مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۱-۳۵، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۵۵-۷۲

Original Article

مسیریابی دوره‌یی گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها در میدان‌های نفتی مشترک فراساحلی

روح‌اله ایقانی یزدلی (دانشجوی دکتری)
عبدالحمید اشراق‌نیای جهرمی * **(استاد)**
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

خدمات فنی چاه‌ها از نیازهای چاه‌های تولیدی در میدان‌های نفتی مشترک فراساحلی است و عدم ارائه‌ی آنها، باعث افت شدید بهره‌وری تولید می‌شود. اما ارائه‌ی برخی از خدمات مذکور مستلزم توقف تولید است و کوچک‌ترین وقفه در تولید معادل تحمیل هزینه‌ی فرصت از دست رفته به‌دلیل برداشت هم‌زمان کشورهای رقیب می‌شود. موازنه‌ی بین دو مقوله‌ی خدمت‌رسانی همراه با توقف و کمینه‌سازی توقف تولید، لزوم بهینه‌سازی را آشکار می‌سازد. ضمن معرفی مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط، [۱] الگوریتم‌هایی مبتنی‌بر روش‌های بندرز، L-shaped و آزادسازی لاگرانژ برای توسعه‌ی حدود پایین ارائه و پس از اعمال روی داده‌های شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج عددی نشان می‌دهند که الگوریتم‌های مبتنی‌بر روش L-shaped و آزادسازی لاگرانژ حدود پایین بهتری تولید می‌کنند. با بزرگ شدن ابعاد مسئله الگوریتم لاگرانژ نسبت به L-shaped از توانایی بالاتری در تولید حدود پایین در یک محدوده‌ی زمانی کوتاه برخوردارند.

واژگان کلیدی: چاه‌های تولیدی در میدان‌های نفتی مشترک، خدمات فنی چاه‌ها، مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط، حد پایین.

ighani_roohollah@ie.sharif.edu
eshragh@sharif.edu

۱. مقدمه

صنعت نفت در فراساحل دارای مؤلفه‌های پیچیده‌ی فنی فراوانی است. اما در کنار این مؤلفه‌ها، هزینه‌های مربوط به فعالیت‌های توسعه‌یی و نگه‌داشت بسیار بالاست و به همین دلیل مقوله‌ی بهینه‌سازی در کلیه‌ی زمینه‌های فعالیتی در فراساحل از اهمیت دوچندان برخوردار است.

یکی از ملزومات مهم در حفظ تولید پایدار نفت در فراساحل، ارائه‌ی خدمات فنی چاه‌ها در میدان‌های نفتی بر اساس طرح‌های از پیش تعیین شده‌یی است که به صورت دوره‌یی توسط واحدهای فنی بالادستی مربوط برای هر چاه نفتی در حال تولید مشخص و به گروه‌های اجرایی خدمات فنی چاه‌ها ابلاغ می‌شود.

ماهیت برخی از خدمات فنی چاه‌ها به‌گونه‌یی است که اجرای آنها مستلزم ایجاد توقف در روند تولید چاه از میدان است. اهمیت این موضوع زمانی بیشتر می‌شود که این چاه‌ها در حوزه‌های مشترک با کشورهای رقیب همسایه قرار گرفته باشند. زیرا کوچک‌ترین وقفه در امر تولید در این میدان‌ها، فرصتی برای سبقت کشور رقیب در برداشت بیشینه را فراهم می‌کند.

هدف از این مقاله، معرفی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط پایه‌یی اولیه برای موازنه‌ی هزینه‌ها بین دو مقوله است. مقوله‌ی اول مسیریابی بهینه‌ی گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها با رویکرد کمینه‌سازی هزینه‌های نگه‌داشت تولید چاه‌های نفتی و مقوله‌ی دوم، کمینه‌سازی هزینه‌های توقف تولید در چاه‌هاست که در زمان ارائه‌ی برخی خدمات فنی، امری اجتناب‌ناپذیر است.

نظر به این‌که هدف در این مقاله مسیریابی دو نوع خدمت‌رسان سرچاهی و درون‌چاهی به‌عنوان وسایل حمل‌ونقل (مستقر در یک ایستگاه مرکزی) به‌منظور ارائه‌ی خدمات مربوط به چاه‌ها به‌عنوان نقاط دریایی در افق برنامه‌ریزی چنددوره‌یی است، مسئله‌ی مدنظر ارتباط نزدیکی به مسئله‌ی مسیریابی دوره‌یی وسایل حمل‌ونقل [۲] پیدا می‌کند. این مسئله، یک مسئله‌ی عمومیت داده شده از مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی حمل‌ونقل [۳] است. هدف از مسئله‌ی مسیریابی دوره‌یی وسایل حمل‌ونقل، تعیین مسیرهایی با نقاط شروع و پایان در یک ایستگاه مرکزی برای یک ناوگان وسایل حمل‌ونقل در خلال دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی است.

سیر تکامل پیشینه‌ی موضوع در ارتباط با مدل‌های ریاضی و روش‌های حل معرفی شده برای مسئله‌ی مسیریابی دوره‌یی وسایل حمل‌ونقل نشان می‌دهد که هدف بسیاری از آنها تاکنون (که البته هدف این مقاله نیز هست)، مدل‌سازی مسائل موجود در دنیای واقعی است.[۱] نمونه‌یی از این مسائل در حوزه‌ی خدمات شهری و روستایی، مسائلی نظیر جمع‌آوری مواد بازیافتی و زباله‌های درون شهری،[۲-۶] جمع‌آوری شیر از بین مزارع و کشاورزان،[۷و۸] توزیع خون بین بیمارستان‌ها،[۹] توزیع نامه‌ها و بسته‌های پستی،[۱۰] پشتیبانی و نگه داشت ماشین‌های خودکار ارائه دهنده‌ی نوشیدنی، سیگار و ... پراکنده در سطح شهر،[۱۱] تخصیص و مسیریابی مربیان کمک‌آموزشی برای کودکان ناتوان در سطح شهر،[۱۲] مدل‌سازی برنامه‌ی‌زمان‌بندی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۷/۳/۵، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۳۰.
DOI:10.24200/J65.2018.7328.1809

قطارهای شهری با توجه به ظرفیت قطارها و چهارچوب‌های زمانی،[۱۳] مسیریابی کاروندهای ماهر (تکنسین‌ها) برای نگهداری و تعمیرات پله‌های برقی و آسانسور در سطح شهر،[۱۴] توزیع فراورده‌های نفتی بین ایستگاه‌های پخش،[۱۵] حمل و توزیع پول در سطح شهر،[۱۶] تأمین اضطراری اقلام حیاتی پس از وقوع بحران[۱۷] هستند.

در حوزه‌ی صنعت نفت فراساحلی که مدنظر این مقاله نیز هست، موضوعات محدودی مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گرفته‌اند؛ نظیر مسیریابی شناورهای حمل‌کننده‌ی کالاها و اجناس با شرایط تحویل و دریافت به سکوهای عملیاتی نفتی مستقر در دریا،[۱۸-۲۲] مسیریابی بال‌گرد برای ارائه‌ی خدمات حمل‌ونقل مسافر بین سکوهای نفتی و پایانه‌های مسافری خشکی،[۲۳-۲۶] برنامه‌ریزی تأمین سوخت گازوئیل برای دکل‌های حفاری و سکوهای نفتی از طریق رفت و آمد قایق‌های سوخت‌رسان بین سکوهای نفتی و دکل‌های حفاری و مخازن سوخت شناور مستقر در دریا،[۲۷] مسیریابی و زمان‌بندی عملیات نگهداری و تعمیرات توربین‌های مستقر در سکوهای دریایی توسط شناورهای فنی دارای گروه کاروندان ماهر،[۲۸] مسئله‌ی مسیریابی خدمت‌دهنده‌های سرچاهی سیار و شناورهای پشتیبان به‌منظور ارائه‌ی خدمات فنی و پشتیبان به سکوهای سرچاهی مستقر در خلیج فارس.[۲۹] در جدول‌های ۱ و ۲ پیشینه‌ی موضوع اشاره شده با توجه به عامل‌های مختلف تقسیم‌بندی و مقایسه شده است. عامل‌های فراوانی در ابعادی مانند هزینه‌ها، وسایل حمل‌ونقل، محصولات و خدمات، مسیرهای تردد، ظرفیت وسایل حمل‌ونقل، ایستگاه مرکزی، تقاضای مشتریان، زمان سفر و پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان به‌منظور تقسیم‌بندی مسائل مسیریابی دوره‌یی وسایل حمل‌ونقل وجود دارند؛ اما به‌منظور اشتراک عامل‌ها در تمام مسائل و همچنین شفاف‌سازی تفاوت‌های این مقاله (که در یکی از حوزه‌های تخصصی نفت مطرح شده است) با پژوهش‌های پیشین مرتبط با موضوع مسائل مسیریابی دوره‌یی وسایل حمل‌ونقل خصوصاً مسائل کار شده در حوزه‌ی نفت فراساحلی، عامل‌های مقایسه‌یی به دو دسته‌ی کلی «عمومی» و «تخصصی در حوزه‌ی نفت فراساحل» تقسیم شده‌اند.

مدل برنامه‌ریزی‌یی که در این مقاله معرفی می‌شود، برپایه جنبه‌های عملیاتی موجود در مطالعه موردی از واحد خدمات فنی چاه‌ها در شرکت نفت فلات قاره ایران است و مدل‌ها و الگوریتم‌هایی که در مقالات پیشینه‌ی موضوع مطرح شده‌اند، قابل تطبیق با جنبه‌های عملیاتی مسئله‌ی مدنظر در این مطالعه موردی نیستند. شرکت نفت فلات قاره‌ی ایران یکی از شرکت‌های تابعه‌ی شرکت ملی نفت ایران و از بزرگ‌ترین شرکت‌های تولیدکننده‌ی نفت دریایی جهان است که وظیفه‌ی استخراج و بهره‌برداری از میدان‌های نفتی کشور در طول بیش از ۱۲۰۰ کیلومتر از گستره‌ی آب‌های نیلگون خلیج فارس (به استثنای پارس شمالی و جنوبی) و همچنین دریای عمان را برعهده دارد. حوزه‌ی اصلی فعالیت این شرکت منطقه‌ی خلیج فارس است که علاوه‌بر ایران، ۷ کشور تولیدکننده‌ی عمده‌ی نفت جهان (عراق، کویت، عربستان، بحرین، قطر، امارات، عمان) در حاشیه‌ی آن قرار دارند.

به بیان بهتر، در ادامه‌ی سیر تکامل جنبه‌های کاربردی در حوزه‌ی صنعت نفت فراساحلی، جنبه‌ی عملیاتی مدنظر این مقاله بدین‌گونه است که چاه‌های نفتی مستقر در میدان‌های مشترک از یک طرف به‌دلیل رقابتی بودن میدان نفتی و تکالیف تولید در حوزه‌های مشترک نفتی نباید در تولید مستمر نفت وقفه‌یی داشته باشند و از طرف دیگر نیازمند خدمات درون چاهی هستند که اولاً به‌صورت ترکیبی توسط گروه‌های خدمت‌رسان سرچاهی و درون‌چاهی ارائه می‌شود و ثانیاً دریافت این خدمات برابر است با توقف تولید. بنابراین مسئله عبارت است از موازنه بین کاهش هزینه‌های توقف تولید و کاهش هزینه‌های کمبود خدمات. از زاویه‌ی عامل‌های عمومی، در این مسئله، دو نوع خدمت سرچاهی و درون چاهی موردنیاز مشتری است که توسط دو نوع خدمت‌رسان مختلف ارائه می‌شود و شیوه‌ی ارائه‌ی خدمت درون‌چاهی به مشتری به‌صورت ترکیبی و با یک زمان‌بندی عملیاتی مشخص است. با نگاهی مختصر به جدول ۱ مشاهده می‌شود که بیشتر مقالات تنوع خدمات موردنیاز مشتری را یک نوع در نظر گرفته‌اند و هیچ‌یک از آنها شیوه‌ی خدمت‌رسانی ترکیبی با یک زمان‌بندی عملیاتی را مورد توجه قرار نداده‌اند. در بعد ساختار تابع هدف، این مقاله، علاوه‌بر کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر و کمبود خدمات، به کاهش هزینه‌های توقف تولید نیز پرداخته است که در جدول ۱ پرداختن به این موضوع در پیشینه‌ی موضوع به چشم نمی‌خورد. در بعد روش حل، مقالات پیشینه‌ی موضوع، عمدتاً به توسعه‌ی حد بالا[۴] از طریق طراحی الگوریتم‌های هیورستیک و متاهیورستیک پرداخته‌اند؛ اما در این مقاله توسعه‌ی حد پایین[۵] با استفاده از الگوریتم‌های لاگرانژ، بندرز و L-shaped مدنظر قرار گرفته است. همچنین از دیدگاه عامل‌های تخصصی، در این مسئله، چاه‌های نفت مشتریان ثابت متقاضی دریافت خدمات بالادستی (یعنی خدمات سرچاهی و درون‌چاهی) از طریق شناورهای غیرتدارکاتی و مجهز به گروه‌های تخصصی واحد خدمات فنی چاه‌ها در نظر گرفته می‌شوند؛ درحالی‌که مطابق جدول ۲، مقالات مسیریابی دوره‌یی وسایل حمل‌ونقل که به‌طور تخصصی در حوزه‌ی صنعت نفت فراساحلی کار کرده‌اند، به ارائه‌ی خدمات پایین‌دستی در حوزه‌ی اعزام نیروی انسانی و تدارک قطعات یدکی و خدمات نگهداری و تعمیرات برای تجهیزات سطح‌الارضی مستقر در محل مشتریانی نظیر سکوهای بهره‌برداری نفت و دکل‌های حفاری پرداخته‌اند. نکته‌ی حائزاهمیت در این‌جا این است که برخلاف مسئله‌ی مدنظر این مقاله، هیچ کدام از مقالات مذکور، الزام توقف تولید نفت در فرایند خدمت‌رسانی در شرایط حساس میدان‌های مشترک نفتی را مورد توجه قرار نداده‌اند. به‌همین دلیل، طبق اطلاع نویسندگان، مسئله‌ی مدنظر این مقاله تاکنون مطالعه و بررسی نشده و در نتیجه هیچ مدل ریاضی برای آن تاکنون ارائه نشده است. بنابراین، در این مقاله ضمن معرفی یک مدل ریاضی برای این مسئله، به معرفی حدود پایین متنوعی که مبتنی‌بر روش‌های بندرز، L-shaped و آزادسازی لاگرانژ هستند، پرداخته می‌شود.

نوآوری‌های این مقاله بدین شرح است: ۱. ارائه و تبیین یک مسئله‌ی جدید مسیریابی دوره‌یی و زمان‌بندی در زیرمجموعه‌ی مسائل مسیریابی دوره‌یی وسایل حمل‌ونقل برگرفته از فعالیت‌های گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها در صنعت نفت فراساحلی که به‌طور هم‌زمان دارای جنبه‌های عملیاتی جدیدی نظیر شیوه‌ی خدمت‌رسانی به چاه‌های نفتی به‌صورت ترکیبی، وجود زمان‌بندی عملیاتی در شیوه‌ی خدمت‌رسانی ترکیبی، الزام توقف تولید نفت در فرایند ارائه‌ی خدمات درون‌چاهی و در نظرگیری هزینه‌ی فرصت از دست رفته در میدان‌های مشترک به دلیل توقف تولید مذکور و طرح مفهوم بهینه‌سازی در تمام این شرایط با رویکرد موازنه بین هزینه‌های توقف تولید و هزینه‌های کمبود خدمات است. ۲. ارائه‌ی یک مدل جدید برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله‌ی مذکور. ۳. توسعه‌ی حدود پایین برای مدل ریاضی بیان شده از طریق شخصی‌سازی[۶] روش‌های بندرز، L-shaped و آزادسازی لاگرانژ با توجه به خصوصیات و پیچیدگی‌های موجود مدل. ۴. بررسی و تحلیل مقایسه‌یی حدود پایین به دست آمده با استفاده از روش‌های بیان شده با توجه به ابعاد مختلف مدل ریاضی.

۲. تشریح مسئله

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مدل‌سازی موضوع ارائه‌ی خدمات فنی چاه‌ها در حوزه‌ی میدان‌های مشترک که توسط گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها انجام می‌شوند،

جدول ۱. جدول مقایسه‌یی پیشینه‌ی موضوع با توجه به عامل‌های عمومی.

شماره مرجع	تعداد ایستگاه مرکزی	تنوع خدمات موردنیاز مشتری	شیوه‌ی خدمت رسانی به مشتری	وجود زمان‌بندی عملیاتی در شیوه‌ی خدمت‌رسانی ترکیبی	الزام مشتری در دریافت خدمت در پنجره‌ی زمانی مشخص	تنوع وسایل حمل و نقل برای ارائه‌ی چند نوع خدمت	تعداد وسایل حمل و نقل	ساختار تابع هدف مسئله	روش حل
[۲]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر	دقیق
[۳]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۴]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر و بیشینه‌سازی درآمد	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم الگوریتم ابتکاری
[۵]	چند ایستگاه	چند نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۶]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	نامحدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی به‌کارگیری وسایل حمل و نقل	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۷]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر	دقیق
[۸]	چند ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	√	×	نامحدود	کمینه‌سازی میزان عدم تعادل عرضه وتقاضا	دقیق
[۹]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر و تاخیر در دیرکرد	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۱۰]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	√	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر و به‌کارگیری وسایل حمل‌ونقل	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فراابتکاری
[۱۱]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	√	×	نامحدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی نگه‌داری موجودی	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۱۲]	چند ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فراابتکاری

ادامه‌ی جدول ۱.

شماره مرجع	تعداد ایستگاه مرکزی	تنوع خدمات موردنیاز مشتری	شیوه‌ی خدمت رسانی به مشتری	وجود زمان‌بندی عملیاتی در شیوه‌ی خدمت‌رسانی ترکیبی	الزام مشتری در دریافت خدمت در پنجره‌ی زمانی مشخص	تنوع وسایل حمل و نقل برای ارائه‌ی چند نوع خدمت	تعداد وسایل حمل و نقل	ساختار تابع هدف مسئله	روش حل
[۱۳]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی زمان انتظار مشتری برای دریافت خدمت	توسعه‌ی حد پایین با الگوریتم آزادسازی لاگرانژ
[۱۴]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	√	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر، بی‌کاری، انتظار و عدم تعادل کاری وسایل‌حمل و نقل	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۱۵]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر و نگهداری موجودی و بیشینه‌سازی درآمد	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۱۶]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه سازی هزینه‌ی سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فرابتکاری
[۱۷]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	√	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه سفر و عدم تعادل مسیرها	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فرابتکاری
[۱۸]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فرابتکاری
[۱۹]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	√	×	نامحدود	بهینه‌سازی اجاره‌ی شناورهای تدارکی	توسعه‌ی مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد
[۲۰]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر کمبود خدمت	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۲۱]	چند ایستگاه	چند نوع	انفرادی	×	×	√	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر، نگهداری وتعمیرات و کمبود خدمت	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۲۲]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر و به‌کارگیری شناور	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری

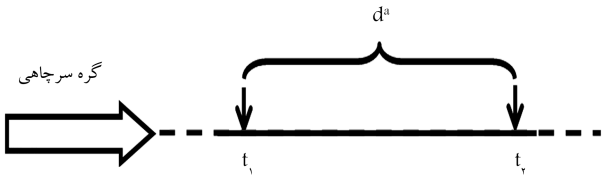
ادامه‌ی جدول ۱.

شماره مرجع	تعداد ایستگاه مرکزی	تنوع خدمات موردنیاز مشتری	شیوه‌ی خدمت رسانی به مشتری	وجود زمان‌بندی عملیاتی در شیوه‌ی خدمت‌رسانی ترکیبی	الزام مشتری در دریافت خدمت در پنجره‌ی زمانی مشخص	تنوع وسایل حمل و نقل برای ارائه‌ی چند نوع خدمت	تعداد وسایل حمل و نقل	ساختار تابع هدف مسئله	روش حل
[۲۳]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر و حوادث مورد انتظار	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۲۴]	چند ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	√	نامحدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر و اجاره‌ی هلیکوپتر	√
[۲۵]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	√	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فرابتکاری
[۲۶]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمینه‌سازی زمان سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فرابتکاری
[۲۷]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	√	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر	×
[۲۸]	چند ایستگاه	چند نوع	انفرادی	×	×	√	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر، نگهداری و تعمیرات و کمبود خدمت	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۲۹]	یک ایستگاه	چند نوع	انفرادی	×	×	√	محدود	کمینه‌سازی هزینه‌ی سفر و کمبود خدمت	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم هیورستیک

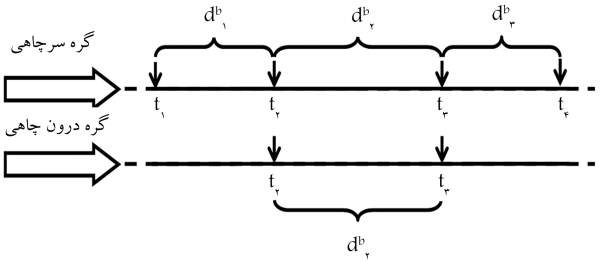
مد نظر است. در این مقاله منظور از گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها، دو مجموعه خدمت‌رسان‌های سرچاهی (A) و درون‌چاهی (B) هستند که با عنوان فعالیت‌های خدمات فنی چاه‌ها روی مجموعه‌یی از چاه‌های نفتی تولیدی (W) مستقر در یک حوزه‌ی نفتی مشترک با کشور رقیب، خدمات مورد نیاز را ارائه می‌دهند. تعداد این خدمت‌رسان‌ها در ابتدای مسئله مشخص است، اما این تعداد در مقایسه با میزان نیازمندی به خدمت مجموعه‌ی چاه‌ها، بسیار کمتر است؛ بنابراین، همواره مقداری کمبود در هر دوره‌ی برنامه‌ریزی برای دو نوع خدمت تعریف شده اتفاق می‌افتد که برای هر واحد کمبود خدمت سرچاهی و درون‌چاهی، هزینه‌یی در نظر گرفته می‌شود که با R_i^H نمایش داده می‌شود؛ به‌طوری که $(H \in \{a,b\}, i \in W)$.

جدول ۲. جدول مقایسه‌یی پیشینه‌ی موضوع در حوزه‌ی صنعت نفت فراساحلی با توجه به عامل‌های تخصصی در این حوزه.

شماره مرجع	مشتری		ارتباط حوزه خدمات		در نظرگیری مؤلفه‌ی	وسیله خدمت رسانی		الزام توقف تولید نفت در فرایند خدمت‌رسانی
	ثابت	متحرک	بالادستی (چاه‌های نفت)	پایین‌دستی (اقلام و تجهیزات سطح‌الارضی)	مشترک بودن میدان نفتی در بررسی	شناور	بال‌گرد	
[۱۸]	سکوهای بهره‌برداری نفت	×	×	تدارک کالا	×	شناورهای تدارکاتی	×	×
[۱۹]	سکوهای بهره‌برداری نفت	دکل‌های حفاری	×	تدارک کالا	×	شناورهای تدارکاتی	×	×
[۲۰]	سکوهای بهره‌برداری نفت	×	×	تدارک کالا و اقلام یدکی	×	شناورهای تدارکاتی	×	×
[۲۱]	توربین‌های بادی فراساحلی	×	×	تدارک کالا و اعزام پرسنل نگهداری و تعمیرات	×	شناورهای تدارکاتی	بال‌گردهای مسافربری	×
[۲۲]	سکوهای بهره‌برداری نفت	×	×	تدارک کالا	×	شناورهای تدارکاتی	×	×
[۲۳]	سکوهای بهره‌برداری نفت	×	×	اعزام کارکنان عملیاتی	×	×	بال‌گردهای مسافربری	×
[۲۴]	سکوهای بهره‌برداری نفت	دکل‌های حفاری	×	اعزام کارکنان عملیاتی	×	×	بال‌گردهای مسافربری	×
[۲۵]	سکوهای بهره‌برداری نفت	×	×	اعزام کارکنان عملیاتی	×	×	بال‌گردهای مسافربری	×
[۲۶]	سکوهای بهره‌برداری نفت	×	×	اعزام کارکنان عملیاتی	×	×	بال‌گردهای مسافربری	×
[۲۷]	سکوهای بهره‌برداری نفت	×	×	تدارک سوخت دیزل	×	شناورهای سوخت‌رسان	×	×
[۲۸]	توربین‌های بادی فراساحلی	×	×	تدارک کالا و اعزام کارکنان نگهداری و تعمیرات	×	شناورهای تدارکاتی	×	×
[۲۹]	سکوهای سرچاهی نفت	شناورهای سرچاهی سیار	خدمات نگهداشت تجهیزات سرچاهی	خدمات عمومی نظیر کالا، سوخت و اعزام کارکنان	×	شناورهای تدارکاتی و شناورهای سرچاهی سیار	×	×



شکل ۱. نحوه‌ی ارائه‌ی خدمت سرچاهی در محل یک چاه.



شکل ۲. نحوه‌ی ارائه‌ی خدمت درون‌چاهی در محل یک چاه.

۱.۲. خدمات سرچاهی

این نوع خدمت که عمدتاً به بخش سطح‌الارضی چاه مربوط می‌شود، عبارت است از مجموعه‌یی از خدمات استاندارد نظیر سرکشی به تاج سرچاهی، ثبت فشار و حرارت سرچاهی، گریس‌کاری و روانکاری شیرهای سرچاهی، نمونه‌گیری از نفت سرچاه، آزمایش عملکرد چاه، تزریق مواد آب‌بندی و گریس نسوز و آزمایش عملکرد شیرهای ایمنی سرچاهی که توسط گروه خدمت‌رسان سرچاهی و بدون نیاز به گروه دیگر در محل چاه انجام می‌پذیرد. این گروه متشکل از کارکنان متخصص سرچاهی هستند که با به‌کارگیری شناورهای مجهز به ادوات و ابزارآلات خدمت سرچاهی به چاه‌های نیازمند خدمات مذکور ارائه می‌دهند.

به‌منظور توضیح بیشتر شکل ۱ را در نظر بگیرید. به‌منظور ارائه‌ی خدمات سرچاهی، گروه خدمت‌رسان سرچاهی به‌صورت مستقل از گروه دیگر در زمان t_1 در محل چاه حاضر می‌شود و پس از گذراندن عملیات به مدت d^a، عملیات را در زمان $t_2 = t_1 + d^a$ به اتمام می‌رساند و چاه را ترک می‌کند.

۲.۲. خدمات درون چاهی

این نوع خدمت که عمدتاً به بخش تحت‌الارضی چاه مربوط می‌شود، عبارت است از مجموعه‌یی از خدمات استاندارد نظیر بازیافت و نصب شیر ایمنی، مسدودکننده‌ها، و شیرهای تزریق درون‌چاهی، باز و بسته کردن شیرهای ارتباطی جداره و لوله مغزی چاه، بررسی عملکرد شیرهای ایمنی درون‌چاهی و نصب تنظیم‌کننده‌ی جریان نفت که توسط گروه‌های خدمت‌رسان سرچاهی و درون‌چاهی به‌صورت ترکیبی و در شرایط توقف تولید چاه انجام می‌گیرد. به‌منظور ارائه‌ی خدمات درون‌چاهی با توقف تولید چاه، لازم است ابتدا گروه خدمت‌رسان سرچاهی در محل چاه حاضر شود و مجموعه‌یی از اقدامات اولیه را برای توقف تولید، ایمن‌سازی و آماده‌سازی چاه انجام دهد. سپس بلافاصله گروه‌های خدمت‌رسان سرچاهی و درون‌چاهی به صورت گروهی ارائه‌ی خدمت می‌کنند و در مرحله‌ی سوم، گروه خدمت‌رسان سرچاهی اقدامات لازم برای آماده‌سازی به‌منظور به تولید رساندن چاه را صورت می‌دهد.

شکل ۲ نحوه‌ی ارائه‌ی خدمت درون‌چاهی در محل یک چاه را نشان می‌دهد. خدمت‌رسان سرچاهی در زمان t_1 در محل چاه حاضر شده است و سپس به مدت d^b_1 عملیات آماده‌سازی و توقف تولید چاه را صورت می‌دهد. سپس در زمان $t_2 = t_1 + d^b_1$ گروه‌های خدمت‌رسان سرچاهی و درون‌چاهی به‌صورت ترکیبی و تیمی به‌مدت d^b_2 عملیات خدمت‌رسانی را انجام می‌دهند و در نهایت عملیات درون‌چاهی در زمان $t_3 = t_1 + d^b_1 + d^b_2$ خاتمه می‌یابد. در زمان t_3 خدمت‌رسان درون‌چاهی چاه را ترک می‌کند، اما خدمت‌رسان سرچاهی باید به مدت d^b_3 عملیات آماده‌سازی چاه و به تولیدرساندن تدریجی آن را تا زمان $t_4 = t_1 + d^b_1 + d^b_2 + d^b_3$ صورت دهد و پس از آن چاه را ترک کند.

در این مسئله به‌دلیل وجود یک برنامه‌ی بالادستی تولیدی برای هریک از چاه‌های نفتی در میدان‌های مشترک، به‌ازای هر مورد ارائه‌ی خدمت درون‌چاهی که منجر به توقف تولید چاه در شرایط ویژه‌ی حوزه‌ی مشترک می‌شود، هزینه‌یی با نماد O_i به‌طوری که $(i \in W)$ در نظر گرفته می‌شود. در واقع، در این مسئله باید یک موازنه‌ی بهینه بین برنامه‌ی نگه‌داشت چاه‌ها و برنامه‌ی تولید بالادستی انجام شود. به دلیل این‌که هرچه بیشتر به برنامه‌های نگه‌داشت چاه‌ها رسیدگی شود، امکان وقفه در عملیات تولید چاه‌های میدان‌های مشترک اتفاق می‌افتد که مطلوب برنامه‌ی تولید بالادستی نیست و از طرف دیگر، هرچه تحقق هرچه بیشتر برنامه‌های تولید بالادستی مطالبه شود، کمینه‌سازی توقف تولید چاه‌ها و در نتیجه مواجهه با هزینه‌های کمبود دور از انتظار نخواهد بود.

P در این مسئله مجموعه‌ی دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی چنددوره‌یی با سقف زمانی D برای هر دوره است، به‌طوری‌که در این افق، هریک از چاه‌های مذکور نیازمند دریافت خدمات سرچاهی و درون‌چاهی با مقدار فرکانس F^H_i و مجموعه‌ی ترکیبات مجاز دریافت خدمت Q^H_i به‌طوری‌که $(H \in \{a,b\}, i \in W)$ هستند که در ابتدای هر دوره توسط واحدهای فنی بالادستی مشخص می‌شوند.

برای مثال یک مسئله دارای یک افق برنامه‌ریزی ۵دوره‌یی در نظر گرفته می‌شود؛ به‌گونه‌یی که برای چاه شماره‌ی ۱ مقادیر بسامد خدمت برابر با $F^a_1 = ۳$ و $F^b_1 = ۲$ و همچنین مجموعه‌ی ترکیبات مجاز دریافت خدمات برابر با $Q^a_1 = \{(1;2;4),(2;3;5)\}$ و $Q^b_1 = \{(1;3),(1;4),(2;5),(2;4)\}$ باشند. در این مثال چاه شماره‌ی ۱ به‌منظور دریافت خدمت سرچاهی به میزان سه مرتبه در یک افق برنامه‌ریزی ۵دوره‌یی دارای دو انتخاب در مجموعه Q^a_1 است. اگر عضو اول مجموعه یعنی $(1;2;4)$ انتخاب شود، چاه شماره‌ی ۱ باید در دوره‌های ۱، ۲ و ۴ خدمت سرچاهی را از گروه خدمت‌رسان سرچاهی دریافت کند، اما اگر عضو دوم مجموعه‌ی مذکور انتخاب شود، لازم است چاه شماره‌ی ۱ در دوره‌های ۲، ۳ و ۵ خدمت مورد نیاز را دریافت کند. به همین ترتیب چاه شماره‌ی ۱ به‌منظور دریافت خدمت درون‌چاهی به میزان دو مرتبه در یک افق برنامه‌ریزی ۵دوره‌یی دارای چهار انتخاب در مجموعه Q^b_1 است. اگر عضو اول مجموعه یعنی $(1;3)$ انتخاب شود، باید چاه شماره‌ی ۱ در دوره‌های ۱ و ۳ خدمت درون‌چاهی را به‌صورت ترکیبی از خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی دریافت کند، اما اگر عضو سوم مجموعه یعنی $(2;5)$ انتخاب شود، آنگاه چاه شماره‌ی ۱ در دوره‌های ۲ و ۵ خدمت مورد نیاز را دریافت می‌کند.

مسئله دارای یک ایستگاه مرکزی به عنوان نقطه‌ی شروع و پایان تورهای خدمت‌رسان‌ها است که در این مقاله با نماد o نشان داده می‌شود. اگر در ابتدای یک دوره، هریک از آنها اعم از سرچاهی و درون‌چاهی ایستگاه مرکزی را ترک کنند، باید در پایان همان دوره به ایستگاه مرکزی بازگردند. در این مسئله یک چاه می‌تواند در یک دوره‌ی برنامه‌ریزی هر دو نوع خدمت را دریافت کند. فرض دیگر این‌که یک خدمت‌رسان سرچاهی مشخص پس از این‌که به چاه مشخصی خدمت سرچاهی

یا درون‌چاهی ارائه کرد، پس از آن چاه مذکور را ترک و به مقصد چاه دیگر یا ایستگاه مرکزی سفر خواهد کرد. در واقع امکان ارائه‌ی پشت سرهم خدمات سرچاهی و درون‌چاهی یا برعکس برای یک خدمت‌رسان سرچاهی مشخص به چاه مذکور وجود ندارد. به‌همین دلیل در تمام تعاریف متغیرها و محدودیت‌ها که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود، قید $i \neq j$ وجود دارد. همچنین مدت زمان سفر خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی بین ایستگاه مرکزی و چاه‌ها به‌ترتیب با t_{ij} و t'_{ij} و هزینه‌ی سفر آنها به‌ترتیب با c_{ij} و c'_{ij} به‌طوری‌که $(i,j \in W \cup \{o\}, i \neq j)$ نشان داده می‌شود.

۳. مدل ریاضی

مدل‌سازی مسئله در قالب یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط انجام شده است. پیش از این‌که به بررسی تابع هدف و محدودیت‌های مدل پرداخته شود، ابتدا متغیرهای تصمیم‌گیری مدل که شامل دو دسته متغیرهای دودویی و پیوسته هستند، معرفی می‌شوند. ضمناً به‌منظور خودداری از ارائه‌ی نوشتار اضافی، در تعریف ارکان مدل، به‌جای الفاظ خدمت سرچاهی و خدمت درون‌چاهی به ترتیب از خدمت a و خدمت b استفاده می‌شود. متغیرهای دودویی به‌همراه توضیحات به شرح زیرند:

x^{sH}_{jkl}: اگر خدمت‌رسان سرچاهی k در دوره‌ی l، از ایستگاه مرکزی برای ارائه‌ی خدمت H به چاه j برود، برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر. $(H \in \{a,b\}, j \in W, k \in A, l \in P)$؛

$x^{H_1 H_2}_{ijkl}$: اگر خدمت‌رسان سرچاهی k در دوره‌ی l، در چاه i خدمت H_1 را ارائه و برای ارائه‌ی خدمت H_2 به چاه j برود، برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر. $(H_1, H_2 \in \{a,b\}, i,j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P)$؛

x^{He}_{jkl}: اگر خدمت‌رسان سرچاهی k در دوره‌ی l، پس از ارائه‌ی خدمت H به چاه j به ایستگاه مرکزی برگردد، برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر. $(H \in \{a,b\}, j \in W, k \in A, l \in P)$؛

y^{sb}_{jml}: اگر خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l ، از ایستگاه مرکزی برای ارائه‌ی خدمت b به چاه j برود، برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر. $(j \in W, m \in B, l \in P)$؛

y^{bb}_{ijml}: اگر خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l، در چاه i خدمت b را ارائه و برای ارائه‌ی خدمت b به چاه j برود، برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر. $(i,j \in W, i \neq j, m \in B, l \in P)$؛

y^{be}_{jml}: اگر خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l، پس از ارائه‌ی خدمت b به چاه j به ایستگاه مرکزی برگردد، برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر. $(j \in W, m \in B, l \in P)$؛

Z^H_{ir}: اگر ترکیب خدمت r برای چاه i برای ارائه‌ی خدمت H انتخاب شود، برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر. $(H \in \{a,b\}, i \in W, 1 \leq r \leq |Q^H_i|)$.

هم‌چنین متغیرهای پیوسته در این مدل عبارت‌اند از:

S^e_{kl}: زمان رسیدن خدمت‌رسان سرچاهی k در دوره‌ی l به ایستگاه مرکزی. $(k \in A, l \in P)$؛

S^H_{jkl}: زمان آغاز ارائه‌ی خدمت H در محل چاه j توسط خدمت‌رسان سرچاهی k در دوره l. $(H \in \{a,b\}, j \in W, k \in A, l \in P)$؛

S^{el}_{ml}: زمان رسیدن خدمت‌رسان درون چاهی m در دوره‌ی l به ایستگاه مرکزی. $(m \in B, l \in P)$؛

S^{el}_{jml}: زمان آغاز ارائه‌ی خدمت b در محل چاه j توسط خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l. $(j \in W, m \in B, l \in P)$.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در این مسئله انجام موازنه بین هزینه‌های نگه‌داشت و کاهش تولید مد نظر است. بخش هزینه‌های نگه‌داشت به معنی مجموع هزینه‌های سفر گروه‌های خدمت‌رسان سرچاهی و درون‌چاهی و هزینه‌های کمبود خدمات در تمام دوره‌های افق برنامه‌ریزی است که شامل سه بخش هزینه‌های سفر بین ایستگاه مرکزی و چاه‌ها مطابق عبارت ۱، هزینه‌های سفر بین چاه‌ها مطابق عبارت ۲ و هزینه‌های کمبود خدمات مطابق عبارت ۳ و بخش هزینه‌های کاهش تولید مطابق عبارت ۴ است:

$$Obj_1 = \sum_H \sum_j \sum_l \left(\sum_k (c_{oj} x^{sH}_{jkl} + c_{jo} x^{He}_{jkl}) + \sum_m (c_{oj}{}' y^{sb}_{jml} + c_{jo}{}' y^{be}_{jml}) \right) \quad (1)$$

$$Obj_2 = \sum_{H_1} \sum_{H_2} \sum_i \sum_{j \neq i} \sum_l \left(\sum_k c_{ij} x^{H_1 H_2}_{ijkl} + \sum_m c_{ij}{}' y^{bb}_{ijml} \right) \quad (2)$$

$$Obj_3 = \sum_i \sum_{H_1} R^{H_1}_i \left(F^{H_1}_i - \left(\sum_k \sum_l (x^{H_1 e}_{ikl} + \sum_{j \neq i} \sum_{H_2} x^{H_1 H_2}_{ijkl}) \right) \right) \quad (3)$$

$$Obj_4 = \sum_i \sum_{H_1} \sum_k \sum_l O_i (x^{H_1 e}_{ikl} + \sum_{j \neq i} \sum_{H_2} x^{H_1 H_2}_{ijkl}) \quad (4)$$

بنابراین تابع هدف مدل برابر با کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های مذکور مطابق عبارت ۵ به‌صورت زیر است:

$$Minimize \;\; Obj = Obj_1 + Obj_2 + Obj_3 + Obj_4 \quad (5)$$

حال به بررسی محدودیت‌های مدل ریاضی پرداخته می‌شود. عبارت ۶ بیان‌گر دسته محدودیت‌های الزام‌آوری است به‌گونه‌یی که اگر یک خدمت‌رسان سرچاهی برای ارائه‌ی خدمت b به محل چاه i در دوره‌ی l رفت، یکی از خدمت‌رسان‌های درون‌چاهی نیز باید در محل چاه مذکور حضور داشته باشد. زیرا همان‌طور که پیش‌تر گفته شد خدمت b یک خدمت ترکیبی است.

$$\sum_k (x^{be}_{ikl} + \sum_{j \neq i} \sum_H x^{bH}_{ijkl}) = \sum_k (y^{be}_{iml} + \sum_{j \neq i} y^{bb}_{ijml}) \quad \forall i \in W, l \in P \quad (6)$$

دسته محدودیت‌های عبارت ۷ تضمین می‌کنند تا در جواب‌های موجه مدل، برای چاه i یکی از ترکیب‌های مجاز دریافت خدمت a و یکی از ترکیب‌های خدمت b که به‌ترتیب در مجموعه‌های Q^a_i و Q^b_i وجود دارند، انتخاب شوند.

$$\sum_r Z^H_{ir} = 1 \quad \forall i \in W, H \in \{a,b\} \quad (7)$$

دسته محدودیت‌های اشاره شده در عبارات ۸ و ۹ اطمینان حاصل می‌کنند خدمت‌رسان سرچاهی k یا خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l برای خدمت‌رسانی به چاه‌ها،

حداکثر یک‌بار می‌توانند از ایستگاه مرکزی خارج شوند.

$$\sum_{H}\sum_{j} x_{jkl}^{sH} \le ۱ \quad \forall k \in A, l \in P \tag{۸}$$

$$\sum_{j} y_{jml}^{sb} \le ۱ \quad \forall m \in B, l \in P \tag{۹}$$

دسته محدودیت‌های مندرج در عبارات ۱۰ و ۱۱ شرایطی را فراهم می‌کنند که اگر در دوره‌ی l خدمت‌رسان سرچاهی k یا خدمت‌رسان درون‌چاهی m از ایستگاه مرکزی خارج شد، در همان دوره باید به ایستگاه مرکزی برگردد.

$$\sum_{j}\sum_{H} x_{jkl}^{sH} = \sum_{j}\sum_{H} x_{jkl}^{He} \quad \forall k \in A, l \in P \tag{۱۰}$$

$$\sum_{j} y_{jml}^{sb} = \sum_{j} y_{jml}^{be} \quad \forall m \in B, l \in P \tag{۱۱}$$

و در ادامه دسته محدودیت‌های مندرج در عبارات ۱۲ و ۱۳ شرایط مشابهی را فراهم می‌کنند که اگر در دوره‌ی l خدمت‌رسان سرچاهی k یا خدمت‌رسان درون چاهی m به چاه i وارد شد، در همان دوره باید از چاه i خارج شود.

$$x_{ikl}^{H_۱ e} + \sum_{j\neq i}\sum_{H_۲} x_{ijkl}^{H_۱H_۲} = x_{ikl}^{sH_۱} + \sum_{j\neq i}\sum_{H_۲} x_{jikl}^{H_۲H_۱}$$
$$\forall i \in W, H_۱ \in \{a,b\}, k \in A, l \in P \tag{۱۲}$$

$$y_{iml}^{be} + \sum_{j\neq i} y_{ijml}^{bb} = y_{iml}^{sb} + \sum_{j\neq i} y_{jiml}^{bb} \quad \forall i \in W, m \in B, l \in P \tag{۱۳}$$

عبارت ۱۴ به دسته محدودیت‌هایی اشاره می‌کند که یک رابطه‌ی منطقی بین انتخاب ترکیب خدمت a یا b و متغیرهای تصمیم مربوطه ایجاد می‌کند. در ضمن این محدودیت‌ها اجازه نمی‌دهند که چاه i در دوره‌ی l بیش از یک‌بار خدمات مذکور را دریافت کند.

$$\sum_{k}(x_{ikl}^{H_۱ e} + \sum_{j\neq i}\sum_{H_۲} x_{ijkl}^{H_۱H_۲}) \le \sum_{r} e_{rl} Z_{ir}^{H_۱}$$
$$\forall i \in W, H_۱ \in \{a,b\}, l \in P \tag{۱۴}$$

رعایت سقف زمانی دوره‌های برنامه‌ریزی مسئله یعنی D برای زمان رسیدن خدمت‌رسان سرچاهی k یا خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l به ایستگاه مرکزی در قالب دسته محدودیت‌های مندرج در عبارات ۱۵ و ۱۶ بیان شده است. ضمناً اگر این خدمت‌رسان‌ها در ابتدای دوره‌ی l از ایستگاه مرکزی خارج نشوند، مقدار S_{kl}^{e} و $S_{ml}^{e'}$ به صورت اجباری برابر با صفر خواهند بود. در واقع در این محدودیت‌ها ارتباط منطقی بین متغیرهای زمان‌بندی و دودویی مربوط به ایستگاه مرکزی برقرار می‌شود

$$S_{kl}^{e} \le \sum_{j}\sum_{H} D x_{jkl}^{sH} \quad \forall k \in A, l \in P \tag{۱۵}$$

$$S_{ml}^{e'} \le \sum_{j} D y_{jml}^{sb} \quad \forall m \in B, l \in P \tag{۱۶}$$

همچنین در ادامه عبارات ۱۷ و ۱۸ اطمینان حاصل می‌کنند که زمان آغاز ارائه‌ی خدمت a توسط خدمت‌رسان سرچاهی k یا ارائه‌ی خدمت b توسط خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l در محل چاه i در صورت فعال شدن متغیرهای دودویی مربوطه، مقداری درنهایت برابر با سقف زمانی دوره‌های برنامه‌ریزی مسئله بگیرد و در غیر این‌صورت برابر با صفر شود.

$$S_{ikl}^{H_۱} \le D(x_{ikl}^{H_۱ e} + \sum_{j\neq i}\sum_{H_۲} x_{ijkl}^{H_۱H_۲})$$
$$\forall H_۱ \in \{a,b\}, i \in W, k \in A, l \in P \tag{۱۷}$$

$$S_{iml}^{bl} \le D(y_{iml}^{be} + \sum_{j\neq i} y_{ijml}^{bb}) \quad \forall i \in W, m \in B, l \in P \tag{۱۸}$$

عبارات ۱۹ و ۲۰ دسته محدودیت‌های زمان‌بندی برای زمانی هستند که خدمت‌رسان سرچاهی k یا خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l برای ارائه‌ی خدمات a یا b از ایستگاه مرکزی به محل چاه i عزیمت کرده‌اند. ضمناً در این عبارات و سایر عبارت‌های مشابه نماد M به معنای یک عدد بزرگ است.

$$S_{jkl}^{H} \ge t_{oj} - M(۱ - x_{jkl}^{sH}) \quad \forall H \in \{a,b\}, j \in W, k \in A, l \in P \tag{۱۹}$$

$$S_{jml}^{bl} \ge t_{oj}' - M(۱ - y_{jml}^{sb}) \quad \forall j \in W, m \in B, l \in P \tag{۲۰}$$

دسته محدودیت‌های زمان‌بندی مربوط به زمانی‌که خدمت‌رسان سرچاهی k در دوره‌ی l پس از ارائه‌ی خدمت a یا b به چاه i برای ارائه‌ی خدمت a یا b به چاه j می‌رود در عبارات ۲۱ تا ۲۴ آمده‌اند. ضمناً عبارت ۲۵ دسته محدودیت‌های زمان‌بندی مربوط به زمانی را که خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l پس از ارائه‌ی خدمت b به چاه i برای ارائه خدمت b به چاه j می‌رود، نشان می‌دهد.

$$S_{jkl}^{a} \ge S_{ikl}^{a} + d^{a} + t_{ij} - M(۱ - x_{ijkl}^{aa})$$
$$\forall i,j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P \tag{۲۱}$$

$$S_{jkl}^{a} \ge S_{ikl}^{b} + d_{۱}^{b} + d_{۲}^{b} + d_{۳}^{b} + t_{ij} - M(۱ - x_{ijkl}^{ba})$$
$$\forall i,j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P \tag{۲۲}$$

$$S_{jkl}^{b} \ge S_{ikl}^{a} + d^{a} + t_{ij} - M(۱ - x_{ijkl}^{ab})$$
$$\forall i,j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P \tag{۲۳}$$

$$S_{jkl}^{b} \ge S_{ikl}^{b} + d_{۱}^{b} + d_{۲}^{b} + d_{۳}^{b} + t_{ij} - M(۱ - x_{ijkl}^{bb})$$
$$\forall i,j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P \tag{۲۴}$$

$$S_{jml}^{bl} \ge S_{iml}^{bl} + d_{۲}^{b} + t_{ij}' - M(۱ - y_{ijml}^{bb})$$
$$\forall i,j \in W, i \neq j, m \in B, l \in P \tag{۲۵}$$

دسته محدودیت‌های زمان‌بندی مربوط به زمانی‌که خدمت‌رسان سرچاهی k یا خدمت‌رسان درون‌چاهی m در دوره‌ی l پس از ارائه‌ی خدمت a یا b به چاه i بلافاصله به ایستگاه مرکزی بازمی‌گردند، در عبارات ۲۶ تا ۲۸ آمده‌اند.

$$S_{kl}^{e} \ge S_{ikl}^{a} + d^{a} + t_{io} - M(۱ - x_{ikl}^{ae})$$
$$\forall i \in W, k \in A, l \in P \tag{۲۶}$$

$$S_{kl}^{e} \ge S_{ikl}^{b} + d_{۱}^{b} + d_{۲}^{b} + d_{۳}^{b} + t_{io} - M(۱ - x_{ikl}^{be})$$
$$\forall i \in W, k \in A, l \in P \tag{۲۷}$$

$$S_{ml}^{el} \ge S_{iml}^{bl} + d_{۲}^{b} + t_{io}' - M(۱ - y_{iml}^{be})$$
$$\forall i \in W, m \in B, l \in P \tag{۲۸}$$

جدول ۳. تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل.

متغیرهای تصمیم‌گیری:	تعداد
• دودویی	$w^۲p(۴a+b)+w(bp+۲q^a+۲q^b)$
• پیوسته	$wp(۲a+b)+p(a+b)$
مجموع متغیرها	$w^۲p(۴a+b)+p(a+b)$ $+۲w(ap+bp+q^a+q^b)$
محدودیت‌ها:	تعداد
• $=$	$w(۲ap+۲bp+p+۲)+p(a+b)$
• $\geq$	$w^۲p(۴a+b)+wbp(a+۱)$
• $\leq$	$wp(۲a+b+۲)+۲p(a+b)$
مجموع محدودیت‌ها	$w^۲p(۴a+b)+۳p(a+b)$ $+w(abp+۴ap+۴bp+۳p+۲)$

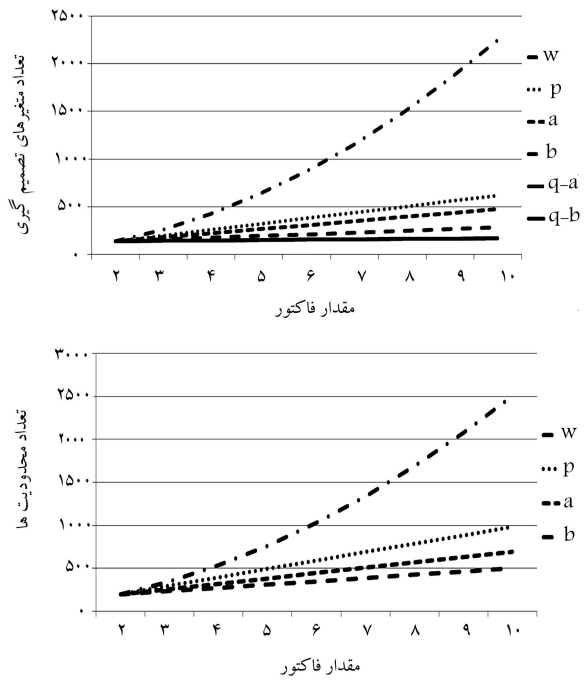
آخرین دسته محدودیت که جزو دسته محدودیت‌های سخت مسئله به شمار می‌آید و در بخش به‌کارگیری روش آزادسازی لاگرانژ روی آن تمرکز خواهد شد، عبارت ۲۹ است. در این عبارت، تلاقی متغیرهای دودویی و پیوسته خدمت‌رسان سرچاهی k و درون‌چاهی m در شرایطی که قرار است خدمت b به‌صورت یک عملیات ترکیبی توسط آنها در محل چاه i در دوره‌ی l صورت پذیرد، در قالب یک رابطه‌ی منطقی بیان شده است. در واقع این محدودیت ملزم می‌کند که اولاً اگر خدمت b اتفاق افتاد و در نتیجه آن به دلیل عبارات ۶ و ۱۴متغیرهای دودویی خدمت‌رسان‌ها مقدار یک گرفتند، متغیرهای زمان‌بندی متناظر آنها نیز مقدار بگیرند. ثانیاً زمان آغاز خدمت درون‌چاهی باید پس از خدمت‌رسان سرچاهی باشد.

$$S^{b'}_{iml} \geq S^{b}_{ikl} + d^{b}_{۱} - M \left(۲ - x^{be}_{ikl} - y^{be}_{iml} - \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} \sum_{H} x^{bH}_{ijkl} - \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} y^{bb}_{ijml}\right)$$
$$\forall i \in W, k \in A, m \in B, l \in P \qquad (۲۹)$$

به‌منظور بحث درباره‌ی پیچیدگی محاسباتی مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح معرفی‌شده، لازم است تا مطابق با جدول ۳ اجزای تشکیل‌دهنده‌ی مدل یعنی تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل بر اساس پارامترهای ورودی مسئله بررسی شوند. عامل‌هایی که در تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل تأثیرگذار هستند، عبارت‌اند از: ۱) w: تعداد چاه‌های نفتی تولیدی، ۲) p: تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی مسئله، ۳) a: تعداد خدمت‌رسان‌های سرچاهی، ۴) b: تعداد خدمت‌رسان‌های درون‌چاهی، ۵) q^a: تعداد اجزای مجموعه‌های ترکیبات مجاز دریافت خدمت سرچاهی و ۶) q^b: تعداد اجزای مجموعه‌های ترکیبات مجاز دریافت خدمت درون‌چاهی.

مقادیر به دست آمده در جدول ۳ حکایت از این دارد که پیچیدگی محاسباتی مدل که تابع تعداد متغیرها و محدودیت‌های مدل است، در برابر عامل تعداد چاه‌های نفتی تولیدی از حساسیت بسیار بیشتری نسبت به سایر عامل‌ها برخوردار است. شکل ۳ نیز طرح‌واره‌یی از این موضوع را به تصویر کشیده است.

برای مثال اگر محدوده‌ی اعداد ۲ تا ۱۰ برای همه‌ی عامل‌ها در نظر گرفته شود و هربار یکی از عامل‌ها در ازای ثابت نگه‌داشتن سایر عامل‌ها در عدد ۲، از ۲ تا ۱۰ افزایش داده شود و هربار بر اساس فرمول‌های جدول ۳ تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌ها محاسبه شود، نتایج به‌صورت شکل ۳ درمی‌آید. به وضوح در این شکل نشان داده شده است که سرعت رشد تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و



شکل ۳. سرعت رشد تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل در ازای افزایش مقدار عامل‌ها.

محدودیت‌های مدل، در ازای افزایش عامل تعداد چاه‌های نفتی تولیدی به مراتب بیشتر از افزایش سایر عامل‌هاست.

۴. معرفی الگوریتم‌های توسعه‌دهنده‌ی حدود پایین مدل

همان‌گونه که در بخش قبلی دیدیم، مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط معرفی شده دارای ابعاد بزرگ و پیچیده‌یی است. به‌طورکلی فرایند حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط در زمره‌ی یک مسئله‌تحت شرایط Np-hard قرار می‌گیرد.[۳۰] از طرفی دیگر پیچیدگی مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی حمل‌ونقل مورد بررسی قرار گرفته و ثابت شده است که این مسئله و تمام مسائل زیر مجموعه‌ی آن که هر کدام از بعدی آن را عمومیت می‌بخشند، Np-hard هستند و به‌ازای تمام نمودهای ورودی، قابل حل توسط یک الگوریتم حل در یک زمان چندجمله‌یی نیستند.[۳۱]

حال با توجه به این‌که این مدل زیرمجموعه‌یی از مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی حمل‌ونقل است، یک مسئله‌ی Np-hard است و روش‌های حل دقیق موجود قادر به حل آن در یک زمان چندجمله‌یی نیستند. در این شرایط توسعه‌ی حدود پایین و همچنین الگوریتم‌های حل ابتکاری (هیورستیک) و فرابتکاری (متاهیورستیک) برای این‌گونه مسائل اهمیت فراوانی می‌یابد.

یکی از روش‌های ساده برای توسعه‌ی حد پایین، حل مدل برنامه‌ریزی خطی حاصل از آزادسازی الزام عددصحیح بودن متغیرهای تصمیم‌گیری در مدل اصلی برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط و در نظرگرفتن مقدار بهینه‌ی تابع هدف مسئله‌ی آزاد شده به عنوان حد پایین مسئله اصلی است. به‌طور حتم حل مدل آزاد شده‌ی جدید بسیار آسان‌تر از مدل اصلی عددصحیح مختلط خواهد بود، اما به‌طور شایع و معمول، مقدار به دست آمده برای حد پایین از کیفیت پایینی برخوردار است و فاصله‌ی بسیار زیادی از مقدار بهینه‌ی تابع هدف مسئله‌ی اصلی دارد؛ بنابراین در چنین شرایطی نیاز به استفاده از روش‌هایی با کارایی بیشتر احساس می‌شود. اگر فضای چندوجهی[۷]

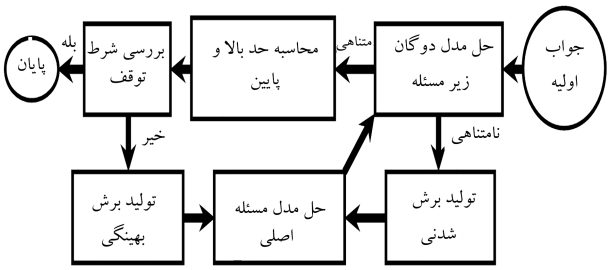
مسئله اصلی با Q نام‌گذاری شود، به‌منظور توسعه و بهبود حد پایین، روش‌های تجزیه در قالب یک روند تکراری و مستمر، یک چندوجهی جدید می‌سازند که می‌تواند با Q تداخل داشته باشد و تخمین بهتری را برای حد پایین به دست آورد. در واقع، اصل و قاعده‌ی کلی روش‌های تجزیه بر بهبود حدود (حد بالا/حد پایین) جواب مسائل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط استوار شده است تا با به‌کارگیری روش تجزیه‌ی مسائل با ابعاد بزرگ (که قابلیت حل شدن توسط حل‌کننده‌های تجاری را ندارند) و جستجو در فضای خودساخته، نهایت استفاده را از ساختار پیچیده‌ی مسئله ببرند.[۳۲] روش‌های تجزیه در مسائل فراوانی با ماهیت مسیریابی یا زمان‌بندی به کارگرفته شده‌اند؛ مانند مسیریابی هواپیما و مسئله‌ی زمان‌بندی خدمه،[۳۳و۳۴] زمان‌بندی و مسیریابی وسایل حمل‌ونقل،[۳۵] زمان‌بندی تور[۳۶] و زمان‌بندی قطارهای شهری.[۱۳] دو رویکرد اصلی تجزیه برای بهره بردن کافی از ساختار مسئله وجود دارد: تجزیه‌ی متغیرها و تجزیه‌ی محدودیت‌ها.[۳۷] در این بخش ابتدا الگوریتم‌های توسعه دهنده‌ی حدود پایین برای مسئله که مبتنی بر روش‌های شناخته شده‌ی بندرز با رویکرد تجزیه‌ی متغیرها و آزادسازی لاگرانژ با رویکرد تجزیه‌ی محدودیت‌ها هستند، معرفی می‌شوند و سپس در بخش نتایج عددی مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند.

۱.۴. الگوریتم اول

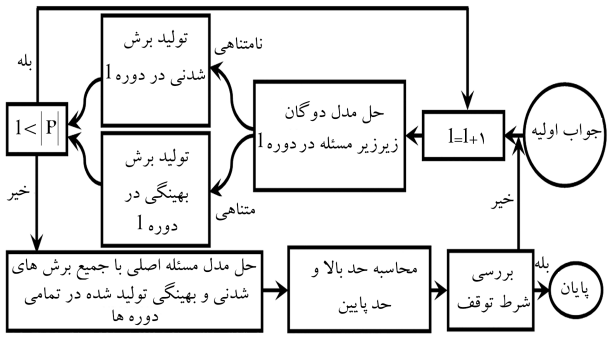
روش بندرز اولین بار به‌منظور حل مسائل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط دارای محدودیت‌های پیچیده، ابداع و معرفی شد[۳۸] و پس از آن سیر تکاملی متنوعی را در قالب مقالات و متون علمی طی کرد.[۳۹] ایده‌ی اصلی این روش برمبنای تجزیه‌ی مسئله و تولید محدودیت‌های الزام‌آور در قالب برش‌های بهینگی[۸] و برش‌های شدنی[۹] تا حد تکمیل مسئله‌ی تجزیه شده‌نسبت به مسئله‌ی اولیه[۱۰] است. در هر تکرار این روش، مسئله‌ی اولیه با ثابت کردن متغیرهای عددصحیح، به یک زیرمسئله[۱۱] و سپس دوگان زیرمسئله[۱۲] با تنها متغیرهای پیوسته تبدیل می‌شود که به آسانی قابل حل است. مسئله‌ی اصلی بندرز[۱۳] حاصل آزادسازی مسئله‌ی اولیه در شرایطی است که فقط شامل متغیرهای عددصحیح است. هر جواب بهینه‌یی از مسئله‌ی اصلی بندرز که بیان‌گر یک حد پایین در شرایط تابع هدف کمینه‌سازی برای مسئله‌ی اولیه است، به‌عنوان مقادیر ثابت جدید متغیرهای عددصحیح در دوگان زیرمسئله در نظرگرفته شده و بدین ترتیب یک دوگان زیرمسئله‌ی جدید ساخته می‌شود. از طریق حل دوباره‌ی دوگان زیرمسئله‌ی جدید، مقادیر متغیرهای دوگان زیرمسئله و یک حد بالا در شرایط تابع هدف کمینه‌سازی برای مسئله‌ی اولیه به‌دست می‌آید و در نهایت یک برش بندرز (اعم از بهینگی یا شدنی) تشکیل و به مسئله‌ی اصلی بندرز اضافه می‌شود. حال مجدداً با معرفی برش جدید بندرز، مسئله‌ی اصلی بندرز دوباره حل می‌شود و به همین ترتیب روش بندرز به‌طور پیوسته تکرار می‌شود و زمانی توقف می‌یابد که تفاوت بین حد پایین و حد بالا از یک مقدار کوچک نزدیک به صفر کمتر شود.

حال با عنایت به روش مذکور، الگوریتم اول برای به دست آوردن یک حد پایین برمبنای روش بندرز در شکل ۴ آمده است.

در الگوریتم اول، جواب اولیه عبارت است از یک جواب شدنی مسئله که تمام مقادیر متغیرهای دودویی مربوط به خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی برابر با صفر هستند. در واقع این جواب اولیه متناظر این است که هیچ خدمتی در هیچ دوره‌یی به چاه‌ها ارائه نشود. در نتیجه، مقدار تابع هدف برابر است با مجموع هزینه‌ی کمبود بسامد مورد نیاز خدمت a و b به‌ازای تمام چاه‌ها. بنابراین، در این جواب هزینه‌های سفر و کاهش تولید نیز برابر با صفر خواهند بود. منظور از دوگان زیرمسئله،



شکل ۴. الگوریتم اول برمبنای روش بندرز.



شکل ۵. الگوریتم دوم برمبنای روش L-shaped .

دوگان مدلی است که در آن دسته محدودیت‌های ۱۵ تا ۲۹ با متغیرهای دودویی ثابت شده و تابع هدف با مقدار صفر قرار دارند. دلیل صفر بودن تابع هدف زیرمسئله این است که تمام متغیرهای پیوسته در مسئله‌ی اولیه در تابع هدف دارای ضریب صفر هستند. شرط توقف در الگوریتم زمانی اتفاق می‌افتد که اختلاف حدود بالا و پایین به کمتر از مقدار ۰/۱ برسد یا تعداد تکرارهای اجرا شده بیشتر از مقدار تعیین شده‌یی باشد یا زمان سپری شده از آغاز اجرای الگوریتم بیشتر از مقدار تعیین شده‌یی باشد. دلیل توقف زمانی اجرای الگوریتم همان‌طور که در ادامه نیز مشاهده خواهد شد این است که برای مسائل بزرگ، الگوریتم به جواب بهینه نمی‌رسد. پس لازم است که یک حد توقف زمانی برای آن درنظرگرفته شود. روش تعیین جواب اولیه و شرط توقف در تمام الگوریتم‌هایی که در ادامه بدان پرداخته خواهد شد، به‌همین شکل محاسبه و به‌کارگرفته می‌شود.

۲.۴. الگوریتم دوم

روش L-shaped برای اولین بار با رویکرد شتاب‌دهی و سرعت‌بخشی به روش بندرز در حل مسائل بزرگ ابداع و معرفی شد.[۴۰] کاربرد این روش در مواجهه با مسائلی است که بتوان زیرمسئله و در نتیجه دوگان زیرمسئله را به n زیرزیرمسئله[۱۴] و در نتیجه به n دوگان زیرزیرمسئله[۱۵] تجزیه کرد و در نتیجه بتوان در هر تکرار به‌جای یک برش بهینگی یا شدنی، در مجموع n برش اعم از بهینگی یا شدنی تولید و به مسئله‌ی اصلی بندرز اضافه کرد. با توجه به این‌که زیرمسئله و در نتیجه دوگان زیرمسئله حاصل از مدل مورد بررسی در این مقاله دارای شرایط تجزیه به هر دوره‌ی برنامه‌ریزی است، در الگوریتم دوم، در هر تکرار تعداد $|P|$ برش اعم از شدنی یا بهینگی یعنی تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی مسئله تولید و به مسئله‌ی اصلی اضافه خواهد شد. حال با عنایت به روش مذکور، الگوریتم دوم برای به دست آوردن یک حد پایین برمبنای روش L-shaped به‌صورت طرح‌پاره در شکل ۵ آمده است. در الگوریتم دوم، منظور از دوگان زیرزیرمسئله، دوگان مدلی است که در آن دسته

محدودیت‌های ۱۵ تا ۲۹ در دوره‌ی مشخص l با متغیرهای دودویی ثابت شده و تابع هدف با مقدار صفر قرار دارند.

۳.۴. الگوریتم سوم

الگوریتم آزادسازی لاگرانژ یکی از روش‌های ابتکاری پرکاربرد در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است که توسط لاگرانژ ابداع و معرفی شد. این الگوریتم که مبتنی‌بر قضیه‌ی لاگرانژ برای حل مسائل بهینه‌سازی مقید توسعه داده شده است، با آزادسازی همه یا برخی قیود مسئله ضمن فراهم کردن اطلاعاتی از جواب بهینه‌ی مسئله‌ی اصلی، جواب‌های تقریبی قابل قبولی را برای مسئله‌ی اصلی ایجاد می‌کند که عمدتاً از این جواب‌ها می‌توان به‌عنوان یک حد پایین در سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهره گرفت. در واقع هدف از به‌کارگیری الگوریتم مبتنی‌بر روش آزادسازی لاگرانژ، حذف برخی از محدودیت‌های پیچیده و اضافه کردن آنها در تابع هدف با ضرایب لاگرانژ و در نهایت دست‌یابی به حدود پایین مناسب است.

به‌منظور ورود به بحث لازم است ابتدا تحلیلی راجع‌به دسته محدودیت‌های مدل ارائه شود. در یک نگاه کلی دسته محدودیت‌های مدل به دو قسمت کلی تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول، محدودیت‌های ۶ تا ۱۴ هستند که تماماً مشتمل‌بر متغیرهای دودویی‌اند. دسته‌ی دوم، محدودیت‌های ۱۵ تا ۲۹ هستند که ماهیتاً محدودیت‌های زمان‌بندی خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی‌اند و دارای هر دو نوع متغیر دودویی و پیوسته هستند. در نگاه اول مشخص است که دسته‌ی دوم محدودیت‌ها، محدودیت‌های سخت‌تر و پیچیده‌تری هستند. بنابراین، در الگوریتم‌های مبتنی‌بر روش آزادسازی لاگرانژ تمرکز بر دسته‌ی دوم محدودیت‌ها خواهد بود. اما دسته‌ی دوم محدودیت‌ها خود به سه بخش کلی تقسیم می‌شوند. بخش اول، محدودیت‌های زمان‌بندی صرفاً محدود به خدمت‌رسان‌های سرچاهی که عبارت‌اند از عبارات ۱۵، ۱۷، ۱۹، ۲۱ تا ۲۴، ۲۶ و ۲۷. بخش دوم، محدودیت‌های زمان‌بندی صرفاً محدود به خدمت‌رسان‌های درون‌چاهی که عبارت‌اند از عبارات ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۵ و ۲۸. اما بخش سوم، محدودیت‌های زمان‌بندی‌یی است که هر دو نوع خدمت‌رسان را شامل می‌شود؛ یعنی عبارت ۲۹. در این‌جا از پیش قضاوت نمی‌شود، ولی به‌نظر می‌رسد در میان بخش‌های اشاره شده، عبارت ۲۹ از همه پیچیده‌تر است؛ زیرا اولاً شامل هر دو نوع متغیر دودویی و پیوسته است و ثانیاً شامل متغیرهای دودویی و پیوسته‌ی مربوط به هر دو نوع خدمت‌رسان است. این دو ویژگی در هیچ بخش دیگری در مدل وجود ندارد.

حال با این مقدمه الگوریتم معرفی می‌شود. همان‌طورکه اشاره شد، محدودیت‌های زمان‌بندی مدل به سه بخش کلی تقسیم می‌شوند. در این مقاله تمام حالات ممکن انتخاب سه بخش محدودیت‌های سخت مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ بنابراین باید الگوریتم مدنظر برای هفت حالت مختلف اجرا شود. این حالات به‌صورت زیر خواهند بود:

حالت اول: حذف صرفاً محدودیت‌های زمان‌بندی خدمت‌رسان سرچاهی و انتقال به تابع هدف یعنی عبارات ۱۵، ۱۷، ۱۹، ۲۱ تا ۲۴، ۲۶ و ۲۷.

حالت دوم: حذف صرفاً محدودیت‌های زمان‌بندی خدمت‌رسان درون‌چاهی و انتقال به تابع هدف یعنی عبارات ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۵ و ۲۸.

حالت سوم: حذف صرفاً محدودیت‌های زمان‌بندی شامل دو خدمت‌رسان و انتقال به تابع هدف یعنی عبارت ۲۹.

حالت چهارم: ترکیب حالات اول و دوم.

حالت پنجم: ترکیب حالات اول و سوم.

حالت ششم: ترکیب حالات دوم و سوم.

حالت هفتم: ترکیب حالات اول، دوم و سوم.

حال با عنایت به توضیحات بیان‌شده، برای هریک از هفت حالت اشاره شده، الگوریتم سوم برای به دست آوردن یک حد پایین برمبنای روش آزادسازی لاگرانژ طبق گام‌های زیر اجرا می‌شود:

گام ۱. در نظرگرفتن یک جواب اولیه به‌عنوان UB، $LB = -\infty$ و تنظیم بردار ضرایب لاگرانژ اولیه $\lambda = 0$.

گام ۲. حل مسئله‌ی آزاد شده LR، محاسبه‌ی مقادیر متغیرها x^* و مقدار تابع هدف مسئله‌ی آزاد شده LB^*.

گام ۳. اگر $LB < LB^*$ آنگاه $LB = LB^*$.

گام ۴. $\lambda^{(t)} = \lambda^{(t-1)} + k(b - Ax^*)$ برای محدودیت‌های به شکل $Ax \geq b$ و $\lambda^{(t)} = \lambda^{(t-1)} + k(Ax^* - b)$ برای محدودیت‌های به شکل $Ax \leq b$ به‌طوری که:

$$k = \theta \frac{UB - LB}{\sum_{i=1}^{n} (b_i - a_i x^*)^2} \qquad (30)$$

گام ۵. اگر پس از دو تکرار متوالی در مقدار LB بهبودی حاصل نشد، آنگاه $\theta = \frac{\theta}{2}$.

گام ۶. در صورت عدم احراز شرایط توقف، بازگشت به گام دوم.

۵. نتایج عددی

در این بخش، به بررسی نتایج عددی به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های معرفی‌شده در تولید حدود پایین مدل ریاضی پرداخته می‌شود. به‌دلیل نبود مسائل مشابه در سایر مقالات که منطبق با شرایط عملیاتی مسئله‌ی مدنظر این مقاله باشند، طیف وسیعی از داده‌های شبیه‌سازی شده‌ی کوچک و بزرگ تولید و نتایج اعمال الگوریتم‌ها روی آنها بررسی، تحلیل، و مقایسه می‌شود.

مبنای تولید داده‌های شبیه‌سازی شده، الگوگیری از اطلاعات موجود در شرکت نفت فلات قاره‌ی ایران است. همان‌گونه که در بخش مقدمه بدان اشاره شد، حوزه‌ی اصلی فعالیت شرکت نفت فلات قاره ایران، منطقه‌ی خلیج فارس است. عمده‌ی تولید نفت شرکت نفت فلات قاره‌ی ایران در حوزه‌ی میدان‌های مشترک نفتی، از سه میدان فروزان، سلمان و نصرت است که با کشورهای عربستان و امارات متحده‌ی عربی مشترک هستند. درحال حاضر، تعداد چاه‌های این سه میدان به‌ترتیب برابر با ۵۳، ۴۴ و ۵ است. تعداد خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی مستقر در هریک از این سکوها به‌ترتیب بین ۱ تا ۳ است. زمان و هزینه‌ی سفر این خدمت‌رسان‌ها بین چاه‌ها، به‌ترتیب باتوجه به فواصل معمول بین چاه‌های نفتی در همین میدان‌های مشترک و متناسب با نرخ‌های اجاره‌ی آنها در نظرگرفته شده است. نظر به این‌که برنامه‌ی کاری کارکنان جزایر و سکوهای نفتی در این شرکت در قالب طرح اقماری (یعنی ۱۵ روزکار، ۱۵ روز استراحت) صورت می‌پذیرد، به‌طور معمول واحد سازمانی امور فنی دوره‌ی برنامه‌ریزی را برای واحدهای خدمات فنی چاه‌ها در سکوها، ۱۵ در نظر می‌گیرد. با توجه به شرایط طرح اقماری، ساعات کاری روزانه‌ی کارکنان، بدون/با اضافه‌کاری بین ۱۲ تا ۱۵ ساعت در نظرگرفته می‌شود. مبنای سایر موارد نظیر بسامد و مجموعه‌های ترکیبات مجاز دریافت خدمات، جزئیات زمانی خدمات، هزینه‌های کاهش تولید و کمبود خدمات نیز بر اساس اطلاعات واحد بالادستی امور

فنی شرکت نفت فلات قاره‌ی ایران به‌دست آمده است. اطلاعات کلی راجع به میدان‌های مشترک مذکور نظیر تعداد چاه‌ها، در صفحات وب[۱۶] قابل مشاهده است.

به‌منظور انجام بررسی و مقایسه‌های مذکور، کدنویسی مدل ریاضی مسئله و الگوریتم‌ها در محیط نرم‌افزار GAMS ۲۴.۱.۲ و با استفاده از حل‌کننده‌ی CPLEX ۱۲.۲ با تنظیمات پیش‌فرض در بستر یک رایانه با سیستم عامل Windows ۷ Home Premium، مشخصه‌ی سخت‌افزاری Intel(R) Core(TM) i۳ CPU M ۳۷۰ processor at ۲/۴ GHz و حافظه‌ی کوتاه‌مدت ۴ GB (RAM) به اجرا گذاشته شده است.

بر پایه‌ی مدلی که در قالب عبارات ۱ تا ۲۹ به تشریح آن پرداخته شد، ابعاد مدل ریاضی مسئله از مواردی نظیر تعداد چاه‌ها ($|W|$)، تعداد دوره‌ها ($|P|$)، تعداد مجموعه‌های ترکیبات مجاز دریافت خدمات ($|Q_i^H|$) به‌طوری‌که $i \in W, H \in \{a, b\}$ و در نهایت تعداد خدمت‌رسان‌های سرچاهی ($|A|$) و درون‌چاهی ($|B|$) نشئت می‌گیرد. حال به منظور ارزیابی عمیق الگوریتم‌ها، ۵۴ نمونه مسئله با الگوگیری از اطلاعات شرکت نفت فلات قاره‌ی ایران از کوچک تا بزرگ به‌صورت تصادفی و با به‌کارگیری توابع توزیع تصادفی بدین صورت تولید شده است: تعداد مجموعه‌های ترکیبات مجاز دریافت خدمات ($|Q_i^H|$) به‌طوری‌که $i \in W, H \in \{a, b\}$ از مجموعه‌ی $\{۱, ۲, ۳\}$ و در نهایت تعداد خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی ($|A|, |B|$) به‌ترتیب از مجموعه‌های $(\{۱, ۲\}, \{۲, ۳\})$ برای تعداد چاه‌های کمتر از ۱۰ و به‌ترتیب از مجموعه‌های $(\{۲, ۴\}, \{۳, ۶\})$ برای تعداد چاه‌های بیشتر از ۱۰. همچنین سایر مقادیر ثابت از طریق به‌کارگیری تابع توزیع یکنواخت بدین‌صورت تولید شده‌اند: سقف زمانی دوره‌ها (D) از بازه‌ی $[۱۲, ۱۵]$، جزئیات زمانی خدمات $(d^a, d^b_۱, d^b_۲)$ به‌ترتیب از بازه‌های $([۱, ۱/۵], [۲, ۲/۵], [۱, ۱/۵], [۱, ۵, ۲])$، هزینه‌ی کاهش تولید چاه‌ها (O_i) به‌طوری‌که $i \in W$ از بازه‌ی $[۸۰۰, ۱۰۰۰]$، هزینه‌های کمبود خدمات a و b چاه‌ها (R_i^a, R_i^b) به‌ترتیب از بازه‌های $([۵۶۰۰, ۸۴۰۰], [۵۰۰, ۸۰۰])$، بسامد خدمات a و b چاه‌ها (F_i^a, F_i^b) به‌ترتیب از مجموعه‌های $(\{۱, ۲\}, \{۴, ۵, ۶, ۷\})$ و اعضای زیرمجموعه‌های ترکیبات مجاز خدمات a و b چاه‌ها (Q_i^H) از مجموعه‌ی $\{۰, ۱\}$ به‌طوری‌که $i \in W, H \in \{a, b\}$، مدت زمان سفر خدمت‌رسان‌ها بین چاه‌ها و ایستگاه مرکزی (t_{ij}, t'_{ij}) به‌ترتیب از بازه‌های $([۰/۰۲, ۰/۳۹], [۰/۰۲, ۰/۳۲])$ و هزینه‌ی سفر خدمت‌رسان‌ها بین چاه‌ها و ایستگاه مرکزی (c_{ij}, c'_{ij}) به‌ترتیب به‌صورت $(t_{ij}, ۲۵۰ \times t'_{ij}, ۱۶۷)$. به ازای هریک از نمونه‌ها، یکی از اعضای مجموعه‌ی $\{۵۵, \ldots, ۲\}$ به‌عنوان تعداد چاه‌ها ($|W|$) انتخاب می‌شود و از تعداد دوره‌ها ($|P|$) نیز به میزان ۱۵ برای تمام نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. مقادیر مذکور به‌گونه‌یی شبیه‌سازی شده‌اند که در هر نمونه مسئله‌ی تولید شده، فضای جواب موجه برای مسئله وجود داشته باشد تا امکان تولید جواب اولیه به شکلی که قبلاً اشاره شد، به‌وجود آید. شرط تعیین شده برای توقف در تمام الگوریتم‌ها بدین‌صورت است که اگر تفاوت حد پایین و حد بالا کمتر از ۰/۱ شد یا زمان سپری شده پس از اجرا بیش از ۹۰۰ ثانیه شد یا اگر تعداد تکرارهای حلقه‌های الگوریتم‌ها بیش از ۱۰۰ تکرار شد، اجرای الگوریتم خاتمه پیدا کند.

همان‌گونه که پیشتر نیز مطرح شد، الگوریتم‌های اول و دوم مبتنی‌بر روش دقیق بندرز و الگوریتم سوم مبتنی‌بر روش فراابتکاری آزادسازی لاگرانژ بودند. بنابراین ابتدا نتایج الگوریتم‌های اول و دوم با هم مقایسه می‌شوند. سپس نتایج هفت حالت مختلف اجرای الگوریتم سوم مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتها نتایج دو الگوریتم دقیق و فراابتکاری مقایسه می‌شوند.

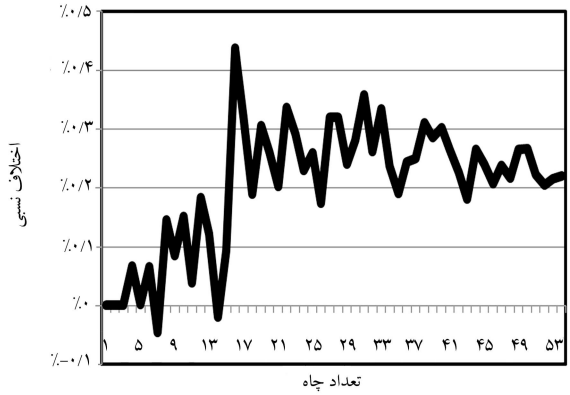
جدول ۴ نتایج حاصل از اعمال الگوریتم‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. در این جدول برای هر نمونه با تعداد چاه مشخص، تعداد تکرارهای اجرا شده، زمان سپری شده بر حسب ثانیه و بهترین حد پایین حاصل شده در شرایط توقف الگوریتم‌های اول و دوم به نمایش در آمده است. ضمناً برای هر نمونه مسئله، اختلاف نسبی بین دو الگوریتم به‌صورت $\frac{(LB_{L-shaped} - LB_{Benders})}{LB_{Benderz}} \times ۱۰۰٪$ محاسبه شده است. همان‌گونه که از جدول ۴ برمی‌آید، به استثنای نمونه‌های با تعداد چاه‌های ۲ تا ۴ که نمونه‌های کوچکی محسوب می‌شوند، در سایر نمونه‌ها الگوریتم دوم حد پایین بهتری نسبت به الگوریتم اول تولید کرده است. همچنین تعداد متوسط تکرارها در مجموع نمونه‌ها، برای الگوریتم‌های اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۴۸ و ۲۲ تکرار است. به‌عبارتی دیگر مجموع تعداد برش‌های شدنی و بهینگی تولید شده توسط الگوریتم‌های اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۴۸ و $۳۳۰ = ۱۵ \times ۲۲$ است که این نشان می‌دهد که الگوریتم دوم توانسته است شتاب زیادی به الگوریتم بندرز بدهد و حدود هفت برابر برش بیشتری تولید کند. اما در بعد متوسط زمانی، الگوریتم‌های اول و دوم به‌ترتیب ۷۴۷ و ۸۴۰ ثانیه در اجرا صرف وقت داشته‌اند که این نشان می‌دهد الگوریتم دوم زمان برتر از الگوریتم اول است؛ اما همان‌گونه که در نمونه‌های بزرگ با تعداد چاه‌های ۲۰ تا ۵۵ دیده می‌شود، هر دو الگوریتم زودتر از رسیدن به سقف ۱۰۰ تکرار، به سقف زمانی می‌رسند و باز در این شرایط الگوریتم دوم است که عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

جدول ۵ نتایج حاصل از اعمال هفت حالت مختلف الگوریتم سوم را نشان می‌دهد. در این جدول برای هر نمونه با تعداد چاه مشخص، تعداد تکرارهای اجرا شده، زمان سپری شده بر حسب ثانیه و بهترین حد پایین حاصل شده در شرایط توقف به‌ازای اجرای الگوریتم سوم در هفت حالت مختلف به نمایش درآمده است. ضمناً برای هر نمونه مسئله، اختلاف نسبی بین بیشینه‌ی حد پایین و کمینه‌ی حد پایین به‌دست‌آمده به‌صورت $\frac{(LB_{LR-Max} - LB_{LR-Min})}{LB_{LR-Min}} \times ۱۰۰٪$ محاسبه شده است. همان‌گونه که از جدول ۵ برمی‌آید، به استثنای نمونه‌ی اول با تعداد چاه ۲، در سایر نمونه‌ها الگوریتم سوم با حالت سوم حد پایین بهتری نسبت به بقیه‌ی حالات تولید کرده است و این همان چیزی است که در بخش تشریح الگوریتم انتظارش مطرح شد. درواقع حالت سوم به حذف پیچیده‌ترین محدودیت مسئله یعنی عبارت ۲۹ برمی‌گردد که هم‌زمان هم شامل متغیرهای دودویی و پیوسته است و هم شامل متغیرهای منسوب به خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی است. همچنین تعداد متوسط تکرارها در مجموع نمونه‌ها، برای حالت‌های اول تا هفتم به‌ترتیب برابر با ۳۵، ۱۲، ۱۰، ۶۷، ۳۵، ۱۰ و ۷۲ تکرار است. به‌عبارتی دیگر الگوریتم سوم با حالت سوم موفق شده تا با کمترین تکرار به بهترین حد پایین در شرایط توقف الگوریتم نائل شود. اما در بعد متوسط زمانی، اجرای الگوریتم سوم با حالت‌های اول تا هفتم به‌ترتیب ۶۸۱، ۸۰۹، ۸۴۴، ۶۴۶، ۷۱۵، ۸۴۶ و ۶۲۳ ثانیه در اجرا صرف وقت داشته‌اند که این نشان می‌دهد حالت سوم نسبتاً زمان‌برتر از حالات دیگر به استثنای حالت ششم است؛ اما همان‌گونه که در نمونه‌های بزرگ با تعداد چاه‌های ۲۷ تا ۵۵ دیده می‌شود، تمام حالات زودتر از رسیدن به سقف ۱۰۰ تکرار، به سقف زمانی می‌رسند و باز در این شرایط الگوریتم سوم با حالت سوم است که عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. حال به مقایسه‌ی حدود بالای به دست آمده توسط الگوریتم‌های برتر در دو بخش دقیق و فراابتکاری پرداخته می‌شود.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های با چاه‌های ۲، ۳ و ۴ مقادیر حدود پایین به‌دست‌آمده با هم برابرند. اما به استثنای دو مورد در تعداد چاه‌های ۸ و ۱۵، در سایر موارد الگوریتم سوم در حالت سوم حد پایین بهتری نسبت به الگوریتم دوم در شرایط توقف مسئله به‌دست آورده است. البته لازم است در این‌جا به این نکته‌ی مهم اشاره شود که الگوریتم دوم یک الگوریتم دقیق و همگرا به جواب

جدول ۴. نتایج حاصل از اعمال الگوریتم‌های اول و دوم بر روی نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

تعداد چاه	الگوریتم اول مبتنی بر روش بندرز			الگوریتم دوم مبتنی بر روش L-shaped			اختلاف نسبی	تعداد چاه	الگوریتم اول مبتنی بر روش بندرز			الگوریتم دوم مبتنی بر روش L-shaped			اختلاف نسبی
	حد پایین	تکرار	زمان	حد پایین	تکرار	زمان			حد پایین	تکرار	زمان	حد پایین	تکرار	زمان	
۲	۱۴۰۸۶.۴۷	۹	۶.۲۱	۱۴۰۸۶.۴۷	۳	۱۱.۱۰	۰.۰۰%	۲۹	۱۹۶۵۱۴.۱۸	۲۷	۹۰۰	۱۹۶۵۳۵.۰۷	۱۸	۹۰۰	۰.۰۱%
۳	۱۶۹۳۰.۵۷	۳۲	۲۹.۱۸	۱۶۹۳۰.۵۷	۱۱	۴۳.۲۹	۰.۰۰%	۳۰	۲۰۱۷۶۵.۸۸	۴۶	۹۰۰	۲۰۱۸۸۳.۵۹	۲۰	۹۰۰	۰.۰۶%
۴	۲۶۶۰۳.۴۴	۳۷	۴۴.۰۴	۲۶۶۰۳.۴۴	۹	۳۹.۶۴	۰.۰۰%	۳۱	۲۱۷۱۶۸.۳۴	۴۰	۹۰۰	۲۱۷۳۳۲.۲۶	۲۰	۹۰۰	۰.۰۸%
۵	۳۵۷۹۹.۶۳	۱۰۰	۱۴۶.۴۷	۳۵۸۱۶.۸۴	۱۰۰	۵۰۱.۲۲	۰.۰۵%	۳۲	۲۰۶۰۲۱.۷۹	۳۳	۹۰۰	۲۰۶۰۷۸.۴۰	۱۷	۹۰۰	۰.۰۳%
۶	۲۷۴۱۱.۳۴	۱۰۰	۱۷۶.۳۰	۲۷۴۸۱.۷۸	۱۰۰	۶۴۴.۴۴	۰.۲۶%	۳۳	۲۰۲۰۵۵.۵۷	۲۵	۹۰۰	۲۰۲۱۵۰.۹۷	۱۶	۹۰۰	۰.۰۵%
۷	۵۴۰۹۵.۲۴	۱۰۰	۲۳۶.۶۴	۵۴۲۸۶.۲۵	۷۳	۹۰۰	۰.۳۵%	۳۴	۲۰۱۱۸۶.۵۳	۲۳	۹۰۰	۲۰۱۲۸۵.۱۱	۱۵	۹۰۰	۰.۰۵%
۸	۴۵۰۴۰.۹۳	۱۰۰	۲۸۲.۸۷	۴۵۳۰۰.۳۴	۴۲	۹۰۰	۰.۵۸%	۳۵	۲۱۳۷۳۵.۵۷	۲۱	۹۰۰	۲۱۳۸۴۳.۱۲	۱۵	۹۰۰	۰.۰۵%
۹	۴۲۲۵۷.۸۱	۱۰۰	۲۶۳.۵۷	۴۲۵۰۱.۳۷	۳۵	۹۰۰	۰.۵۸%	۳۶	۲۲۲۶۸۶.۲۵	۲۸	۹۰۰	۲۲۲۸۱۹.۷۰	۱۵	۹۰۰	۰.۰۶%
۱۰	۶۲۴۸۲.۱۶	۱۰۰	۳۴۱.۶۰	۶۳۰۰۳.۴۸	۳۲	۹۰۰	۰.۸۳%	۳۷	۲۳۲۶۰۰.۰۴	۱۹	۹۰۰	۲۳۲۷۱۵.۰۴	۱۴	۹۰۰	۰.۰۵%
۱۱	۷۹۷۹۲.۰۴	۱۰۰	۷۰۳.۲۷	۷۹۹۶۰.۱۴	۳۴	۹۰۰	۰.۲۱%	۳۸	۲۴۴۱۹۶.۳۹	۲۹	۹۰۰	۲۴۴۳۲۹.۴۴	۱۶	۹۰۰	۰.۰۵%
۱۲	۷۳۹۲۲.۵۶	۱۰۰	۴۶۸.۸۳	۷۴۱۹۸.۴۱	۳۲	۹۰۰	۰.۳۷%	۳۹	۲۳۷۹۸۴.۲۸	۲۲	۹۰۰	۲۳۸۰۴۲.۲۴	۱۴	۹۰۰	۰.۰۲%
۱۳	۸۹۹۶۹.۷۳	۱۰۰	۴۷۳.۹۷	۹۰۳۹۷.۵۱	۳۳	۹۰۰	۰.۴۸%	۴۰	۲۳۵۸۳۱.۹۹	۱۶	۹۰۰	۲۳۵۸۸۲.۱۲	۱۱	۹۰۰	۰.۰۲%
۱۴	۸۰۵۷۱.۰۶	۱۰۰	۷۱۹.۹۹	۸۰۸۸۴.۴۸	۳۱	۹۰۰	۰.۳۹%	۴۱	۲۵۵۸۳۱.۱۲	۱۷	۹۰۰	۲۵۵۸۷۹.۶۰	۱۲	۹۰۰	۰.۰۲%
۱۵	۸۹۵۵۸.۱۸	۱۰۰	۸۶۹.۰۷	۸۹۸۹۶.۴۹	۲۷	۹۰۰	۰.۳۸%	۴۲	۲۷۹۱۴۷.۴۹	۲۷	۹۰۰	۲۷۹۲۶۷.۸۳	۱۵	۹۰۰	۰.۰۴%
۱۶	۱۰۱۲۵۷.۹۵	۱۰۰	۷۳۸.۸۳	۱۰۱۶۰۰.۱۳	۲۷	۹۰۰	۰.۳۴%	۴۳	۳۰۵۱۵۰.۵۳	۱۷	۹۰۰	۳۰۵۲۱۲.۲۵	۱۲	۹۰۰	۰.۰۲%
۱۷	۱۱۹۹۲۷.۸۵	۸۸	۹۰۰	۱۲۰۰۷۴.۴۹	۲۶	۹۰۰	۰.۱۲%	۴۴	۳۰۲۸۸۹.۳۸	۱۶	۹۰۰	۳۰۲۹۲۷.۰۸	۱۲	۹۰۰	۰.۰۱%
۱۸	۱۱۹۰۵۵.۱۴	۱۰۰	۶۶۸.۳۱	۱۱۹۳۴۹.۳۳	۲۸	۹۰۰	۰.۲۵%	۴۵	۲۴۹۳۲۲.۷۱	۲۳	۹۰۰	۲۴۹۴۱۳.۴۲	۱۳	۹۰۰	۰.۰۴%
۱۹	۱۲۱۱۲۷.۵۸	۹۵	۹۰۰	۱۲۱۳۱۴.۴۷	۲۵	۹۰۰	۰.۱۵%	۴۶	۳۴۰۹۵۶.۹۳	۱۴	۹۰۰	۳۴۱۰۱۰.۹۶	۱۱	۹۰۰	۰.۰۲%
۲۰	۱۱۶۵۱۷.۶۴	۷۶	۹۰۰	۱۱۶۶۳۹.۴۸	۲۶	۹۰۰	۰.۱۰%	۴۷	۲۹۸۷۷۷.۶۷	۱۴	۹۰۰	۲۹۸۸۲۲.۳۳	۱۱	۹۰۰	۰.۰۱%
۲۱	۱۴۸۹۱۱.۳۳	۷۰	۹۰۰	۱۴۹۱۰۷.۷۲	۲۳	۹۰۰	۰.۱۳%	۴۸	۳۲۷۴۳۷.۸۰	۱۶	۹۰۰	۳۲۷۴۹۳.۵۶	۱۱	۹۰۰	۰.۰۲%
۲۲	۱۵۹۵۱۱.۵۲	۵۷	۹۰۰	۱۵۹۶۶۵.۸۷	۲۰	۹۰۰	۰.۱۰%	۴۹	۳۵۱۸۷۰.۰۷	۱۱	۹۰۰	۳۵۱۹۰۴.۲۳	۹	۹۰۰	۰.۰۱%
۲۳	۱۴۱۹۴۶.۵۵	۳۷	۹۰۰	۱۴۱۹۶۵.۱۹	۱۲	۹۰۰	۰.۰۱%	۵۰	۳۳۰۸۷۴.۳۶	۱۸	۹۰۰	۳۳۰۹۵۸.۰۳	۱۲	۹۰۰	۰.۰۳%
۲۴	۱۸۵۸۱۱.۶۶	۴۵	۹۰۰	۱۸۵۹۲۵.۱۵	۲۱	۹۰۰	۰.۰۶%	۵۱	۳۳۲۷۰۳.۶۰	۱۴	۹۰۰	۳۳۲۷۵۶.۷۳	۱۱	۹۰۰	۰.۰۲%
۲۵	۱۶۹۶۷۸.۷۰	۴۱	۹۰۰	۱۶۹۸۰۷.۳۲	۱۹	۹۰۰	۰.۰۸%	۵۲	۳۱۹۵۸۳.۷۶	۱۰	۹۰۰	۳۱۹۶۰۲.۴۱	۸	۹۰۰	۰.۰۱%
۲۶	۱۵۱۸۸۰.۷۰	۶۰	۹۰۰	۱۵۲۰۴۰.۳۸	۲۲	۹۰۰	۰.۱۱%	۵۳	۳۷۰۱۰۱.۸۶	۱۷	۹۰۰	۳۷۰۱۳۳.۹۲	۱۲	۹۰۰	۰.۰۱%
۲۷	۱۸۹۲۶۲.۴۱	۴۲	۹۰۰	۱۸۹۳۵۱.۹۳	۲۰	۹۰۰	۰.۰۵%	۵۴	۳۷۲۶۹۹.۵۸	۱۴	۹۰۰	۳۷۲۸۰۳.۶۰	۱۱	۹۰۰	۰.۰۳%
۲۸	۱۸۰۱۵۰.۶۷	۳۶	۹۰۰	۱۸۰۲۹۴.۵۹	۲۰	۹۰۰	۰.۰۸%	۵۵	۳۵۴۵۴۳.۳۹	۱۰	۹۰۰	۳۵۴۵۸۸.۷۰	۸	۹۰۰	۰.۰۱%



شکل ۶. نمودار مقادیر اختلاف نسبی الگوریتم سوم در حالت سوم و الگوریتم دوم در ازای تعداد چاه‌ها.

بهینه است، اما موضوع بر سر سرعت عمل در یک زمان کوتاه است که در این شرایط الگوریتم سوم در حالت سوم در دست‌یابی به یک حد پایین خوب عملکرد بهتری داشته است. نکته‌ی دیگر این‌که اگر مقادیر اختلاف نسبی که به‌صورت $\frac{(LB_{LR-Max}-LB_{L-shaped})}{LB_{L-shaped}} \times ٪۱۰۰$ محاسبه شده‌اند، در ازای تعداد چاه‌ها در قالب نموداری ترسیم شوند، شکل ۶ حاصل می‌شود.

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مقادیر اختلاف نسبی با بزرگ شدن ابعاد مسئله، بیشتر می‌شود و الگوریتم سوم در حالت سوم عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم دوم از خود نشان می‌دهد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار مسئله‌ی مسیریابی دوره‌یی گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها در میدان‌های نفتی مشترک فراساحلی بررسی و یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای آن معرفی شد. با توجه به این‌که این مسئله جزء زیرمجموعه‌های مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی حمل‌ونقل محسوب می‌شود و در شرایط NP-hard قرار دارد، معرفی یک حد پایین به‌منظور استفاده در الگوریتم‌های حل از اهمیت بسزایی برخوردار است. به‌همین دلیل در این مقاله سه الگوریتم برمبنای روش‌های معروف بندرز، L-shaped و آزادسازی لاگرانژ برای توسعه‌ی حد پایین معرفی و پس از اعمال روی ۵۴ نمونه مسئله‌ی شبیه‌سازی شده در طیف وسیعی از مسائل با ابعاد کوچک تا بزرگ مورد بررسی و ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند.

در بین الگوریتم‌های دقیق اول و دوم مشخص شد که الگوریتم دوم از حدود پایین بهتری نسبت به الگوریتم اول به دلیل توانایی در ایجاد برش‌های بهینگی و

جدول ۵. نتایج حاصل از اعمال الگوریتم سوم با هفت حالت مختلف بر روی نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

تعداد چاه	حالت اول			حالت دوم			حالت سوم			حالت چهارم		
	حد پایین	تکرار	زمان	حد پایین	تکرار	زمان	حد پایین	تکرار	زمان	حد پایین	تکرار	زمان
۲	۱۳۹۵۸.۲۶	۱۰۰	۳۱.۶۴	۱۴۰۸۶.۴۷	۱۰۰	۴۲.۰۹	۱۴۰۸۶.۴۷	۱۰۰	۴۳.۶۳	۱۳۹۵۸.۲۶	۱۰۰	۳۹.۷۹
۳	۱۶۹۰۲.۷۲	۱۰۰	۵۰.۱۲	۱۶۹۰۸.۸۵	۱۰۰	۴۰.۷۶	۱۶۹۳۰.۵۷	۱۰۰	۷۰.۸۳	۱۶۸۸۱.۰۱	۱۰۰	۴۲.۵۸
۴	۲۶۴۴۰.۸۴	۱۰۰	۶۲.۰۷	۲۶۵۰۳.۴۸	۱۰۰	۵۳.۸۸	۲۶۶۰۳.۴۴	۱۰۰	۹۱.۴۲	۲۶۳۴۰.۸۸	۱۰۰	۵۶.۱۹
۵	۳۵۶۸۲.۵۱	۱۰۰	۵۸.۱۱	۳۵۷۴۷.۳۴	۱۰۰	۷۵.۲۳	۳۵۸۴۰.۸۶	۱۰۰	۷۲۱.۶۴	۳۵۵۸۸.۹۹	۱۰۰	۶۴.۹۱
۶	۲۷۳۷۸.۸۰	۱۰۰	۶۵.۴۴	۲۷۳۸۵.۵۲	۱۰۰	۹۲.۶۴	۲۷۴۸۲.۲۵	۱۰۰	۵۹۱.۵۵	۲۷۲۸۲.۰۷	۱۰۰	۷۰.۵۷
۷	۵۴۰۱۳.۱۵	۱۰۰	۹۳.۲۷	۵۴۲۷۷.۰۲	۱۰۰	۱۸۸.۹۹	۵۴۳۲۲.۱۵	۲	۹۰۰	۵۳۹۶۸.۰۲	۱۰۰	۹۰.۲۷
۸	۴۴۹۸۹.۲۲	۱۰۰	۱۱۳.۳۸	۴۵۱۹۸.۴۷	۱	۹۰۰	۴۵۲۷۹.۵۰	۱	۹۰۰	۴۴۹۱۲.۴۳	۱۰۰	۱۲۱.۲۸
۹	۴۲۲۲۷.۹۱	۱۰۰	۹۹.۶۱	۴۲۴۲۸.۹۴	۱	۹۰۰	۴۲۵۶۳.۲۳	۱	۹۰۰	۴۲۱۲۸.۳۲	۱۰۰	۹۸.۴۸
۱۰	۶۲۷۳۱.۲۲	۱۰۰	۱۳۰.۰۰	۶۲۷۹۱.۱۳	۱	۹۰۰	۶۳۰۵۶.۶۸	۱	۹۰۰	۶۲۴۷۴.۶۶	۱۰۰	۱۵۲.۶۴
۱۱	۷۹۹۲۰.۸۲	۱۰۰	۲۷۴.۸۱	۷۹۹۵۸.۸۴	۱	۹۰۰	۸۰۰۸۱.۳۵	۱	۹۰۰	۷۹۷۷۷.۵۳	۱۰۰	۲۷۶.۱۷
۱۲	۷۳۹۰۰.۸۷	۱۰۰	۲۰۱.۰۴	۷۳۹۹۳.۱۰	۱	۹۰۰	۷۴۲۲۷.۱۰	۱	۹۰۰	۷۳۶۷۷.۴۳	۱۰۰	۱۷۸.۶۸
۱۳	۹۰۲۶۷.۴۱	۱۰۰	۲۰۲.۲۲	۹۰۳۴۶.۸۰	۱	۹۰۰	۹۰۵۶۳.۵۰	۱	۹۰۰	۸۹۹۳۱.۶۶	۱۰۰	۱۴۶.۶۱
۱۴	۸۰۶۹۶.۰۰	۱۰۰	۳۲۹.۳۸	۸۰۸۱۵.۶۲	۱	۹۰۰	۸۰۹۸۳.۲۸	۱	۹۰۰	۸۰۴۷۶.۳۵	۱۰۰	۳۲۵.۸۱
۱۵	۸۹۶۱۶.۶۵	۷۸	۹۰۰	۸۹۸۰۲.۷۸	۱	۹۰۰	۸۹۸۷۹.۰۹	۱	۹۰۰	۸۹۵۰۶.۵۰	۱۰۰	۳۸۸.۴۶
۱۶	۱۰۱۴۵۷.۵۴	۱۰۰	۴۱۸.۲۳	۱۰۱۵۵۷.۳۵	۱	۹۰۰	۱۰۱۶۹۵.۲۵	۱	۹۰۰	۱۰۱۲۴۹.۴۱	۱۰۰	۲۷۹.۹۰
۱۷	۱۲۰۳۲۸.۶۵	۱۰۰	۴۷۱.۷۲	۱۲۰۲۸۷.۶۸	۱	۹۰۰	۱۲۰۵۹۹.۴۰	۱	۹۰۰	۱۱۹۹۱۹.۵۶	۱۰۰	۴۵۷.۳۴
۱۸	۱۱۹۴۵۷.۶۰	۱۰۰	۲۹۴.۷۰	۱۱۹۲۹۲.۰۴	۱	۹۰۰	۱۱۹۷۳۳.۴۵	۱	۹۰۰	۱۱۸۹۷۱.۹۰	۱۰۰	۲۳۸.۷۸
۱۹	۱۲۱۳۳۷.۸۶	۷۸	۹۰۰	۱۲۱۲۹۲.۲۷	۱	۹۰۰	۱۲۱۵۴۴.۳۴	۱	۹۰۰	۱۲۱۰۵۶.۸۴	۱۰۰	۳۳۷.۰۹
۲۰	۱۱۶۷۵۷.۱۶	۱۰۰	۵۷۸.۹۰	۱۱۶۷۷۴.۰۸	۱	۹۰۰	۱۱۶۹۹۶.۷۸	۱	۹۰۰	۱۱۶۵۱۳.۴۸	۱۰۰	۵۷۷.۵۲
۲۱	۱۴۹۱۹۷.۵۸	۱	۹۰۰	۱۴۹۳۱۵.۶۶	۱	۹۰۰	۱۴۹۴۹۷.۸۱	۱	۹۰۰	۱۴۸۸۹۹.۴۰	۱۰۰	۶۲۶.۶۳
۲۲	۱۵۹۷۱۲.۹۱	۱	۹۰۰	۱۵۹۸۰۹.۸۷	۱	۹۰۰	۱۵۹۹۸۹.۹۸	۱	۹۰۰	۱۵۹۵۰۶.۲۲	۱۰۰	۷۸۵.۱۷
۲۳	۱۴۲۲۰۲.۶۶	۱	۹۰۰	۱۴۲۲۵۱.۲۵	۱	۹۰۰	۱۴۲۴۴۳.۹۶	۱	۹۰۰	۱۴۱۹۳۵.۱۷	۱۰۰	۸۷۷.۰۵
۲۴	۱۸۶۳۲۶.۲۶	۱	۹۰۰	۱۸۶۱۴۵.۰۵	۱	۹۰۰	۱۸۶۴۶۷.۱۹	۱	۹۰۰	۱۸۵۸۱۱.۶۶	۸۴	۹۰۰
۲۵	۱۷۰۰۴۷.۴۵	۱	۹۰۰	۱۶۹۸۶۸.۷۰	۱	۹۰۰	۱۷۰۱۹۸.۱۳	۱	۹۰۰	۱۶۹۶۷۸.۷۰	۸۹	۹۰۰
۲۶	۱۵۲۲۹۵.۸۳	۱	۹۰۰	۱۵۲۱۶۴.۳۲	۱	۹۰۰	۱۵۲۴۳۵.۸۹	۱	۹۰۰	۱۵۱۸۷۵.۷۶	۱۰۰	۷۴۷.۷۲
۲۷	۱۸۹۴۱۴.۰۰	۱	۹۰۰	۱۸۹۵۴۱.۸۷	۱	۹۰۰	۱۸۹۶۸۲.۳۱	۱	۹۰۰	۱۸۹۲۵۹.۳۷	۷۹	۹۰۰
۲۸	۱۸۰۵۴۸.۵۴	۱	۹۰۰	۱۸۰۵۱۸.۷۴	۱	۹۰۰	۱۸۰۸۷۲.۷۶	۱	۹۰۰	۱۸۰۱۴۸.۰۵	۷۲	۹۰۰
۲۹	۱۹۶۸۹۰.۲۶	۱	۹۰۰	۱۹۶۷۹۵.۹۹	۱	۹۰۰	۱۹۷۱۶۵.۴۴	۱	۹۰۰	۱۹۶۴۸۸.۷۹	۵۲	۹۰۰
۳۰	۲۰۲۱۳۱.۳۱	۱	۹۰۰	۲۰۲۰۴۵.۲۱	۱	۹۰۰	۲۰۲۳۶۸.۹۳	۱	۹۰۰	۲۰۱۷۴۷.۷۷	۹۴	۹۰۰
۳۱	۲۱۷۵۸۰.۲۸	۱	۹۰۰	۲۱۷۵۵۹.۹۲	۱	۹۰۰	۲۱۷۹۴۴.۶۳	۱	۹۰۰	۲۱۷۱۶۴.۹۳	۷۷	۹۰۰
۳۲	۲۰۶۴۳۶.۱۲	۱	۹۰۰	۲۰۶۴۲۶.۲۸	۱	۹۰۰	۲۰۶۸۱۷.۴۶	۱	۹۰۰	۲۰۶۰۱۹.۱۰	۶۳	۹۰۰
۳۳	۲۰۲۴۰۳.۰۵	۱	۹۰۰	۲۰۲۳۴۶.۷۸	۱	۹۰۰	۲۰۲۶۸۰.۴۰	۱	۹۰۰	۲۰۲۰۴۸.۶۰	۴۶	۹۰۰
۳۴	۲۰۱۵۳۶.۵۱	۱	۹۰۰	۲۰۱۶۳۷.۲۲	۱	۹۰۰	۲۰۱۹۵۹.۴۳	۱	۹۰۰	۲۰۱۱۸۳.۴۸	۴۳	۹۰۰
۳۵	۲۱۴۰۴۲.۲۹	۱	۹۰۰	۲۱۴۰۹۷.۵۳	۱	۹۰۰	۲۱۴۳۵۰.۶۸	۱	۹۰۰	۲۱۳۷۳۵.۵۷	۴۰	۹۰۰
۳۶	۲۲۲۹۷۳.۲۵	۱	۹۰۰	۲۲۳۰۲۸.۲۸	۱	۹۰۰	۲۲۳۲۴۴.۶۷	۱	۹۰۰	۲۲۲۶۸۶.۲۵	۵۴	۹۰۰
۳۷	۲۳۳۰۲۰.۷۸	۱	۹۰۰	۲۳۲۸۹۹.۰۱	۱	۹۰۰	۲۳۳۲۸۳.۲۰	۱	۹۰۰	۲۳۲۶۰۰.۰۴	۳۴	۹۰۰
۳۸	۲۴۴۳۵۳.۹۴	۱	۹۰۰	۲۴۴۷۵۶.۵۶	۱	۹۰۰	۲۴۴۹۳۹.۷۱	۱	۹۰۰	۲۴۴۱۹۵.۹۲	۵۵	۹۰۰
۳۹	۲۳۸۴۲۷.۲۲	۱	۹۰۰	۲۳۸۳۸۱.۳۰	۱	۹۰۰	۲۳۸۷۸۲.۴۲	۱	۹۰۰	۲۳۷۹۸۲.۸۲	۳۴	۹۰۰
۴۰	۲۳۶۲۰۸.۶۶	۱	۹۰۰	۲۳۶۲۲۲.۶۸	۱	۹۰۰	۲۳۶۵۵۷.۸۹	۱	۹۰۰	۲۳۵۸۳۱.۹۹	۲۳	۹۰۰
۴۱	۲۵۶۲۸۰.۱۰	۱	۹۰۰	۲۵۶۲۵۴.۴۱	۱	۹۰۰	۲۵۶۶۵۵.۶۱	۱	۹۰۰	۲۵۵۸۳۱.۱۲	۲۷	۹۰۰
۴۲	۲۷۹۵۴۲.۷۵	۱	۹۰۰	۲۷۹۶۵۳.۴۰	۱	۹۰۰	۲۸۰۰۸.۰۶	۱	۹۰۰	۲۷۹۱۴۷.۴۹	۴۳	۹۰۰
۴۳	۳۰۵۵۳۲.۶۳	۱	۹۰۰	۳۰۵۵۶۱.۹۵	۱	۹۰۰	۳۰۵۹۰۳.۲۸	۱	۹۰۰	۳۰۵۱۵۰.۵۳	۲۸	۹۰۰
۴۴	۳۰۳۰۸۹.۲۳	۱	۹۰۰	۳۰۳۲۷۲.۳۲	۱	۹۰۰	۳۰۳۴۷۴.۹۱	۱	۹۰۰	۳۰۲۸۸۹.۳۸	۲۸	۹۰۰
۴۵	۲۴۹۶۰۲.۳۰	۱	۹۰۰	۲۴۹۷۹۶.۳۴	۱	۹۰۰	۲۵۰۰۷۵.۹۸	۱	۹۰۰	۲۴۹۳۰۹.۲۲	۳۸	۹۰۰
۴۶	۳۴۱۴۲۳.۳۷	۱	۹۰۰	۳۴۱۳۶۹.۱۹	۱	۹۰۰	۳۴۱۸۳۳.۴۷	۱	۹۰۰	۳۴۰۹۵۶.۹۳	۲۳	۹۰۰
۴۷	۲۹۹۱۱۸.۶۰	۱	۹۰۰	۲۹۹۱۳۲.۵۵	۱	۹۰۰	۲۹۹۴۴۲.۰۴	۱	۹۰۰	۲۹۸۷۷۷.۴۷	۲۵	۹۰۰
۴۸	۳۲۷۷۷۸.۹۷	۱	۹۰۰	۳۲۷۹۲۰.۸۳	۱	۹۰۰	۳۲۸۲۷۴.۷۰	۱	۹۰۰	۳۲۷۴۱۷.۱۶	۲۵	۹۰۰
۴۹	۳۵۲۱۹۹.۶۳	۱	۹۰۰	۳۵۲۳۱۱.۵۹	۱	۹۰۰	۳۵۲۶۶۶.۳۹	۱	۹۰۰	۳۵۱۸۷۰.۰۷	۱۶	۹۰۰
۵۰	۳۳۱۳۲۷.۷۸	۱	۹۰۰	۳۳۱۴۱۱.۲۷	۱	۹۰۰	۳۳۱۸۳۹.۵۶	۱	۹۰۰	۳۳۰۸۷۴.۳۶	۲۹	۹۰۰
۵۱	۳۳۳۰۹۵.۳۵	۱	۹۰۰	۳۳۳۲۶۲.۱۶	۱	۹۰۰	۳۳۳۶۴۳.۵۲	۱	۹۰۰	۳۳۲۷۰۳.۶۰	۲۰	۹۰۰
۵۲	۳۱۹۸۵۳.۰۷	۱	۹۰۰	۳۲۰۰۷۲.۶۱	۱	۹۰۰	۳۲۰۳۱۵.۵۴	۱	۹۰۰	۳۱۹۵۸۳.۷۶	۱۴	۹۰۰
۵۳	۳۷۰۴۷۲.۶۳	۱	۹۰۰	۳۷۰۵۶۷.۸۰	۱	۹۰۰	۳۷۰۸۹۳.۸۸	۱	۹۰۰	۳۷۰۱۰۱.۳۹	۳۰	۹۰۰
۵۴	۳۷۳۰۸۵.۵۷	۱	۹۰۰	۳۷۳۲۴۰.۳۵	۱	۹۰۰	۳۷۳۶۰۹.۳۹	۱	۹۰۰	۳۷۲۶۹۹.۵۸	۲۴	۹۰۰
۵۵	۳۵۴۸۸۲.۹۵	۱	۹۰۰	۳۵۵۰۶۴.۴۴	۱	۹۰۰	۳۵۵۳۶۹.۴۷	۱	۹۰۰	۳۵۴۵۴۰.۳۲	۱۹	۹۰۰

ادامه‌ی جدول ۵. نتایج حاصل از اعمال الگوریتم سوم با هفت حالت مختلف بر روی نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

تعداد چاه	حالت پنجم			حالت ششم			حالت هفتم			اختلاف نسبی
	حد پایین	تکرار	زمان	حد پایین	تکرار	زمان	حد پایین	تکرار	زمان	
۲	۱۳۹۵۸.۲۶	۱۰۰	۳۹.۹۱	۱۴۰۸۶.۴۷	۱۰۰	۳۶.۹۷	۱۳۹۵۸.۲۶	۱۰۰	۳۰.۷۸	۰.۹۲%
۳	۱۶۹۰۲.۷۲	۱۰۰	۴۰.۳۸	۱۶۹۰۸.۸۵	۱۰۰	۶۰.۸۲	۱۶۸۸۱.۰۱	۱۰۰	۳۸.۵۴	۰.۲۹%
۴	۲۶۴۴۰.۸۴	۱۰۰	۵۶.۸۵	۲۶۵۰۳.۴۸	۱۰۰	۷۸.۵۳	۲۶۳۴۰.۸۸	۱۰۰	۴۶.۸۸	۱.۰۰%
۵	۳۵۶۸۲.۵۱	۱۰۰	۷۲.۷۶	۳۵۷۴۷.۳۴	۱۰۰	۷۳۶.۶۵	۳۵۵۸۸.۹۹	۱۰۰	۶۴.۸۸	۰.۷۱%
۶	۲۷۳۷۸.۸۰	۱۰۰	۷۹.۲۱	۲۷۳۸۵.۵۲	۱۰۰	۶۹۷.۷۲	۲۷۲۸۲.۰۷	۱۰۰	۶۲.۴۴	۰.۷۳%
۷	۵۴۰۱۳.۱۵	۱۰۰	۱۱۸.۶۱	۵۴۲۷۷.۰۲	۲	۹۰۰	۵۳۹۶۸.۰۲	۱۰۰	۷۶.۱۸	۰.۶۶%
۸	۴۴۹۸۹.۲۲	۱۰۰	۱۲۹.۸۸	۴۵۲۰۴.۵۵	۱	۹۰۰	۴۴۹۱۲.۴۳	۱۰۰	۱۰۶.۳۸	۰.۸۲%
۹	۴۲۲۲۷.۹۱	۱۰۰	۱۱۴.۳۲	۴۲۴۲۸.۹۴	۱	۹۰۰	۴۲۱۲۸.۳۲	۱۰۰	۱۰۱.۲۱	۱.۰۳%
۱۰	۶۲۷۳۱.۲۲	۱۰۰	۱۷۶.۴۵	۶۲۷۹۱.۱۴	۱	۹۰۰	۶۲۴۷۴.۶۶	۱۰۰	۱۳۷.۱۵	۰.۹۳%
۱۱	۷۹۹۲۰.۸۲	۱۰۰	۵۸۲.۳۷	۷۹۹۵۹.۰۲	۱	۹۰۰	۷۹۷۷۷.۵۳	۱۰۰	۲۳۱.۳۴	۰.۳۸%
۱۲	۷۳۹۰۰.۸۷	۱۰۰	۳۳۱.۹۳	۷۳۹۹۲.۶۵	۱	۹۰۰	۷۳۶۷۷.۴۳	۱۰۰	۱۵۰.۲۸	۰.۷۵%
۱۳	۹۰۲۶۷.۴۱	۱۰۰	۴۰۴.۴۱	۹۰۳۳۰.۶۴	۱	۹۰۰	۸۹۹۳۱.۶۶	۱۰۰	۱۷۳.۶۶	۰.۷۰%
۱۴	۸۰۶۹۶.۰۰	۱۰۰	۶۱۱.۶۴	۸۰۸۱۶.۶۰	۱	۹۰۰	۸۰۴۷۶.۳۵	۱۰۰	۲۷۸.۹۴	۰.۶۳%
۱۵	۸۹۶۱۶.۶۵	۱۰۰	۵۹۲.۵۴	۸۹۸۰۳.۱۰	۱	۹۰۰	۸۹۵۰۶.۵۰	۱۰۰	۳۲۶.۲۵	۰.۴۲%
۱۶	۱۰۱۴۵۷.۵۴	۱۰۰	۵۶۲.۹۹	۱۰۱۵۵۶.۸۳	۱	۹۰۰	۱۰۱۲۴۹.۴۱	۱۰۰	۲۹۹.۱۲	۰.۴۴%
۱۷	۱۲۰۳۲۸.۶۵	۳۶	۹۰۰	۱۲۰۲۸۹.۸۹	۱	۹۰۰	۱۱۹۹۱۹.۵۶	۱۰۰	۳۹۵.۹۰	۰.۵۷%
۱۸	۱۱۹۴۵۷.۶۰	۱۰۰	۶۳۷.۰۲	۱۱۹۲۹۵.۸۳	۱	۹۰۰	۱۱۸۹۷۱.۹۰	۱۰۰	۲۴۱.۸۶	۰.۶۴%
۱۹	۱۲۱۳۳۷.۸۶	۱۰۰	۸۰۴.۸۸	۱۲۱۲۸۶.۳۹	۱	۹۰۰	۱۲۱۰۵۶.۸۴	۱۰۰	۳۷۳.۸۲	۰.۴۰%
۲۰	۱۱۶۷۵۷.۱۶	۷۷	۹۰۰	۱۱۶۷۷۳.۶۲	۱	۹۰۰	۱۱۶۵۱۳.۴۸	۱۰۰	۵۱۸.۷۴	۰.۴۱%
۲۱	۱۴۹۲۰۲.۵۰	۱	۹۰۰	۱۴۹۳۱۶.۶۲	۱	۹۰۰	۱۴۸۸۹۹.۴۰	۱۰۰	۵۴۸.۳۸	۰.۴۰%
۲۲	۱۵۹۷۲۰.۰۸	۱	۹۰۰	۱۵۹۸۰۹.۹۶	۱	۹۰۰	۱۵۹۵۰۶.۲۲	۱۰۰	۶۷۸.۰۴	۰.۳۰%
۲۳	۱۴۲۲۲۱.۹۲	۳۶	۹۰۰	۱۴۲۲۵۱.۲۵	۱	۹۰۰	۱۴۱۹۳۵.۱۷	۱۰۰	۷۸۸.۱۲	۰.۳۶%
۲۴	۱۸۶۳۱۷.۹۴	۱	۹۰۰	۱۸۶۱۵۰.۷۴	۱	۹۰۰	۱۸۵۸۱۱.۶۶	۹۹	۹۰۰	۰.۳۵%
۲۵	۱۷۰۰۷۴.۳۲	۲	۹۰۰	۱۶۹۸۶۸.۶۸	۱	۹۰۰	۱۶۹۶۷۸.۷۰	۹۹	۹۰۰	۰.۳۱%
۲۶	۱۵۲۳۳۲.۱۹	۲۱	۹۰۰	۱۵۲۱۶۴.۶۴	۱	۹۰۰	۱۵۱۸۷۵.۷۶	۱۰۰	۶۴۵.۳۱	۰.۳۷%
۲۷	۱۸۹۴۲۸.۸۰	۱	۹۰۰	۱۸۹۵۴۲.۵۱	۱	۹۰۰	۱۸۹۲۵۹.۳۷	۹۲	۹۰۰	۰.۲۲%
۲۸	۱۸۰۶۰۱.۶۰	۲	۹۰۰	۱۸۰۵۱۸.۷۴	۱	۹۰۰	۱۸۰۱۴۸.۰۵	۸۰	۹۰۰	۰.۴۰%
۲۹	۱۹۷۰۱۶.۸۳	۱	۹۰۰	۱۹۶۷۹۶.۰۰	۱	۹۰۰	۱۹۶۴۸۸.۷۹	۶۱	۹۰۰	۰.۳۴%
۳۰	۲۰۲۰۹۶.۰۶	۱	۹۰۰	۲۰۲۰۴۵.۲۱	۱	۹۰۰	۲۰۱۷۴۷.۷۵	۱۰۰	۸۵۵.۹۸	۰.۳۱%
۳۱	۲۱۷۶۱۳.۳۹	۱	۹۰۰	۲۱۷۵۶۲.۵۹	۱	۹۰۰	۲۱۷۱۶۴.۹۳	۹۱	۹۰۰	۰.۳۶%
۳۲	۲۰۶۴۸۴.۱۹	۱	۹۰۰	۲۰۶۴۲۵.۹۸	۱	۹۰۰	۲۰۶۰۱۹.۱۰	۷۲	۹۰۰	۰.۳۹%
۳۳	۲۰۲۴۸۱.۶۷	۱	۹۰۰	۲۰۲۳۴۸.۴۳	۱	۹۰۰	۲۰۲۰۴۸.۶۰	۵۴	۹۰۰	۰.۳۱%
۳۴	۲۰۱۶۷۶.۶۱	۱	۹۰۰	۲۰۱۶۳۷.۲۲	۱	۹۰۰	۲۰۱۱۸۳.۴۸	۴۸	۹۰۰	۰.۳۹%
۳۵	۲۱۴۰۴۱.۷۸	۱	۹۰۰	۲۱۴۱۰۷.۳۶	۱	۹۰۰	۲۱۳۷۳۵.۵۷	۴۵	۹۰۰	۰.۲۹%
۳۶	۲۲۲۹۸۸.۱۱	۱	۹۰۰	۲۲۳۰۲۷.۹۶	۱	۹۰۰	۲۲۲۶۸۶.۲۵	۶۰	۹۰۰	۰.۲۵%
۳۷	۲۳۳۰۸۳.۵۰	۱	۹۰۰	۲۳۲۸۹۹.۰۲	۱	۹۰۰	۲۳۲۶۰۰.۰۴	۳۹	۹۰۰	۰.۲۹%
۳۸	۲۴۴۳۶۶.۰۱	۱	۹۰۰	۲۴۴۷۶۹.۹۷	۱	۹۰۰	۲۴۴۱۹۵.۹۲	۶۴	۹۰۰	۰.۳۰%
۳۹	۲۳۸۴۶۷.۴۸	۱	۹۰۰	۲۳۸۳۸۱.۳۰	۱	۹۰۰	۲۳۷۹۸۲.۸۲	۴۷	۹۰۰	۰.۳۴%
۴۰	۲۳۶۲۵۷.۰۹	۱	۹۰۰	۲۳۶۱۷۷.۰۶	۱	۹۰۰	۲۳۵۸۳۱.۹۹	۳۲	۹۰۰	۰.۳۱%
۴۱	۲۵۶۳۴۰.۹۱	۱	۹۰۰	۲۵۶۲۵۳.۴۶	۱	۹۰۰	۲۵۵۸۳۱.۱۲	۳۶	۹۰۰	۰.۳۲%
۴۲	۲۷۹۵۲۵.۲۸	۱	۹۰۰	۲۷۹۶۵۳.۴۲	۱	۹۰۰	۲۷۹۱۴۷.۴۹	۵۶	۹۰۰	۰.۳۱%
۴۳	۳۰۵۵۲۱.۰۱	۱	۹۰۰	۳۰۵۵۶۱.۹۵	۱	۹۰۰	۳۰۵۱۵۰.۵۳	۳۶	۹۰۰	۰.۲۵%
۴۴	۳۰۳۰۶۹.۴۲	۱	۹۰۰	۳۰۳۲۷۳.۲۳	۱	۹۰۰	۳۰۲۸۸۹.۳۸	۳۵	۹۰۰	۰.۱۹%
۴۵	۲۴۹۶۰۱.۵۴	۱	۹۰۰	۲۴۹۷۹۶.۵۱	۱	۹۰۰	۲۴۹۳۰۹.۲۲	۵۰	۹۰۰	۰.۳۱%
۴۶	۳۴۱۴۳۳.۴۲	۱	۹۰۰	۳۴۱۳۸۱.۰۹	۱	۹۰۰	۳۴۰۹۵۶.۹۳	۳۰	۹۰۰	۰.۲۶%
۴۷	۲۹۹۱۱۰.۰۶	۱	۹۰۰	۲۹۹۱۲۷.۰۰	۱	۹۰۰	۲۹۸۷۷۷.۴۷	۳۰	۹۰۰	۰.۲۲%
۴۸	۳۲۷۷۸۰.۹۷	۱	۹۰۰	۳۲۷۹۱۸.۰۴	۱	۹۰۰	۳۲۷۴۱۷.۱۶	۳۴	۹۰۰	۰.۲۶%
۴۹	۳۵۲۲۱۱.۲۲	۱	۹۰۰	۳۵۲۳۱۱.۵۹	۱	۹۰۰	۳۵۱۸۷۰.۰۷	۲۳	۹۰۰	۰.۲۳%
۵۰	۳۳۱۳۲۹.۳۹	۱	۹۰۰	۳۳۱۴۱۱.۳۳	۱	۹۰۰	۳۳۰۸۷۴.۳۶	۴۱	۹۰۰	۰.۲۹%
۵۱	۳۳۳۱۱۲.۸۲	۱	۹۰۰	۳۳۳۲۶۴.۵۱	۱	۹۰۰	۳۳۲۷۰۳.۶۰	۲۹	۹۰۰	۰.۲۸%
۵۲	۳۱۹۸۴۰.۲۷	۱	۹۰۰	۳۲۰۰۳۶.۷۸	۱	۹۰۰	۳۱۹۵۸۳.۷۶	۲۰	۹۰۰	۰.۲۳%
۵۳	۳۷۰۴۶۳.۲۲	۱	۹۰۰	۳۷۰۵۴۸.۴۳	۱	۹۰۰	۳۷۰۱۰۱.۳۹	۳۷	۹۰۰	۰.۲۱%
۵۴	۳۷۳۰۷۷.۸۶	۱	۹۰۰	۳۷۳۲۴۳.۱۲	۱	۹۰۰	۳۷۲۶۹۹.۵۸	۲۸	۹۰۰	۰.۲۴%
۵۵	۳۵۴۸۶۰.۷۵	۱	۹۰۰	۳۵۵۰۶۶.۰۳	۱	۹۰۰	۳۵۴۵۴۰.۳۲	۲۲	۹۰۰	۰.۲۳%

شدنی بیشتر برخوردار بود. درباره‌ی الگوریتم سوم، هفت حالت مختلف اجرا معرفی شد و در بین آنها حالت سوم که همانا حذف محدودیت تلاقی متغیرهای دودویی و پیوسته‌ی خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی و انتقال به تابع هدف با ضرایب لاگرانژ بود، توانست حدود پایین بهتری در تمام نمونه‌های شبیه‌سازی شده تولید کند. در نهایت در مقایسه‌ی بین الگوریتم دوم و الگوریتم سوم مشخص شد که می‌توان با تکیه بر الگوریتم سوم در حالت سوم، حدود پایین بهتری در زمان کمتری برای مسائل مدنظر این مقاله با ابعاد بزرگ به‌دست آورد.

مسئله‌ی مسیریابی دوره‌یی گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها در میدان‌های نفتی مشترک فراساحلی مسئله‌یی است که به‌ندرت مورد تحقیق قرار گرفته است و یک زمینه‌ی بسیار مستعد برای انجام تحقیقات آتی است. بنابراین، تحقیق صورت‌گرفته در این مقاله از زوایای مختلف ادامه‌پذیر و تکمیل‌پذیر است. یکی از زوایای پیشنهادی این مقاله برای کاربردی‌ترشدن مدل این مقاله، در نظرگرفتن زمان خدمت درون‌چاهی به‌صورت احتمالی و در نظرگرفتن بیشینه‌ی زمانی است که تولید چاه‌های مشترک (با توجه به حساسیت‌های آن) می‌تواند متوقف باشد که در صورت انحراف از آن، جریمه‌یی در تابع هدف در نظرگرفته شود. همچنین نظر به این‌که، خدمت‌رسانی به چاه‌های نفتی در بستر دریا صورت می‌گیرد، در مدل توسعه داده شده، جنبه‌ی تغییرات آب‌وهوایی و تأثیر آن به‌صورت مؤلفه‌های احتمالی در زمان‌های سفر و خدمت‌رسانی در نظرگرفته شود. همان‌گونه که در بخش نتایج عددی دیده شد، ضعف الگوریتم‌های بندرز و L-shaped در مقایسه با الگوریتم آزادسازی لاگرانژ بود. بنابراین با این مقدمه، یکی دیگر از زوایای پیشنهادی این مقاله، شتاب‌دهی الگوریتم‌های تجزیه‌ی بندرز و L-shaped از طریق توسعه‌ی یک الگوریتم هیورستیک (با هدف تولید یک حد بالای خوب) و ترکیب آن با این الگوریتم‌هاست تا بدین وسیله حدود پایین تولید شده در فرایند اجرایی الگوریتم‌ها در این مقاله بهبود یابد. همچنین فرصت تکمیل این تحقیق از زاویه‌ی دیگر، از طریق تعریف سازوکارهای جدیدی برای تعریف ضرایب لاگرانژ حاصل می‌شود تا بدین‌وسیله حدود پایین به دست آمده توسط الگوریتم آزادسازی لاگرانژ در این مقاله بهبود یابد.

پانوشت‌ها

1. mixed integr programming
2. periodic vehicle routing problem
3. vehicle routing problem
4. upper bound
5. lower bound
6. customizing
7. polyhedron
8. optimality cut
9. feasibility cut
10. primary problem
11. sub problem
12. dual sub problem
13. benders master problem
14. sub sub problem
15. dual sub sub problem
16. http://www.iooc.co.ir/khark.aspx
    http://www.iooc.co.ir/lavan.aspx
    http://www.iooc.co.ir/siri.aspx

منابع (References)

1. Francis, P., Smilowitz, K. and Tzur, M. "The period vehicle routing problem and its extensions", In The vehicle routing problem: latest advances and new challenges, B. Golden, S. Raghavan , E. Wasil, Ed., **43**, pp. 73-102, Springer, New York (2008).
2. Beltrami, E. and Bodin, L. "Networks and vehicle routing for municipal waste collection", *Networks*, **4**(1), pp. 65-94 (1974).
3. Bommisetty, D., Dessouky, M. and Jacobs, L. "Scheduling collection of recyclable material at northern illinois university campus using a two-phase algorithm", *Comput. Ind. Eng.*, **35**(3-4), pp. 435-438 (1998).
4. Baptista, S., Oliveira, R.C. and Zuquete, E. "A period vehicle routing case study", *Eur. J. Oper. Res.*, **139**(2), pp. 220-229 (2002).
5. Teixeira, J., Antunes, A.P. and Pinho de Sousa, J. "Recyclable waste collection planning. A case study", *Eur. J. Oper. Res.*, **158**(3), pp. 543-554 (2004).
6. Cho, B.M. and Lee, D.H. "A heuristic algorithm for the period vehicle routing problem: minimizing the fleet size", *Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference* (2006).
7. Butler, M., Williams, H.P. and Yarrow, L.A. "The 2-period travelling salesman problem applied to milk collection in Ireland", *Comput. Optim. Appl.*, **7**(3), pp. 291-306 (1997).
8. Claassen, G.D.H. and Hendriks, T.H.B. "An application of Special ordered sets to a periodic milk collection problem", *Eur. J. Oper. Res.*, **180**(2), pp. 754-769 (2007).
9. Alshamrania, A., Mathur, K. and Ballou, R.H. "Reverse logistics: simultaneous design of delivery routes and returns strategies", *Comput. Oper. Res.*, **34**(2), pp. 595-619 (2007).
10. Zapfel, G. and Bogl, M. "Multi-period vehicle routing and crew scheduling with outsourcing options", *Int. J. Production Economics*, **113**(2), pp. 980-996 (2008).
11. Rusdiansyah, A., Tsao, D. "An integrated model of the periodic delivery problems for vending-machine supply chains", *J. Food Eng.*, **70**(3), pp. 421-434 (2005).
12. Maya, P., Sorensen, K. and Goos, P. "A metaheuristic for a teaching assistant assignment-routing problem", *Comput. Oper. Res.*, **39**(2), pp. 249-258 (2011).
13. Hassannayebi, E., Zegordi, S.H. and Yaghini, M. "Train timetabling in urban rail transit line using lagrangian relaxation approach", *Appl. Math. Model.*, **40**(23-24), pp. 9892-9913 (2016).

14. Blakeley, F., Arguello, B., Cao, B. and et al. "Optimizing periodic maintenance operations for schindler elevator corporation", *Interfaces*, **33**(1), pp. 67-79 (2003).
15. Cornillier, F., Boctor, F.F., Laporte, G. and et al. "A heuristic for the multi-period petrol station replenishment problem", *Eur. J. Oper. Res.*, **191**(2), pp. 295-305 (2008).
16. Ngueveu, S.U., Prins, C. and Calvo, R.W. "Lower and upper bounds for the m-peripatetic vehicle routing problem", *4OR-Q. J. Oper. Res.*, **8**(4), pp. 387-406 (2010).
17. Lin, Y.H., Batta, R., Rogerson, P.A. and et al. "A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster", *Socio Econ. Plan. Sci.*, **45**(4), pp. 132-145 (2011).
18. Sopot, E. and Gribkovskaia, I. "Routing of supply vessels to with deliveries and pickups of multiple commodities", *Procedia Comput. Sci.*, **31**, pp. 910-917 (2014).
19. Maisiuk, Y. and Gribkovskaia, I. "Fleet sizing for offshore supply vessels with stocastic sailing and service times", *Procedia Comput. Sci.*, **31**, pp. 939-948 (2014).
20. Cuesta, E.F., Andersson, H., Fagerholt, K. and et al. "Vessel routing with pickups and deliveries: an application to the supply of offshore oil platforms", *Comput Oper. Res.*, **79**, pp. 140-147 (2016).
21. Halvorsen-Wearea, E.E., Gundegjerde, C., Halvorsen, I.B. and et al. "Vessel fleet analysis for maintenance operations at offshore wind farms", *Enrgy. Proced.*, **35**, pp. 167-176 (2013).
22. Halvorsen-Weare, E.E., Fagerholt, K., Nonas, L.M. and et al. "Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels", *Eur. J. Oper. Res.*, **223**(2), pp. 508-517 (2012).
23. Halskau, y. "Offshore helicopter routing in a hub and spoke fashion: minimizing expected number of fatalities", *Procedia Comput. Sci.*, **31**, pp. 1124-1132 (2014).
24. Hermeto, l.d.S., Filho, l.J.M. and Bahiense, L. "Logistics network planning for offshore air transport of oil rig crews", *Comput. Ind. Eng.*, **75**, pp. 41-54 (2014).
25. Alvarenga Rosa, R.d., Machado, A.M., Ribeiro, G.M. and et al. "A mathematical model and a clustering search metaheuristic for planning the helicopter transportation of employees to the production platforms of oil and gas", *Comput. Ind. Eng.*, **101**, pp. 303-312 (2016).
26. Abbasi-Pooya, A. and Husseinzadeh Kashan, A. "New mathematical models and a hybrid grouping evolution strategy algorithm for optimal helicopter routing and crew pickup and delivery", *Comput. Ind. Eng.*, **112**, pp. 35-56 (2017).
27. Astoures, H.F., Alvarenga Rosa, R. and Silva Rosa, A.L. "Planning the diesel supply for offshore platforms by a mathematical model based on the vehicle routing problem with replenishment", *Transp. Res. Proc.*, **18**, pp. 11-18 (2016).
28. Irawan, C.A., Ouelhadj, D., Jones, D. and et al. "Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms", *Eur. J. Oper. Res.*, **256**(1), pp. 76-89 (2017).
29. Eshraghniaye Jahromi, A. and Ighani Yazdeli, R. "A mixed integer programming model for periodic routing of special vessels in offshore oil industry", *Int. J. Ind. Eng.-Theory.*, **22**(5), pp. 524-548 (2015).
30. Garey, M. R. and Johnson, D. S. "Computers and Intractability: a Guide to the theory of NP-Completeness", W. H. Freeman and Company, New York (1979).
31. Lenstra, J. K. Rinnooy Kan, A.H.G. "Complexity of vehicle routing problem with time windows", *Networks*, **11**, pp. 221-227 (1981).
32. Ralphs, T.K. and Galati, M.V. "Decomposition methods for integer programming", *Wiley Encyclopedia of Operations Reasearch and Management Science* (2010).
33. Cordeau, J. F., Stojkovi'c, G., Soumis, F. and et al. "Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling", *Transport Sci*, **35**(4), pp. 375-388 (2001).
34. Salazar-González , J. J. "Approaches to solve the fleet-assignment, aircraft-routing, crew-pairing and crew-rostering problems of a regional carrier", *Omega*, **43**, pp. 71-82 (2014).
35. Corréa , A. I., Langevin, A. and Rousseau, L.M. "Scheduling and routing of automated guided vehicles: a hybrid approach", *Comput Oper Res*, **34**(6), pp. 1688-1707 (2007).
36. Rekik, M., Cordeau, J. F. and Soumis, F. "Using benders decomposition to implicitly model tour scheduling", *Annals of Operations Research*, **128**(1-4), pp. 111-133 (2004).
37. Vanderbeck, F. and Wolsey, L. A. "Reformulation and decomposition of integer programs", In 50 Years of Integer Programming, M. Jünger, T. M. Liebling, D. Naddef, G. L. Nemhauser, W. R. Pulleyblank, G. Reinelt, G. Rinaldi , L. A. Wolsey, Ed., pp. 431-502, Springer, Berlin (2010).
38. Benders, J.F. "Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems", *Numer. Math.*, **4**(1), pp. 238-252 (1962).
39. Rahmaniani, R., Crainic, T.G., Gendreau, M. and et al. "The benders decomposition algorithm: a literature review", *Eur. J. Oper. Res.*, **259**(3), pp. 801-817 (2017).
40. Van Slyke, R.M. and Wets, R. "L-Shaped linear programs with applications to optimal control and stochastic", *SIAM J. Appl. Math.*, **17**(4), pp. 638-663 (1969).