

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 مهم 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 دبعاد 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

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 پیشواپی (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه

علم و صنعت ایران

(pishvae@iust.ac.ir)

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 فروشنده¹ (VMI) رخ می‌دهد.

VMI یکی 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 دنتزیگ و رامسیر [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 به گونه‌ای 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 به نحوی که 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 پرخاطر 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، در نظر 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 دلیل اهمیت بالای آن، گسترش یافته است. یکپارچه‌سازی عملیات تولید، موجودی، مسیریابی و توزیع بطور گسترده در زنجیره تأمین جهت رسیدن به مزایای رقابتی در نظر گرفته شده است. این موضوع برای شرکت‌هایی با بهره‌گیری پایین از ظرفیت‌شان و نیز هزینه توزیع بالای‌شان، بسیار بااهمیت است [۲-۴].

سیندهوچا و همکاران [۵] یک مسئله IRP یکپارچه را برای بازپس‌سازی 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 در نظر گرفتند. یو و همکاران [۹] یک مسئله IRP را با محدودیت اندازه



ناوگان حمل و نقل، مطالعه نمودند. آن‌ها بدلیل پیچیدگی این نوع مسائل از رویکرد تقریبی آزادسازی لاگرانژ استفاده نمودند. بارد و ناناکول [۱۰] با تجزیه و تحلیل 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 در نظر گرفته شوند. اُپن و همکاران [۱۱] با در نظر 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. کوهلو و همکاران [۱۴] مسئله IRP را با انتقال دریایی معرفی نمودند جایی که مسیریابی وسایل و تصمیمات موجودی باید باهم بطور همزمان توجه شوند. کوهلو 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 در نظر گرفتن محدودیت‌های موجودی و مسیریابی تعیین نمایند.

میرزاپور آل‌هاشم و رکیک [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 حمل و نقل با تولید گازهای گلخانه‌ای بود که از برنامه‌ریزی خطی مختلط کمک گرفتند. برتازی و همکاران [۱۷] پژوهشی ارائه دادند که مسئله IRP دارای محدودیت ظرفیت تولید بود و هدف، کاهش هزینه‌های کمبود، نگهداری و حمل و نقل در یک دوره زمانی بود. ادلیاسک 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 در نظر گرفتن فسادپذیری محصولات انجام دادند. اگر 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 حسنی 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 حمل و نقل 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 لزوماً آخرین آن‌ها، کیو و همکاران [۲۳] مدلی را برای مسئله PIRP با در نظر 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 بر مبنای دنتزیک و لوف^۸ استفاده نمودند.

جدول (۱): برخی از آخرین تحقیقات مرتبط

مطالعه موردی	ملاحظات زیستی (انتشار گازهای گلخانه‌ای)	رویکرد حل	قطعی یا غیرقطعی	نوع مدل‌سازی	موضوع اصلی	محققان
	☑	CPLEX	قطعی	MILP	GIRP	Mirzapour Al-e-hashem & Rekik (۲۰۱۴)
	☑	الگوریتم ریاضی براساس چرخ رولت	غیرقطعی با توزیع گسسته	MINLP	IRP	Bertazzi et al. (۲۰۱۵)
	-	-	-	مروری	PIRP	Adulyasak et al. (۲۰۱۵)
	☑	CPLEX	قطعی	MILP	PIRP	Yantong et al. (۲۰۱۶)
	☑	آزادسازی لاگرانژ	قطعی	LP	PIRP	Agra et al. (۲۰۱۶)
	☑	الگوریتم جست‌وجوی همسایگی	قطعی	LP	IRP	Hasni et al. (۲۰۱۷)
	☑	CPLEX و هیورستیک	قطعی	MILP	ARP	Chitsaz et al. (۲۰۱۷)
	☑	هیورستیک	قطعی	MILP	PIRP	Qiu et al. (۲۰۱۷)
	☑	CPLEX	قطعی	MILP	GPIRP	This Research



در این پژوهش، از رویکردهای مدل‌سازی مقالات میرزاپور آل هاشم و رکیک [۱۶]، آولیاسک 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، در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی، دوم، توسعه مدل یکپارچه تولید-موجودی-مسیریابی در زنجیره تأمین سبز دوسطحی و در نتیجه 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 هر سال) 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 در نظر 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, \dots) از جمله این آلودگی‌هاست که با روند گرم شدن کره زمین، رابطه مستقیم دارد. از این رو، قیود و محدودیت‌هایی برای جلوگیری از انتشار بیش‌ازحد این گازها بر شرکت‌ها اعمال می‌شود. با توجه به آن‌که حمل‌ونقل از جمله 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 در نظر 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 افزاینده می‌شوند:



- ظرفیت تولید در کارخانه: تنوع محصولات محدود است و میزان تولید هر کدام در هر دوره از حدی بیشتر نمی شود.
- ظرفیت انبار کارخانه: تولید کارخانه باید بگونه ای 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 حمل و نقل: 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 گلخانه ای: در هر دوره نباید میزان انتشار گازهای گلخانه ای کل فرایند حمل و نقل از مقدار مجاز آن بیشتر شود (میزان انتشار این گازها برای هر وسیله نقلیه مشخص است).

۲.۲. مدل سازی مسئله بصورت یک مسئله بهینه سازی خطی

در این بخش، مدل مسئله بصورت یک مسئله بهینه سازی ریاضی چند دوره ای بیان می گردد.
نمادها:

مجموعه ها:

کارخانه تولیدکننده محصولات	$\{F\}$
مراکز توزیع	$DC = \{1, 2, 3, \dots, |DC|\}$
ناوگان وسایل نقلیه	$\{O\}$
مجموعه تمامی مراکز توزیع و کارخانه	$N = D \cup \{F\}$
مجموعه یال های بین مراکز توزیع و کارخانه	$E = N \times N$
افق زمانی	$T = \{1, 2, 3, \dots, |T|\}$
مجموعه وسایل نقلیه	$K = \{1, 2, 3, \dots, |K|\}$
مجموعه محصولات	$P = \{1, 2, 3, \dots, |P|\}$

پارامترها:

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



میزان تقاضای محصول P از مرکز توزیع d در دوره t	$dem_{p,d}^t$
میزان گاز گلخانه‌ای تولید شده به ازای هر واحد حمل‌ونقل وسیله نقلیه k	GH_k
حداکثر انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر دوره	$MaxGH^t$

متغیرهای تصمیم‌گیری:

میزان تولید محصول نوع P در دوره t	x_p^t
میزان عرضه محصول نوع P از مرکز توزیع d در دوره t	$sup_{p,d}^t$
میزان عرضه محصول نوع P از کارخانه در دوره t	$supF_p^t$
حجم کل محصولات عرضه شده از کارخانه در دوره t	$supF^t$
میزان محصول دریافت شده نوع P از مرکز توزیع d در دوره t	$rec_{p,d}^t$
میزان موجودی محصول نوع P در مرکز توزیع d در دوره t	$I_{p,d}^t$
میزان موجودی محصول نوع P در کارخانه در دوره t	$I_{p,F}^t$
متغیر باینری مشخص‌کننده اجاره شدن (۱) یا نشدن (۰) وسیله نقلیه k در دوره t (متغیر)	$y_{(O,F),k}^t$
باینری مشخص‌کننده حرکت (۱) یا عدم حرکت (۰) وسیله نقلیه k از ناوگان به کارخانه در دوره t	$y_{(i,j),k}^t$
متغیر باینری مشخص‌کننده عبور (۱) یا عدم عبور (۰) وسیله نقلیه k از یال $(i, j) \in E$ در دوره t	$y_{(i,j),k}^t$
متغیر باینری مشخص‌کننده فعالیت (۱) یا عدم فعالیت (۰) کارخانه در دوره t	$openF^t$
هزینه در پایان افق زمانی	Total Cost
هزینه تولید در دوره t	PC_t
هزینه متغیر تولید در دوره t	VPC_t
هزینه ثابت تولید در دوره t	FPC_t
هزینه حمل‌ونقل وسایل نقلیه در دوره t	TC_t
هزینه متغیر حمل‌ونقل وسایل نقلیه در دوره t	VTC_t
هزینه ثابت حمل‌ونقل وسایل نقلیه در دوره t	FTC_t
هزینه نگهداری موجودی در دوره t	HC_t
هزینه سفارشات عقب‌افتاده در دوره t	BC_t

رابطه (۱) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که شامل ۴ جزء هزینه‌های ثابت و متغیر تولید (۲)، هزینه نگهداری موجودی در انبار کارخانه و مراکز توزیع (۳)، هزینه سفارشات عقب‌افتاده (۴) 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.

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

$$PC_t = VPC_t + FPC_t = \sum_{p \in P} vcp_p \cdot x_p^t + fcp \cdot openF^t \quad \forall t \quad (۲)$$

$$HC_t = \sum_{p \in P} hc_{p,F}^t \cdot I_{p,F}^t + \sum_{p \in P} \sum_{d \in DC} hc_{p,d}^t \cdot I_{p,d}^t \quad \forall t \quad (۳)$$

$$BC_t = \sum_{p \in P} \sum_{d \in DC} bc_p \cdot (dem_{p,d}^t - sup_{p,d}^t) \quad \forall t \quad (۴)$$

$$TC_t = VTC_t + FTC_t = \sum_{(i,j) \in E} \sum_{k \in K} v_k \cdot d_{(i,j)} \cdot y_{(i,j),k}^t + \sum_{k \in K} f_k \cdot y_{(O,F),k}^t \quad \forall t \quad (۵)$$



قیود عملیاتی مسئله شامل ظرفیت تولید، ظرفیت حمل و نقل، 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 حمل و نقل وسایل نقلیه و ... هستند که در روابط زیر توضیح داده می‌شوند:

$$I_{p,F}^t = I_{p,F}^{t-1} + x_p^t - supF_p^t \quad \forall t, p \quad (6)$$

$$I_{p,d}^t = I_{p,d}^{t-1} + rec_{p,d}^t - sup_{p,d}^t \quad \forall t, p, d \quad (7)$$

$$x_p^t \leq capF_p \cdot openF^t \quad \forall t, p \quad (8)$$

$$\sum_d rec_{p,d}^t = supF_p^t \quad \forall t, p \quad (9)$$

$$supF_p^t \leq I_{p,F}^{t-1} + x_p^t \quad \forall t, p \quad (10)$$

$$sup_{p,d}^t \leq I_{p,d}^{t-1} + rec_{p,d}^t \quad \forall t, p, d \quad (11)$$

$$sup_{p,d}^t \leq dem_{p,d}^t \quad \forall t, p, d \quad (12)$$

$$supF^t = \sum_p supF_p^t \quad \forall t \quad (13)$$

$$\sum_k capV_k \cdot y_{(O,F),k}^t \geq supF^t \quad \forall t \quad (14)$$

$$\sum_p s_p I_{p,F}^t \leq CapSF \quad \forall t \quad (15)$$

$$\sum_p s_p I_{p,d}^t \leq CapSD_d \quad \forall t, d \quad (16)$$

$$\sum_{(i,j) \in E^+} \sum_{k \in VehType} GH_k \cdot d_{(i,j)} \cdot y_{(i,j),k}^t \leq MaxGH^t \quad \forall t \quad (17)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} y_{(i,j),k}^t \leq 1 \quad \forall t, k \quad (18)$$

$$\sum_{(i,n) \in E} y_{(i,n),k}^t = \sum_{(n,j) \in E} y_{(n,j),k}^t \quad \forall t, k, n \quad (19)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} y_{(i,j),k}^t \leq y_{(O,F),k}^t \quad \forall t, k \quad (20)$$

$$u_{i,k}^t - u_{j,k}^t + |N| y_{(i,j),k}^t \leq |N| - 1 \quad \forall t, k, (i, j) \quad (21)$$

$$\begin{cases} x_p^t, sup_{p,d}^t, supF_p^t, supF^t, rec_{p,d}^t, I_{p,d}^t, I_{p,F}^t \geq 0 \quad \forall All \\ y_{(O,F),k}^t, y_{(i,j),k}^t, openF^t \in \{0,1\} \quad \forall All \end{cases} \quad (22)$$

روابط (6) و (7) سطح موجودی کارخانه و مراکز توزیع را برای هر محصول در هر دوره محاسبه می‌کنند. رابطه (8) ظرفیت کارخانه را در تولید هر محصول نشان می‌دهد. رابطه (9) کل محصولات دریافتی را برای هر نوع محصول، در هر دوره محاسبه می‌کند. به عبارت دیگر، رابطه (9) مشخص می‌کند که در هر دوره چه میزان از هر نوع محصول از کارخانه عرضه می‌گردد. رابطه (10) 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 (11) 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 (12) بیان می‌کند که میزان عرضه به هر مشتری از هر مرکز توزیع نمی‌تواند از تقاضای مشتری بیشتر باشد.

رابطه (13) حجم کل محصولات عرضه شده از کارخانه به مشتریان را محاسبه می‌کند. رابطه (14) اطمینان می‌دهد که وسایل نقلیه باید به گونه‌ای اجاره شوند که ظرفیت کل آن‌ها بیشتر یا مساوی حجم محصولات عرضه شده از کارخانه باشد.

رابطه (15) اطمینان می‌دهد که موجودی کارخانه در هر دوره نباید از کل فضای خالی انبار کارخانه بیشتر باشد و رابطه (16) این موضوع را در انبار مراکز توزیع کنترل می‌کند. رابطه (17) محدودیت زیست‌محیطی حاکم بر فعالیت‌های حمل و نقل است و مانع می‌شود که مجموع گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل و نقل شبکه از حداکثر مجاز آن در هر دوره بیشتر شود.

روابط (18) تا (21) عمدتاً بر بخش مسیریابی مسئله حاکم هستند. بنا بر رابطه (18) در هر دوره، حداکثر یک وسیله نقلیه از هر یال می‌تواند عبور کند. رابطه (19) 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 قبلاً از ناوگان به سمت کارخانه حرکت کرده باشد (اجاره شده باشد). رابطه (۲۱)، محدودیت‌های حذف زیرتور MTZ را تضمین می‌نماید [۲۴]. در این محدودیت، $u_{i,k}^t$ و $u_{j,k}^t$ 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 این صورت 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 توازن 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:

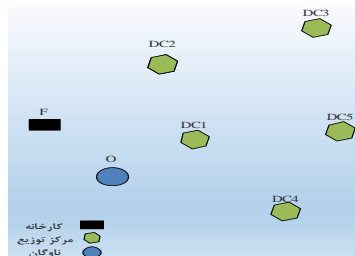
$$Min\{PC+TC+HC+BC, \sum_{(i,j) \in E} \sum_{k \in K} GH_k \cdot d_{(i,j)} \cdot y'_{(i,j),k}\} \quad (27)$$

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 $P1, P2, P3$ و در سطح دوم آن، پنج مرکز توزیع در پنج نقطه مختلف قرار گرفته‌اند (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 (۴) اطلاعات مربوط به ظرفیت انبارهای کارخانه و مراکز توزیع، جدول (۵) اطلاعات مربوط به میزان تقاضای ارائه شده از هر محصول به مراکز توزیع در افق برنامه‌ریزی و جدول (۶) ماتریس فاصله را در این شبکه توزیع، نشان می‌دهد. این اطلاعات مربوط به یک افق زمانی شش دوره‌ای (مثلاً ۶ ماهه) است. همچنین، موجودی فعلی کارخانه و مراکز توزیع ۱۰۰ واحد در نظر 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
P1	۳۰۰۰	۱٫۸	۶۰۰	۱٫۸	۲٫۹	۰٫۶
P2	۲۰۰۰	۲٫۰۵	۶۰۰	۱٫۶	۳٫۱	۰٫۸
P3	۲۵۰۰	۳٫۶۵	۶۰۰	۲٫۳	۳٫۷	۰٫۵۵



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

وسيله نقلیه	هزینه متغیر برای هر واحد مسافت	هزینه ثابت اجاره	ظرفیت (گنجایش)	میزان انتشار آلاینده در هر واحد مسافت
K ₁	۷	۷۰۰	۱۲۰۰	۰.۸
K _۲	۶	۹۰۰	۱۱۰۰	۰.۶۵
K _۳	۹	۱۰۵۰	۱۵۰۰	۰.۹
K _۴	۱۱	۱۳۰۰	۱۰۰۰	۰.۵

جدول (۴): اطلاعات مربوط به کارخانه و مراکز توزیع مطالعه موردی مسئله GPIRP

تسهیلات	F	DC ₁	DC _۲	DC _۳	DC _۴	DC _۵
گنجایش / ظرفیت	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۳۲۰	۲۶۰	۴۰۰

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					
	T ₁	T _۲	T _۳	T _۴	T _۵	T _۶
P ₁ .DC ₁	۵۹	۲۴۹	۴۸۰	۱۷۰	۲۹۳	۱۱۲
P ₁ .DC _۲	۳۷۶	۱۲۸	۲۵۳	۳۵۰	۴۴۵	۴۸۰
P ₁ .DC _۳	۲۷۴	۶۹	۷۵	۱۲۹	۴۲۰	۱۲۷
P ₁ .DC _۴	۴۰۷	۱۲۲	۴۶۵	۱۷۵	۹۸	۱۲۶
P ₁ .DC _۵	۳۰۸	۲۳۷	۱۷۶	۴۱۵	۲۹۳	۲۷۵
P _۲ .DC ₁	۴۵۹	۱۴۳	۳۷۹	۳۷۷	۱۹۰	۲۸۴
P _۲ .DC _۲	۳۸	۲۷	۲۶۵	۳۹۰	۴۶۷	۶۵
P _۲ .DC _۳	۲۸۴	۲۳۵	۶	۱۶۹	۸۱	۳۹۷
P _۲ .DC _۴	۱۵۶	۳۶۴	۸۳	۳۰۱	۱۳۱	۳۲۷
P _۲ .DC _۵	۲۴۵	۳۷۴	۲۳۵	۴۲	۱۱۴	۴۵۷
P _۳ .DC ₁	۷۶	۴۱۳	۲۶۹	۴۹۸	۳۹	۲۲۱
P _۳ .DC _۲	۵۳	۴۸۱	۲	۳۸۷	۴۰۹	۴۳۴
P _۳ .DC _۳	۴۲	۲۰۰	۱۳۰	۴۰۰	۲۱۶	۴۵۵
P _۳ .DC _۴	۹۱	۱۳۲	۷۳	۶۸	۴۳۵	۲۹۰
P _۳ .DC _۵	۲۷۵	۷۲	۴۳۷	۳۱۱	۱۷۵	۲۵۷

جدول (۶): ماتریس فاصله در مطالعه موردی مسئله GPIRP

	O	F	DC ₁	DC _۲	DC _۳	DC _۴	DC _۵
O	۰	۱۰۰	۸۰	۲۵۰	۴۸۰	۳۱۰	۲۸۵
F	۱۰۰	۰	۱۲۵	۱۴۰	۳۸۵	۳۰۵	۲۸۰
DC ₁	۸۰	۱۲۵	۰	۱۰۰	۲۴۰	۱۸۵	۱۳۳
DC _۲	۲۵۰	۱۴۰	۱۰۰	۰	۱۴۲	۴۴۸	۳۱۸
DC _۳	۴۸۰	۳۸۵	۲۴۰	۱۴۲	۰	۴۰۰	۲۱۰
DC _۴	۳۱۰	۳۰۵	۱۸۵	۴۴۸	۴۰۰	۰	۱۶۵
DC _۵	۲۸۵	۲۸۰	۱۳۳	۳۱۸	۲۱۰	۱۶۵	۰

۲.۳. 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

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

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

دوره - محصول	F	DC ۱	DC ۲	DC ۳	DC ۴	DC ۵
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	DC ۱	DC ۲	DC ۳	DC ۴	DC ۵
T۱.P۱	۰	۳۷۶	۱۷۴	۳۰۷	۳۰۸
T۱.P۲	۳۵۹	۰	۱۸۴	۵۶	۲۴۵
T۱.P۳	۰	۰	۰	۰	۱۷۵
T۲.P۱	۳۰۸	۱۲۸	۶۹	۱۲۲	۲۳۷
T۲.P۲	۱۴۳	۰	۲۳۵	۲۶۴	۳۷۴
T۲.P۳	۳۸۹	۴۳۴	۱۴۲	۱۳۲	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

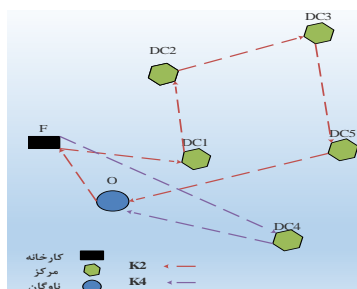
دوره . محصول	F	DC1	DC2	DC3	DC4	DC5
T0.P1	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
T0.P2	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
T0.P3	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
T1.P1	.	۴۱	.	.	.	.
T1.P2	.	.	۶۲	.	.	.
T1.P3	.	۲۴	۴۷	۵۸	۹	.
T2.P1
T2.P2	.	.	۳۵	.	.	.
T2.P3
T3.P1
T3.P2
T3.P3
T4.P1
T4.P2
T4.P3
T5.P1
T5.P2
T5.P3
T6.P1
T6.P2
T6.P3

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

هزینه‌ها	دوره زمانی					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
هزینه تولید (PC)	۳۹۵۵,۹۵	۸۲۹۲	۸۳۸۹	۱۱۵۲۵,۷۵	۱۰۰۵۳,۴۵	۱۱۸۰۰,۵۵
هزینه سفارشات عقب‌افتاده (BC)	.	.	.	.	.	.
هزینه نگهداری/موجودی (HC)	۴۹۰,۴	۵۶	.	.	.	.
مجموع	۴۴۴۶,۳۵	۸۳۵۸	۸۳۸۹	۱۱۵۲۵,۷۵	۱۰۰۵۳,۴۵	۱۱۸۰۰,۵۵
هزینه در پایان افق زمانی	۵۴۵۷۳,۱					

در بخش مسیریابی وسایل نقلیه و عرضه محصولات نیز با توجه به قید زیست‌محیطی حاکم بر مدل و جواب بهینه برنامه ریزی تولید و موجودی در جداول قبل در هر شش دوره، وسایل نقلیه شماره ۲ و ۴ 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 حمل و نقل (TC) و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در پایان افق برنامه ریزی 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				
	DC ۱	DC ۲	DC ۳	DC ۴	DC ۵
K ۱	*	*	*	*	*
K ۲	✓	✓	✓	*	✓
K ۳	*	*	*	*	*
K ۴	*	*	*	✓	*

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 بهیجگی 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.

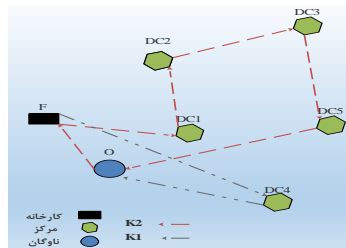
جدول (۱۳): تحلیل حساسیت فعالیت کارخانه نسبت به پارامترهای هزینه نگهداری، ظرفیت انبار و هزینه سفارشات عقب‌افتاده

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		۲٫۵	۳۰۰۰	۰٫۵
۰	۱۰۰۰	۲	۳۰۰۰	۱
۱		۲	۳۵۰۰	۰٫۷
۱				
۰				
۱		۱٫۵	۴۰۰۰	۰٫۳
۰	۱۵۰۰	۱٫۵	۴۰۰۰	۰٫۳
۱		۱٫۵	۴۰۰۰	۰٫۳
۰				

براساس شکل (۲) و جدول (۱۲) مشخص است که قید زیست‌محیطی حاکم بر سیستم موجب انتخاب وسایل نقلیه K ۲ و K ۴ شده است. انتخاب وسیله نقلیه K ۲ با توجه به هزینه مناسب آن و داشتن استانداردهای زیست‌محیطی، منطقی است. از طرف دیگر، علی‌رغم آن‌که انتخاب K ۴ 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 K ۱ جایگزین K ۴ 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 از نظر تصمیم‌گیرنده، همان جواب با میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برای هر دوره، ۵۰۰ واحد، بوده است.

جدول (۱۴): برنامه‌ریزی حمل‌ونقل محصولات، هزینه حمل‌ونقل و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (با انعطاف ۲۰٪)

وسيله نقلیه	مراکز توزیع				
	DC _۱	DC _۲	DC _۳	DC _۴	DC _۵
K _۱	*	*	*	✓	*
K _۲	✓	✓	✓	*	✓
K _۳	*	*	*	*	*
K _۴	*	*	*	*	*
هزینه حمل‌ونقل در پایان افق برنامه‌ریزی				۴۷۸۱۰	
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در پایان افق برنامه‌ریزی				۳۴۲۰	



شکل (۳): مسیریابی بهینه وسایل نقلیه در مثال مسئله GPIP (با انعطاف ۲۰٪)

۴.۳. 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 قابل قبول 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 مطمئناً از

مقدار $Cost_{Cap}$ بیشتر نیست $(Cost_{Cap_{new}} \leq Cost_{Cap})$. حال اگر هزینه ناشی از افزایش ظرفیت تولید به اندازه Y باشد، آن‌گاه

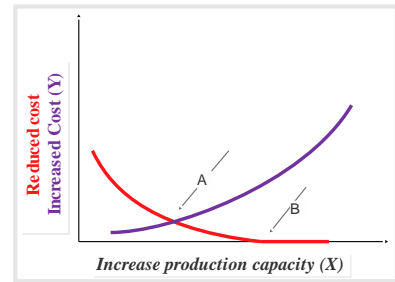
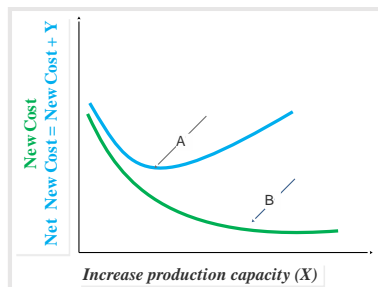
$$Cost_{Cap_{new}}^R = Cost_{Cap_{new}} + Y$$

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 (۴) و (۵) آورده شده است. در شکل (۴)، میزان کاهش کل هزینه‌ها و افزایش هزینه ظرفیت، در سطوح مختلف افزایش ظرفیت تولید آورده شده است. معمولاً 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 (۵) 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 به نحو مذکور، انجام دهند و به نقطه بهینه *A* پی ببرند.

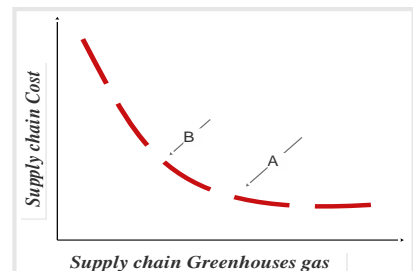
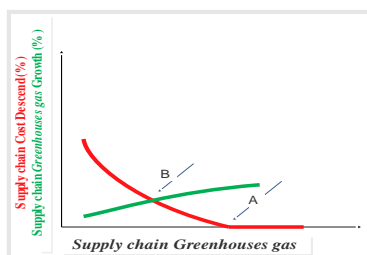


شکل (۴): روند کاهش کل هزینه و افزایش هزینه ظرفیت در سطوح مختلف افزایش ظرفیت تولید
 شکل (۵): روند هزینه کل و هزینه کل خالص در سطوح مختلف افزایش ظرفیت تولید

به فرض آن که ظرفیت تولید بالا باشد، افزایش ظرفیت نگهداری محصولات، تحلیلی کاملاً 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 در نظر گرفتن قیود زیست‌محیطی، هزینه کل، کمترین مقدار خواهد بود. در نظر گرفتن قیود زیست‌محیطی سبب می‌شود که هزینه کل افزایش یابد اما این که 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 (۶)، انعطاف در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای سبب می‌شود تا هزینه کل حمل‌ونقل و به تبع آن، هزینه کل کاهش یابد. درحالی‌که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود که از نقطه‌ای مانند *A* به بعد کاهش چشم‌گیری در هزینه کل، رخ نمی‌دهد. در واقع، 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 (۷): دو سطح پیشنهادی از انتشار گازهای گلخانه‌ای زنجیره تامین

شکل (۶): رابطه بین هزینه زنجیره تامین و انتشار گاز گلخانه‌ای

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، دسته‌ای از مسائل زنجیره تامین 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 از جمله 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 قابل ملاحظه‌ای 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 دویعد 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 در نظر گرفتن تمامی پارامترهایی از قبیل هزینه تولید، هزینه نگهداری، هزینه سفارشات عقب‌افتاده، هزینه حمل‌ونقل و همچنین در نظر 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 عدد صحیح (MILP) به مدل‌سازی یکپارچه این مسئله در قالب یک مسئله بهینه‌سازی پرداخته شد. به منظور نشان دادن کاربردپذیری مدل پیشنهادی و نیز عملی بودن 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 در دسترس، ظرفیت تولید کارخانه و برخی از پارامترهای مهم دیگر از مسئله بصورت مقادیری ثابت و قطعی در نظر گرفته شد؛ درحالی‌که در واقعیت معمولاً در این پارامترها، عدم قطعیت وجود دارد. لذا در تحقیقات آتی می‌توان از رویکردهای بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت 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, Ruszczyński 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, Reik 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. *Omega* 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