

ترکیب رویکردهای تجزیه و صفحه برش برای مسئله زمان‌بندی و توزیع یکپارچه در زنجیره تأمین

علی قرایی^۱، فریبرز جولای^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
 ۲. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	خلاصه
تاریخچه مقاله: دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۰۸ پذیرش ۱۳۹۷/۰۶/۱۱	یکپارچه‌سازی تصمیمات در زنجیره تأمین، امروزه به یکی از موضوعات جذاب و کاربردی برای محققان تبدیل شده است. زمان‌بندی تولید و توزیع سفارش‌های مشتریان دو مورد مهم از این تصمیمات است که هر دو آن‌ها روی عملکرد زنجیره در تحویل به‌موقع سفارش‌ها و کاهش هزینه‌های زنجیره تأثیر می‌گذارند. در این مطالعه به مسئله یکپارچه‌سازی زمان‌بندی و توزیع سفارش‌ها در یک زنجیره تأمین پرداخته شده است. این مسئله از دیدگاه چندعاملی بررسی شده است. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله ارائه شده است. با توجه به ساختار مسئله، ابتدا مسئله به دو زیر مسئله تجزیه شده است و سپس برای حل آن از یک رویکرد صفحه برش استفاده شده است. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی است.
کلمات کلیدی: زمان‌بندی چندعاملی مسیریابی تحویل دسته‌ای صفحه برش تجزیه	

۱- مقدمه

تصمیمات در سطح برنامه‌ریزی عملیاتی صورت می‌گیرند. واضح است که تصمیمات یکپارچه برنامه‌ریزی و توزیع می‌تواند هزینه‌های عملیات را کاهش دهد و همچنین تحویل به‌موقع و در نتیجه رضایتمندی مشتری را بهبود بخشد. استراتژی‌های توزیع مختلفی در ادبیات مربوط به توزیع سفارش‌ها ارائه شده است. یکی از محبوب‌ترین این روش‌ها، جمع‌آوری و ادغام محصولات است که روش تحویل دسته‌ای نامیده می‌شود. در این روش، سفارش‌های متعدد به دسته‌ها و یا وسیله‌های نقلیه اختصاص داده می‌شود و بعد از پردازش آخرین سفارش، تحویل آغاز می‌شود. تحویل دسته‌ای، برخلاف تحویل تکی، هزینه‌های توزیع را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. با توجه به چنگ و همکاران [۶]، مسئله تحویل دسته‌ای به برنامه‌ریزی و زمان‌بندی برخی از سفارش‌ها روی ماشین‌آلات یا کارخانه‌ها مربوط است که قرار است پس از تجمیع سفارش‌ها به کارخانه‌های

برای مدیریت کارآمد در هر زنجیره تأمین باید تصمیمات متعددی گرفته شود. دو تصمیم مهم، برنامه‌ریزی تولید و توزیع سفارش‌های مشتریان است. در گذشته، هر یک از اعضای زنجیره تأمین مشغول برنامه‌ریزی وظایف خود بودند و سعی داشتند سود خود را بدون در نظر گرفتن منافع سایر اعضای پیشینه کنند. اما امروزه، تصمیمات هماهنگ و یکپارچه در میان هر یک از اعضای زنجیره تأمین، بسیار مهم است. در سال‌های اخیر چندین مقاله به این مسئله پرداخته‌اند مانند چاندر و همکاران [۱]، چن و همکاران [۲]، لی و همکاران [۳]، چن و همکاران [۴] و بارد و همکاران [۵]. هر دو این

* نویسنده مسئول: فریبرز جولای

تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۲۱۰۶۷؛ پست الکترونیکی: ffolai@ut.ac.ir

۴) مجموعه غیر مجزا، که یک حالت کلی است، که هر کار ممکن است به یک یا چند مجموعه تعلق داشته یا نداشته باشد. همچنین در ادبیات چندعاملی، سه رویکرد برای حل مسائل چندعاملی وجود دارد:

- ۱) مسئله بهینه‌سازی مقید، که یک روش متداول است که در آن یک هدف به‌عنوان هدف اصلی در تابع هدف قرار می‌گیرد و دیگر اهداف به‌صورت محدودیت درمی‌آیند.
- ۲) ترکیب خطی، که در آن تمام اهداف به‌صورت خطی ترکیب شده و به یک هدف واحد می‌رسند.
- ۳) رویکرد پارتو، که هدف آن یافتن کل یا قسمتی از جواب‌های پارتو است.

در این مطالعه، یک مسئله یکپارچه زمان بندی و توزیع همراه با تصمیمات مسیریابی در میان مشتریان مورد بحث قرار گرفته است. در ابتدای افق برنامه‌ریزی، هر مشتری یک سفارش را صادر می‌کند و تاریخی برای تحویل خود معرفی می‌کند. برای مثال، در دنیای واقعی، یک زنجیره تأمین را در نظر بگیرید که مشتریان از مکان‌های مختلف، سفارش‌ها را به مدیریت زنجیره تأمین ارسال می‌کنند. مدیریت مرکزی تلاش می‌کند با برنامه‌ریزی توزیع و زمان بندی مناسب، سفارش‌ها را در موعد مقرر تحویل مشتریان دهد. سیاست تولید بر اساس MTO است. یکی دیگر از نوآوری‌ها در این مطالعه، بررسی مسئله از دیدگاه چندعاملی است. اولین عامل برخی از مشتریان هستند که هدف آن‌ها به حداقل رساندن کل زمان دیرکرد است و هدف عامل دوم کمینه کردن هزینه کل توزیع برای همه کارها است. در این مطالعه، مسئله چندعاملی به‌صورت مجموعه متداخل بررسی شده است.

همچنین، رویکرد بهینه‌سازی مقید برای این مسئله استفاده می‌شود. به این معنا که هزینه توزیع کل به‌عنوان هدف اصلی محسوب می‌شود و هدف عامل اول محدود می‌شود. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای این مسئله آورده شده است. با توجه به ساختار مسئله، ابتدا مسئله اولیه به دو مسئله اصلی و زیر مسئله تجزیه شده است و سپس با استفاده از یک رویکرد صفحه برش به حل آن پرداخته می‌شود. عملکرد روش پیشنهادی با روش شاخه و برش مورد استفاده در حل‌کننده CPLEX مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج محاسباتی نشان از عملکرد مناسب روش پیشنهادی دارد.

۲- مرور ادبیات

مسئله یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید و توزیع، دو دهه است که مورد توجه قرار گرفته است. چاندر و همکاران [۱] به مسئله هماهنگی مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع پرداخته‌اند و نتایج به‌دست‌آمده را در دو حالت تصمیمات هماهنگ و جداگانه مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها کارخانه‌های با چندین محصول را در نظر گرفته‌اند و در بخش توزیع، وسایل نقلیه با ظرفیت نامحدود وجود

پایین دست یا مشتریان به‌صورت دسته‌ای و توسط وسایل نقلیه ارسال شود. اهداف مختلفی برای این مسئله در ادبیات معرفی شده است. اول، معیارهای زمان بندی مانند حداکثر زمان تکمیل، مجموع زمان دیرکرد و غیره. هزینه حمل و نقل نیز یکی دیگر از اهداف است که در برخی مقالات استفاده شده است. مجموع زمان دیرکرد و هزینه حمل و نقل اهداف این مطالعه هستند، که این دو هدف با یکدیگر در تعارض هستند و اگر هر دو آن‌ها به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شوند، ما با یک مسئله چندهدفه مواجه هستیم. برای کاهش هزینه‌های توزیع، تعداد دسته یا وسایل نقلیه باید به حداقل برسد که به نوبه خود نیاز است ظرفیت هر وسیله نقلیه پر شود. از سوی دیگر، این امر می‌تواند به تأخیر در عملیات تحویل منجر شود و هزینه‌های انبارداری و نارضایتی مشتری را افزایش دهد. از این رو، تعادل بین هزینه‌های توزیع و اهداف زمان بندی ضروری است. همچنین، به دلیل تجمع کارهای مشتریان، یک وسیله نقلیه می‌تواند برای چندین مشتری ارسال شود، بنابراین تصمیمات مسیریابی را می‌توان در میان مشتریان در نظر گرفت.

پیشرفت در زمینه زمان بندی کارها، فرضیات جدیدی را در مقالات مطرح کرده است که به مسائل دنیای واقعی نزدیک شده‌اند. در دنیای واقعی به جای در نظر گرفتن یک هدف برای یک مسئله زمان بندی، منطقی است که اهداف چندگانه را برای یک مسئله در نظر بگیریم. در مسائل زمان بندی کلاسیک، فرض بر این است که تمام کارها بر اساس یک یا چند هدف برنامه‌ریزی شوند. به‌عنوان مثال، لی و همکاران [۷] به یک مسئله چندهدفه زمان بندی تولید و توزیع پرداخته‌اند که اهداف آن عبارتند از کمینه‌سازی کل هزینه توزیع و کل زمان انتظار مشتریان. با این حال، در بسیاری از مسائل واقعی، چندین مجموعه از کارها، که به آن‌ها عامل گفته می‌شود، وجود دارند که هر یک اهداف خاص خودشان را دارند که به‌عنوان زمان بندی چندعاملی شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر، مطالعات متعدد در این زمینه انجام شده است. اولین مطالعات توسط بیکر و همکاران [۸] و آجنتیس و همکاران [۹] انجام شده است که در آن مسئله برنامه‌ریزی چندعاملی ارائه و تعریف شده است. در مسائل زمان بندی چندعاملی، هر عامل بر اساس اهداف خودش از منابع مشترک زنجیره استفاده می‌کند و عامل‌ها برای دسترسی به این منابع با یکدیگر رقابت می‌کنند.

با توجه به آجنتیس و همکاران [۱۰]، مسائل چندعاملی به چهار دسته از دیدگاه ساختاری تقسیم می‌شوند:

- ۱) عوامل رقابتی، که در آن عوامل هیچ کار مشترکی ندارند و هر کار فقط به یک عامل اختصاص دارد.
- ۲) مجموعه متداخل، که در آن هر مجموعه می‌تواند زیرمجموعه‌ای از مجموعه‌های دیگر باشد. به‌عنوان مثال، در یک مسئله دوعاملی، یک مجموعه زیرمجموعه کل کارهاست.
- ۳) چند معیاره، که همان مسئله زمان بندی چند هدفه کلاسیک است که در آن همه کارها دارای اهداف مشترکی هستند.

کارهای دارای تأخیر پرداخته‌اند. یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا برای به حداقل رساندن این اهداف، و همچنین هزینه توزیع بکار رفته است. وانگ و همکاران [۲۳]، مسئله زمان‌بندی کارها روی چند ماشین موازی را بررسی کرده‌اند و سپس روش تحویل دسته‌ای برای توزیع در نظر می‌گیرند، به طوری که کل هزینه جریان و هزینه تحویل کاهش می‌یابد. آن‌ها نشان داده‌اند که کلاس پیچیدگی مسئله NP-complete است حتی برای دو ماشین و یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئله استفاده شده است.

سلوارجه و همکاران [۲۴]، مسئله زمان‌بندی تک ماشین را با تحویل دسته‌ای و زمان آماده‌سازی بررسی کرده‌اند به صورتی که مجموع زمان‌های شناوری موزون و هزینه‌های تحویل به حداقل برسد. یک الگوریتم تقریبی برای حل مسئله در حالت وزن‌های یکسان ارائه شده است و یک روش فراابتکاری برای مسئله کلی توسعه یافته است. در بین و همکاران [۲۵]، یک مسئله زمان‌بندی تک ماشین و تحویل دسته‌ای با یک موعد تحویل مشترک و زمان پردازش قابل کنترل بررسی شده است. به تازگی، رستمی و همکاران [۲۶]، یک روش شاخه و کران و دو الگوریتم فراابتکاری را برای مسئله زمان‌بندی تک ماشین و تحویل دسته‌ای با توجه به زمان آماده‌سازی توسعه داده‌اند. روش فراابتکاری مبتنی بر قاعده برای مسئله زمان‌بندی روی ماشین‌های موازی و تحویل دسته‌ای توسط جو و همکاران [۲۷] برای به حداقل رساندن حداکثر زمان تکمیل کل فرایند طراحی شده است.

اخیراً، تحقیقات در مورد مسئله زمان‌بندی چندعاملی توسط پرز گونزالز و همکاران [۲۸]، بررسی و طبقه‌بندی شده است و آن‌ها چارچوبی برای تحقیقات آینده در مورد این مسئله و راه‌حل‌ها آن ارائه می‌دهند. آن‌ها در مورد کاربردهای برنامه‌ریزی چندعاملی توضیح می‌دهند که یکی از آن‌ها مربوط به برنامه‌ریزی زنجیره تأمین است، به طوری که مشتریان برای رسیدن به منابع زنجیره تأمین رقابت می‌کنند و درعین حال کل هزینه تولید و توزیع به حداقل می‌رسد. برخی از مسائل مختلف در زمان‌بندی چندعاملی با رویکرد بهینه‌سازی مقید توسط آجنتیس و همکاران [۹] ارائه شده است. در مورد رویکرد پارتو و مجموعه‌های متداخل، تنها یک مطالعه توسط ایتایف و همکاران [۲۹] انجام شده است. آن‌ها یک فرمول‌بندی ریاضی را ارائه می‌دهند و سپس برای حل دو روش جستجوی ممنوع و شبیه‌سازی تبرید مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مسئله بهینه‌سازی مقید، یک الگوریتم شاخه و کران و آزادسازی لاگرانژ برای یک مسئله زمان‌بندی تک ماشین توسط آجنتیس و همکاران [۳۰] در حالت دوعاملی ارائه شده است. اهداف مسئله به حداقل رساندن زمان تکمیل موزون کارهای مربوط به عامل اول، و هدف دوم، که به به صورت حد بالا درمی‌آید، تابع هزینه کارهای عامل دوم است.

یک الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان برای مسئله زمان‌بندی تک ماشین در حالت دوعاملی با هدف حداکثر زمان

دارد و تحویل جداگانه سفارش‌ها مجاز است. آن‌ها نشان دادند که هزینه عملیات می‌تواند از ۳٪ تا ۲۰٪ در حالت تصمیمات هماهنگ شده کاهش یابد. همچنین در چن و همکاران [۲] و پاندور و همکاران [۱۱] نیز سود قابل توجه تصمیمات بهینه یکپارچه تولید و توزیع در مقایسه با تصمیمات جداگانه نشان داده شده است.

اهداف مختلفی در مقالات برای این مسئله ارائه شده است. بعضی از مقالات در ادبیات، به هزینه حمل‌ونقل و معیارهای رضایت مشتری پرداخته‌اند، به‌عنوان مثال در هال و همکاران [۱۲]، وانگ و همکاران [۱۳] و لی و همکاران [۱۴]. از سوی دیگر، برخی مقالات به موازنه بین هزینه‌های حمل و کل هزینه موجودی پرداخته‌اند، به‌عنوان مثال در هرمان و همکاران [۱۵]، لی و همکاران [۱۶]، گیسمار و همکاران [۱۷] و لی و همکاران [۱۸]. همچنین چندین مقالات مروری در مورد برنامه‌ریزی عملیات یکپارچه در زنجیره تأمین وجود دارد. در سارمینتو و همکاران [۱۹]، مسئله یکپارچه در سطوح استراتژیک و تاکتیکی در نظر گرفته شده است. آن‌ها همچنین با توجه به نوع مسئله تصمیم‌گیری (مانند موجودی و توزیع) مسائل را دسته‌بندی و بررسی می‌کنند. در سال‌های اخیر نیز چندین مقالات مروری مانند مولا و همکاران [۲۰] و فهیمی نیا و همکاران [۲۱] وجود دارد. در مقاله اول این مسئله را بر اساس چندین عامل، مانند سطوح تصمیم‌گیری، رویکرد مدل‌سازی، نوع تابع هدف، رویکرد حل و غیره طبقه‌بندی و مرور شده است. اما در مقاله دوم، از دیدگاه ساختار مسئله (مثلاً تعداد محصولات، تعداد کارخانجات، تعداد انبارها، ...) و روش‌های حل (مانند فرمول‌بندی ریاضی، روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری و شبیه‌سازی) مورد بررسی قرار می‌گیرد. بهنامیان و فاطمی قمی [۸۶] به بررسی مسئله زمان‌بندی در محیط چند کارخانه‌های پرداختند که میان کارخانجات انتقال درونی برقرار است و یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی برای آن ارائه دادند. خداینده و همکاران [۳۹] به ارائه یک الگوریتم ژنتیک برای مسئله یکپارچه تولید و توزیع با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری و هزینه‌های حمل‌ونقل پرداختند.

مطالعات انجام شده در زمینه تحویل دسته‌ای در سال‌های اخیر افزایش یافته است. چنگ و همکاران [۶]، نخستین مطالعه را در زمینه مسئله تحویل دسته‌ای انجام دادند. آن‌ها تاریخ تحویل هر دسته به سیستم توزیع را برابر با زمان لازم برای تکمیل آخرین کار در دسته تعریف می‌کنند. برای حل مسئله، از یک روش شاخه و کران استفاده می‌شود و سپس یک حد پایین و بالا برای مسئله ارائه می‌شود. در چنگ و همکاران [۲۲]، مسئله زمان‌بندی تک ماشین با تحویل دسته‌ای بحث شده است به طوری که تعداد کل دسته‌ها و جریمه زود کرد به حداقل برسد. به‌عنوان یکی از مقالات با بیشترین ارجاع در مورد تحویل دسته‌ای، هال و همکاران [۱۲] به مسئله زمان‌بندی کارها روی یک ماشین با توجه به تحویل دسته‌ای و اهداف مختلف مانند زمان کل شناوری، حداکثر دیرکرد و تعداد

روی وسایل حمل در زمان حمل و نقل گنجانده شده است. دستگاه‌های پردازش و وسایل نقلیه در کارخانه همیشه در دسترس هستند. دسته یا وسیله نقلیه ظرفیت محدودی دارند و ناوگان حمل همگن بوده و وسایل نقلیه کافی در دسترس هستند. در ادامه علائم استفاده شده در مطالعه معرفی می‌شوند:

J	مجموعه مشتریان یا کارها ($i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$)
K	مجموعه وسیله‌های حمل ($k \in \{1, 2, \dots, n\}$)
پارامترها	
n	تعداد کل مشتریان یا کارها
M	یک عدد مثبت بزرگ
p_i	زمان پردازش کار i
d_i	موعد تحویل کار i
q_i	اندازه کار i
t_{ij}	زمان انتقال بین مشتری i و j
t_i	زمان انتقال از سایت تولیدی به سمت مشتری i
r_{ij}	هزینه انتقال بین مشتری i و j
r_i	هزینه انتقال بین سایت تولیدی و مشتری i
FC	هزینه ثابت هر بار انتقال وسیله حمل
Q	محدودیت ظرفیت وسیله
δ	حد بالا مجموع زمان تأخیر

متغیرهای تصمیم

X_{ij}	برابر ۱ است اگر کار j بلافاصله بعد از پردازش شود.
Y_j^k	برابر ۱ است اگر کار j به وسیله k اختصاص یابد.
Z_{ij}^k	برابر ۱ است اگر کار j بلافاصله بعد از کار i با وسیله k تحویل شود.
C_j	زمان تکمیل پردازش کار j
Cb_k	زمان شروع تحویل وسیله k
T_j	زمان تأخیر کار j
A_j	زمان تحویل کار j به مشتری

فرمول بندی ریاضی

دو کار مجازی 0 و n+1 با زمان پردازش و موعد تحویل صفر برای تعیین اولین و آخرین کار توالی معرفی می‌شوند. همچنین دو مشتری 0 و n+1 با هزینه حمل صفر وجود دارند که مشتری صفر کارخانه است و مشتری n+1 به معنای بازگشت به سایت تولیدی است. حال فرمول بندی ریاضی مسئله به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\sum_{i=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n+1 \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} X_{ij} = 1 \quad \forall i = 0, 1, \dots, n \quad (2)$$

$$X_{ij} = 0 \quad \forall i = j \quad 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$X_{0, n+1} = 0 \quad (4)$$

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

تکمیل برای هر دو عامل در تان و همکاران [۳۱] آورده شده است. بین و همکاران [۳۲]، یک مدل زمان بندی تک ماشین دو عاملی برای مسئله تحویل دسته‌ای ارائه کرده‌اند. یک رویکرد بهینه‌سازی مقید برای این مسئله مورد استفاده قرار گرفته است. پیچیدگی مسئله بررسی شده و یک الگوریتم با زمان چندجمله‌ای برای حل مسئله توسعه داده شده است. استفاده از روش‌های فراابتکاری برای مسائل چندعاملی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در لین و همکاران [۳۳]، ابتدا یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مسئله زمان بندی سفارش‌ها مشتریان مورد استفاده قرار گرفته است و در بین و همکاران [۳۴]، الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل برای حل مسئله زمان بندی تک ماشین در حالت دو عاملی با زمان آماده‌سازی استفاده می‌شود.

با بررسی ادبیات، برخی از شکاف‌های تحقیقاتی مورد توجه قرار می‌گیرد. اکثر مقالات در ادبیات تحویل دسته‌ای به حمل و نقل مستقیم محصولات به مشتریان تمرکز می‌کنند و تحقیقات کمی در مورد حالت چند مشتری و استراتژی‌های توزیع مانند مسیریابی وسیله نقلیه یا کراس داک صورت گرفته است. علاوه بر این، هیچ مقاله‌ای وجود ندارد که دارای دیدگاه چندعاملی در این مسئله باشد. نوآوری‌های این مطالعه به صورت زیر خلاصه می‌شود: یک فرمول بندی ریاضی برای مسئله یکپارچه زمان بندی و تحویل دسته‌ای ارائه شده است. این مسئله در حالت چندین مشتری و تصمیمات مسیریابی بین مشتریان مورد مطالعه قرار گرفته است. یک دیدگاه چندعاملی به مسئله اعمال شده است. برای به دست آوردن راه حل بهینه، یک رویکرد تجزیه به همراه روش صفحه و برش مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- تعریف مسئله

کارخانه‌های را که سفارش‌ها مشتریان خود را پردازش و سپس ارسال می‌کند، در نظر بگیرید. در ابتدای دوره، مشتریان سفارش خود را به کارخانه همراه با موعد تحویل آن برای هر سفارش ارسال می‌کنند. هر مشتری یک سفارش را می‌تواند ارسال کند. هر کارخانه پس از پردازش سفارش‌ها، آن‌ها را به مکان‌های مشتریان توسط وسایل نقلیه ارسال می‌کند. وسایل نقلیه باید سفارش‌ها را در میان مشتریان توزیع کنند که به تصمیمات مسیریابی نیاز دارند. بنابراین مسئله مورد بحث در این مطالعه شامل این مسائل است. اولین مسئله شامل توالی سفارش‌ها در کارخانه و سپس اختصاص دادن کارها به یک وسیله نقلیه با توجه به ظرفیت وسیله نقلیه و در نهایت تعیین توالی تحویل سفارش‌ها است. این مسئله از دیدگاه دو عاملی با مجموعه‌های متداخل بررسی شده است. هزینه توزیع کل باید به حداقل برسد و مجموع دیرکرد کارهای عامل اول محدود می‌شود.

در مسئله زمان بندی، وقفه در پردازش مجاز نیست. همه سفارش‌ها در ابتدای افق برنامه‌ریزی در دسترس هستند. قبل از پردازش کارها زمان راه اندازی وجود ندارد و زمان بارگیری و تخلیه

محدودیت (۲۱) نمایش داده شده است. محدودیت‌های عدد صحیح بودن و نامنفی بودن متغیرها در محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) نمایش یافته است. تابع هدف عامل دوم، مجموع هزینه‌های توزیع است به‌عنوان تابع هدف اصلی آمده است.

مدل ریاضی بالا یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) است و با متغیرهای باینری X_{ij} ، Y_j^k و Z_{ij}^k و متغیرهای پیوسته C_j ، Cb_k ، A_j و T_j توصیف می‌شود. تعداد متغیرهای باینری $n^2 + (n+1)^2$ و تعداد متغیرهای پیوسته n^4 است. همچنین تعداد محدودیت‌ها برابر $2 + (n+2)(n+1) + 3n^2$ است. بنابراین، این مدل شامل متغیرهای باینری است که پیچیدگی مسئله را افزایش می‌دهد. بنابراین، با توجه به این پیچیدگی، استفاده از حل‌کننده‌های معمولی مانند CPLEX برای حل این مدل کارآمد نیست، به‌خصوص هنگامی که اندازه مسئله افزایش می‌یابد. به همین دلیل یک رویکردی ترکیبی تجزیه و صفحه برش برای مسئله بکار رفته است.

۴- رویکرد حل

در این مطالعه برای حل کارای مسئله، به دلیل پیچیدگی آن نیاز است که در ابتدا مسئله اولیه به دو مسئله اصلی و زیر مسئله تجزیه شود. تجزیه کردن مسائل یکی از روش‌های کارآمد در حل دقیق مسائل بهینه‌سازی ترکیبیاتی است. برای تجزیه درست مسئله، ابتدا باید ساختار مشکل کشف شود. در اینجا متغیرهای Y و Z متغیرهای مسئله اصلی هستند و متغیر X متغیرهای زیر مسئله هستند و همه آن‌ها متغیرهای باینری هستند و این نشان از پیچیدگی بالای مسئله دارد.

در این مطالعه، مسئله زمان‌بندی به‌عنوان زیر مسئله و مسئله مسیریابی به‌عنوان مسئله اصلی انتخاب شده است. علت این امر این است که پیچیدگی مسئله زمان‌بندی نسبت به مسئله مسیریابی کمتر است. اما نکته قابل توجه این است که مسئله زمان‌بندی نیز یک مسئله عدد صحیح می‌باشد. در اغلب روش‌های تجزیه مانند روش تجزیه بندرز، برای حل زیر مسئله از روش‌های دوگان استفاده می‌شود. به این معنا که یک زیر مسئله که یک مدل خطی است به مدل دوگان تبدیل شده و طبق قضیه دوگان پاسخ بهینه این مسئله پاسخ بهینه مسئله اولیه نیز می‌باشد. اما وقتی زیر مسئله از جنس عدد صحیح باشد قضایای دوگان در آن صدق نمی‌کند. در ادبیات چندین روش برای مقابله با این مشکل پیشنهاد شده است. به‌عنوان مثال هوکر و همکاران [۳۵] روش بندرز بر مبنای منطق را پیشنهاد نمودند، کوداتو و فیشتی [۳۶] روش برش بندرز ترکیبیاتی را ارائه نمودند و ساوایا و همکاران [۳۷] روش بندرز تودرتو را ارائه دادند.

در این مطالعه پس از تجزیه مسئله اولیه به مدل اصلی و زیر مسئله، ابتدا مسئله اصلی را به روش آزادسازی برنامه‌ریزی خطی حل کرده تا جواب عدد صحیح به دست آید. سپس اطلاعات به‌دست‌آمده از آن را در زیر مسئله قرار می‌دهیم اگر شرط خاتمه

$$\sum_{k=1}^n Y_j^k = 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۶)$$

$$\sum_{i=0}^n Z_{ij}^k = Y_j^k \quad \forall j = 1, \dots, n+1 \quad (۷)$$

$$\forall k = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n Z_{ij}^k = Y_i^k \quad \forall i = 0, 1, \dots, n \quad (۸)$$

$$\forall k = 1, 2, \dots, n$$

$$Z_{ij}^k = 0 \quad \forall i = j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۹)$$

$$Z_{0,n+1}^k = 0 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (۱۰)$$

$$Z_{ij}^k + Z_{ji}^k \leq 1 \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i=0}^n Z_{ih}^k - \sum_{j=1}^{n+1} Z_{hj}^k = 0 \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۱۲)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j Y_j^k \leq Q * \sum_{j=1}^n Z_{0j}^k \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (۱۳)$$

$$C_j \geq P_j - M(1 - X_{0j}) \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۴)$$

$$C_j \geq C_i + P_j - M(1 - X_{ij}) \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۵)$$

$$Cb_k \geq C_j - M(1 - Y_j^k) \quad \forall j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۱۶)$$

$$A_j \geq Cb_k + t_j - M(1 - Z_{0j}^k) \quad \forall j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۱۷)$$

$$A_j \geq A_i + t_{ij} - M(1 - Z_{ij}^k) \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۱۸)$$

$$T_j \geq A_j - d_j \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۹)$$

$$T_j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۲۰)$$

$$\sum_{j \in Agent1} T_j \leq \delta \quad (۲۱)$$

$$X_{ij}, Y_j^k, Z_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad (۲۲)$$

$$C_j, Cb_k, A_j, t_j \geq 0 \quad (۲۳)$$

$$\min Z = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} Z_{ij}^k + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n r_i Z_{i,n+1}^k \quad (۲۴)$$

$$+ \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n r_j Z_{0,j}^k + FC * \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Z_{0,j}^k$$

محدودیت‌های (۱) تا (۵) به تعیین توالی کارها در کارخانه و تعیین کار اول و آخر برای پردازش می‌پردازند. در محدودیت (۶) هر کار به یک وسیله حمل اختصاص می‌یابد. محدودیت‌های (۷) تا (۱۱) به تعیین توالی تحویل کارها به مشتریان می‌پردازند. محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد که از هر گره مشتری در مسئله مسیریابی، هر وسیله یکبار وارد می‌شود و یکبار نیز خارج می‌شود. محدودیت ظرفیت وسیله حمل در محدودیت (۱۳) نمایش داده شده است. نابرابری‌های (۱۴) و (۱۵) برای محاسبه زمان پایان پردازش هر کار استفاده شده است. محدودیت (۱۶) زمان تکمیل کارهای تخصیص داده شده به هر دسته را نشان می‌دهد که برابر زمان تکمیل آخرین کار آن دسته است. محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) به محاسبه زمان تحویل هر سفارش می‌پردازند. محاسبه زمان تأخیر هر سفارش با محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) امکان‌پذیر است. تابع هدف، زمان تأخیر کارهای مشتریان عامل اول، به‌صورت

$$\sum_{j \in Agent1}^n T_j \leq \delta \quad (۴۷)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad (۴۸)$$

$$C_j, Cb_k, A_j, t_j \geq 0 \quad (۴۹)$$

نکته قابل توجه در مدل بالا این است که زیر مسئله تابع هدف ندارد و تابع هدف مسئله اصلی همان تابع هدف مسئله اولیه است. در اصطلاح به این زیر مسئله، مسئله شدنی بودن می‌گویند چون تمامی نقاط درون فضای آن شدنی و بهینه هستند. بنابراین، زیر مسئله فقط وظیفه بررسی کردن شدنی بودن جواب مسئله اصلی را دارد. پس در ابتدا مسئله اصلی حل می‌شود و پاسخ بهینه آن پیدا می‌شود. سپس پاسخ بهینه مسئله اصلی را در زیر مسئله قرار می‌دهیم. اگر زیر مسئله شدنی بود، جواب بهینه مسئله اصلی، جواب بهینه مسئله اولیه نیز خواهد بود. اما اگر پاسخ نشدنی بود باید یک برش به مسئله اصلی افزوده شود. این برش جواب بهینه قبلی را از مسئله اصلی حذف می‌کند و تدریجاً فضای شدنی مسئله عدد صحیح اصلی را به پوشش محدب آن نزدیک می‌کند. سپس مسئله اصلی مجدداً حل می‌شود. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که جواب بهینه مسئله اصلی یک فضای شدنی در زیر مسئله ایجاد کند.

از سوی دیگر چون مسئله اصلی ارائه شده یک مسئله عدد صحیح محض است تمامی جواب‌های بهینه به دست آمده از آن در تمامی تکرارها باید عدد صحیح باشد. برای حل مسئله اصلی، ابتدا باید به روش آزادسازی برنامه‌ریزی خطی، متغیرهای عدد صحیح آن را آزاد کرد. با استفاده از این روش، مسئله اصلی آزاد شده را آن قدر حل می‌کنیم تا به یک جواب شدنی عدد صحیح بهینه برای مسئله اصلی برسیم.

در این مسئله برش مناسب، برشی است که بتواند مقدار بهینه عدد صحیح به دست آمده در یک تکرار از مسئله اصلی را در تکرار بعد حذف کند. در ادبیات برنامه‌ریزی عدد صحیح به این نوع برش اصطلاحاً "No-good cut" گویند که جواب نشدنی \bar{Z}_{ij}^{kv} و \bar{y}_j^{kv} را از مدل اصلی در تکرار v حذف کرده و از دسترسی به آن در تکرار بعد جلوگیری می‌کند. در مسئله مورد بررسی این برش به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_j \sum_k \bar{Z}_{ij}^{kv} (1 - Z_{ij}^{kv}) \\ & + \sum_i \sum_j \sum_k (1 - \bar{Z}_{ij}^{kv}) Z_{ij}^{kv} \\ & + \sum_j \sum_k \bar{y}_j^{kv} (1 - y_j^{kv}) \\ & + \sum_j \sum_k (1 - \bar{y}_j^{kv}) y_j^{kv} \geq 1 \quad \forall v \end{aligned} \quad (۵۰)$$

کلیه مراحل رویکرد ارائه شده در شکل ۱ قابل مشاهده است.

۵- آزمایش‌های محاسباتی

برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی ابتدا باید با توجه به

برقرار شد جواب به دست آمده بهینه است و در غیر این صورت یک برش به مسئله اضافه شده و مجدداً مسئله اصلی حل می‌شود. جزئیات رویکرد پیشنهادی در ادامه آمده است.

مسئله اصلی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} Z_{ij}^k + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n r_i Z_{i,n+1}^k \\ & + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n r_j Z_{0,j}^k + FC * \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n Z_{0,j}^k \end{aligned} \quad (۲۵)$$

$$\sum_{k=1}^n Y_j^k = 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۲۶)$$

$$\sum_{i=0}^n Z_{ij}^k = Y_j^k \quad \forall j = 1, 2, \dots, n+1 \quad (۲۷)$$

$$\sum_{j=1}^n Z_{ij}^k = Y_i^k \quad \forall i, k = 1, 2, \dots, n \quad (۲۸)$$

$$Z_{ij}^k = 1 \quad \forall i = j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۲۹)$$

$$Z_{0,n+1}^k = 0 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (۳۰)$$

$$Z_{ij}^k + Z_{ji}^k \leq 1 \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۳۱)$$

$$\sum_{i=0}^n Z_{ih}^k - \sum_{j=1}^{n+1} Z_{hj}^k = 0 \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۳۲)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j Y_j^k \leq Q * \sum_{j=1}^n Z_{0,j}^k \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (۳۳)$$

$$Y_j^k, Z_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (۳۴)$$

با حل مسئله بالا مقادیر بهینه مسئله اصلی به دست می‌آیند که برابر \bar{Z}_{ij}^k و \bar{y}_j^k هستند. این مقادیر را در زیر مسئله قرار می‌دهیم:

$$\sum_{i=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n+1 \quad (۳۵)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad \forall i = 0, 1, \dots, n \quad (۳۶)$$

$$X_{ij} = 0 \quad \forall i = j, 1, 2, \dots, n \quad (۳۷)$$

$$X_{0,n+1} = 0 \quad (۳۸)$$

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (۳۹)$$

$$C_j \geq P_j - M(1 - X_{0,j}) \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۴۰)$$

$$C_j \geq C_i + P_j - M(1 - X_{ij}) \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (۴۱)$$

$$Cb_k \geq C_j - M(1 - \bar{y}_j^k) \quad \forall j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۴۲)$$

$$A_j \geq Cb_k + t_j - M(1 - \bar{Z}_{0,j}^k) \quad \forall j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۴۳)$$

$$A_j \geq A_j + t_{ij} - M(1 - \bar{Z}_{ij}^k) \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (۴۴)$$

$$T_j \geq A_j - d_j \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۴۵)$$

$$T_j \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (۴۶)$$

به صورت زیر محاسبه می‌شود:

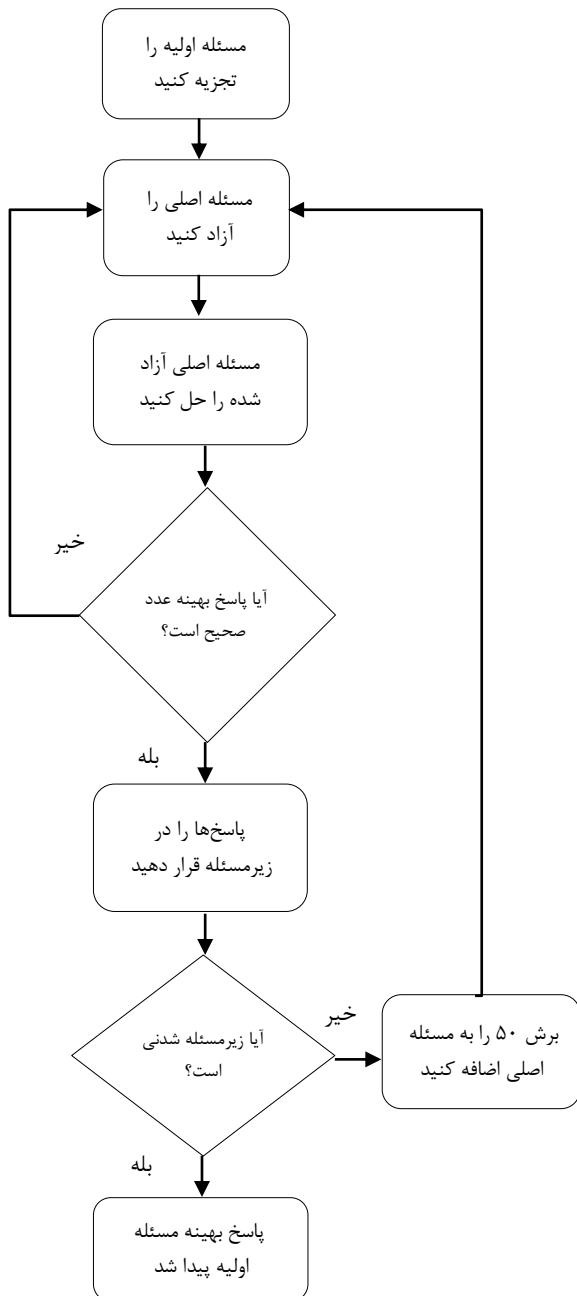
$$GAP(\%) = \frac{Z_{UB} - Z_{LB}}{Z_{LB}}$$

همچنین تفاوت نسبی کران پایین به دست آمده از توابع هدف

دو روش به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$Diff(\%) = \frac{|Z_{LB}^{DCA} - Z_{LB}^{CPLEX}|}{Z_{LB}^{CPLEX}}$$

که در آن Z_{LB}^{CPLEX} و Z_{LB}^{DCA} به ترتیب مقدار به دست آمده از هدف الگوریتم پیشنهادی و حل کننده CPLEX است.



شکل (۱): چارچوب الگوریتم پیشنهادی

همان‌طور که در جدول ۱ مشهود است، از لحاظ زمان اجرا، الگوریتم پیشنهادی DCA سریع‌تر از حل کننده معمولی CPLEX عمل کرده است. از لحاظ میانگین زمان اجرا در بین ۳۵ مسئله نمونه

ساختار مسئله، مسائلی با استفاده از داده‌های تصادفی ایجاد کنیم. برای این کار پارامترهای مسئله بر اساس توزیع‌های زیر تولید شده‌اند. در این مطالعه به دلیل ارتباط سه پارامتر زمان‌های پردازش، زمان‌های حمل و موعده تحویل، ابتدا بر اساس چندین آزمون و خطا در اجرای مدل زمان‌های پردازش طبق توزیع $P_i \sim U[100; 200]$ و زمان‌های حمل و نقل $t_{ij} \sim U[200; 500]$ طراحی شدند. حال به دلیل وجود معیار زمان دیرکرد در مسئله، باید موعده تحویل به گونه‌ای در نظر گرفته شود که مسئله دارای زمان دیرکرد برای برخی از سفارش‌ها باشد. پس رابطه $d_i \sim U[\frac{\bar{P} + \bar{t}}{2}; 2 * (\bar{P} + \bar{t})]$ برای زمان‌های تحویل در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، دو پارامتر اندازه کارها و حداکثر ظرفیت خودرو به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که هر وسیله حداقل قابلیت تخصیص دو کار داشته باشد. پس اندازه کار $q_i \sim U[4; 8]$ و ظرفیت خودرو ۲۰ است. هزینه تحویل ثابت برابر با ۲۰۰ و هزینه انتقال بین مشتریان و سایت برابر $r_{ij}, r_j \in U[50; 250]$ در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به اینکه زمان دیرکرد به تعداد کارها وابسته است، حد بالای مجموع تأخیر بصورت $\delta = 50 \cdot n$ تعریف می‌شود که تابعی از تعداد کارهاست. این روش در نرم‌افزار ۱۲٫۶ CPLEX و پردازنده Intel Core™ پیاده‌سازی شده و در رایان‌های با پردازنده دو هسته‌ای و ۴ گیگابایت حافظه رم اجرا شده است.

در این بخش، عملکرد الگوریتم تجزیه و صفحه برش (DCA) پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم شاخه و برش مورد استفاده در حل کننده CPLEX مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. الگوریتم شاخه و برش ترکیبی از دو روش شاخه و کران و صفحه برش است که به طور گسترده برای حل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح استفاده می‌شود. تفاوت روش شاخه و کران و روش شاخه و برش در این است که در شاخه و کران پس از حل مسئله خطی آزاد شده مسئله عدد صحیح، شاخه زنی شروع می‌شود و هر جا شرایط برقرار بود شاخه زنی انجام می‌شود. اما در شاخه و برش پس از حل مسئله خطی آزاد شده برش‌ها اضافه می‌شوند و زمانی که نتوان برش بیشتری به مسئله آزاد شده هر مرحله اضافه کرد، آن موقع شاخه زنی می‌کنیم.

نتایج مقایسه دو روش در جدول ۱ و ۲ گزارش شده است. برای کارا بودن نتایج، یک حد بالای ۳۰۰ دقیقه برای حل تمام مسائل در نظر گرفته شده است و اگر مسئله‌ای در این زمان به شرایط خاتمه نرسد، فرایند حل توسط کاربر قطع می‌شود. در جدول ۱، روش پیشنهادی با پاسخ‌های حل کننده CPLEX در ابعاد مختلف مسئله مقایسه شده است. تعداد متغیرهای دودویی، تعداد محدودیت‌ها، زمان اجرا (زمان CPU)، مقدار تابع هدف، تعداد برش‌های استفاده شده و تفاوت بین تابع هدف دو روش در این جدول آورده شده است. شرایط خاتمه الگوریتم رسیدن به شکاف ۳ درصد است که با استفاده از کران بالا و پایین مقدار تابع هدف

برسند و توسط کاربر ادامه اجرا متوقف شده است. اما در مورد روش پیشنهادی، چهار مسئله نمونه آخر قادر به برآورده کردن شرایط خاتمه نبوده‌اند.

ایجاد شده الگوریتم پیشنهادی تقریباً ۹ درصد سریع‌تر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شش مسئله نمونه آخر در روش شاخه و برش، نتوانستند در زمان ۳۰۰ دقیقه به شکاف ۳ درصد

جدول (۱): نتایج مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم شاخه و برش

تعداد کارها	تعداد متغیرها	تعداد محدودیت‌ها	CPLEX		Proposed DCA		Diff (%)
			زمان اجرا	حد پایین	زمان اجرا	حد پایین	
۴	۴۱	۸۰	۰/۴۳	۱۹۹۴/۹۹	۰/۴۰	۱۹۹۴/۹۹	۰/۰۰
۶	۸۵	۱۶۶	۰/۹۲	۲۶۲۱/۷۴	۰/۷۷	۲۶۵۵/۲۸	۱/۲۸
۸	۱۴۵	۲۸۴	۱/۳۱	۳۸۳۶/۳۰	۱/۱۹	۳۷۰۳/۰۸	۱/۷۸
۱۰	۲۲۱	۴۳۴	۱/۵۵	۴۷۴۶/۴۲	۱/۳۲	۴۸۴۹/۲۱	۲/۱۷
۱۲	۳۱۳	۶۱۶	۲/۱۷	۵۳۰۵/۰۲	۱/۹۳	۵۴۵۹/۸۲	۲/۹۲
۱۴	۴۲۱	۸۳۰	۳/۴۵	۶۲۱۴/۴۰	۳/۱۷	۶۳۶۹/۰۹	۲/۴۹
۱۶	۵۴۵	۱۰۷۶	۴/۶۷	۶۹۴۴/۲۷	۴/۲۹	۷۰۴۵/۷۰	۱/۴۶
۱۸	۶۸۵	۱۳۵۴	۶/۱۲	۸۱۱۳/۵۶	۵/۲۰	۸۳۱۲/۱۰	۲/۴۵
۲۰	۸۴۱	۱۶۶۴	۷/۵۵	۹۱۳۹/۰۴	۶/۴۹	۹۳۲۷/۹۸	۲/۰۷
۲۴	۱۲۰۱	۲۳۸۰	۹/۸۸	۱۰۷۵۹/۸۰	۸/۶۰	۱۱۱۳۶/۰۵	۳/۵۰
۲۸	۱۶۲۵	۳۲۲۴	۱۵/۳۰	۱۳۶۳۶/۵۸	۱۳/۹۲	۱۴۲۲۸/۰۲	۴/۳۴
۳۲	۲۱۱۳	۴۱۹۶	۲۴/۰۱	۱۴۶۵۹/۷۰	۲۱/۱۳	۱۵۰۱۱/۹۴	۲/۴۰
۳۶	۲۶۶۵	۵۲۹۶	۳۱/۸۴	۱۶۷۲۸/۲۸	۲۸/۰۲	۱۷۰۹۲/۶۳	۲/۱۸
۴۰	۳۲۸۱	۶۵۲۴	۳۹/۹۱	۱۷۵۵۱/۴۶	۳۵/۱۲	۱۷۸۲۰/۶۴	۱/۵۳
۴۵	۴۱۴۱	۸۲۳۹	۴۸/۹۶	۱۹۹۷۷/۱۳	۴۳/۰۸	۲۰۲۱۴/۸۸	۱/۱۹
۵۰	۵۱۰۱	۱۰۱۵۴	۵۹/۴۹	۲۲۱۰۶/۴۸	۴۹/۳۷	۲۲۷۴۶/۶۷	۲/۹۰
۵۵	۶۱۶۱	۱۲۲۶۹	۶۵/۹۹	۲۳۸۸۸/۱۰	۵۶/۰۸	۲۴۵۸۹/۹۹	۲/۹۴
۶۰	۷۳۲۱	۱۴۵۸۴	۷۵/۶۱	۲۸۴۰۷/۹۱	۶۲/۷۵	۲۸۷۹۴/۸۹	۱/۳۶
۶۵	۸۵۸۱	۱۷۰۹۹	۸۷/۹۰	۲۹۵۶۱/۲۰	۷۷/۳۶	۲۹۹۶۳/۴۷	۱/۳۶
۷۰	۹۹۴۱	۱۹۸۱۴	۱۰۲/۳۳	۳۱۶۸۷/۲۹	۸۵/۹۶	۳۱۹۵۸/۴۳	۰/۸۶
۸۰	۱۲۹۶۱	۲۵۸۴۴	۱۱۵/۳۵	۳۲۰۴۳/۴۶	۹۸/۰۴	۳۲۴۰۲/۰۰	۱/۱۲
۹۰	۱۶۳۸۱	۳۲۶۷۴	۱۳۷/۰۴	۳۲۷۹۵/۵۶	۱۱۷/۹۴	۳۳۳۰۵/۴۷	۱/۵۵
۱۰۰	۲۰۲۰۱	۴۰۳۰۴	۱۴۷/۹۵	۳۹۵۰۰/۸۵	۱۲۷/۲۴	۴۰۰۹۶/۱۳	۱/۵۱
۱۱۰	۲۴۴۲۱	۴۸۷۳۴	۱۶۲/۲۸	۴۱۷۲۱/۲۶	۱۳۴/۶۸	۴۲۴۷۵/۲۲	۱/۸۱
۱۲۰	۲۹۰۴۱	۵۷۹۶۴	۱۷۵/۸۸	۴۸۴۹۸/۰۱	۱۵۶/۵۴	۴۹۳۲۳/۳۰	۱/۷۰
۱۳۵	۳۶۷۲۱	۷۳۳۰۹	۱۹۷/۹۱	۵۵۵۴۱/۷۷	۱۸۲/۰۸	۵۶۳۴۶/۷۷	۱/۴۵
۱۵۰	۴۵۳۰۱	۹۰۴۵۴	۲۱۲/۸۴	۵۷۷۵۵/۲۲	۱۸۳/۰۴	۵۸۶۴۱/۰۸	۱/۵۳
۱۶۵	۵۴۷۸۱	۱۰۹۳۹۹	۲۴۳/۰۱	۵۷۸۱۶/۹۴	۲۱۳/۸۴	۵۸۹۷۲/۹۲	۲/۰۰
۱۸۰	۶۵۱۶۱	۱۳۰۱۴۴	۲۶۸/۷۸	۶۴۴۵۱/۲۵	۲۲۸/۴۶	۶۵۵۷۰/۶۶	۱/۷۴
۲۰۰	۸۰۴۰۱	۱۶۰۶۰۴	۳۰۰/۰۰	۱۴۲۵۴۴/۷۵	۲۷۹/۹۲	۱۴۵۳۷۱/۹۹	۱/۹۸
۲۲۰	۹۷۲۴۱	۱۹۴۲۶۴	۳۰۰/۰۰	۱۹۵۷۹۰/۷۸	۲۸۱/۷۳	۱۹۹۴۱۲/۶۴	۱/۸۵
۲۴۰	۱۱۵۶۸۱	۲۳۱۱۲۴	۳۰۰/۰۰	۲۴۱۶۱۹/۵۷	۳۰۰/۰۰	۲۴۵۵۹۶/۱۹	۱/۶۵
۲۶۰	۱۳۵۷۲۱	۲۷۱۱۸۴	۳۰۰/۰۰	۲۸۴۵۲۳/۹۶	۳۰۰/۰۰	۲۸۱۷۵۳/۳۲	۱/۴۹
۲۸۰	۱۵۷۳۶۱	۳۱۴۴۴۴	۳۰۰/۰۰	۳۶۰۹۰۷/۱۳	۳۰۰/۰۰	۳۶۶۰۷۶/۵۸	۱/۴۳
۳۰۰	۱۸۰۶۰۱	۳۶۰۹۰۴	۳۰۰/۰۰	۴۲۴۷۲۷/۴۹	۳۰۰/۰۰	۴۲۹۹۸۰/۵۴	۱/۲۴
میانگین			۱۱۵/۵۵		۱۰۵/۹۹		

پیشنهادی DCA به غیر از چند مسئله اولیه، بر روی بسیاری از مسائل نسبت به روش شاخه و برش برتر است که این امر در مسائل با اندازه بزرگتر واضح است.

جدول (۲): نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی

تعداد کارها	Proposed DCA		CPLEX
	تعداد تکرار	GAP	GAP
۴	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۶	۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۸	۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۵۰
۱۰	۴	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۶۲
۱۲	۵	۰/۰۲۵۴	۰/۰۲۷۵
۱۴	۵	۰/۰۱۰۳	۰/۰۲۸۶
۱۶	۵	۰/۰۱۲۶	۰/۰۲۹۵
۱۸	۷	۰/۰۲۳۰	۰/۰۱۹۲
۲۰	۷	۰/۰۲۵۱	۰/۰۲۲۹
۲۴	۸	۰/۰۲۲۱	۰/۰۲۷۶
۲۸	۹	۰/۰۳۳۷	۰/۰۲۶۳
۳۲	۱۱	۰/۰۲۳۰	۰/۰۳۵۹
۳۶	۱۱	۰/۰۳۲۸	۰/۰۳۶۴
۴۰	۱۲	۰/۰۲۱۷	۰/۰۲۵۶
۴۵	۱۲	۰/۰۲۲۴	۰/۰۳۹۲
۵۰	۱۲	۰/۰۲۰۷	۰/۰۳۴۹
۵۵	۱۴	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۶۵
۶۰	۱۶	۰/۰۳۲۸	۰/۰۳۴۵
۶۵	۱۶	۰/۰۳۱۸	۰/۰۴۲۶
۷۰	۲۰	۰/۰۳۳۶	۰/۰۳۹۸
۸۰	۲۳	۰/۰۲۲۷	۰/۰۳۴۸
۹۰	۲۶	۰/۰۲۱۹	۰/۰۴۵۸
۱۰۰	۲۶	۰/۰۳۲۴	۰/۰۳۹۱
۱۱۰	۲۸	۰/۰۲۲۶	۰/۰۳۸۸
۱۲۰	۲۹	۰/۰۲۳۲	۰/۰۴۵۲
۱۳۵	۳۱	۰/۰۳۲۱	۰/۰۳۹۴
۱۵۰	۳۳	۰/۰۳۷۹	۰/۰۴۸۳
۱۶۵	۳۵	۰/۰۳۱۳	۰/۰۳۹۷
۱۸۰	۳۶	۰/۰۲۰۹	۰/۰۴۶۹
۲۰۰	۳۹	۰/۰۳۸۱	۰/۰۴۷۳
۲۲۰	۴۱	۰/۰۳۲۴	۰/۰۵۶۲
۲۴۰	۴۴	۰/۰۳۲۵	۰/۰۴۶۳
۲۶۰	۴۶	۰/۰۳۹۵	۰/۰۴۶۸
۲۸۰	۴۹	۰/۰۳۳۲	۰/۰۴۵۴
۳۰۰	۵۲	۰/۰۳۷۳	۰/۰۴۹۶
میانگین	۲۰/۶۷۶	۰/۰۲۴۹	۰/۰۳۴۵

در این مطالعه، به دلیل تضاد اهداف دو عامل، مطلوب است یک تحلیل حساسیت روی دو پارامتر ظرفیت حمل وسیله (Q) که مرتبط با هدف عامل دوم و حد بالای تأخیرها (δ) که مرتبط با

همچنین در جدول ۱ مقادیر حد پایین به دست آمده از دو روش گزارش شده است که به غیر از مسئله اول در سایر مسائل، حد پایین به دست آمده از روش پیشنهادی قوی تر است. درصد تفاوت در به دست آوردن مقدار تابع در هدف دو روش در آخرین ستون جدول گزارش شده است. همان طور که از جدول مشخص است، در مسائل اولیه این اختلاف کمتر است اما هر چه سائز مسئله افزایش می یابد قدرت الگوریتم پیشنهادی در دستیابی به کران های پایین قوی تر افزایش می یابد. اما با هر چه بزرگتر شدن مسئله (از ۱۵۰ کار به بعد)، باز این تفاوت کمتر می شود، که این امر نشان دهنده ضعف روش های دقیق در دستیابی به جواب های مناسب است و استفاده از الگوریتم های ابتکاری و فرا ابتکاری برای این مسائل کاربرد بیشتری دارد.

توجه داشته باشید که این معیار بر اساس درصد تفاوت نسبی محاسبه می شود و ارزش عددی این تفاوت با تفریق مقادیر تابع هدف از دو روش به دست می آید. نتایج نشان می دهد که روش پیشنهادی توانسته حدود پایین مناسب تری را برای مسئله ایجاد کند.

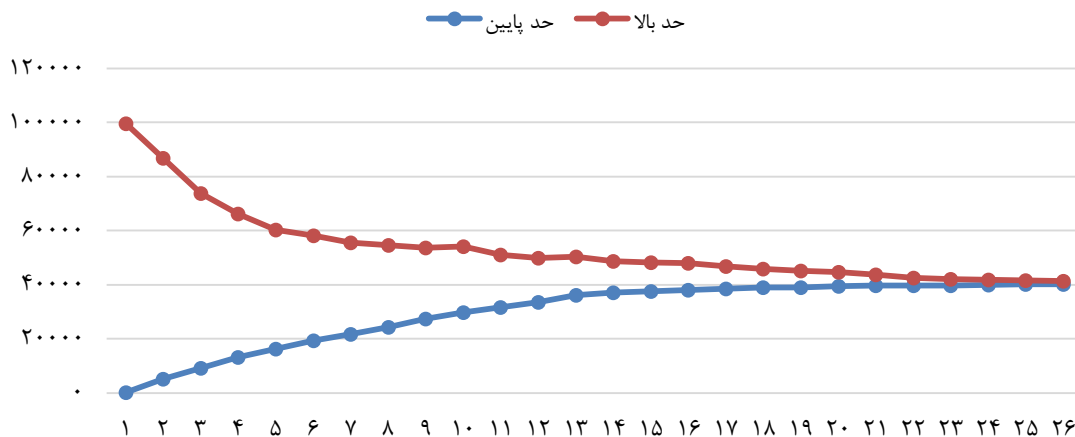
در جدول ۲، تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به شرایط خاتمه یا تعداد برش استفاده شده در روش پیشنهادی گزارش شده است. توجه کنید که در این تحلیل شرط رسیدن به شکاف در نظر گرفته نشده است و الگوریتم تا رسیدن به جواب بهینه ادامه می یابد و در غیر این صورت در زمان ۱۰۰ دقیقه متوقف می شود. به طور متوسط برای حل این مسائل به ۲۰ تکرار نیاز است و بیشترین تکرار در مسئله نمونه آخر و برابر ۵۲ تکرار است. همچنین، مقایسه بین شکاف های ارائه شده در حل کننده CPLEX و روش پیشنهادی برای تمام مسائل نمونه در این جدول گزارش شده است. در این حالت برای ارزیابی عملکرد الگوریتم، یا به جواب بهینه رسیده است که شکاف صفر است و یا الگوریتم به زمان ۱۰۰ دقیقه رسیده است و متوقف شده و شکاف آن ثبت شده است. همان طور که در این جدول نشان داده شده است، برخی از مسائل اولیه به راه حل های بهینه می رسند و شکاف برابر صفر دارند، به این معنی که حد بالا و پایین به یک مقدار رسیده اند. درصد شکاف زمانی که اندازه مسئله افزایش می یابد بزرگ می شود. مقدار میانگین شکاف کران بالا و پایین مسئله برای دو روش CPLEX و روش DCA به ترتیب برابر ۳/۴۵ درصد و ۲/۴۹ درصد است. این امر نشان دهنده توانایی الگوریتم پیشنهادی در دستیابی به کران های قوی تر است.

در شکل ۲، همگرایی حد پایین و حد بالا برای مسئله نمونه با اندازه کار ۱۰۰ گزارش شده است که نیاز به ۲۶ تکرار دارد. همان طور که دیده می شود، شکاف بین حد بالا و پایین در ۲۶ تکرار پس از ۱۰۰ دقیقه به ۳/۲۴ درصد رسیده است.

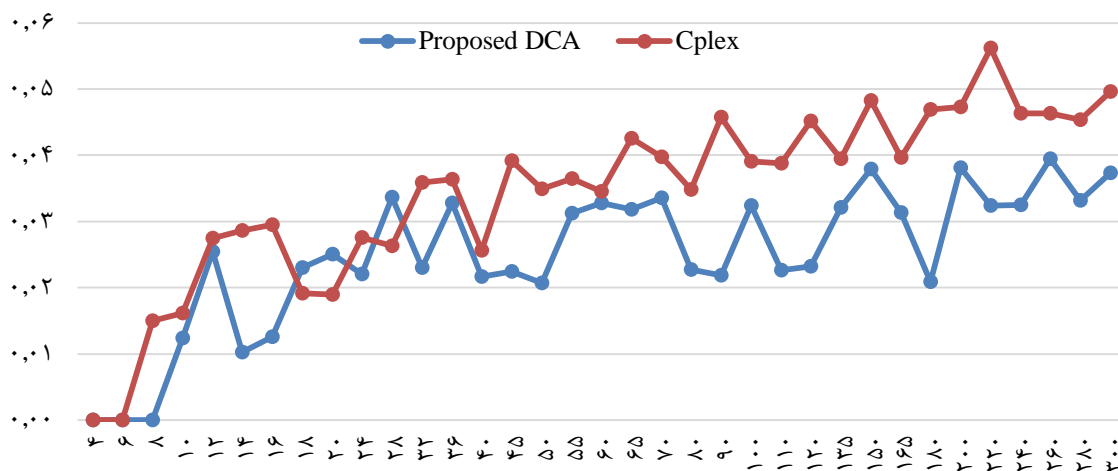
همچنین، در شکل ۳، شکاف دو روش مقایسه شده است. همان طور که در شکل مشخص است، هنگامی که اندازه مسئله بالا می رود، مقدار شکاف برای هر دو روش افزایش می یابد. اما روش

بالعکس. اما در مورد حد بالای تأخیرها، با افزایش این پارامتر، تأثیر زیادی بر مقدار تابع هدف نداشته است. علت این امر در نظر گرفتن این پارامتر به صورت حد بالاست که با افزایش آن تأثیری در مسئله به وجود نیامده است. اما هنگامی که این پارامتر مقدار ۳۰۰ را می‌گیرد، مقدار هدف به شدت افزایش می‌یابد. علت این امر این است که با اجبار مسئله به کاهش زمان تأخیر، وسایل حمل باید به تعداد بیشتری فرستاده شوند که منجر به افزایش هزینه‌های توزیع خواهد شد.

هدف عامل اول است، صورت گیرد. بدین منظور مطابق جدول ۳، چهار سطح برای ظرفیت حمل به صورت ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ در نظر گرفته شده است. همچنین چهار سطح ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ در تعداد کار، برای حد بالای تأخیرها در نظر گرفته می‌شود. دو اندازه مسئله اولیه، دو مسئله میانی و دو مسئله با اندازه بالاتر از جدول ۱ برای این مقایسه انتخاب شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است، با تغییر مقدار پارامتر ظرفیت حمل وسیله، مقدار هدف به صورت خطی تغییر می‌کند. این امر بدیهی است که با افزایش ظرفیت وسایل حمل هزینه‌های توزیع کاهش می‌یابد و



شکل (۲): همگرایی حد بالا و پایین در مسئله‌ای با تعداد کار $n=100$



شکل (۳): نمودار مقایسه شکاف دو روش

جدول (۳): جدول تحلیل حساسیت پارامترهای مسئله

تعداد کارها	Q				δ			
	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰
۶	۳۰۰۰/۴۷	۲۶۵۵/۲۸	۲۶۵۵/۲۸	۲۲۰۳/۸۸	۴۵۵۰/۵۸	۳۰۰۰/۴۷	۲۶۵۵/۲۸	۲۵۶۱/۰۲
۸	۴۴۴۳/۶۹	۳۷۰۳/۰۷	۳۷۰۳/۰۸	۳۲۵۸/۷۰	۶۵۴۳/۴۱	۴۴۴۳/۶۹	۳۷۰۳/۰۷	۳۶۹۸/۸۵
۵۵	۲۸۰۳۲/۵۹	۲۴۵۸۹/۹۹	۲۴۵۸۹/۹۹	۱۷۲۱۲/۹۹	۴۶۲۴۵/۶۲	۲۸۰۳۲/۵۹	۲۴۵۸۹/۹۹	۲۴۴۴۱/۱۲
۶۰	۳۱۰۹۸/۴۷	۲۸۷۹۴/۸۸	۲۸۷۹۴/۸۹	۲۴۴۷۵/۶۵	۴۹۱۵۹/۸۳	۳۱۰۹۸/۴۷	۲۸۷۹۴/۸۸	۲۸۶۵۰/۴۱
۲۰۰	۱۶۷۱۷۷/۷۸	۱۴۵۳۷۱/۹۸	۱۴۵۳۷۱/۹۹	۱۱۰۴۸۲/۷۰	۲۴۲۳۷۷/۱۱	۱۶۷۱۷۷/۷۸	۱۴۵۳۷۱/۹۸	۱۴۵۳۰۱/۳۰
۲۲۰	۲۱۹۳۵۳/۹۰	۱۹۹۴۱۲/۶۴	۱۹۹۴۱۲/۶۴	۱۶۱۵۲۴/۲۴	۳۲۷۰۹۵/۴۷	۲۱۹۳۵۳/۹۰	۱۹۹۴۱۲/۶۴	۱۹۸۲۳۶/۳۲

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مسئله زمان‌بندی تولید و توزیع یکپارچه توصیف شده است. مزایای این یکپارچگی قبلاً در ادبیات نشان داده شده است. مشتریان از مکان‌های مختلف جغرافیایی، سفارش‌ها را به یک زنجیره تأمین عرضه می‌فرستند. مدیریت زنجیره تأمین باید این سفارش‌ها را برنامه‌ریزی کند. پس از پردازش، سفارش‌ها به وسیله وسایل نقلیه به مکان‌های مشتریان ارسال می‌شود. سفارش‌ها مشتریان مختلف می‌تواند در یک وسیله نقلیه باشد پس تصمیمات مسیریابی در میان مشتریان موردنیاز است. برای این مسئله یک فرمول‌بندی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله و عدم توانایی حل‌کننده MIP معمولی از قبیل CPLEX در حل این مسئله، یک روش تجزیه به همراه رویکرد صفحه برش برای حل این مسئله ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به روش شاخه و برش عملکرد مناسب‌تری دارد.

برای تحقیقات آتی، می‌توان مسئله را در حالت چند کارخانه‌های به‌صورت سری و موازی یا شبکه‌ای مورد بررسی قرار داد. همچنین می‌توان معیارهای دیگر زمان‌بندی مانند زمان شناوری یا حداکثر زمان تکمیل را موردنظر قرار داد. همچنین، فرضیه‌های مختلف را می‌توان به مسئله اضافه کرد. به‌عنوان مثال، زمان‌های آماده‌سازی سفارش‌ها یا زمان راه‌اندازی ماشین‌آلات در قسمت زمان‌بندی و یا تعداد وسیله نقلیه محدود و وسیله نقلیه چند سفره در بخش مسیریابی. سایر روش‌های حل دقیق و یا روش فرابالبتکاری می‌تواند مسیر خوبی برای پژوهش‌های آینده باشد.

مراجع

- [8] Baker, K.R., Cole Smith, J., (2003). "A Multiple-Criterion Model for Machine Scheduling", *Journal of Scheduling*, 6(1): 7-16.
- [9] Agnetis, A., Mirchandani, P.B., Pacciarelli, D., Pacifici, A., (2004). "Scheduling Problems with Two Competing Agents", *Operations Research*, 52(2): 229-242.
- [10] Agnetis, A., Aloulou, M.A., Fu, L.L., (2014). "Coordination of production and interstage batch delivery with outsourced distribution", *European Journal of Operational Research*, 238(1): 130-142.
- [11] Pundoor, G., Chen, Z.L., (2005). "Scheduling a production-distribution system to optimize the tradeoff between delivery tardiness and distribution cost", *Naval Research Logistics*, (NRL) 52(6): 571-589.
- [12] Hall, N.G., Potts, C.N., (2003). "Supply chain scheduling: batching and delivery", *Operations Research*, 51(4): 584-566.
- [13] Wang, H., Lee, C.Y., (2005). "Production and transport logistics scheduling with two transport mode choices", *Naval Research Logistics* (NRL) 52(8): 796-809.
- [14] Li, C.L., Vairaktarakis, G., (2007). "Coordinating production and distribution of jobs with bundling operations", *IIE transactions* 39(2): 203-215.
- [15] Herrmann, J.W., Lee, C.Y., (1993). "On scheduling to minimize earliness-tardiness and batch delivery costs with a common due date", *European Journal of Operational Research*, 70(3): 272-288.
- [16] Lee, C.Y., Chen, Z.L., (2001). "Machine scheduling with transportation considerations", *Journal of scheduling*, 4(1): 3-24.
- [17] Geismar, H.N., Laporte, G., Lei, L., Sriskandarajah, C., (2008). "The integrated production and transportation scheduling problem for a product with a short lifespan", *INFORMS Journal on Computing*, 20(1): 21-33.
- [18] Li, C.L., Vairaktarakis, G., Lee, C.Y., (2005). "Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations", *European Journal of Operational Research*, 164(1): 39-51.
- [19] Sarmiento, A.M., Nagi, R., (1999). "A review of integrated analysis of production--distribution systems", *IIE transactions*, 31(11): 1061-1074.
- [20] Mula, J., Pedro, D., Díaz-Madroño, M., Vicens, E., (2010). "Mathematical programming models for supply chain production and transport planning", *European Journal of Operational Research*, 204(3): 377-390.
- [21] Fahimnia, B., Farahani, R.Z., Marian, R., Luong, L., (2013). "A review and critique on integrated production-distribution planning models and techniques", *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1): 1-19.
- [22] Cheng, T.C.E., Gordon, V.S., Kovalyov, M.Y., (1996). "Single machine scheduling with batch deliveries", *European Journal of Operational Research*, 94(2): 277-283.
- [23] Wang, G., Cheng, T.C.E., (2000). "Parallel machine scheduling with batch delivery costs", *International Journal of Production Economics*, 65(1-3): 15-24.
- [1] Chandra, P., Fisher, M.L., (1994). "Coordination of production and distribution planning", *European Journal of Operational Research*, 72(3): 503-517.
- [2] Chen, Z.L., Vairaktarakis, G.L., (2005). "Integrated scheduling of production and distribution operations", *Management Science*, 51(4): 614-628.
- [3] Lei, L., Liu, S., Ruszczynski, A., Park, S., (2006). "On the integrated production, inventory, and distribution routing problem", *IIE Transactions*, 38(11): 955-970.
- [4] Chen, Z.L., (2010). "Integrated production and outbound distribution scheduling: review and extensions", *Operations research*, 58(1): 130-148.
- [5] Bard, J.F., Nananukul, N., (2009). "The integrated production inventory distribution routing problem", *Journal of Scheduling*, 12(3): 257-280.
- [6] Cheng, T.C.E., Kahlbacher, H.G., (1993). "Scheduling with Delivery and Earliness Penalties", *Asia Pacific Journal of Operational Research*, 10(2): 145-152.
- [7] Li, K., Zhou, C., Leung, J.Y.T., Ma, Y., (2016). "Integrated production and delivery with single machine and multiple vehicles", *Expert Systems with Applications*, 57: 12-20.

- [32] Yin, Y., Wang, Y., Cheng, T.C.E., Wang, D.J., Wu, C.C., (2016). "Two-agent single-machine scheduling to minimize the batch delivery cost", *Computers and Industrial Engineering*, 92: 16-30
- [33] Lin. H., Wu, C.C., (2017). "Particle swarm optimization and opposite-based particle swarm optimization for two-agent multi-facility customer order scheduling with ready times", *Applied Soft Computing*, 52: 877-884.
- [34] Yin, Y., Wu, W.H., Cheng, T., Wu, C.C., Wu, W.H., (2015). "A honey-bees optimization algorithm for a two-agent single-machine scheduling problem with ready times", *Applied Mathematical Modelling*, 39(9): 2587-2601.
- [35] Hooker, J.N., Ottosson, G., (2003). "Logic-based benders decomposition", *Mathematical Programming*, 96(1): 33-60.
- [36] Codato, G., Fischetti, M., (2006). "Combinatorial Benders' cuts for mixed-integer linear programming", *Operations Research*, 54(4): 756-766.
- [37] Naoum-Sawaya, J., Elhedhli, S., (2010). "A nested benders decomposition approach for telecommunication network planning", *Naval Research Logistics (NRL)*, 57(6): 519-539.
- [۳۸] بهنامیان، جواد، فاطمی قمی، سیدمحمدتقی، (۱۳۹۲). "ارائه الگوریتم ترکیبی بر پایه بهینه‌سازی گروه ذرات و روش هایپرهیوریستیک برای زمانبندی کارخانه‌های توزیع شده با اتحاد مجازی"، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱(۱): ۱-۱۱.
- [۳۹] خدابنده، مهدی، حجازی، سید رضا، راستی-برزکی، مرتضی، (۱۳۹۲). "یک الگوریتم ژنتیک برای مساله زمانبندی یکپارچه تولید و توزیع با در نظر گرفتن مسیریابی در زنجیره تأمین"، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید: ۱(۲): ۱۶۷-۱۸۱.
- 68(2): 177-183.
- [24] Selvarajah, E., Steiner, G., Zhang, R., (2013). "Single machine batch scheduling with release times and delivery costs", *Journal of Scheduling*, 16(1): 69-79.
- [25] Yin, Y., Cheng, T., Wu, C.C., Cheng, S.R., (2013). "Single-machine common due-date scheduling with batch delivery costs and resource-dependent processing times", *International Journal of Production Research*, 51(17): 5083-5099.
- [26] Rostami, M., Kheirandish, O., Ansari, N., (2015). "Minimizing maximum tardiness and delivery costs with batch delivery and job release times", *Applied Mathematical Modelling*, 39(16): 4909-4927.
- [27] Joo, C.M., Kim, B.S., (2017). "Rule-based meta-heuristics for integrated scheduling of unrelated parallel machines, batches, and heterogeneous delivery trucks", *Applied Soft Computing*, 53: 457-476.
- [28] Perez-Gonzalez, P., Framinan, J.M., (2014). "A common framework and taxonomy for multicriteria scheduling problems with interfering and competing jobs: Multi-agent scheduling problems", *European Journal of Operational Research*, 235(1): 1-16
- [29] Itayef, A.B., Loukil, T., Teghem, J., (2009). "Rescheduling a permutation flowshop problems under the arrival a new set of jobs", 2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering, IEEE, 188-192.
- [30] Agnetis, A., De Pascale, G., Pacciarelli, D., (2009). "A lagrangian approach to single-machine scheduling problems with two competing agents", *Journal of Scheduling*, 12(4): 401-415.
- [31] Qi, T., Hua-Ping, C., Bing, D., Xiao-lin, L., (2011). "Two-agent scheduling on a single batch processing machine with non-identical job sizes. In 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence", *Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, IEEE: 7431-7435.



A Decomposition and Cutting Plane Approach to the Integrated Scheduling and Distribution Problem in the Supply Chain

A. Gharaei^{1,*}, F. Jolai²

¹ Department of Industrial Engineering, Alborz campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

² Department of Industrial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 February 2018

Accepted 11 September 2018

Keywords:

Multi-Agent scheduling

Routing

Batch delivery

Cutting plane

Decomposition

ABSTRACT

Integration of supply chain decisions has become one of the most attractive and practical topics for researchers. The scheduling of the production and distribution of customer orders are two most important activities of these decisions, which both of them affect the supply chain performance in timely delivery of orders and reduce costs. This study addresses the problem of integrating these two decisions. The problem has been investigated from a multi-agent point of view. A mixed integer programming model is proposed to the problem. Regarding the problem structure, first, the problem is decomposed into two problems, and then a cutting plane approach is used to solve it. The computational results indicate the proper performance of the proposed algorithm.

* Corresponding author. Fariborz jolai

Tel.: 021-88021067; E-mail address: fjolai@ut.ac.ir