مهندسی صنایع و مدیریت شریف (زمستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۱-۳۳، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۶۵-۷۷

Original Article

مروری بر تحقیقات مرتبط با مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی با تأکید بر مدل‌ها و روش‌های حل

علی ریحانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین
مهدی سیف برقی* (دانشیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه الزهرا

مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی، ترکیبی از دو مسئله‌ی کلاسیک، مسیریابی ـ موجودی و تعیین اندازه تولید است. در این مسئله می‌کوشیم تا به‌طور همزمان تصمیمات تولید، موجودی و مسیریابی بهینه شود. در واقع این مسئله‌ی تعمیم، مسئله‌ی مسیریابی موجودی است. اگرچه این مسئله ساختار پیچیده‌یی دارد اما علاقه‌ی روبه رشد در این مسئله طی سال‌های اخیر موجب شده است که توجه زیادی به این مسئله به‌لحاظ نظری جلب شود. در این نوشتار به بررسی جامع و دسته‌بندی تحقیقات مربوطه پرداخته و همچنین یکی از انواع مدل‌های این مسئله ارائه می‌شود. مدل مورد نظر شامل یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی است که دارای یک مرکز تولید و چند مشتری با تقاضای قطعی است. این مسئله در حالت چندمحصولی ارائه می‌شود و کمبود موجودی در آن مجاز نیست. در نهایت، توصیه‌هایی برای تحقیقات بیشتر ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین، تولید ـ مسیریابی ـ موجودی، الگوریتم‌های دقیق، ابتکاری، چند محصولی.

alihector69@yahoo.com
m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

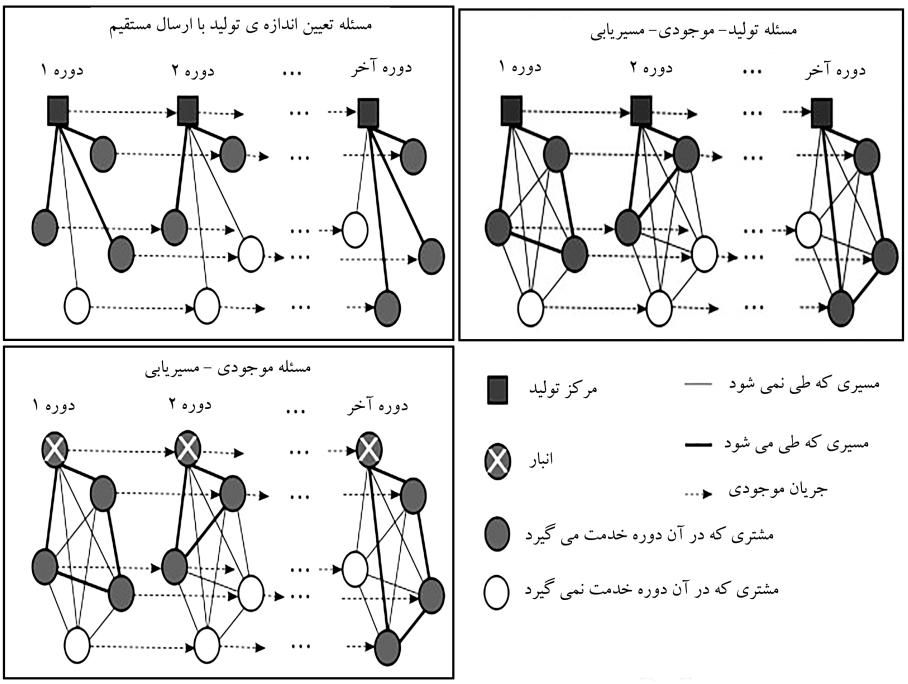
۱. مقدمه

نیاز به یکپارچه‌سازی و هماهنگی اجزای مختلف در مدیریت زنجیره‌ی تأمین (SCM)[۱] به‌عنوان عاملی مهم برای بیشتر شرکت‌ها در حفظ توان رقابتی شناخته شده است. بسیاری از فعالیت‌ها در زنجیره‌ی تأمین به هم مربوط است و تغییرات در یک بخش به احتمال فراوان بر عملکرد فرایندهای دیگر تأثیر می‌گذارد.[۱] اجزای مختلف یک زنجیره‌ی تأمین شامل مکان‌یابی، تولید، مسیریابی، مدیریت موجودی، بازاریابی و خرید است.

مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی (PIRP)[۲] در تلاش است تا سه جزء از زنجیره‌ی تأمین یعنی تولید، موجودی و مسیریابی را به‌طور همزمان بهینه‌سازی کند. در زنجیره‌ی تأمین نمونه که شامل فعالیت‌های پی‌درپی از تولید، نگه‌داری موجودی و توزیع است، هر فعالیتی اغلب با استفاده از تصمیم‌گیری‌های از پیش تعیین شده‌ی فعالیت‌های قبلی برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی شده است. به‌عنوان مثال یک برنامه‌ریز تولید، درمورد مقدار تولید به‌منظورکمینه‌سازی مقدار تولیدی و هزینه‌ی موجودی در تأسیسات تولید تصمیم‌گیری می‌کند. تصمیمات برنامه‌ریزی شده درمورد اندازه تولیدی به‌عنوان ورودی در مراحل برنامه‌ریزی توزیع استفاده می‌شود. از آنجا که تصمیمات به فعالیت قبلی محدود شده است، مزایای هماهنگی در فرایند برنامه‌ریزی در نظرگرفته شده است. «سیستم برنامه‌ریزی عملیاتی در زنجیره‌ی تأمین یکپارچه» ابزاری است که برای بهینه‌سازی تصمیم‌گیری چند جزء باهم استفاده شده است.

در سال‌های اخیر بسیاری از شرکت‌ها از قبیل کلوگ و فریتولی با ایجاد یک برنامه‌ریزی یکپارچه، موفق به صرفه‌جویی چندین میلیون دلار هزینه شده‌اند.[۲و۳] این مسئله از آن جهت مورد توجه است که چند جزء از مدیریت زنجیره‌ی تأمین را به یکدیگر پیوند می‌دهد و در واقع ترکیبی از مسائل سیستم تولید، کنترل موجودی و مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه (VRP)[۳] است که در رویکرد سنتی به‌صورت جداگانه کاملاً به این مباحث پرداخته شده است، اما یکپارچه‌سازی آن‌ها می‌تواند تأثیر به‌سزایی در بهبود عملکرد زنجیره‌ی تأمین داشته باشد. PIRP در بستر مدیریت موجودی توسط فروشنده (VMI)[۴] نیز مطرح شده است. در سیستم‌های مدیریت موجودی توسط فروشنده، فروشنده قادر به کنترل زمان‌بندی و اندازه تحویل به مشتریان است. در قبال این آزادی عمل، فروشنده تضمین می‌کند که مشتریان با کمبود مواجه نشوند. در روابط سنتی‌تر میان فروشنده و مشتری که در آن مشتریان درخواست سفارش محصولات را به فروشنده می‌دادند، به‌دلیل زمان‌بندی سفارش‌های مشتریان، ممکن است کارایی به‌شدت کاهش و به‌نوبه‌ی آن هزینه‌های موجودی و توزیع به شدت افزایش یابد. با این وجود، تحقق کاهش هزینه‌های ناشی از به کارگیری سیستم‌های

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۰/۱۷، پذیرش ۱۳۹۴/۱۱/۲۰.



شکل ۱. نمایش شبکه‌یی از مسائل یک‌پارچه.

VMI در عمل ساده نیست، و به‌ویژه با افزایش تعداد و تنوع مشتریان این امر دشوارتر نیز می‌شود.

هدف ما در این مقاله بررسی پیشینه‌ی تحقیق، تعیین اندازه تولید (LSP)[5]، مسیریابی ـ موجودی (IRP)[6] و PIRP است. همچنین مدلی را به‌عنوان نمونه‌یی از PIRP برای یک مسئله ارائه می‌کنیم. همچنین الگوریتم‌های ارائه شده برای این مسئله اعم از الگوریتم‌های دقیق، ابتکاری و فرا ابتکاری را بررسی خواهیم کرد. در نهایت، توصیه‌های لازم برای تحقیقات بیشتر ارائه خواهد شد. در ادامه، خلاصه‌یی از سه مسئله، LSP، IRP و PIRP ارائه می‌شود.

در شکل ۱، هر سه مسئله‌ی تولید ـ موجودی ـ مسیریابی، مسیریابی ـ موجودی، و تعیین اندازه‌ی تولید برای یک زنجیره‌ی تأمین با یک تأمین‌کننده و چندین مشتری در یک افق برنامه‌ریزی محدود نشان داده شده است.

۲. انواع مسائل پایه مرتبط با مسئله‌ی اصلی

۱.۲. مسئله‌ی تعیین اندازه‌ی تولید با ارسال مستقیم (LSP)

در این مسئله، مقدار تولید کالا در صورتی محاسبه می‌شود که هزینه‌ی تولید، موجودی، راه‌اندازی و ارسال مستقیم روی افق برنامه‌ریزی کمینه شود. محصولات به‌طور مستقیم از کارخانه به مشتریان ارسال می‌شود و تصمیمات مسیریابی در این مسئله لحاظ نمی‌شود. این مسئله به‌طور معمول شامل جنبه‌های مختلف تولید است. به‌عنوان مثال هزینه‌ی راه‌اندازی تولید و یا زمان راه‌اندازی تولید. تصمیمات توزیع در این مسئله ثابت است. تولید و ارسال مستقیم به‌صورت یکپارچه توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در بسیاری از مطالعات هزینه‌های توزیع به‌عنوان یک هزینه‌ی ثابت یا یک تابع هزینه‌ی مرکب در نظر گرفته شده است.

لی و همکاران (۲۰۰۴) یک مسئله‌ی تعیین اندازه‌ی تولید را با تابع هزینه‌ی حمل و نقل خطی بیان کردند. در این مسئله فرض بر این است که کامیون‌هایی که کالا را حمل می‌کنند به‌صورت پر یا به‌صورت نیمه‌پر منتقل می‌شوند. این مسئله شامل یک محصول و یک مشتری است. آن‌ها برای حل این مسئله یک روش برنامه‌ریزی پویا توسعه دادند.[4] محققین همچنین مسئله‌یی با ساختارهای هزینه‌یی ویژه را، که در آن تأمین‌کننده‌ی کالا می‌تواند ظرفیت حمل و نقل رزرو شده را کاهش دهد، مورد مطالعه قرار داده‌اند.[5] چند و همکاران (۲۰۰۷) یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئله‌ی مقدار تولید توسعه دادند، که در آن پیش‌فروش مجاز است.[6] جاریوفونگسا و لی (۲۰۰۸) مسئله‌یی را با تحویل دوبخشی تحت محدودیت‌های پنجره زمانی در نظر گرفتند و یک برنامه‌ریزی پویا برای حل این مسئله توسعه دادند.[7] سولیا و سیزال (۲۰۱۲) مدلی برای ترکیب حمل و نقل و کوتاه‌ترین مسیر در یک زنجیره‌ی تأمین شامل یک انبار و چندین خرده‌فروش با فرض تک‌محصولی پیشنهاد دادند.[8] مالو و ولسی (۲۰۱۲) نیز چندین مدل برای مسئله‌ی تولید ـ حمل و نقل، و یک حل ابتکاری ترکیبی برای این مسئله ارائه دادند. در این مسئله ظرفیت تولید و ظرفیت وسیله‌ی نقلیه محدود فرض شده است.[9]

بین مسئله‌ی تعیین اندازه تولید با ارسال کالا بین مشتریان، و مسئله‌ی تعیین اندازه تولید با محصولات جایگزین ارتباط وجود دارد: یک محصول می‌تواند جایگزین محصول دیگر شود، هزینه‌ی انتقال بین مشتریان نیز می‌تواند به جای هزینه‌های تولید محصول جایگزین در نظر گرفته شود.[10]

۲.۲. مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی (IRP)

مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی توسعه‌ی مهمی از مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه است که در آن تصمیمات کنترل موجودی و مسیریابی با هم ادغام می‌شود. در مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، پس از اعلام سفارشات از جانب مشتریان، فروشنده این سفارشات را به مسیرهای وسایل نقلیه اختصاص می‌دهد به‌نحوی که ضمن ارضای سفارشات، کل مسافت طی شده کمینه شود. اما در مسئله‌ی مسیریابی موجودی، فروشنده ــ و نه خود مشتری ــ درمورد این که چه مقدار محصول و به کدامیک از مشتریان ارسال شود، تصمیم‌گیری می‌کند. تفاوت اصلی دیگر بین این دو مسئله افق برنامه‌ریزی است. در VRP معمولاً یک روزکاری مطرح است و این الزام وجود دارد که

تمام سفارشات تا پایان آن روز تحویل داده شود، درحالی که در IRP افق برنامه‌ریزی طولانی‌تر خواهد بود و تصمیمات اخذ شده برتصمیمات آینده تأثیرگذار است.

در ادبیات موضوع، نحوه‌ی طبقه‌بندی مسائل مسیریابی ـ موجودی براساس افق‌های زمانی متفاوت و فرضیاتی درمورد ماهیت تقاضا صورت پذیرفته است. افق‌های زمانی به‌صورت تک‌دوره‌یی و چنددوره‌یی و تقاضا به‌صورت قطعی و احتمالی در نظرگرفته شده است. مسئله‌ی مسیریابی موجودی تک‌دوره‌یی با تقاضای قطعی در واقع یک مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی نقلیه است.

گلدن و همکاران (۱۹۸۴) اولین کسانی هستند که در رابطه با یک‌پارچه‌سازی تخصیص موجودی و مسائل مسیریابی وسایل نقلیه برای یک شرکت فروشنده‌ی انرژی، که پروپان مایع را بین مشتریانش توزیع می‌کرد، تحقیق کردند. آن‌ها یک مدل شبیه‌سازی برای تعیین مشتریانی که باید به آنها خدمت‌رسانی شود، مقداری که باید به مشتریان ارسال شود، و نیز مسیر ارسال کالا به آن‌ها ارائه دادند.[۱۱]

در این زمینه مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با تحویل دوبخشی، بررسی شد.[۱۲] در تحقیقی دیگر محققین به ارائه‌ی مدلی پرداختند که در آن محدودیت موجود در مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه ــ هر مشتری فقط باید از یک وسیله‌ی خاص خدمت بگیرد ــ برداشته شد و در نهایت، مسافت طی شده و تعداد وسایل حمل به‌شدت بهبود یافت. البته با توجه به آزادسازی محدودیت ذکرشده، این مسئله همچنان در زمره‌ی مسائل Np-hard قرار دارد.[۱۳] طبق مطالعه‌ی موردی انجام شده توسط محققین در شرکت‌های بزرگ نوشابه، این نتیجه به دست آمد که ترکیب مسائل مسیریابی و مدیریت موجودی می‌تواند حدود ۴۰ درصدِ کل ساعات کار را ذخیره کند.[۱۴]

در سال ۲۰۰۴ یک سیاست تفکیک ثابت (FPP)[۷] که در آن تمام مشتریان در مجموعه‌های جدا از هم افراز شده‌اند، ارائه شد[۱۵] که در آن مشتریان داخل هر مجموعه جدا از سایر مشتریان در مجموعه‌های دیگر به خدمت گرفته می‌شوند. یک حد پایین هزینه برای یک سیاست بهینه تعیین شد و تحلیل احتمالی کارایی این سیاست ۹۸/۵٪ برآورد شد.[۱۵] زاکاریادیس و همکاران (۲۰۰۹)، مدلی را با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی کل نگه‌داری موجودی و حمل و نقل ارائه کرده‌اند که از روش ابتکاری جست‌وجوی محلی برای ترکیب دو جنبه‌ی موجودی و مسیریابی ــ تعیین میزان مقادیر تحویل و مجموعه مسیرها ــ استفاده شده است.[۱۶] همچنین برای کاهش بیشتر هزینه‌های حمل و نقل از روش جست‌وجوی ممنوعه نیز استفاده شده است.

در مدل دیگر که توسط بارد و ناتانوکول مطرح شد، مجموعه‌یی از روش‌های ابتکاری برای مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی در یک زنجیره‌ی تأمین با هدف بیشینه‌سازی سود خالص و در شرایطی که کمبود مجاز نیست تحلیل شده است؛ روش حل به دو صورت دومرحله‌یی بوده که در مرحله‌ی اول مقادیر تحویل روزانه تخمین زده می‌شود، و در مرحله‌ی دوم مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی حمل برای هر روز از منظر برنامه‌ریزی حل می‌شود.[۱۷]

شین و همکاران (۲۰۱۰)، مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی چندمحصولی را با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی کل در حالی مطرح کردند که تقاضا برای محصولات به‌صورت غیرقطعی است و احتمال کمبود وجود دارد. همچنین محدودیتی مبنی بر «بیشترین ساعات کار» نیز در این مسئله در نظرگرفته شده که مدل را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند.[۱۸]

شوچو و جون‌روی (۲۰۱۱)، مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی را با پنجره زمانی مطرح کرده‌اند، ناوگان حمل در این مسئله همگن در نظرگرفته شده است. آن‌ها قیمت‌گذاری در IRP را با هدف بیشینه‌سازی سود زنجیره‌ی تأمین به جای کمینه‌سازی هزینه‌ی کل مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق به‌دلیل پیچیدگی‌های موجود از روش‌های ابتکاری برای رسیدن به جواب مطلوب استفاده شده است. روش‌های جست‌وجوی همسایگی متفاوت در دل روش جست‌وجوی ممنوعه[۸] قرارگرفته است؛ این روش با دو روش دیگر مقایسه شده که در نهایت روش ابتکاریِ مطرح‌شده، نسبت به دو روش دیگر، میانگین هزینه‌ی زنجیره‌ی تأمین کم‌تری را نشان می‌دهد.[۱۹]

درسال ۲۰۱۱ مسئله‌ی دیگری به‌صورت مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی دوره‌یی تک‌وسیله‌یی از یک مبدأ به مجموعه‌یی از خرده‌فروشان با تقاضای ثابت ارائه شد[۲۰] که هدف آن عبارت بود از: ۱. زیرمجموعه‌یی از خرده‌فروشان برای تأمین دوره‌یی؛ ۲. میزان محصول تحویل داده شده؛ ۳. طرح مسیرهای حرکت. محققین در یک زنجیره‌ی تأمین با یک تأمین‌کننده و چند خرده‌فروش مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی دوره‌یی را با فرض این که مقدار تحویل داده شده به مشتریان برابر با تقاضای آن‌ها در طول افق برنامه‌ریزی است مطرح کردند[۲۱] و برای حل آن از روش جست‌وجوی محلی[۹] بهره جستند؛ نتایج محاسباتی نشان داده که این روش کارآمد و با ثبات است.

۳.۲. مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی (PIRP)

مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی تعمیم‌یافته، مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی است که در آن تصمیمات تولید نیز در نظرگرفته می‌شود. PIRP یکی از مباحث مهم در مدیریت عملیات زنجیره‌ی تأمین است، که به‌دلیل هماهنگ کردن و یک‌پارچه‌سازی سه جزء کلیدی از مدیریت زنجیره‌ی تأمین ــ مدیریت تولید، مدیریت موجودی و مدیریت حمل و نقل ــ بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از PIRP به‌منظور بهینه‌سازی موازنه بین هزینه‌های مدیریت تولید، مدیریت موجودی و هزینه‌های حمل و نقل بهره‌گیری می‌شود. درواقع PIRP با یک‌پارچه‌سازی این سه جزء از ناکارآمدی حاصل از به کارگیری و حل جداگانه‌ی مسائل مرتبط با این اجزاء جلوگیری می‌کند.

مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی نسبت به مسائل مسیریابی ـ موجودی کم‌تر مطرح شده است که دلیل اصلی آن نیز پیچیدگی مسئله در صورت هماهنگی این چند جزء است. بنابراین درگذشته این مسئله هماهنگ گرفته نمی‌شد و به‌طور مثال در تحقیقی که در سال ۱۹۹۴ انجام شد،[۲۲] ابتدا برنامه‌ی تولید را بدون در نظرگیری مسیریابی حل و بعد با برنامه‌ی توزیع در هر دوره‌ی برنامه‌ریزی توسعه دادند. این رویکرد زمانی مناسب بود که موجودی به تعداد زیاد وجود داشت که البته از طرفی هزینه‌های نگه‌داری را نیز بالا می‌برد.

لی و همکاران (۲۰۰۶)، برای اولین بار به تدوین و فرموله‌کردن PIRP، به‌عنوان یک برنامه‌ی عدد صحیح مختلط پرداختند.[۲۳] آنان PIRP را با ناوگان غیرهمگن در یک زنجیره‌ی تأمین، که در آن یک تولیدکننده‌ی مواد شیمیایی با مشتریان بین‌المللی در ارتباط است، مطرح کردند و نیز یک رویکرد حل دومرحله‌یی برای PIRP به‌عنوان یک برنامه‌ی عدد صحیح مختلط ارائه دادند. در مرحله‌ی اول یک مدل کاهش‌یافته که در آن مسیریابی با انتقال سیستم بین کارخانه‌ها و مشتریان انجام شده، حل می‌شود و در مرحله‌ی دوم یک روش ابتکاری مسیریابی برای کارآمد کردن نتایج به دست‌آمده در مرحله‌ی اول ارائه شده است.

در سال ۲۰۰۷ محققین یک مسئله‌ی تولید ـ توزیع[۱۰] را فرموله کردند که در آن یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی با یک مرکز تولید و چند خرده‌فروش مطرح شده است.[۲۴] این مسئله تک‌محصولی است و طی آن برای حل این مسئله یک الگوریتم فراابتکاری دومرحله‌یی حریصانه‌ی تصادفی تطبیقی پیشنهاد شده است.

بودیا و همکاران (۲۰۰۸) یک حل ابتکاری مبتنی بر تجزیه برای ترکیب برنامه‌ریزی تولید و مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی پیشنهاد کردند.[۲۵] هدف از این مسئله تعیین مقدار تولید و برنامه‌ی تحویل محصول به مشتریان با کمینه‌سازی هزینه‌های تولید،

موجودی و توزیع است. برای حل این مسئله دو حل ابتکاری حریصانه به‌وسیله‌ی دو روش جست‌وجوی محلی پیشنهاد شده است. این الگوریتم برای مسائل بزرگ بسیار مؤثر است و در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر در زمان کوتاه‌تری به جواب می‌رسد.

در سال ۲۰۰۸ مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی با استفاده از تصمیم‌گیری‌های تولید با ظرفیت محدود مورد استفاده قرارگرفت.[۲۶] برای یافتن جواب، یک الگوریتم مبتنی بر برنامه‌نویسی عدد صحیح را در روش اکتشافی تصادفی حریصانه[۱۱] با یکی از ویژگی‌های جست‌وجوی محلی توسعه دادند. در تحقیقی مشابه[۲۷] ابتدا یک مدل برای بیشینه‌سازی منافع خالص مرتبط با فروش محصول، در یک دوره زمانی خاص ارائه شد و سپس در مدل دوم هزینه‌های حاصل از تولید و مسیریابی کمینه‌سازی شد. محققین همچنین PIRP را به‌صورت یک‌پارچه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها در نظر گرفتند. در این مدل فرض بر این است که ظرفیت انبار در مرکز تولید و مشتریان محدود است، همچنین ظرفیت تولید نیز محدود فرض شده است. هدف از این مسئله تعیین میزان تولید در هر دوره و تعیین مسیریابی برای تحویل محصول به مشتریان است. در سال ۲۰۱۱ مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی (PRP)[۱۲] در یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی بررسی شد، با این فرض که مرکز تولید محدودیتی برای تولید یک نوع محصول ندارد و فقط یک وسیله‌ی نقلیه موجود است.[۲۸] برای حل این مسئله دو روش پیاده‌سازی شده است: روش الگوریتم شاخه و برش، و یک روش ابتکاری. نتایج محاسباتی بیان‌گرکارآمدی روش ابتکاری در مقایسه با الگوریتم شاخه و برش است. سپس در سال ۲۰۱۲ روش PRP در حالت غیرقطعی بودن تقاضا مطرح شد و برای آن دو فرایند تصمیم‌گیری دومرحله‌یی و چندمرحله‌یی در نظر گرفتند.[۲۹] هر دو این مسائل در اندازه‌ی کوچک با الگوریتم دقیق شاخه و برش قابل حل است و برای حل آن در سایز بزرگ، یک روش ابتکاری مبتنی بر تجزیه پیشنهاد شده است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد سرعت این الگوریتم ابتکاری در مقایسه با الگوریتم دقیق شاخه و برش بیشتر است و برای گونه‌های مختلفی از PRP کاربرد دارد. در مطالعه‌یی دیگر، محققین دو مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی و مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی را با فرض وجود چندین وسیله‌ی نقلیه مطرح کردند.[۳۰] در این تحقیق مسئله‌ی مسیریابی ـ موجودی و تولید ـ مسیریابی در دو حالت با/بدون استفاده از شاخص برای وسایل نقلیه فرموله شده است. در نهایت مسائل در این دو حالت، با استفاده از الگوریتم شاخه و برش، با هم مقایسه می‌شوند. این محققین در ادامه، طی یک الگوریتم فراابتکاری، جست‌وجوی همسایگی جامع تطبیقی (ALNS)[۱۳] را برای PRP پیشنهاد دادند.[۳۱] در این مسئله برای رسیدن به واقعیت‌های موجود محدودیت‌هایی نظیر ظرفیت تولید و ظرفیت وسیله‌ی نقلیه در نظرگرفته شده است. در مطالعات بعدی، سیاست بازپرسازی ML[۱۴] در PRP تک‌محصولی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.[۳۲] در این تحقیق یک روش ابتکاری دوفازی برای حل ارائه شده است. در فاز اول مسئله‌ی تعیین میزان تولید حل می‌شود و همچنین هزینه‌های مسیریابی با استفاده از یک مد تقریبی محاسبه می‌شود. سپس در فاز دوم هزینه‌ها برای تکرار فاز اول به‌روزرسانی می‌شود. فاز اول و دوم مدام در حال تکرار است تا این که به شرط توقف برسد. نتایج محاسباتی نشان‌گر بهتر بودن جواب‌های به دست آمده از این روش در مقایسه با روش‌های موجود است.

با توجه به مرور انجام شده در ادبیات موضوع، می‌توان به جمع‌بندی مفیدی درخصوص مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی دست یافت. مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی ارکانی دارد که در ادامه، درمورد این ارکان و نحوه‌ی طبقه‌بندی آن‌ها توضیحاتی ارائه شده است؛ در صورت اعمال این طبقه‌بندی، بررسی و مطالعه‌ی بهتر مقالات عنوان شده در این زمینه ممکن خواهد شد.

۱.۳.۲. عوامل لازم در طبقه‌بندی PIRP

در شکل ۲ عوامل لازم برای طبقه‌بندی PIRP ارائه می‌شود.

- **زمان**

در مقالات متفاوت وضعیت زمان در سه گروه قابل تفکیک است:

۱. ثابت: در این مسائل افق برنامه‌ریزی آن‌قدر کوتاه است که حداکثر یک ملاقات در تمام طول افق برنامه‌ریزی رخ می‌دهد.
۲. محدود: در این حالت در افق برنامه‌ریزی بیش از یک‌بار از مشتری دیدن می‌شود.
۳. نامحدود: در این حالت افق برنامه‌ریزی نامحدود است و استراتژی‌های توزیع به‌جای زمان‌بندی، تصمیم اساسی مسئله است.

- **تقاضا**

در تمامی مسائل موجودی چنانچه عامل عدم قطعیت وارد مسئله شود حالت احتمالی بروز می‌دهد. بر این اساس تقاضا به یکی از دو صورت احتمالی یا قطعی مطرح شده است.

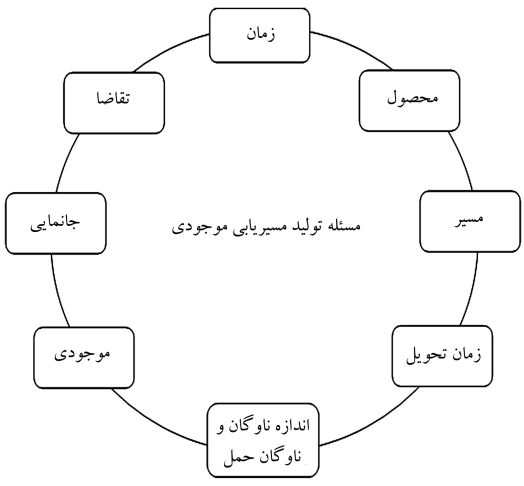
- **جانمایی**

مسائل را می‌توان در سه گروه جانمایی تقسیم کرد:

۱. یک به یک: در این حالت یک تأمین‌کننده به یک مشتری سرویس می‌دهد.
۲. یک به چند: در این حالت یک تأمین‌کننده به چند مشتری سرویس می‌دهد. این حالت وضعیت چند به یک را نیز شامل می‌شود.
۳. چند به چند: در سیستم‌های دریایی معمولاً یک مرکز ارائه‌ی کالا یا خدمات وجود دارد وکشتی‌ها می‌توانند در تمام نقاط مراجعه عملیات بارگیری و تخلیه را انجام دهند. در واقع این وضعیت بیشتر کاربرد دریایی دارد.

- **مسیر**

مسیرها در مسائل ترکیبی تولید، مدیریت موجودی و مسیریابی به دوگروه VRP و PDP[۱۵] تقسیم می‌شوند. در VRP انبار نقطه‌ی شروع و پایان مسیرها و همچنین جایگاه توزیع کالاست. اغلب تقاضاها برپایه‌ی حمل و نقل جاده‌یی دارای یک انبار مرکزی است، جایی که کامیون‌ها مسیرهایشان آغاز و پایان می‌یابد. اما در PDP انبار مرکزی وجود ندارد و توزیع کالا از یک مشتری به مشتری



شکل ۲. عوامل تأثیرگذار بر PIRP.

تحویل‌گیرنده به‌وسیله‌ی مشتریان انجام می‌شود. با توجه به این توضیحات می‌توان وضعیت مسیر را به سه حالت تقسیم کرد:

۱. مستقیم: وسیله‌ی نقلیه کالاها را در یک انبار مرکزی بارگیری و قبل از بازگشت به انبار همه‌ی کالاها را به مشتری توزیع می‌کند.

۲. چندتایی: در این حالت وسیله‌ی نقلیه در یک سفر چندین مشتری را ملاقات می‌کند.

۳. پیوسته: در برخی بارگیری‌ها و تحویل کالا، سفرهای مداوم بدون آغاز و پایان وجود دارد.

- **موجودی**

۱. ثابت: در بسیاری از کاربردها این امر مجاز نیست. در این حالت کم‌ترین سطح موجودی ثابت، برابر صفر، یا موجودی اطمینان مشخص است.

۲. نبود موجودی: در برخی شرایط تأمین تقاضای مشتری ممکن است دچار نقصان شود. در این حالت با ارسال فوری این تقاضا تأمین می‌شود.

۳. فروش ازدست‌رفته: در این حالت فروشنده دچار هزینه‌ی فروش ازدست‌رفته می‌شود.

۴. سفارش معوقه: تأخیر رخ داده با تأخیر زمانی برطرف می‌شود.

- **ناوگان حمل**

شباهت یا عدم شباهت در ویژگی‌های وسایل نقلیه، مانند سرعت، هزینه‌ی ثابت، تجهیزات و ظرفیت، مبنای تفاوت در ناوگان حمل است. بدین ترتیب دو نوع ناوگان حمل در ادبیات موضوع مطرح شده است:

۱. ناوگان حمل همگن؛

۲. ناوگان حمل غیرهمگن.

- **سایر ناوگان حمل**

۱. تکی: ناوگان شامل یک وسیله است؛

۲. چندتایی: ناوگان شامل چند وسیله است؛

۳. نامحدود: درمواردی که وسایل با ظرفیت‌های بالا مورد نیاز باشد و امکان خرید یا اجاره آن فراهم باشد. برنامه‌ریز سیستم، همواره تعداد وسایل به حد کافی در دسترس خواهد داشت.

- **محصول**

مسئله می‌تواند تک‌محصولی یا چندمحصولی باشد.

- **زمان تحویل**

زمان تحویل به مشتریان می‌تواند قطعی و ثابت باشد، یا در شرایط خاص زمان تحویل می‌تواند غیرقطعی و احتمالی در نظرگرفته شود. طبقه‌بندی فوق را می‌توان در جدول ۱ خلاصه کرد. تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی PIRP را بر اساس عوامل مؤثر در جدول ۲ دسته‌بندی می‌کنیم.

جدول ۱. دسته‌بندی عوامل مؤثر بر PIRP.

عامل	گزینه			
	۱	۲	۳	۴
زمان	ثابت	محدود	نامحدود	
تقاضا	احتمالی	قطعی		
جانمایی	یک‌به‌یک	یک‌به‌چند	چندبه‌چند	
مسیر	مستقیم	چندتایی	پیوسته	
موجودی	ثابت	نبود موجودی	فروش از دست‌رفته	سفارش معوقه
ناوگان حمل	همگن	ناهمگن		
سایز ناوگان	تکی	چندتایی		
محصول	تک	چند		
زمان تحویل	احتمالی	قطعی		

۳. مدل سازی PIRP

در این بخش یک PIRP را با فرض‌های مشخصی در نظر می‌گیریم و سپس چگونگی فرموله‌کردن آن ارائه خواهد شد. این مسئله شامل سیستم تولید و توزیع چنددوره‌یی، متشکل از یک مرکز تولید و چندین مشتری با تقاضای قطعی از چند محصول است؛ ناوگان حمل در این مسئله همگن فرض شده است. برای نزدیکی به واقعیت محدودیت‌هایی از قبیل ظرفیت تولید، محدودیت ظرفیت انبار، و محدودیت ظرفیت وسیله‌ی نقلیه در نظرگرفته شده است. در هر دوره‌ی زمانی که تولید صورت می‌گیرد، محصولات تولید شده در دوره‌ی بعد قابل تحویل به مشتری است. وسایل نقلیه در ابتدای هر دوره از مرکز تولید حرکت می‌کنند و پس از توزیع محصولات به مرکز تولید بازمی‌گردند. فاصله‌ی بین مشتریان از روش اقلیدسی محاسبه می‌شود. با توجه به شرایط هر دوره و ظرفیت وسایل نقلیه و بسته به این که محصولات تولید شده در روز بعد قابل تحویل باشند، اگر مازاد محصولی از یک دوره به دوره بعد وجود داشته باشد، تأمین‌کننده متحمل هزینه‌ی نگه‌داری خواهد شد. همچنین یک مشتری ممکن است در یک دوره بیش از تقاضای آن دوره، محصول تحویل بگیرد، بنابراین مشتریان نیز متحمل هزینه‌ی نگه‌داری می‌شوند. در اکثر مسائل مطرح شده در طول یک دوره‌ی ارسال، مشتری چندین بار شاهد ارسال است که این موضوع به‌نوبه‌ی خود سبب افزایش هزینه‌های کارگری، از دست رفتن زمان و افزایش بوروکراسی اداری می‌شود. از این روی در هر دوره به هر مشتری حداکثر یک بار سرویس داده می‌شود.

۱.۳. فرضیات مسئله

- در مرکز تولید چند محصول متفاوت تولید و توزیع می‌شود.
- ظرفیت تولید محصولات محدود است.
- تقاضای مشتریان ثابت و قطعی است.
- طول افق برنامه‌ریزی محدود و چنددوره‌یی است.
- فضای انبار تولیدکننده و مشتریان محدود است.
- زنجیره‌ی تأمین دوسطحی و واگراست.
- وسایل حمل ونقل به‌لحاظ ظرفیت حمل و سایر مشخصات همگن هستند.
- ظرفیت وسیله‌ی نقلیه محدود است.
- خرابی کامیون‌ها یا هرگونه اتفاق پیش‌بینی نشده مجاز نیست. به‌همین ترتیب سایر پارامترها و هزینه‌های حل در مسئله‌ی ثابت و قطعی و معین است.
- هزینه‌ی حمل کالا به مشتریان براساس مسافت طی شده محاسبه می‌شود.

جدول ۲. دسته‌بندی تحقیقات مرتبط با PIRP بر اساس عوامل مؤثر.

سال	نویسنده/ نویسندگان	زمان	تقاضا	جانمایی	مسیر	موجودی	ناوگان حمل	سایر ناوگان	محصول	زمان تحویل
۲۰۰۶	Lei et al	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۲	۱	۲
۲۰۰۷	Boudia et al	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۰۸	Boudia et al	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۰۸	Savelsbergh & song	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۰۹	Boudia & Prins	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۰۹a	Bard & Nananukul	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۰۹b	Bard & Nananukul	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۱۰	Bard & Nananukul	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۱۱	Archetti et al	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۲
۲۰۱۲	Adulyasak et al	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۱۴a	Adulyasak et al	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۱۴b	Adulyasak et al	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۲۰۱۴	Absi et al	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۲

۲.۳. مدل ریاضی

برای طرح بهتر مدل ریاضی، ابتدا به تعریف اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها پرداخته و سپس تابع هدف و محدودیت‌های آن ارائه می‌شود. توضیحات ضروری درمورد جزئیات مدل ریاضی نیز در ادامه ارائه می‌شود.

۱.۲.۳. اندیس‌ها

i, j: شاخص مشتری بوده و متعلق به مجموعه‌ی $\{0, 1, 2, ..., N\}$ هستند. شاخص صفر بیان‌گر مرکز تولید است و سیستم شامل N مشتری است؛

t: شاخص دوره زمانی است و متعلق به مجموعه‌ی $\{0, 1, 2, ..., \tau\}$ است. دوره زمانی صفر مربوط به دوره‌ی قبل از شروع است و مسئله شامل τ دوره زمانی است؛

k: اندیس مربوط به محصولات است و متعلق به مجموعه‌ی $\{1, 2, ..., K\}$ است.

۲.۲.۳. پارامترها

d_{ikt}: تقاضای مشتری i از محصول k در دوره‌ی t؛

θ: تعداد وسیله‌ی نقلیه در دسترس؛

Q_k: ظرفیت وسیله‌ی نقلیه برای محصول k؛

$I^p_{k,\max}$: بیشترین مقدار محصول k که می‌توان در مرکز تولید نگه‌داری کرد؛

$I^c_{\max,ki}$: بیشترین مقدار محصول k که می‌توان در محل مشتریان i نگه‌داری کرد؛

c_k: ظرفیت تولید محصول k در مرکز تولید؛

c_{ij}: هزینه‌ی سفر از گره i به گره j؛

f_{kt}: هزینه‌ی راه‌اندازی تولید محصول k؛

h^p_k: هزینه‌ی نگه‌داری هر واحد محصول k در مرکز تولید؛

h^c_{ik}: هزینه‌ی نگه‌داری هر واحد محصول k در محل مشتری i؛

$D^{\max}_{ikt}$: حد بالای بیشترین مقدار محصول k، که به مشتری i در دوره‌ی t تحویل داده می‌شود و از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$D^{\max}_{ikt} = \min\{Q_k, \sum_{L=t}^{\tau} d_{ikL}\} \quad (۱)$$

$D^{\max}_{kt}$: حد بالای بیشترین مقدار محصول k که در روز t توسط وسیله‌ی نقلیه بار زده می‌شود و از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$D^{\max}_{kt} = \min\{Q_k, \sum_{i=N}^{} \sum_{L=t}^{\tau} d_{ikL}\} \quad (۲)$$

۳.۲.۳. متغیرهای تصمیم

x_{ijt}: معادل ۱، اگر مشتری i بلافاصله قبل از مشتری j در مسیر تحویل روز t قرار گیرد؛

y_{ikt}: مقدار بار موجود از محصول k در وسیله‌ی نقلیه قبل از تحویل به مشتری i در روز t؛

p_{kt}: مقدار محصول تولید شده از محصول k در روز t؛

z_{kt}: معادل ۱، اگر در روز t محصول k تولید شود؛

I^p_{kt}: مقدار موجودی از محصول k در پایان دوره t در مرکز تولید؛

I^c_{ikt}: مقدار موجودی از محصول k در پایان دوره t برای مشتری i؛

w_{ikt}: مقدار تحویل داده شده از محصول k به مشتری i در روز t.

۴.۲.۳. مدل ریاضی

هدف مدل پیشنهادی کمینه‌سازی همزمان هزینه‌های مسیریابی، تولید و موجودی است. با توجه به اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تعریف شده، مدل ریاضی پیشنهادی متشکل از یک تابع هدف چهاربخشی و ۲۱ دسته محدودیت است که پس از معرفی مدل ریاضی توضیحات بیشتری درمورد تابع هدف و محدودیت‌ها ارائه خواهد شد.

$$\min = \sum_{t\in T}\sum_{i\in N.}\sum_{j\in N.} c_{ij}x_{ijt} + \sum_{t\in T}\sum_{k\in K} f_{tk}z_{tk} + \sum_{t\in T./\{\tau\}}\sum_{k\in K} h^p_k I^p_{kt} + \sum_{t\in T/\{\tau\}}\sum_{i\in N}\sum_{k\in K} h^c_{ik} I^c_{ikt} \quad (۳)$$

s.t.

$$I^p_{kt} = I^p_{k,t-1} + p_{kt} - \sum_{i\in N} w_{ikt} \qquad \forall t \in T,\ \ k \in K \quad (۴)$$

$$I^c_{ikt} = I^c_{ik,t-1} + w_{ikt} - d_{ikt} \qquad \forall t \in T,\ \ i \in N,\ \ k \in K \quad (۵)$$

$$\sum_{i\in N} w_{ikt} \le I^p_{k,t-1} \qquad \forall t\in T,\ \ k\in K \qquad (۶)$$

$$p_{kt} \le c_k z_{tk} \qquad \forall t\in T,\ \ k\in K \qquad (۷)$$

$$I^p_{k0} \ge \sum_{i\in N}(d_{ik1} - I^c_{ik0}) \qquad \forall k\in K \qquad (۸)$$

$$\sum_{j\in N.,j\neq i} x_{ijt} \le 1 \qquad \forall t\in T,\ \ i\in N \qquad (۹)$$

$$\sum_{i\in N.,j\neq i} x_{ijt} = \sum_{b\in N.,j\neq b} x_{jbt} \qquad \forall t\in T,\ \ j\in N \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{j\in N.} x_{ijt} \le \theta \qquad \forall t\in T \qquad (۱۱)$$

$$y_{jkt} \le y_{ikt} - w_{ikt} + D^{\max}_{kt}(1 - x_{ijt})$$
$$\forall t\in T,\ \ i\in N,\ \ j\in N_0,\ \ k\in K \qquad (۱۲)$$

$$w_{ikt} \le D^{\max}_{ikt} \sum_{j\in N.} x_{ijt} \qquad \forall t\in T,\ \ i\in N,\ \ k\in K \qquad (۱۳)$$

$$0 \le I^p_{kt} \le I^p_{\max,k} \qquad \forall i\in N,\ \ t\in T/\{\tau\} \qquad (۱۴)$$

$$0 \le I^c_{ikt} \le I^c_{\max,ik} \qquad \forall i\in N,\ \ t\in T/\{\tau\} \qquad (۱۵)$$

$$I^p_{k\tau} = I^c_{ik\tau} = 0 \qquad \forall i\in N,\ \ k\in K \qquad (۱۶)$$

$$0 \le y_{ikt} \le Q_k \qquad \forall t\in T,\ \ i\in N_0,\ \ k\in K \qquad (۱۷)$$

$$x_{ijt} = \{0,1\} \qquad \forall i,j\in N_0,\ \ t\in T \qquad (۱۸)$$

$$z_{kt} = \{0,1\} \qquad \forall t\in T,\ \ k\in K \qquad (۱۹)$$

$$p_{kt} \ge 0, \mathrm{integer} \qquad \forall t\in T,\ \ k\in K \qquad (۲۰)$$

$$w_{ikt} \ge 0, \mathrm{integer} \qquad \forall t\in T,\ \ i\in N,\ \ k\in K \qquad (۲۱)$$

$$y_{ikt} \ge 0, \mathrm{integer} \qquad \forall i\in N_0,\ \ k\in K,\ \ t\in T \qquad (۲۲)$$

$$I^p_{kt} \ge 0, \mathrm{integer} \qquad \forall k\in K,\ \ t\in T \qquad (۲۳)$$

$$I^c_{ikt} \ge 0, \mathrm{integer} \qquad \forall i\in N,\ \ k\in K,\ \ t\in T \qquad (۲۴)$$

معادله‌ی ۳ بیان‌گر تابع هدف مدل پیشنهادی است که شامل هزینه‌ی مسیریابی، هزینه‌های ثابت راه‌اندازی و هزینه‌های نگه‌داری محصول توسط تولیدکننده و مشتریان است. از آنجا که همه‌ی تقاضاها باید در هر دوره برآورده شود، جزء متغیر از هزینه‌های تولید که تصور می‌شود خطی و ثابت است می‌تواند به‌عنوان هزینه‌های اولیه حذف شود. محدودیت ۴ توازن میان مجموع محصول نوع k ارسال شده از مرکز تولید به مشتریان در دوره t و مجموع محصول نوع k که در دوره tام تولید شده را بیان می‌دارد. توازن موجودی بین تقاضا برای محصول نوع k در مشتری i در دوره t و مجموع محصول نوع k ارسال شده از مرکز تولید به مشتری i در دوره t با استفاده از محدودیت ۵ بیان می‌شود. در محدودیت ۶، مجموع محصول نوع k که از مرکز تولید به مشتریان در دوره t ارسال می‌شود، به باقی‌مانده موجودی دوره $t-1$ مرکز تولید، محدود شده است. محدودیت ۷، محدودیت ظرفیت تولید را تضمین می‌کند. از آنجا که تقاضای مشتریان باید در همه‌ی دوره‌ها برآورده شود و از طرفی مقدار محصول تولید شده در دوره t، در همان دوره قابل دسترس برای تحویل به مشتریان نیست، موجودی اولیه‌ی مرکز تولید برای برآورده‌شدن تقاضای مشتریان در دوره ۱ از محدودیت ۸ به دست می‌آید. محدودیت‌های ۹ تا ۱۲ مربوط به مسیریابی مسئله‌اند. مسیر بین گره i به گره j در دوره t، حداکثر یک بار طی می‌شود و این موضوع با محدودیت ۹ تضمین می‌شود. در محدودیت ۱۰ اگر مشتری i در روز t سرویس داده شود، آنگاه حتماً این مشتری پیش‌نیاز یک مشتری دیگر است که ممکن است مرکز تولید باشد. به‌عبارت دیگر پیوستگی مسیر توسط محدودیت ۱۰ تضمین می‌شود. تعداد وسیله‌ی نقلیه‌یی که از مرکز تولید در دوره t خارج می‌شوند، محدود و برابر است با θ که با محدودیت ۱۱ نشان داده شده است. در محدودیت ۱۲، اگر مشتری i بلافاصله قبل از مشتری j روی مسیر در دوره t قرار بگیرد، آنگاه بار وسیله‌ی نقلیه قبل از مشتری j، کم‌تر یا مساوی است با بار وسیله‌ی نقلیه قبل از مشتری i، منهای مقدار تحویل داده شده به مشتری i. این امر موجب می‌شود که دیگر تورهای فرعی تشکیل نشود. در شکل ۳ مفهوم این محدودیت نشان داده شده است.

در تحقیق بارد و نانوکول (۲۰۰۹a و ۲۰۱۰) نیز از این محدودیت برای حذف تورهای فرعی استفاده شده است. اما این یک محدودیت منحصربه فرد نیست و محدودیت‌های دیگری نیز هستند که می‌توانند جایگزین این محدودیت شوند. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۷ را می‌توان با محدودیت‌های دیگر جایگزین کرد. روابط ۲۵ و ۲۶ نمونه‌یی از این محدودیت‌ها هستند.

- محدودیت‌های کسری ظرفیت (FCCs)[۱۶]:[۳۳]

$$\sum_{i\notin S}\sum_{j\in S} x_{ijt} \ge \sum_{i\in s} w_{ikt}/Q_k$$
$$\forall S\subseteq N/\{0\} : |S| \ge 1,\ \ \forall t\in T,\ \ \forall k\in K. \qquad (۲۵)$$

- تعمیم محدودیت‌های کسری حذف تورهای فرعی (GFSECs)[۱۷]:[۳۴]

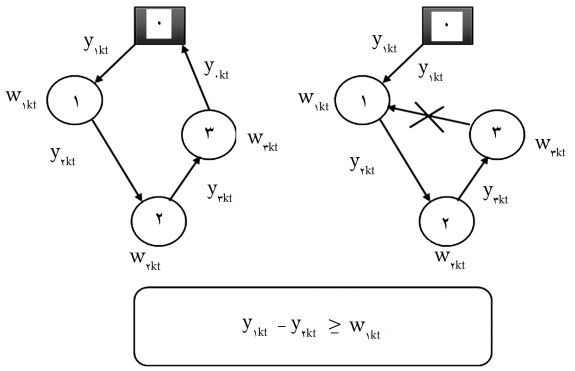
$$\sum_{i\in S}\sum_{j\in S} x_{ijt} \le |S| - \sum_{i\in S} w_{ikt}/Q_k$$
$$\forall S\subseteq N/\{0\} : |S| \ge 2,\ \ \forall t\in T,\ \ k\in K \qquad (۲۶)$$

در شکل ۴ محدودیت‌های حذف تورهای فرعی ۲۵ و ۲۶ نشان داده شده، و فرض شده است:

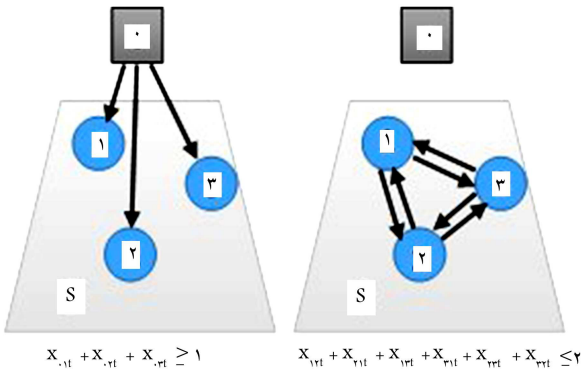
$$(w_{1kt} + w_{2kt} + w_{3kt})/Q_k = 1$$

در صورتی که مشتری i در دوره t، در مسیر یک وسیله‌ی نقلیه قرار گیرد آنگاه با توجه به محدودیت ۱۳، مقدار محصول نوع k که در روز t به مشتری i تحویل داده می‌شود، به پارامتر $D^{\max}_{ikt}$ محدود می‌شود.

محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ تضمین‌کننده‌ی محدودیت ظرفیت نگه‌داری، به ترتیب برای مرکز تولید و مشتریان است. باقی‌مانده‌ی موجودی در پایان دوره آخر (τ) صفر



شکل ۳. نمایش محدودیت حذف تورهای فرعی وسیله‌ی نقلیه.



شکل ۴. نمایان FCCs (چپ) و GFSECs (راست).

است که با محدودیت ۱۶ نشان داده شده است. محدودیت ظرفیت وسایل حمل و نقل با استفاده از محدودیت ۱۷ ارائه شده است. محدودیت‌های فنی روی متغیرهای تصمیم از طریق محدودیت‌های ۱۸ تا ۲۴ برقرار شده است.

۴. روش‌های حل PIRP

بسیاری از مسائل تحقیق در عملیات ماهیت پیچیده‌یی دارند و حل آن‌ها توسط روش‌های بهینه‌سازی دقیق بسیار مشکل است. در بسیاری از مسائل، به‌ویژه مسائل بزرگ، انتخاب بهترین جواب از طریق جست‌وجوی همه‌جانبه، اگرچه غیر ممکن نیست ولی کار بسیار مشکلی است. PIRP به‌عنوان یک مسئله‌ی ترکیبی که سه جزء از زنجیره‌ی تأمین را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد به‌دلیل داشتن متغیرهای زیاد از جمله متغیرهای باینری، دارای ساختار بسیار پیچیده‌یی است. از این رو حل این مسائل در اندازه بزرگ با نرم‌افزار کار بسیار مشکلی است. مدل‌های PIRP را می‌توان با نرم‌افزارهایی از قبیل: CPLEX، GAMS، LINGO حل کرد، اما به‌دلیل این که نرم‌افزار تمام فضای موجود را جست‌وجو می‌کند حل PIRP در سایز بزرگ با نرم‌افزار نیازمند زمان‌های محاسباتی زیادی است. البته نرم‌افزار CPLEX نسبت به دو نرم‌افزار دیگر از قدرت بالاتری برای حل برخوردار است اما به هر حال این نرم‌افزار نیز نیازمند زمان محاسباتی بالایی است و برای حل مسائل در اندازه کوچک و متوسط کاربرد بیشتری دارد. یک PIRP شامل یک مرکز تولید، پنج مشتری، دو محصول، چهار دوره زمانی و دو وسیله‌ی نقلیه در محیط نرم‌افزار لینگو ۸ و در یک لپ‌تاپ با مشخصات (پردازنده AMD، ۶۴ بیتی، ۳ گیگاهرتز، ویندوز ۸ و ۴ گیگابایت رم)، کدنویسی و اجرا شد. این حل ۲ ساعت به طول انجامید. بنابراین برای حل PIRP در اندازه متوسط و بزرگ الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری پیشنهاد می‌شود. در ادامه به بررسی الگوریتم‌های دقیق، الگوریتم‌های ابتکاری و الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهاد شده برای PIRP، توسط محققین مختلف می‌پردازیم.

۱.۴. الگوریتم‌های دقیق

الگوریتم‌های حل دقیق برای PIRP بسیار اندک‌اند. در بهترین مطالعه‌ی ما سه الگوریتم دقیق برای حل PIRP پیشنهاد شده است.

۱.۱.۴. الگوریتم شاخه و برش روکوکوسکی[۳۵]

این مسئله شامل یک مرکز تولید و چندین مشتری است. ظرفیت انبار مرکز تولید و همچنین ظرفیت وسیله‌ی نقلیه نامحدود فرض شده است. از تکنیک کوتاه‌ترین مسیر برای حل PIRP استفاده شده است. در این مدل، از محدودیت ۲۷ برای حذف تورهای فرعی استفاده شده است.

$z_{et} = ۱$ اگر مشتری i در روز t خدمت داده شود.

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{ijt} + \sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ijt} \geq ۲ z_{et}$$

$$\forall S \subseteq N / \{۰\} : |S| \geq ۲, \quad \forall e \in S, \quad \forall t \in T. \qquad (۲۷)$$

روکوکوسکی و همکاران، مقدار حد پایینِ مدل‌های مختلف LSP را با مقدار حد پایینِ مدل پایه‌یی LSP مقایسه کردند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد مقدار تابع هدف در مدل‌های مبتنی بر کوتاه‌ترین مسیر و مکان تسهیلات، زمانی که محدودیت حذف تورهای فرعی حذف می‌شود، نسبت به حالت عمومی بسیار بهبود یافته است. در اجرای الگوریتم شاخه و برش، نویسندگان از ابتکارات و روش جدایی دقیق مبنی بر حداقل مسئله‌ی برش S-t، برای یافتن تورهای فرعی استفاده کردند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد مدل مبتنی بر مکان تسهیلات بهترین جواب را تولید می‌کند. این مسئله برای ۸۰ مشتری و ۳۰ دوره در حدود ۳۰ دقیقه به جواب می‌رسد.[۳۵]

۲.۱.۴. الگوریتم شاخه و برش آرچتی[۲۸]

در این تحقیق ظرفیت تولید و ظرفیت وسیله‌ی نقلیه نامحدود فرض شده است. آرچتی و همکاران علاوه بر محدودیت‌های گفته شده در مدل PIRP یک محدودیت جدید مطابق رابطه‌ی ۲۸ به مدل اضافه کردند. مدل جدید در مقایسه با مدل پایه‌یی نتایج بهتری برای مقدار تولید ارائه می‌دهد. در این تحقیق ظرفیت تولید و ظرفیت وسیله‌ی نقلیه نامحدود فرض شده است.

$z_{it} = ۱$ اگر مشتری i در روز t سرویس داده شود.

$$I_{i,t-s-۱} \geq \sum_{j=۰}^{s} d_{i,t-j} (۱ - \sum_{j=۰}^{s} z_{i,t-j})$$

$$\forall i \in N / \{۰\}, \quad \forall t \in T, \quad S = ۰, ۱, .., t-۱ \qquad (۲۸)$$

در طول فرایند شاخه‌زنی محدودیت حذف تورهای فرعی از مدل حذف می‌شود و فقط در شاخه‌هایی که نقص وجود داشته باشد این محدودیت به مدل اضافه می‌شود. عملکرد این الگوریتم با ۱۴ مشتری و ۶ دوره مورد آزمایش قرارگرفته است. برای نمونه‌های دیگر هم این الگوریتم درکم‌تر از چند ثانیه به جواب می‌رسد.[۲۸]

۳.۱.۴. الگوریتم شاخه و برش آدولیاساک[۳۰و۳۶]

آدولیاساک و همکاران (۲۰۱۴a)، با فرض وجود چندین وسیله‌ی نقلیه، الگوریتم شاخه و برش مطرح شده توسط آرچتی را برای PIRP تعمیم دادند. در این تحقیق دو مدل متفاوت مقایسه شده است. در مدل اول برای وسیله‌ی نقلیه اندیس در نظر گرفته نشده و در مدل دوم اندیس به‌وسیله‌ی نقلیه تخصیص داده شده است. در هر دو مدل از سیاست OU [۱۸] برای بازپرسازی موجودی استفاده شده است. برای حل مدل اول از الگوریتم مطرح شده توسط لیساگارد استفاده شده و همچنین یک الگوریتم ابتکاری حریصانه برای این مدل توسعه یافته است. مدل دوم را با استفاده از الگوریتم شاخه و برش (شبیه الگوریتم روکوکوسکی) حل کردند. نتایج نشان می‌دهد که مدل دوم عملکرد بهتری در رسیدن به جواب بهینه دارد.[۳۰و۳۶]

۲.۴. الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری

بسیاری از مسائل واقعی تحقیق در عملیات ماهیت پیچیده‌یی دارند و حل آن‌ها توسط روش‌های بهینه‌ی دقیق بسیار زمان‌بر است. بنابراین روش‌های ابتکاری و فراابتکاری

مطرح می‌شود. با پیشرفت دانش در زمینه‌ی روش‌های ابتکاری و فرااِبتکاری، انواع متعددی از این روش‌ها معرفی شد که برتری آنها به ویژگی‌های زیر وابسته است:
۱. سادگی؛ ۲. وابستگی؛ ۳. کارایی؛ ۴. اثربخشی؛ ۵. توانمندی؛ ۶. نوآوری؛ ۷. کلی‌بودن؛ ۸. اثر متقابل؛ ۹. گوناگونی.

در این بخش پیرامون الگوریتم‌های ابتکاری و فرااِبتکاریِ مطرح شده در حوزه‌ی PIRP یک بررسی جامع انجام می‌دهیم.

۱.۲.۴. الگوریتم‌های ابتکاری

در این قسمت مروری بر روش‌های ابتکاری مطرح شده برای PIRP انجام می‌دهیم که شامل روش مبتنی بر تجزیه، ابتکار شاخه و قیمت، ابتکار MIP [۱۹]، و ابتکار MIP تکرارشونده است.

۱. روش مبتنی بر تجزیه

در این روش هر مسئله تبدیل به دو زیرمسئله‌ی تولید و برنامه‌ی توزیع می‌شود. ابتدا هر زیرمسئله حل می‌شود و سپس از یک حل ابتکاری برای بهبود جواب‌ها استفاده می‌شود. این مسئله اولین بار توسط چندرا (۱۹۹۳) و بعد چندرا و فیشر (۱۹۹۴) برای حل مسئله‌ی تولید ـ توزیع چندمحصولی معرفی شد. مسئله‌ی تولید ـ توزیع به دو مسئله‌ی تعیین اندازه‌ی تولید و مسئله‌ی زمان‌بندی توزیع تقسیم می‌شود. بدین منظور پس از حل LSP و بهینه‌سازی آن، مسئله‌ی زمان‌بندی توزیع از طریق یک الگوریتم ابتکاری ساده برای هر دوره به دست می‌آید.[۳۷] این الگوریتم ابتکاری در مقایسه با رویکرد ناهماهنگ برای نمونه‌های کوچک حدود ۶٪ هزینه‌ها را ذخیره می‌کند. لی و همکاران (۲۰۰۶) به جای تمرکز روی مسئله‌ی تعیین اندازه تولید، دو مسئله را ترکیب کرده و برای حل PIRP با فرض ناوگان غیرهمگن یک الگوریتم دوفازی پیشنهاد کردند. در فاز اول با فرض ارسال مستقیم محصول بین مرکز تولید و مشتریان مسئله‌ی تعیین اندازه تولید حل می‌شود. در فاز دوم با استفاده از نتایج حاصل از فاز اول یک الگوریتم ابتکاری برای تعیین مسیرهای تحویل پیشنهاد می‌شود. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که این روش در مقایسه با حل به‌وسیله‌ی نرم‌افزار CPLEX، در مدت زمان کوتاه‌تری به جواب می‌رسد.[۲۳] بودیا و همکاران (۲۰۰۸) روش بهبودیافته‌ی مبتنی بر تجزیه را توسعه دادند. در این روش مقدار تولید به‌منظور پوشش تقاضای برخی از دوره‌های آینده تا حد امکان بزرگ تعیین می‌شود. سپس برنامه‌ی توزیع توسط الگوریتم پیشنهادی کلارک و رایت [۲۰] (۱۹۶۴) به دست می‌آید.[۲۵]

۲. روش ابتکاری شاخه و قیمت

بارد و نانانوکول یک روش ابتکاری شاخه و قیمت معرفی کردند.[۳۸] روش شاخه و قیمت یک روش مبتنی بر تجزیه است که در آن از فرایند شاخه‌زنی استفاده شده است. شاخه‌زنی تا جایی ادامه پیدا می‌کند که جواب مناسب برای مسئله به دست آید. جزئیات بیشتر روش شاخه و قیمت را می‌توان در تحقیق بارن‌هات و همکاران [۲۱] (۱۹۹۸) مطالعه کرد. بارد و نانانوکول قبل از ارائه‌ی الگوریتم، یک RMP [۲۲] و زیرمسئله‌هایی برای ارائه الگوریتم تعریف می‌کنند. ابتدا مجموعه‌یی از طرح‌های مختلف برای هر دوره t معرفی می‌شود ($R(t)$). هر طرح (r) شامل مقدار تحویل داده شده به مشتری و برنامه‌ی توزیع دوره t است. (پارامترهای تعریف شده در مقاله پیشرو در حالت چندمحصولی است، بنابراین برای شرح این الگوریتم آن‌ها را در حالت تک‌محصولی در نظر می‌گیریم.) فرایند شاخه‌زنی الگوریتم شاخه و قیمت با متغیر z_t آغاز و سپس بررسی می‌شود که طرح r در دوره t انتخاب می‌شود یا خیر. اگر جواب مثبت باشد از روی طرح انتخاب شده مقدار تحویلی به مشتریان و همچنین مسیریابی تعیین می‌شود. اما اگر جواب منفی باشد، طرح r حذف شده و مناسب‌تر است که روی متغیر x_{ijt} شاخه زده شود. برای بهبود روش شاخه و قیمت چندین ویژگی در این فرایند در نظر گرفته می‌شود. اول آن که جواب اولیه از طریق الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه‌ی بارد و نانانوکول (۲۰۰۹b) تولید می‌شود. دوم، در طی فرایند تولید ستون، به جای حل بهینگی زیرمسئله‌ها، مسائل به‌وسیله‌ی الگوریتم ابتکاری مبتنی بر جدایی بارد و نانانوکول (۲۰۰۹a) حل می‌شود. سوم، طرح شاخه‌زنی اصلاح‌شده برای شاخه‌ی متغیرها ارائه می‌شود. چهارم از روش ابتکاری گردکردن استفاده می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد در نمونه‌یی با ۵۰ مشتری و ۸ دوره، الگوریتم ابتکاری شاخه و قیمت بهتر از حل ترکیبی مسئله با CPLEX به جواب می‌رسد.[۳۹،۲۷،۱۷]

۳. روش ابتکاری مبتنی بر MIP

آرچتی و همکاران (۲۰۱۱) مسئله‌ی PIRP را به دو زیرمسئله‌ی LSP نامحدود و IRP تقسیم کرده و یک روش ابتکاری برای حل زیرمسئله‌ها توسعه می‌دهند. الگوریتم با تعیین مقدار تولید برای هر دوره، به میزان تقاضای آن دوره شروع می‌شود. سپس IRP با یک روش ابتکاری حل می‌شود. در این فرایند خرده‌فروشان به‌ترتیب انتخاب می‌شوند؛ دوره زمانی و وسیله‌ی نقلیه‌یی که به خرده‌فروش سرویس می‌دهد، به‌وسیله درخت جست‌وجو تعیین می‌شود. برای بررسی بیشتر درمورد این که با تغییر مقدار تولید، آیا هزینه‌ی تولید و موجودی کاهش می‌یابد، LSP نامحدود حل می‌شود. یک روش ابتکاری برای بهبود جواب فعلی به‌وسیله‌ی حذف دو خرده‌فروش ارائه می‌شود و سپس مسئله برای تعیین مقدار هزینه‌ی خرده‌فروشان فرموله می‌شود. اگر هزینه‌ی کل کاهش یابد، LSP نامحدود دوباره حل می‌شود. این فرایند آن‌قدر تکرار می‌شود تا دیگر بهبودی حاصل نشود. نتایج محاسباتی برای یک نمونه با ۱۴ خرده‌فروش و ۶ دوره نشان می‌دهد که الگوریتم ابتکاری در مقایسه با الگوریتم دقیق شاخه برش، در مدت زمان کوتاه‌تری نتایج بهتری ارائه می‌دهد.[۲۸]

۴. روش ابتکاری MIP تکرار شونده

آبسی و همکاران (۲۰۱۴) یک ابتکار MIP تکرارشونده برای حل مسئله‌ی PIRP با فرض نامحدود بودن تولید معرفی کرده‌اند. MIP به‌وسیله‌ی جایگزینی هزینه‌های مسیریابی و متغیرهای مدل عمومی PIRP، با هزینه‌ی ثابت SC_{vit} فرموله می‌شود. SC_{vit} عبارت است از هزینه‌ی ثابت خدمت به مشتری i در دوره t توسط وسیله‌ی نقلیه v. در هر تکرار، MIP برای به دست آوردن مقدار بهینه‌ی تولید و موجودی حل می‌شود. سپس یک حل ابتکاری برای به دست آوردن مسیریابی ارائه می‌شود. در مرحله‌ی بعد هزینه‌ی SC_{vit} با کم‌ترین هزینه‌ی جواب فعلی تنظیم می‌شود و سپس تکرار بعد انجام می‌شود. زمانی که تعداد تکرار مشخص انجام شود، فرایند متوقف می‌شود. نویسندگان دو گزینه برای روش تکرارشونده پیشنهاد می‌کنند. در گزینه‌ی اول، به هنگام حل MIP، ظرفیت وسیله‌ی نقلیه به‌صورت فردی در نظر گرفته می‌شود و از حل ابتکاری TSP [۲۳] برای تعیین مسیر استفاده می‌شود. در حالی که در گزینه‌ی دوم، ظرفیت وسیله‌ی نقلیه تجمعی در نظر گرفته می‌شود و از حل ابتکاری VRP برای تعیین مسیر استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که گزینه‌ی دوم نسبت به گزینه‌ی اول در مدت‌زمان کوتاه‌تری به جواب می‌رسد.[۳۲]

۲.۲.۴. الگوریتم‌های فرا ابتکاری

۱. **روش جست‌وجوی حریصانه تصادفی تطبیقی (GRASP)**[۲۴]

روش GRASP اولین بار در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. این روش دارای دو فاز اصلی ساخت و جست‌وجوی محلی است. در فاز ساخت یک جواب اولیه از طریق الگوریتم حریصانه‌ی تصادفی تطبیقی ارائه می‌شود. سپس فاز جست‌وجوی محلی برای بهبود جواب استفاده می‌شود. GRASP برای PIRP توسط بودیا و همکاران (۲۰۰۷) توسعه داده شد. در فاز ساخت، یک جواب اولیه با توسعه‌ی تولید و برنامه‌ی توزیع محصول به مشتریان ایجاد می‌شود. از دوره اول به بعد، ابتدا برنامه‌ی تولید برای پوشش تقاضا در دوره‌هایی که تولید اضافی صورت نمی‌گیرد، تعیین می‌شود، که این امر موجب ایجاد موجودی در مرکز تولید می‌شود. سپس مسیرهای تحویل در هر دوره با استفاده از الگوریتم تطبیقی به دست می‌آید. در مرحله‌ی بعد توسط الگوریتم بررسی می‌شود که می‌توان برخی از تقاضاهای مشتریان را به دوره‌های قبل منتقل کرد، بدون این که نقصی در تولید، موجودی و ظرفیت وسیله‌ی نقلیه ایجاد شود. دوباره فرایند تطبیقی برای جایگذاری مقدار آن‌ها انجام می‌شود. سپس یک حل ابتکاری برای تعیین بهترین مسیریابی جواب معرفی می‌شود. همه‌ی برنامه‌های مسیریابی ثابت است و الگوریتم بهبود برنامه تولید از طریق تغییر مقدار تولید و ترکیب با برنامه تولید مرحله‌ی قبل، برای کاهش هزینه‌ی اجرا می‌شود (به‌عنوان مثال اگر هزینه‌های ذخیره‌سازی کم‌تر از هزینه‌های راه‌اندازی تولید باشد). همچنین بودیا و همکاران (۲۰۰۷)، روش ارتباط دوباره مسیر (PRP)[۲۵] را توسعه دادند. در این فرایند جواب‌های به دست آمده از GRASP براساس هزینه‌ی کل طبقه‌بندی می‌شود و تعداد محدودی از جواب‌ها در یک مجموعه جواب برتر ذخیره می‌شود. سپس از این مجموعه دو جواب برای ایجاد یک جواب جدید انتخاب می‌شود. جواب جدید از طریق انتقال برخی مقادیر تحویل در یکی از این جواب‌ها به دوره دیگر با توجه به مقادیر تحویل جواب دیگر، به‌منظور کاهش تفاوت بین این دو جواب ایجاد می‌شود.[۲۴و۴۰]

۲. **الگوریتم ممتیک (MA)**[۲۶]

به‌طور غیر رسمی، الگوریتم ممتیک اصلاح شده‌ی الگوریتم ژنتیک است با این تفاوت که در آن از یک روش جست‌وجوی محلی برای بهبود جواب‌ها استفاده می‌شود. ایده‌ی اصلی الگوریتم ژنتیک، تولید جواب جدید از جمعیت جواب اولیه با استفاده از تکامل طبیعت است. جواب‌ها با استفاده از کروموزوم نشان داده می‌شوند. در این الگوریتم از عملگرهای تقاطع و جهش برای ایجاد جواب جدید استفاده می‌شود. در الگوریتم ممتیک از یک روش جست‌وجوی محلی برای بهبود جواب اولیه و جواب جدید استفاده می‌شود. این روش اولین بار توسط ماسکاتو (۱۹۹۹) معرفی شد. بودیا و پرنس (۲۰۰۹) این الگوریتم را برای PIRP با ویژگی‌های خاص معرفی کردند. در این مطالعه جمعیت اولیه از یک حل ابتکاری ساده به دست می‌آید. در حل ابتکاری برنامه‌ی تولید ابتدا برای کل تقاضا تعیین می‌شود. سپس از یک حل ابتکاری دیگر برای ایجاد برنامه توزیع و برنامه تولید اصلاح شده شبیه الگوریتم معرفی شده توسط واگنر و ویتین (۱۹۵۸) استفاده می‌شود. سپس با استفاده از تقاطع جواب جدید ایجاد خواهد شد. در مرحله‌ی بعد از الگوریتم جست‌وجوی محلی بودیا و همکاران (۲۰۰۷)، برای بهبود جواب‌های به دست آمده استفاده می‌شود. این فرایند تا رسیدن به شرط توقف ادامه می‌یابد.[۲۴و۴۱-۴۳]

۳. **روش جست‌وجوی ممنوعه**

مفهوم روش جست‌وجوی ممنوعه توسط گلور (۱۹۸۹) معرفی شده است. در این روش جست‌وجو در هر تکرار جواب فعلی به سمت بهترین جواب همسایه حرکت می‌کند. برای جلوگیری از ایجاد چرخه و دوری از بهینه‌ی محلی همه‌ی جواب‌های چک شده در یک لیست ممنوعه ذخیره می‌شود.[۴۴] روش جست‌وجوی ممنوعه به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای VRP شناخته شده است.[۴۵] بارد و نانانوکول (۲۰۰۹b) یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه برای PIRP پیشنهاد کردند. در این الگوریتم از یک لیست ممنوعه‌ی واکنشی برای سایز متغیرها استفاده شده است. در این الگوریتم جواب اولیه از طریق حل PIRP اصلاح شده به‌وسیله‌ی حذف محدودیت‌های مسیریابی (حذف متغیر x_{ijt})، به دست می‌آید. سپس برنامه‌ی مسیریابی با استفاده از مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی ظرفیت‌دار براساس روش جست‌وجوی ممنوعه‌ی کارلتون و بارنس[۲۷] (۱۹۹۶) به دست می‌آید. جواب تولید شده با روش جست‌وجوی محلی و استفاده از مبادله یا انتقال بهبود می‌یابد. مبادله، بررسی دو مشتری در دو دوره و تبادل بیشترین مقدار تحویل ممکن بین دو مشتری است. انتقال مقدار تحویل یک مشتری برای ترکیب با مقدار تحویل در دوره‌ی قبل به‌منظور کاهش هزینه‌های حمل و نقل را پیدا می‌کند. جوابی که بهبود می‌یابد در لیست ممنوعه ذخیره می‌شود.[۳۹و۴۶]

آرمنتو و همکاران (۲۰۱۱) یک روش جست‌وجوی ممنوعه برای PRP توسعه دادند. در این روش برای ایجاد جواب اولیه، مقدار تحویل برابر تقاضاها و برنامه تولید و مسیریابی به ترتیب از الگوریتم واگنر و ویتین (۱۹۵۸) و کلارک و رایت (۱۹۶۴) به دست می‌آید.[۴۷و۴۸]

۴. **جست‌وجوی همسایگی جامع تطبیقی (ALNS)**

چارچوب روش ALNS توسط روپکه و پسینگر (۲۰۰۶) برای حل VRP با دریافت و تحویل، معرفی شد.[۴۹] ایده‌ی اصلی ALNS خراب کردن و درست کردن مکرر یک بخش از جواب برای به دست آوردن جواب بهبود یافته با استفاده از عملگرهای جست‌وجو است. از این روش به‌تازگی برای کاربردهای مختلف مسیریابی استفاده می‌شود. ALNS آدولیاساک و همکاران (۲۰۱۴b) سه ویژگی اصلی دارد. نخست آن که از یک طرح شمارشی برای ایجاد چندین جواب اولیه مختلف استفاده می‌شود. هر جواب اولیه با حل دو مسئله‌ی تجزیه، شبیه روش بارد و نانانوکول (۲۰۰۹b) ایجاد می‌شود و معادلات شاخه‌زنی محلی فیسچتی و لودی (۲۰۰۳) برای تولید جواب دیگر استفاده می‌شود. دوم، نویسندگان دو عملگر به نام‌های انتخاب و تبدیل معرفی می‌کنند. در هر تکرار یک عملگر به‌صورت احتمالی انتخاب می‌شود. عملگر انتخاب برای تولید لیست گره‌های کاندید اعمال می‌شود و سپس عملگر تبدیل برای حذف و ایجاد دوباره لیست گره‌های کاندید برای جواب فعلی اعمال می‌شود. سوم، هنگامی که یک جواب جدید در طول فرایند تبدیل ایجاد می‌شود یک مسئله‌ی حداقل جریان هزینه (MCF)[۲۸] برای به دست آوردن مقدار بهینه‌ی تولید، موجودی و مقدار تحویل به مشتریان حل می‌شود.[۳۹و۳۱و۵۰]

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری بر تحقیقات انجام‌شده‌ی مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی انجام شد. ابتدا پیشینه‌ی PIRP و مسائل پایه‌یی مرتبط با PIRP را مطرح کردیم. سپس یک نوع مدل‌سازی برای مسئله‌ی تولید ـ مسیریابی ـ موجودی چندمحصولی ارائه شد. همچنین تکنیک‌های مورد استفاده برای حل PIRP توسط محققین گذشته

را مورد تجزیه تحلیل قرار دادیم و در نهایت شکاف‌های موجود برای تحقیقات بیشتر در زمینه PIRP را معرفی کردیم.

۶. تحقیقات آتی

در این مقاله مروری بر تحقیقات ارائه شده در زمینه PIRP انجام شد. مدل‌سازی و فرضیات مسئله و همچنین الگوریتم‌های استفاده شده برای حل مدل‌ها را بررسی کردیم.

علی‌رغم این که تحقیقاتی در زمینه PIRP انجام شده، همچنان شکاف‌هایی برای پیشرفت‌های بیشتر در زمینه PIRP به‌منظور هماهنگی بیشتر با محیط اطراف وجود دارد. این شکاف‌ها در دو بخش وجود دارد:

۱. مدل‌سازی و فرضیات مسئله؛

۲. روش‌های حل.

در ادامه این شکاف‌ها برای انجام تحقیقات آینده ارائه می‌شود.

- امروزه بسیاری از عوامل مثل ارتعاشات، دود، حمل و نقل و... باعث انتشار گازهای گلخانه‌یی و درنتیجه گرم شدن هوا شده است. از این‌رو ارتباط بین صنعت و محیط‌زیست بیش از قبل مورد توجه قرار گرفته است. لذا پیشنهاد می‌شود یک هدف به‌منظور کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌یی به مدل پایه‌یی PIRP اضافه شود. به‌عبارت دیگر PIRP در یک زنجیره‌ی تأمین سبز ارائه شود.
- در تحقیقات قبلی بیشتر توابع هدف به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های حاصل از PIRP است. در حالی که عواملی مثل مسافت، زمان تحویل، مقدار بار وسیله‌ی نقلیه و... نیز در این مسئله قابل کنترل است. از این‌رو می‌توان هدفی به‌منظور کمینه‌سازی مسافت طی شده توسط وسیله‌ی نقلیه، کمینه‌سازی زمان تحویل و کمینه‌سازی مقدار با وسیله‌ی نقلیه در هر مسیر را به مسئله اضافه کرد
- یکی از عوامل مؤثر در PIRP زمان تحویل است. این عامل در تحقیقات قبلی به‌صورت قطعی در نظر گرفته شده است. در حالی که در واقعیت ممکن است وسیله‌ی نقلیه یک مسیر را در یک زمان مشخص طی نکند و با مشکلاتی از قبیل ترافیک، خرابی و... مواجه شود. لذا می‌توان این عامل را به‌صورت غیرقطعی و احتمالی فرض کرد که باعث افزایش جذابیت مسئله خواهد شد.
- در یک زنجیره‌ی تأمین بیش از یک مرکز تولید در نظر گرفته شود. این مراکز تولید می‌توانند به‌صورت هماهنگ و یا جدا از هم فعالیت کنند و به مشتریان سرویس دهند.
- در واقعیت ممکن است در یک زنجیره‌ی تأمین کمبود موجودی به وجود آید. این کمبود موجودی هم می‌تواند در انبار مرکز تولید و هم در مراکز مشتریان به وجود آید. کمبود موجودی یا به‌صورت پس‌افت و یا فروش از دست رفته است. در نظر گرفتن کمبود موجودی در PIRP می‌تواند مسئله را به واقعیت نزدیک‌تر کند.
- یکی دیگر از عوامل مؤثر بر PIRP اندازه ناوگان است. این عامل در تحقیقات انجام شده معلوم و مشخص است. اندازه ناوگان را می‌توان به‌صورت یک متغیر تصمیم در نظر گرفت. این امر موجب کاهش هزینه‌های اولیه زنجیره‌ی تأمین خواهد شد.
- یکی از اهداف اصلی در مدیریت زنجیره‌ی تأمین هماهنگی تصمیم‌گیری در مراحل مختلف زنجیره‌ی تأمین است. یکی از مراحل زنجیره‌ی تأمین مکان‌یابی است. مکان‌یابی می‌تواند با تصمیمات PIRP به‌صورت هماهنگ به دست آید. اگرچه این کار موجب افزایش پیچیدگی مسئله خواهد شد اما ممکن است موجب بهبود عملکرد زنجیره‌ی تأمین شود.
- الگوریتم ژنتیک یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای حل مسائل مختلف تحقیق در عملیات است. این امر به‌دلیل کارآمدی و همچنین پیاده‌سازی ساده‌تر این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگر است. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای حل PIRP از الگوریتم ژنتیک استفاده و با نتایج آن با الگوریتم‌های موجود مقایسه شود.
- الگوریتم کلونی مورچگان دارای ماهیت مسیریابی است و چون PIRP نیز یک مسئله‌ی مسیریابی است، لذا این الگوریتم برای حل PIRP می‌تواند مؤثر و کارآمد واقع شود.
- معمولاً در الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری از یک جواب اولیه برای حل مسئله استفاده می‌شود. هرقدر این جواب اولیه بهتر باشد نتایج حاصل از حل نیز به جواب بهینه نزدیک‌تر خواهد بود. لذا پیشنهاد می‌شود برای ایجاد جواب اولیه از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری دیگر استفاده شود. به‌عبارت دیگر برای حل PIRP از چند الگوریتم ابتکاری و فرا ابتکاری به‌صورت ترکیبی استفاده شود.
- از دیگر الگوریتم‌های دقیق می‌توان به الگوریتم شاخه ـ برش ـ قیمت اشاره کرد. پیچیدگی این روش زیاد و زمان‌بر است اما کارایی این روش برای حل PIRP خیلی بالاست.

پانوشت‌ها

1. supply chain management (SCM)
2. production inventory routing problem
3. vehicle routing problem
4. vendor managed inventory
5. lot-sizing problem
6. inventory routing problem
7. fixed partition policy
8. tabu search
9. local search
10. production-distribution problem
11. random greedy heuristic
12. production routing problem
13. adaptive large neighborhood search
14. maximum level
15. pick–up and delivery problem
16. fractional capacity constraints
17. generalized fractional subtour elimination constraints

18. order-up-to level
19. mingmixed integer program
20. Clarke and Wright
21. Barnhart et al
22. restricted master problem
23. travelling salesman problem
24. greedy randomized adaptive search procedure
25. path relinking procedure
26. Memetic algorithm
27. Carlton and Barnes
28. minimum cost flow

منابع (References)

1. Moin, N.H., Salhi, S. and Aziz, N.A.B. "An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem", *Int. J. Production Economics*, **133**, pp. 334-343 (2011).
2. Brown, G., Keegan, J., Vigus, B. and Wood, K. "The Kellogg company optimizes production, inventory, and distribution", *Interfaces*, **31**(6), pp. 1-15 (2001).
3. Çetinkaya, S., Uster, H., Easwaran, G. and Keskin, B.B. "An integrated outbound logistics model for Frito-Lay: Coordinatingaggregate-level production and distribution decisions", *Interfaces*, **39**(5), pp. 460-475 (2009).
4. Li, C.-L., Hsu, V.N. and Xiao, W.-Q. "Dynamic lot sizing witnh batchordering and truckload discounts", *Oper. Res.*, **52**(4), pp. 639-654 (2004).
5. van Norden, L. and van de Velde, S. "Multi-product lot-sizing with a transportation capacity reservation contract", *Eur. J. Oper. Res.*, **165**(1), pp. 127-138 (2005).
6. Chand, S., Hsu, V.N., Sethi, S. and Deshpande, V. "A dynamic lot sizing problem with multiple customers, Customer-specific shipping and backlogging costs", *IIE Trans.*, **39**(11), pp. 1059-1069 (2007).
7. Jaruphongsa, W. and Lee, C.-Y. "Dynamic lot-sizing problem with demandtime windows and container-based transportation cost", *Optim. Lett.*, **2**(1), pp. 39-51 (2008).
8. Solyalı, O. and Süral, H. "The one-warehouse multi-retailer problem: Reformulation, classification, and computational results", *Annals of Operations Research*, **196**(1), pp. 517-541 (2012).
9. Melo, R.A. and Wolsey, L.A. "MIP formulations and heuristics for twolevel production transportation problems", *Comput. Oper. Res.*, **39**(11), pp. 2776-2786 (2012).
10. Hsu, V.N., Li, C.-L. and Xiao, W.-Q. "Dynamic lot size problems withone-way product substitution", *IIE Trans.*, **37**(3), pp. 201-215 (2005).
11. Golden, B., Assad, A. and Dahl, R. "Analysis of a large scale vehicle routing problem with an inventory component", *Large Scale System*, **7**, pp. 181-190 (1984).
12. Dror, M. and Trudeau, P. "Saving by split delivery routing", *Transportation Science*, **23**, pp. 141-145 (1989).
13. Dror, M. and Trudeau, P. "Split delivery routing", *Naval Research Logistics*, **37**, pp. 383-402 (1990).
14. Miyamoto, Y. and Kubo, M. "Case study: The inventory routing for vending machines", *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **44**(4), pp. 378-389 (2001).
15. Anily, Sh. and Bramel, J. "An asymptotic 98.5%-effective lower bound on fixed patition policies for the inventory-royting problem", *Discrete Applied Mathematics*, **145**, pp. 22-39 (2004).
16. Zachariadis, E.E., Tarantilis, C.D. and Kiranoudis, C.T. "An integrated local search method for inventory and routing decisions", *Expert Systems with Applications*, **36**(7), pp. 10239-10248 (2009).
17. Bard, J.F. and Nananukul, N. "Heuristics for a multi-period inventory routing problem with production decisions", *Computers & Industrial Engineering*, **57**, pp. 713-723 (2009a).
18. Huang, S.-H. and Lin, P.-C. "Modified ant colony optimization algorithm for multi-iteminventory routing problems with demand uncertainty", *Transportation Research Part E*, **46**, pp. 598-611 (2010).
19. Shu-Chu, L. and Jyun-Ruei, C. "A heuristic method for the inventory routing and pricing problem in a supply chain", *Expert Systems with Applications*, **38**(3), pp. 1447-1456 (2011).
20. Zhong, Y. and Aghezzaf, E. "Combining DC-programming and steepest-descent to solve the single-vehicle inventory routing problem", *Computers & Industrial Engineering*, **61**, pp. 313-321 (2011).
21. Qin, L., Miao, L., Ruan, Q. and Zhang, Y. "A local search method for periodic inventory routing problem", *Expert Systems with Applications*, **41**(2), pp. 765-778 (2014).
22. Chandra, P. and Fisher, M. "Coordination of production and distribution planning", *Eur. J. Oper. Res.*, **72**(3), pp. 503-517 (1994).
23. Lei, L., Liu, S., Ruszczynski, A. and Park, S. "On the integrated production, inventory, and distribution routing problem", *IIE Transactions*, **38**(11), pp. 955-970 (2006).
24. Boudia, M., Louly, M.A.O. and Prins, C. "A reactive GRASP and path relinking for a combined production-distribution problem", *Comput. Oper. Res.*, **34**(11), pp. 3402-3419 (2007).
25. Boudia, M., Louly, M.A.O. and Prins, C. "Fast heuristics for a combined production planning and vehicle routing problem", *Prod. Plan. Control*, **19**(2), pp. 85-96 (2008).
26. Savelsbergh, M.W.P. and Song, J.-H. "An optimization algorithm for the inventory routing problem with continuous moves", *Comput. Oper. Res.*, **35**(7), pp. 2266-2282 (2008).
27. Bard J.F. and Nananukul, N. "Branch-and-price algorithm for an integrated production andinventory routing problem", *Computers & Operations Research*, **37**, pp. 2202-2217 (2010).
28. Archetti, C., Bertazzi, L., Paletta, G. and Speranza, M.G. "Analysis of themaximum level policy in a production-distribution system", *Comput. Oper. Res.*, **38**(12), pp. 1731-1746 (2011).
29. Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. and Jans, R. "Benders decomposition for production routing under demand uncertainty", GERAD Tech. Rep. G2012-57, HEC Montr'eal, Canada (2012).

30. Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. and Jans, R. "Formulations and branchand-cut algorithms for multi-vehicle production and inventory routing problems", *INFORMS J. Comput.*, **26**(1), pp. 103-120 (2014a).

31. Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. and Jans, R. "Optimization-based adaptive large neighborhood search for the production routing problem", *Transportation Sci.*, **48**(1), pp. 20-45 (2014b).

32. Absi, N., Archetti, C., Dauzère-P'erès, S. and Feillet, D. "An two-phase iterative heuristic approach for the production routing problem", *Transportation Sci. Forthcoming*, **49**(4), pp. 1-26 (2014).

33. Letchford, A.N. and Salazar-Gonz'alez, J.J. "Projection results for vehiclerouting", *Math. Programming*, **105**(2), pp. 251-274 (2006).

34. Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. and Jans, R. "The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms", *Computers & Operations Research*, **55**, pp. 141-152 (2015).

35. Ruokokoski, M., Solyalı, O., Cordeau, J.-F., Jans, R. and Süral, H. "Efficient formulations and a branch-and-cut algorithm for a productionrouting problem", GERAD Tech. Rep. G-2010-66, HEC Montr'eal, Canada (2010).

36. Lysgaard, J., Letchford, A.N. and Eglese, R.W. "A new branch-and-cutalgorithm for the capacitated vehicle routing problem", *Math. Programming,* **100**(2), pp. 423-445 (2004).

37. Lin, S. "Computer solutions of the traveling salesman problem", *BellSyst. Tech. J.*, **44**(10), pp. 2245-2269 (1965).

38. Barnhart, C., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., Savelsbergh, M.W.P. and Vance, P.H. "Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs", *Oper. Res.*, **46**(3), pp. 316-329 (1998).

39. Bard, J.F. and Nananukul, N. "The integrated production– inventory–distribution—routingproblem for a single commodity", *Journal of Scheduling*, **12**(3), pp. 257-80 (2009b).

40. Feo, T.A. and Resende, M.G.C. "Greedy randomized adaptive searchprocedures", *J. Global Optim.*, **6**(2), pp. 109-133 (1995).

41. Moscato, P. "Memetic algorithms: A short introduction", *New Ideasin Optimization*, McGraw-Hill Ltd., UK, pp. 219-234 (1999).

42. Boudia, M. and Prins, C. "A memetic algorithm with dynamic population management for an integrated production-distribution problem", *Eur. J.Oper. Res.*, **195**(3), pp. 703-715 (2009).

43. Wagner, H.M. and Whitin, T.M. "Dynamic version of the economic lot size model", *Management Sci.*, **5**(1), pp. 89-96 (1958).

44. Glover, F. "Tabu search–Part I.", *ORSA J. Comput.*, **1**(3), pp. 190-206 (1989).

45. Gendreau, M., Laporte, G. and Potvin, J.-Y. "Metaheuristics for the capacitated VRP", In: Toth, P., Vigo, D. (Eds.), *The Vehicle Routing Problems,* Society for Industrial and Applied Mathematics, pp. 129-154 (2001).

46. Carlton, W.B. and Barnes, J.W. "Solving the travelingsalesman problemwith time windows using tabu search", *IIE Trans.*, **28**(8), pp. 617-629 (1996).

47. Armentano, V.A., Shiguemoto, A.L. and Lokketangen, A. "Tabu search with path relinking for an integrated production-distribution problem", *Comput. Oper. Res.*, **38**(8), pp. 1199-1209 (2011).

48. Clarke, G. and Wright, J.W. "Scheduling of vehicles from a central depotto a number of delivery points", *Oper. Res.*, **12**(4), pp. 568-581 (1964).

49. Ropke, S. and Pisinger, D. "An adaptive large neighborhood search heuristicfor the pickup and delivery problem with time windows", *Transportation Sci.*, **40**(4), pp. 455-472 (2006).

50. Fischetti, M. and Lodi, A. "Local branching", *Math. Programming*, **98**(1), pp. 23-47 (2003).