینه نگهداری و ظرفیت نگهداری از جمله موارد تاثیرگذار در میزان تولید و موجودی محصولات در هر دوره است. تغییرات این سه پارامتر در ادامه، بررسی شده است:

به فرض آن‌که ظرفیت نگهداری محصولات بالا باشد؛ با افزایش ظرفیت تولید، امکان ذخیره‌سازی بیشتر محصولات برای دوره‌های پر تقاضا افزایش می‌یابد. بنابراین در این دوره‌ها بدون آن‌که هزینه کمبود بر شرکت تحمیل شود می‌توان از هزینه فعال‌سازی مجدد کارخانه‌ها کاست و از موجودی دوره‌های قبل استفاده نمود. در این استراتژی، باید توجه داشت که "هزینه افزایش ظرفیت تولید کارخانه" نسبت به "کاهش هزینه کل در صورت افزایش ظرفیت تولید"، بیشتر نباشد. فرض شود Cap ظرفیت تولید کارخانه و $Cost_{Cap}$ هزینه کل به ازای این سطح از ظرفیت باشد. حال اگر ظرفیت تولید به اندازه X واحد افزایش یابد و ظرفیت جدید تولید برابر $Cap_{new} = Cap + X$ حاصل شده باشد؛ آن‌گاه هزینه کل به ازای این سطح تولید برابر با $Cost_{Cap_{new}}$ می‌گردد که مطمئنا از مقدار $Cost_{Cap}$ بیشتر نیست $\left(Cost_{Cap_{new}} \le Cost_{Cap} \right)$. حال اگر هزینه ناشی از افزایش ظرفیت تولید به اندازه Y باشد، آن‌گاه هزینه واقعی/خالص جدید برابر است با $Cost^{R}_{Cap_{new}} = Cost_{Cap_{new}} + Y$ که در مقایسه با $Cost_{Cap}$ ممکن است بیشتر شود. بنابراین در افزایش ظرفیت تولید، باید هزینه کل به ازای سطح جدید تولید همراه با هزینه ناشی از افزایش ظرفیت تولید، دیده شود. برای توضیح بهتر این موضوع، شکل‌های (٤) و (٥) آورده شده است. در شکل (٤)، میزان کاهش کل هزینه‌ها و افزایش هزینه ظرفیت، در سطوح مختلف افزایش ظرفیت تولید آورده شده است. معمولا در ابتدا، کاهش کل هزینه بیشتر از افزایش هزینه ظرفیت است، سپس در نقطه‌ای مانند A با هم برابر می‌شوند و در ادامه افزایش هزینه ظرفیت بیشتر می‌شود در حالی‌که کاهش کل هزینه از نقطه B به مقدار صفر می‌رسد. نهایتاً، شکل (٥) به وضوح نشان می‌دهد که نقطه A بهترین سطح افزایش ظرفیت تولید است چراکه هزینه خالص جدید در

کمترین حالت خود قرار دارد. مدیران تصمیم‌گیرنده با تحلیل حساسیت روی پارامتر ظرفیت تولید می‌توانند استراتژی افزایش ظرفیت تولید را به‌نحو مذکور، انجام دهند و به نقطه بهینه ***A*** پی ببرند.



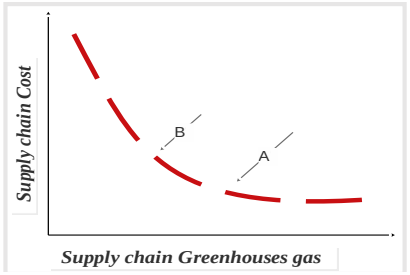
شکل (٤): روند کاهش کل هزینه و افزایش هزینه ظرفیت در سطوح مختلف افزایش ظرفیت تولید



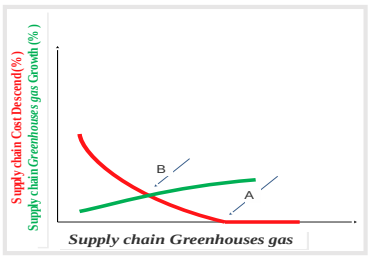
شکل (٥): روند هزینه کل و هزینه کل خالص در سطوح مختلف افزایش ظرفیت تولید

- به فرض آن‌که ظرفیت تولید بالا باشد، افزایش ظرفیت نگهداری محصولات، تحلیلی کاملا مشابه با حالت قبل (افزایش ظرفیت تولید) دارد. لازم به ذکر است که اگر بجای افزایش ظرفیت نگهداری، هزینه نگهداری هر واحد محصول کاهش یابد؛ نتیجه مشابه حاصل می‌شود. نکته دیگری که باید در نظر گرفته شود آن است که اگر در جواب بهینه مسئله، موجودی انبار در دوره‌های مختلف برابر با صفر بود و یا از ظرفیت انبار کمتر بود؛ آن‌گاه استراتژی افزایش ظرفیت نگهداری اشتباه است چراکه فقط هزینه خالص افزایش می‌یابد.
- افزایش همزمان ظرفیت تولید و ظرفیت نگهداری مانند دو حالت قبل است با این تفاوت که هنگام محاسبه هزینه خالص باید دو جزء افزایش هزینه ناشی از افزایش ظرفیت تولید و نگهداری به هزینه کل اضافه گردد.

واضح است که بدون درنظر گرفتن قیود زیست‌محیطی، هزینه کل، کمترین مقدار خواهد بود. درنظر گرفتن قیود زیست‌محیطی سبب می‌شود که هزینه کل افزایش یابد اما این‌که چگونه و تا چه حد قیود زیست‌محیطی مورد توجه قرار گیرند؛ برای مدیران سوالی است که پاسخ به آن توضیح داده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که گرچه با انعطاف در قید زیست‌محیطی، هزینه کل کاهش می‌یابد؛ اما از سطحی به بعد، کاهش چشم‌گیری در هزینه رخ نمی‌دهد. به عبارت دیگر مطابق شکل (٦)، انعطاف در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای سبب می‌شود تا هزینه کل حمل‌ونقل و به تبع آن، هزینه کل کاهش یابد. درحالی‌که در شکل (٧) ملاحظه می‌شود که از نقطه‌ای مانند ***A*** به بعد کاهش چشم‌گیری در هزینه کل، رخ نمی‌دهد. درواقع، نقطه ***A*** می‌تواند نشان‌دهنده یک تصمیم مناسب برای کمینه کردن هزینه با لحاظ قیود زیست‌محیطی در این زنجیره تامین سبز باشد. نقطه پیشنهادی دیگر نیز نقطه‌ای مثل ***B*** است جایی که درصد تغییرات در هزینه و گازهای گلخانه‌ای برابر است. در مسائلی که قیود زیست‌محیطی، حساسیت بیشتری دارند؛ نقطه ***B*** پیشنهاد می‌شود.



شکل (٦): رابطه بین هزینه زنجیره تأمین و انتشار گاز گلخانه‌ای



شکل (٧): دو سطح پیشنهادی از انتشار گازهای گلخانه‌ای زنجیره تأمین

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، دسته‌ای از مسائل زنجیره تأمین تحت عنوان مسئله برنامه‌ریزی تولید–موجودی–مسیریابی (PIRP) بررسی شد. در این مسائل، هدف آن است که برنامه‌ریزی‌های تولید و حمل‌ونقل به‌نحوی صورت پذیرند که هزینه کل فعالیت‌های تولید و عرضه محصولات برای هر شرکت تولیدی کمینه گردد. شرکت‌ها موظفند علاوه بر بعد اقتصادی فعالیت‌هایشان (کاهش هزینه‌های تولید و عرضه)، ملاحظات زیست‌محیطی را نیز در تمامی فرایندهای تولید تا عرضه رعایت کنند. فعالیت‌های حمل‌ونقل محصولات ازجمله مواردی است که برنامه‌ریزی مناسب برای آن می‌تواند همزمان با جلوگیری از افزایش بیش از حد هزینه‌ها، آلودگی‌های زیست‌محیطی هر صنعت را

نیز به میزان قابل‌ملاحظه‌ای کاهش دهد. با اعمال قیود زیست‌محیطی در مسئله PIRP، مسئله‌ای از زنجیره تأمین سبز تحت عنوان مسئله برنامه‌ریزی تولید-مسیریابی-موجودی سبز (GPIRP) تعریف شد که همزمان دوبعد اقتصادی و اجتماعی فعالیت‌های تولید و عرضه هر شرکت را مدیریت می‌کند. در مسئله GPIRP مورد بررسی، به برنامه‌ریزی تولید و موجودی یک کارخانه و مسیریابی عرضه محصولات آن به مراکز توزیع‌کننده پرداخته شد. در این مسئله، مدیران تصمیم‌گیرنده با درنظر گرفتن تمامی پارامترهایی از قبیل هزینه تولید، هزینه نگهداری، هزینه سفارشات عقب‌افتاده، هزینه حمل‌ونقل و همچنین درنظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی به دنبال کمینه نمودن هزینه کل هستند درحالی‌که قیود زیست‌محیطی حاکم بر سیستم نیز نقض نگردد. با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح (MILP) به مدل‌سازی یکپارچه این مسئله در قالب یک مسئله بهینه‌سازی پرداخته شد. به‌منظور نشان دادن کاربردپذیری مدل پیشنهادی و نیز عملی‌بودن لحاظ جنبه زیست‌محیطی، مطالعه موردی انجام شد. مسیریابی بهینه وسایل نقلیه مطالعه موردی در شکل (۲) و نیز با لحاظ انعطاف‌پذیری در قید زیست‌محیطی، در شکل (۳)، نمایش داده شد. نتیجه شد که کل هزینه در صورت افزایش انعطاف در قید زیست‌محیطی، کاهش می‌یابد.

تقاضای مشتریان، تعداد وسایل نقلیه دردسترس، ظرفیت تولید کارخانه و برخی از پارامترهای مهم دیگر از مسئله بصورت مقادیری ثابت و قطعی درنظر گرفته شد؛ درحالی‌که در واقعیت معمولاً در این پارامترها، عدم قطعیت وجود دارد. لذا در تحقیقات آتی می‌توان از رویکردهای بهینه‌سازی در شرایط عدم‌قطعیت بخصوص روش‌های بهینه‌سازی استوار، استفاده نمود تا مدل به مسائل دنیای واقعی نزدیک‌تر گردد.

منابع

[۱] *Dantzig GB, Ramser JH (۱۹۵۹) The truck dispatching problem. Manage Sci* ۶:۸۰–۹۱.

[۲] *Fumero F, Vercellis C (۱۹۹۹) Synchronized development of production, inventory, and distribution schedules. Transp Sci* ۳۳:۳۳۰–۳۴۰.

[۳] *Brown G, Keegan J, Vigus B, Wood K (۲۰۰۱) The Kellogg company optimizes production, inventory, and distribution. Interfaces (Providence)* ۳۱:۱–۱۵.

[۴] *Gupta V, Peters E, Miller T, Blyden K (۲۰۰۲) Implementing a distribution-network decision-support system at Pfizer/Warner-Lambert. Interfaces (Providence)* ۳۲:۲۸–۴۵.

[۵] *Sindhuchao S, Romeijn HE, Akçali E, Boondiskulchok R (۲۰۰۵) An Integrated Inventory-Routing System for Multi-item Joint Replenishment with Limited Vehicle Capacity. J Glob Optim* ۳۲:۹۳–۱۱۸.

[۶] *Lei L, Liu S, Ruszczynski A, Park S (۲۰۰۶) On the integrated production, inventory, and distribution routing problem. IIE Trans* ۳۸:۹۵۵–۹۷۰.

[۷] *Boudia M, Louly MAO, Prins C (۲۰۰۶) A memetic algorithm with population management for a production-distribution problem. IFAC Proc Vol* ۳۹:۵۴۱–۵۴۶.

[۸] *Boudia M, Louly MAO, Prins C (۲۰۰۷) A reactive GRASP and path relinking for a combined production–distribution problem. Comput Oper Res* ۳۴:۳۴۰۲–۳۴۱۹.

[۹] *Yu Y, Chen H, Chu F (۲۰۰۸) A new model and hybrid approach for large scale inventory routing problems. Eur J Oper Res* ۱۸۹:۱۰۲۲–۱۰۴۰.

[۱۰] *Bard JF, Nananukul N (۲۰۰۹) The integrated production–inventory–distribution–routing problem. J Sched* ۱۲:۲۵۷–۲۸۰.

[۱۱] *Oppen J, Løkketangen A, Desrosiers J (۲۰۱۰) Solving a rich vehicle routing and inventory problem using column generation. Comput Oper Res* ۳۷:۱۳۰۸–۱۳۱۷

.

[۱۲] *Bard JF, Nananukul N (۲۰۱۰) A branch-and-price algorithm for an integrated production and inventory routing problem. Comput Oper Res* ۳۷:۲۲۰۲–۲۲۱۷.

[۱۳] Moin NH, Salhi S, Aziz NAB (۲۰۱۱) An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem. Int J Prod Econ ۱۳۳:۳۳۴–۳۴۳.

[۱۴] Coelho LC, Cordeau J-F, Laporte G (۲۰۱۲) The inventory-routing problem with transshipment. Comput Oper Res ۳۹:۲۵۳۷–۲۵۴۸.

[۱۵] Coelho LC, Cordeau J-F, Laporte G (۲۰۱۳) Thirty years of inventory routing. Transp Sci ۴۸:۱–۱۹.

[۱۶] Mirzapour Al-e-hashem SMJ, Rekik Y (۲۰۱۴) Multi-product multi-period Inventory Routing Problem with a transshipment option: A green approach. Int J Prod Econ ۱۵۷:۸۰–۸۸.

[۱۷] Bertazzi L, Bosco A, Laganà D (۲۰۱۵) Managing stochastic demand in an Inventory Routing Problem with transportation procurement. Omega ۵۶:۱۱۲–۱۲۱.

[۱۸] Adulyasak Y, Cordeau J-F, Jans R (۲۰۱۵) The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms. Comput Oper Res ۵۵:۱۴۱–۱۵۲.

[۱۹] Yantong LI, Feng CHU, Zhen Y, Calvo RW (۲۰۱۶) A Production Inventory Routing Planning for Perishable Food with Quality Consideration. IFAC-PapersOnLine ۴۹:۴۰۷–۴۱۲.

[۲۰] Agra A, Cerveira A, Requejo C (۲۰۱۶) Lagrangian Relaxation Bounds for a Production-Inventory-Routing Problem. In: Pardalos PM, Conca P, Giuffrida G, Nicosia G (eds) Mach. Learn. Optim. Big Data Second Int. Work. MOD ۲۰۱۶, Volterra, Italy, August ۲۶-۲۹, ۲۰۱۶, Revis. Sel. Pap. Springer International Publishing, Cham, pp ۲۳۶–۲۴۵

[۲۱] Hasni S, Toumi S, Jarboui B, Mjirda A (۲۰۱۷) GVNS based heuristic for solving the multi-product multi-vehicle inventory routing problem. Electron Note s Discret Math ۵۸:۷۱–۷۸.

[۲۲] Chitsaz M, Cordeau J-F, Jans R (۲۰۱۷) A Unified Decomposition Matheuristic for Assembly, Production and Inventory Routing. Cah. du GERAD

[۲۳] Qiu Y, Qiao J, Pardalos PM (۲۰۱۷) A branch-and-price algorithm for production routing problems with carbon cap-and-trade. Omeg a ۶۸:۴۹–۶۱.

[۲۴] Desrochers M, Laporte G (۱۹۹۱) Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints. Oper Res Lett ۱۰:۲۷–۳۶.

پی نوشت

[۱] *Vendor Managed Inventory*
[۲] *Vehicle Routing Problem*
[۳] *Inventory Routing Problem*
[۴] *Memetic Algorithm*
[۵] *Column Generation*
[۶] *Neighborhood Search*
[۷] *Assembly Routing Problem*
[۸] *Dantzig–Wolfe Decomposition*