

مسیریابی دوره‌ی گروه‌های خدمات فنی  
چاه‌ها در میدان‌های نفتی مشترک فراساحلی

Original Article

روح‌اله ایقانی یزدلی (دانشجوی دکتری)

عبدالحمید اشراق‌نای 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 به دلیل برداشت هم‌زمان کشورهای رقیب می‌شود. موازنه‌ی بین دو مقوله‌ی خدمت‌رسانی همراه با توقف و کمیته‌سازی توقف تولید، لزوم بهینه‌سازی را آشکار می‌سازد. ضمن معرفی مدل برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط،<sup>۱</sup> الگوریتم‌هایی مبتنی بر 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 مبتنی بر 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 عددصحيح مختلط، حد پایین.

## ۱. مقدمه

صنعت نفت در فراساحل دارای مؤلفه‌های پیچیده‌ی فنی فراوانی است. اما در کنار این مؤلفه‌ها، هزینه‌های مربوط به فعالیت‌های توسعه‌ی 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 شده‌ی است که به صورت دوره‌ی 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 به‌گونه‌ی 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 عددصحيح مختلط پایه‌ی اولیه برای موازنه‌ی هزینه‌ها بین دو مقوله است. مقوله‌ی اول مسیریابی بهینه‌ی گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها با رویکرد کمیته‌سازی هزینه‌های نگه‌داشت تولید چاه‌های نفتی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۷/۳/۵، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۳۰

DOI:10.24200/J65.2018.7328.1809

و مقوله‌ی دوم، کمیته‌سازی 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 چنددوره‌ی است، مسئله‌ی مدنظر ارتباط نزدیکی به مسئله‌ی مسیریابی دوره‌ی وسایل حمل‌ونقل<sup>۲</sup> پیدا می‌کند. این مسئله، یک مسئله‌ی عمومیت داده شده از مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی حمل‌ونقل<sup>۳</sup> است. هدف از مسئله‌ی مسیریابی دوره‌ی 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 دوره‌ی وسایل حمل‌ونقل نشان می‌دهد که هدف بسیاری از آنها تاکنون (که البته هدف این مقاله نیز هست)، مدل‌سازی مسائل موجود در دنیای واقعی است.<sup>[۱]</sup> نمونه‌ی از این مسائل در حوزه‌ی خدمات شهری و روستایی، مسائلی نظیر جمع‌آوری مواد بازیافتی و زباله‌های درون شهری،<sup>[۲-۶]</sup> جمع‌آوری شیر از بین مزارع و کشاورزان،<sup>[۷،۸]</sup> توزیع خون بین بیمارستان‌ها،<sup>[۹]</sup> توزیع نامه‌ها و بسته‌های پستی،<sup>[۱۰]</sup> پشتیبانی و نگه‌داشت ماشین‌های خودکار ارائه دهنده‌ی نوشیدنی، سیگار و ... پراکنده در سطح شهر،<sup>[۱۱]</sup> تخصیص و مسیریابی مربیان کمک‌آموزشی برای کودکان ناتوان در سطح شهر،<sup>[۱۲]</sup> مدل‌سازی برنامه‌ی زمان‌بندی

## Archive of SID

این مسئله، دو نوع خدمت سرچاهی و درون چاهی مورد نیاز مشتری است که توسط دو نوع خدمت‌رسان مختلف ارائه می‌شود و شیوه‌ی ارائه‌ی خدمت درون چاهی به مشتری به صورت ترکیبی و با یک زمان بندی عملیاتی مشخص است. با نگاهی مختصر به جدول ۱ مشاهده می‌شود که بیشتر مقالات تنوع خدمات مورد نیاز مشتری را یک نوع در نظر گرفته‌اند و هیچ یک از آنها شیوه‌ی خدمت‌رسانی ترکیبی با یک زمان بندی عملیاتی را مورد توجه قرار نداده‌اند. در بعد ساختار تابع هدف، این مقاله، علاوه بر 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<sup>۴</sup> از طریق طراحی الگوریتم‌های هیورستیک و متاهیورستیک پرداخته‌اند؛ اما در این مقاله توسعه‌ی حد پایین<sup>۵</sup> با استفاده از الگوریتم‌های لاگرانژ، بندرز و I-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 درون چاهی) از طریق شناورهای غیرتدارکاتی و مجهز به گروه‌های تخصصی واحد خدمات فنی چاه‌ها در نظر گرفته می‌شوند؛ در حالی که مطابق جدول ۲، مقالات مسیریابی دوره‌ی وسایل حمل و نقل که به طور 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 حائز اهمیت در این جا 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. به همین 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 مبتنی بر روش‌های بندرز، I-shaped و آزادسازی لاگرانژ هستند، پرداخته می‌شود. نوآوری‌های این مقاله بدین شرح است: ۱. ارائه و تبیین یک مسئله‌ی جدید مسیریابی دوره‌ی و زمان بندی در زیرمجموعه‌ی مسائل مسیریابی دوره‌ی وسایل حمل و نقل برگرفته از فعالیت‌های گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها در صنعت نفت فراساحلی که به طور هم‌زمان دارای جنبه‌های عملیاتی جدیدی نظیر شیوه‌ی خدمت‌رسانی به چاه‌های نفتی به صورت ترکیبی، وجود زمان بندی عملیاتی در شیوه‌ی خدمت‌رسانی ترکیبی، الزام توقف تولید نفت در فرایند ارائه‌ی خدمات درون چاهی 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<sup>۶</sup> روش‌های بندرز، I-shaped و آزادسازی لاگرانژ با توجه به خصوصیات و پیچیدگی‌های موجود مدل. ۴. بررسی و تحلیل مقایسه‌ی 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،

قطارهای شهری با توجه به ظرفیت قطارها و چهارچوب‌های زمانی<sup>[۱۳]</sup> مسیریابی کاروند‌های ماهر (تکنسین‌ها) برای نگهداری و تعمیرات پله‌های برقی و آسانسور در سطح شهر<sup>[۱۴]</sup> توزیع فراورده‌های نفتی بین ایستگاه‌های پخش<sup>[۱۵]</sup> حمل و توزیع پول در سطح شهر<sup>[۱۶]</sup> تأمین اضطراری اقلام حیاتی پس از وقوع بحران<sup>[۱۷]</sup> 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<sup>[۱۸-۲۲]</sup> مسیریابی بال‌گرد برای ارائه‌ی خدمات حمل و نقل مسافر بین سکوهای نفتی و پایانه‌های مسافری خشکی<sup>[۲۳-۲۶]</sup> 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<sup>[۲۷]</sup> مسیریابی و زمان بندی عملیات نگهداری و تعمیرات توربین‌های مستقر در سکوهای دریایی توسط شناورهای فنی دارای گروه کاروندان ماهر<sup>[۲۸]</sup> مسئله‌ی مسیریابی خدمت‌دهنده‌های سرچاهی سیار و شناورهای پشتیبان به منظور ارائه‌ی خدمات فنی و پشتیبان به سکوهای سرچاهی مستقر در خلیج فارس<sup>[۲۹]</sup> در جدول‌های ۱ و ۲ پیشینه‌ی موضوع اشاره شده با توجه به عامل‌های مختلف تقسیم بندی و مقایسه شده است. عامل‌های فراوانی در ابعادی مانند هزینه‌ها، وسایل حمل و نقل، محصولات و خدمات، مسیرهای تردد، ظرفیت وسایل حمل و نقل، ایستگاه مرکزی، تقاضای مشتریان، زمان سفر و پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان به منظور تقسیم بندی مسائل مسیریابی دوره‌ی وسایل حمل و نقل وجود دارند؛ اما به منظور 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 دوره‌ی وسایل حمل و نقل خصوصاً مسائل کار شده در حوزه‌ی نفت فراساحلی، عامل‌های مقایسه‌ی به دو دسته‌ی کلی «عمومی» و «تخصصی در حوزه‌ی نفت فراساحلی» تقسیم شده‌اند.

مدل برنامه‌ریزی‌ی که در این مقاله معرفی می‌شود، بر پایه 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 علاوه بر 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 به دلیل رقابتی بودن میدان نفتی و تکالیف تولید در حوزه‌های مشترک نفتی نباید در تولید مستمر نفت وقفه‌ی داشته باشند و از طرف دیگر نیازمند خدمات درون چاهی هستند که اولاً به صورت ترکیبی توسط گروه‌های خدمت‌رسان سرچاهی و درون چاهی 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

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

شماره مرجع	تعداد ایستگاه مرکزی	تنوع خدمات مشتری	شیوه‌ی خدمات رسانی به مشتری	وجود زمان بندی عملیاتی در شیوه‌ی خدمت رسانی 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 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 و تقاضا	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 حمل و نقل	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 مورد نیاز مشتری	شیوه‌ی خدمت رسانی به مشتری	وجود زمان بندی عملیاتی در شیوه‌ی خدمت رسانی 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	کمیته‌سازی زمان انتظار مشتری برای دریافت خدمت	توسعه‌ی حد پایین با الگوریتم آزادسازی لاگرانژ
[۱۴]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	✓	×	محدود	کمیته‌سازی هزینه‌ی سفر، بی‌کاری، انتظار و عدم تعادل کاری وسایل حمل و نقل	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۱۵]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمیته‌سازی هزینه‌ی سفر و نگهداری موجودی و بیشینه‌سازی درآمد	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۱۶]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمیته‌سازی هزینه‌ی سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فراابتکاری
[۱۷]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	✓	×	محدود	کمیته‌سازی هزینه سفر و عدم تعادل مسیرها	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فراابتکاری
[۱۸]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمیته‌سازی هزینه‌ی سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فراابتکاری
[۱۹]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	✓	×	نامحدود	بهینه‌سازی اجاره‌ی شناورهای تدارکی	توسعه‌ی مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد
[۲۰]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمیته‌سازی هزینه‌ی سفر کمبود خدمت	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۲۱]	چند ایستگاه	چند نوع	انفرادی	×	×	✓	محدود	کمیته‌سازی هزینه‌ی سفر، نگهداری و تعمیرات و کمبود خدمت	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری
[۲۲]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	×	محدود	کمیته‌سازی هزینه‌ی سفر و به‌کارگیری شناور	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم ابتکاری

شماره مرجع	تعداد ایستگاه مرکزی	تنوع خدمات مورد نیاز مشتری	شیوه‌ی خدمت مشتری	وجود		تعداد وسایل حمل و نقل	تنوع وسایل حمل و نقل برای ارائه‌ی چند نوع خدمت	الزام مشتری در دریافت خدمت در پنجره‌ی زمانی مشخص	ساختار تابع هدف مسئله	روش حل
				زمان‌بندی عملیاتی در شیوه‌ی خدمت‌رسانی ترکیبی	زمان‌بندی					
[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 فراابتکاری
[۲۶]	یک ایستگاه	یک نوع	انفرادی	×	×	محدود	×	×	کمینه‌سازی زمان سفر	توسعه‌ی حد بالا با الگوریتم فراابتکاری
[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

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، هزینه‌ی در نظر گرفته می‌شود که با  $R_i^H$  نمایش داده می‌شود؛ به طوری که  $(H \in \{a, b\}, i \in W)$ .

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 مجموعه‌ی 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

شماره مرجع	مشتری	ارتباط حوزه خدمات			در نظرگیری مؤلفه‌ی مشترک بودن میدان نفتی در بررسی	وسایله خدمت رسانی		الزام توقف تولید نفت در فرایند خدمت رسانی
		متحرک	بالادستی (چاه‌های نفت)	پایین دستی (اقلام و تجهیزات سطح الارضی)		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 سوخت رسان	×	×
[۲۸]	توربین‌های بادی فراساحلی	×	×	تدارک کالا و اعزام کارکنان نگهداری و تعمیرات	×	شناورهای تدارکاتی	×	×
[۲۹]	سکوهای سرچاهی نفت	شناورهای سرچاهی سیار	نگهداشت تجهیزات سرچاهی	خدمات عمومی نظیر کالا، سوخت و اعزام کارکنان	×	شناورهای تدارکاتی و شناورهای سرچاهی سیار	×	×

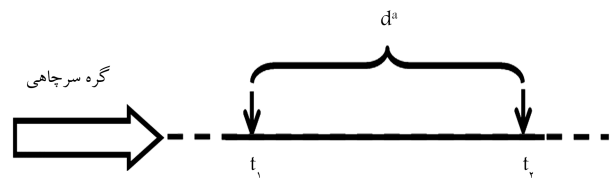
مدت  $d_1^a$  عملیات آماده‌سازی و توقف تولید چاه را صورت می‌دهد. سپس در زمان  $t_1 = t_0 + d_1^a$  گروه‌های خدمات‌رسان سرچاهی و درون‌چاهی به صورت ترکیبی و تیمی به مدت  $d_1^b$  عملیات خدمات‌رسانی را انجام می‌دهند و در نهایت عملیات درون‌چاهی در زمان  $t_2 = t_1 + d_1^a + d_1^b$  خاتمه می‌یابد. در زمان  $t_2$  خدمات‌رسان درون‌چاهی چاه را ترک می‌کند، اما خدمات‌رسان سرچاهی باید به مدت  $d_1^b$  عملیات آماده‌سازی چاه و به تولیدرساندن تدریجی آن را تا زمان  $t_2 = t_1 + d_1^a + d_1^b + d_1^b$  صورت دهد و پس از آن چاه را ترک کند.

در این مسئله به دلیل وجود یک برنامه‌ی بالادستی تولیدی برای هر یک از چاه‌های نفتی در میدان‌های مشترک، به‌ازای هر مورد ارائه‌ی خدمات درون‌چاهی که منجر به توقف تولید چاه در شرایط ویژه‌ی حوزه‌ی مشترک می‌شود، هزینه‌ی بی‌ناماد  $O_i$  به‌طوری که  $(i \in W)$  در نظر گرفته می‌شود. 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 وقته 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.

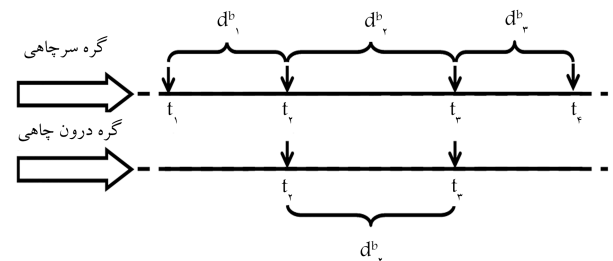
در این مسئله مجموعه‌ی دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ی با سقف زمانی  $D$  برای هر دوره است، به‌طوری‌که در این افق، هر یک از چاه‌های مذکور نیازمند دریافت خدمات سرچاهی و درون‌چاهی با مقدار فرکانس  $F_i^H$  و مجموعه‌ی ترکیبات مجاز دریافت خدمت  $Q_i^H$  به‌طوری‌که  $(H \in \{a, b\}, i \in W)$  هستند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

برای مثال یک مسئله دارای یک افق برنامه‌ریزی ۵ دوره‌ی در نظر گرفته می‌شود؛ به‌گونه‌ی که برای چاه شماره ۱ مقادیر بسامد خدمت برابر با  $F_1^a = 3$  و  $F_1^b = 2$  و همچنین مجموعه‌ی ترکیبات مجاز دریافت خدمات برابر با  $Q_1^a = \{(1; 2; 4), (2; 3; 5)\}$  و  $Q_1^b = \{(1; 3), (1; 4), (2; 5), (2; 4)\}$  باشند. در این مثال چاه شماره ۱ به‌منظور دریافت خدمت سرچاهی به میزان سه مرتبه در یک افق برنامه‌ریزی ۵ دوره‌ی دارای دو انتخاب در مجموعه  $Q_1^a$  است. اگر عضو اول مجموعه یعنی  $(1; 2; 4)$  انتخاب شود، چاه شماره ۱ باید در دوره‌های ۱، ۲ و ۴ خدمت سرچاهی را از گروه خدمات‌رسان سرچاهی دریافت کند، اما اگر عضو دوم مجموعه‌ی مذکور انتخاب شود، لازم است چاه شماره ۱ در دوره‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ خدمت مورد نیاز را دریافت کند. به همین ترتیب چاه شماره ۱ به‌منظور دریافت خدمت درون‌چاهی به میزان دو مرتبه در یک افق برنامه‌ریزی ۵ دوره‌ی دارای چهار انتخاب در مجموعه  $Q_1^b$  است. اگر عضو اول مجموعه یعنی  $(1; 3)$  انتخاب شود، باید چاه شماره ۱ در دوره‌های ۱ و ۳ خدمت درون‌چاهی را به‌صورت ترکیبی از خدمات‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی دریافت کند، اما اگر عضو سوم مجموعه یعنی  $(2; 5)$  انتخاب شود، آنگاه چاه شماره ۱ در دوره‌های ۱ و ۲ خدمت مورد نیاز را دریافت می‌کند.

مسئله دارای یک ایستگاه مرکزی به عنوان نقطه‌ی شروع و پایان تورهای خدمات‌رسان‌ها است که در این مقاله با نماد  $o$  نشان داده می‌شود. اگر در ابتدای یک دوره، هر یک 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 دوره برنامه‌ریزی هر دو نوع خدمت را دریافت کند. فرض دیگر این‌که یک خدمت‌رسان سرچاهی مشخص پس از این‌که به چاه مشخصی خدمت سرچاهی



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



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

## ۱.۲. خدمات سرچاهی

این نوع خدمت که عمدتاً به بخش سطح‌الارضی چاه مربوط می‌شود، عبارت است از مجموعه‌ی 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 گریس‌سوز و آزمایش عملکرد شیرهای ایمنی سرچاهی که توسط گروه خدمات‌رسان 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 خدمات‌رسان سرچاهی به‌صورت مستقل از گروه دیگر در زمان  $t_1$  در محل چاه حاضر می‌شود و پس از گذراندن عملیات به مدت  $d_1^a$ ، عملیات را در زمان  $t_2 = t_1 + d_1^a$  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 مجموعه‌ی خدمات استاندارد نظیر باز یافت 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 خدمات‌رسان 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 خدمات‌رسان سرچاهی در محل چاه حاضر شود و مجموعه‌ی اقدامات اولیه را برای توقف تولید، ایمن‌سازی و آماده‌سازی چاه انجام دهد. سپس بلافاصله گروه‌های خدمات‌رسان سرچاهی و درون‌چاهی به صورت گروهی ارائه‌ی خدمت می‌کنند و در مرحله‌ی سوم، گروه خدمات‌رسان سرچاهی اقدامات لازم برای آماده‌سازی به‌منظور به تولید رساندن چاه را صورت می‌دهد.

شکل ۲ نحوه‌ی ارائه‌ی خدمات درون‌چاهی در محل یک چاه را نشان می‌دهد. خدمت‌رسان سرچاهی در زمان  $t_1$  در محل چاه حاضر شده است و سپس به

## Archive of SID

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:

$$Obj_1 = \sum_H \sum_j \sum_l \left( \sum_k (c_{oj} x_{jkl}^{sH} + c_{jo} x_{jkl}^{sH_e}) + \sum_m (c_{oj} y_{jml}^{sb} + c_{jo} y_{jml}^{be}) \right) \quad (1)$$

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

$$Obj_3 = \sum_i \sum_{H_1} R_i^{H_1} \left( F_i^{H_1} - \left( \sum_k \sum_l (x_{ikl}^{H_1 e} + \sum_{j \neq i} \sum_{H_2} x_{ijkl}^{H_1 H_2}) \right) \right) \quad (3)$$

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

بنابراین تابع هدف مدل برابر با کمیته‌سازی مجموع هزینه‌های مذکور مطابق عبارت ۵ به صورت زیر است:

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

حال به بررسی محدودیت‌های مدل ریاضی پرداخته می‌شود. عبارت ۶ بیان‌گر دسته محدودیت‌های الزام‌آوری است به‌گونه‌ی 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.

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

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 به ترتیب در مجموعه‌های  $Q_i^b$  و  $Q_i^a$  وجود دارند، انتخاب شوند.

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

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،

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. به همین دلیل در تمام تعاریف متغیرها و محدودیت‌ها که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود، قید  $j \neq i$  وجود دارد. همچنین مدت زمان سفر خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی بین ایستگاه مرکزی و چاه‌ها به ترتیب با  $t_{ij}$  و  $t'_{ij}$  و هزینه‌ی سفر آنها به ترتیب با  $c_{ij}$  و  $c'_{ij}$  به طوری که  $(i, j \in W \cup \{o\}, i \neq j)$  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 به منظور خودداری از ارائه‌ی نوشتار اضافی، در تعریف ارکان مدل، به جای الفاظ خدمت سرچاهی و خدمت درون‌چاهی به ترتیب از خدمت  $a$  و خدمت  $b$  استفاده می‌شود. متغیرهای دودویی به همراه توضیحات به شرح زیرند:

$x_{jkl}^{sH}$ : 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.  $(H \in \{a, b\}, j \in W, k \in A, l \in P)$

$x_{ijkl}^{H_1 H_2}$ : 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.  $(H_1, H_2 \in \{a, b\}, i, j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P)$

$x_{jkl}^{H_e}$ : 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.  $(H \in \{a, b\}, j \in W, k \in A, l \in P)$

$y_{jml}^{sb}$ : 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.  $(j \in W, m \in B, l \in P)$

$y_{ijml}^{bb}$ : 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.  $(i, j \in W, i \neq j, m \in B, l \in P)$

$y_{jml}^{be}$ : 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.  $(j \in W, m \in B, l \in P)$

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

هم چنین متغیرهای پیوسته در این مدل عبارت‌اند از:

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

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

$S_{ml}^{el}$ : زمان رسیدن خدمت‌رسان درون‌چاهی  $m$  در دوره‌ی  $l$  به ایستگاه مرکزی.  $(m \in B, l \in P)$



درون چاهی  $m$  در دوره  $l$  در محل چاه  $i$  در صورت فعال شدن متغیرهای دودویی مربوطه، مقداری در نهایت برابر با سقف زمانی دوره های برنامه ریزی مسئله بگیرد و در غیر این صورت برابر با صفر شود.

$$S_{ikl}^{H_1} \leq D(x_{ikl}^{H_1 e} + \sum_{j \neq i} \sum_{H_\tau} x_{ijk}^{H_1 H_\tau}) \quad \forall H_1 \in \{a, b\}, i \in W, k \in A, l \in P \quad (17)$$

$$S_{iml}^{b_l} \leq D(y_{iml}^{be} + \sum_{j \neq i} y_{ijml}^{bb}) \quad \forall i \in W, m \in B, l \in P \quad (18)$$

عبارت ۱۹ و ۲۰ دسته محدودیت های زمان بندی برای زمانی هستند که خدمت رسان سرچاهی  $k$  یا خدمت رسان درون چاهی  $m$  در دوره  $l$  برای ارائه خدمات  $a$  یا  $b$  از ایستگاه مرکزی به محل چاه  $i$  عزیمت کرده اند. ضمناً در این عبارات و سایر عبارات های مشابه نماد  $M$  به معنای یک عدد بزرگ است.

$$S_{jkl}^H \geq t_{oj} - M(1 - x_{jkl}^H) \quad \forall H \in \{a, b\}, j \in W, k \in A, l \in P \quad (19)$$

$$S_{jml}^{b_l} \geq t_{oj} - M(1 - y_{jml}^{bb}) \quad \forall j \in W, m \in B, l \in P \quad (20)$$

دسته محدودیت های زمان بندی مربوط به زمانی که خدمت رسان سرچاهی  $k$  در دوره  $l$  پس از ارائه خدمت  $a$  یا  $b$  به چاه  $i$  برای ارائه خدمت  $a$  یا  $b$  به چاه  $j$  می رود در عبارات ۲۱ تا ۲۴ آمده اند. ضمناً عبارت ۲۵ دسته محدودیت های زمان بندی مربوط به زمانی را که خدمت رسان درون چاهی  $m$  در دوره  $l$  پس از ارائه خدمت  $b$  به چاه  $i$  برای ارائه خدمت  $b$  به چاه  $j$  می رود، نشان می دهد.

$$S_{jkl}^a \geq S_{ikl}^a + d^a + t_{ij} - M(1 - x_{ijk}^{aa}) \quad \forall i, j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P \quad (21)$$

$$S_{jkl}^a \geq S_{ikl}^b + d_1^b + d_2^b + d_3^b + t_{ij} - M(1 - x_{ijk}^{ba}) \quad \forall i, j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P \quad (22)$$

$$S_{jkl}^b \geq S_{ikl}^a + d^a + t_{ij} - M(1 - x_{ijk}^{ab}) \quad \forall i, j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P \quad (23)$$

$$S_{jkl}^b \geq S_{ikl}^b + d_1^b + d_2^b + d_3^b + t_{ij} - M(1 - x_{ijk}^{bb}) \quad \forall i, j \in W, i \neq j, k \in A, l \in P \quad (24)$$

$$S_{jml}^{b_l} \geq S_{iml}^{b_l} + d_1^b + t_{ij} - M(1 - y_{ijml}^{bb}) \quad \forall i, j \in W, i \neq j, m \in B, l \in P \quad (25)$$

دسته محدودیت های زمان بندی مربوط به زمانی که خدمت رسان سرچاهی  $k$  یا خدمت رسان درون چاهی  $m$  در دوره  $l$  پس از ارائه خدمت  $a$  یا  $b$  به چاه  $i$  بلافاصله به ایستگاه مرکزی بازمی گردند، در عبارات ۲۶ تا ۲۸ آمده اند.

$$S_{kl}^e \geq S_{ikl}^a + d^a + t_{io} - M(1 - x_{ikl}^{ae}) \quad \forall i \in W, k \in A, l \in P \quad (26)$$

$$S_{kl}^e \geq S_{ikl}^b + d_1^b + d_2^b + d_3^b + t_{io} - M(1 - x_{ikl}^{be}) \quad \forall i \in W, k \in A, l \in P \quad (27)$$

$$S_{ml}^{e_l} \geq S_{iml}^{b_l} + d_1^b + t_{io} - M(1 - y_{iml}^{be}) \quad \forall i \in W, m \in B, l \in P \quad (28)$$

حداکثر یک بار می توانند از ایستگاه مرکزی خارج شوند.

$$\sum_H \sum_j x_{jkl}^{sH} \leq 1 \quad \forall k \in A, l \in P \quad (8)$$

$$\sum_j y_{jml}^{sb} \leq 1 \quad \forall m \in B, l \in P \quad (9)$$

دسته محدودیت های مندرج در عبارات ۱۰ و ۱۱ شرایطی را فراهم می کنند که اگر در دوره  $l$  خدمت رسان سرچاهی  $k$  یا خدمت رسان درون چاهی  $m$  از ایستگاه مرکزی خارج شد، در همان دوره باید به ایستگاه مرکزی برگردد.

$$\sum_j \sum_H x_{jkl}^{sH} = \sum_j \sum_H x_{jkl}^{H_e} \quad \forall k \in A, l \in P \quad (10)$$

$$\sum_j y_{jml}^{sb} = \sum_j y_{jml}^{be} \quad \forall m \in B, l \in P \quad (11)$$

و در ادامه دسته محدودیت های مندرج در عبارات ۱۲ و ۱۳ شرایط مشابهی را فراهم می کنند که اگر در دوره  $l$  خدمت رسان سرچاهی  $k$  یا خدمت رسان درون چاهی  $m$  به چاه  $i$  وارد شد، در همان دوره باید از چاه  $i$  خارج شود.

$$x_{ikl}^{H_1 e} + \sum_{j \neq i} \sum_{H_\tau} x_{ijk}^{H_1 H_\tau} = x_{ikl}^{H_1} + \sum_{j \neq i} \sum_{H_\tau} x_{ijk}^{H_1 H_\tau} \quad \forall i \in W, H_1 \in \{a, b\}, k \in A, l \in P \quad (12)$$

$$y_{iml}^{be} + \sum_{j \neq i} y_{ijml}^{bb} = y_{iml}^{sb} + \sum_{j \neq i} y_{ijml}^{bb} \quad \forall i \in W, m \in B, l \in P \quad (13)$$

عبارت ۱۴ به دسته محدودیت هایی اشاره می کند که یک رابطه منطقی بین انتخاب ترکیب خدمت  $a$  یا  $b$  و متغیرهای تصمیم مربوطه ایجاد می کند. در ضمن این محدودیت ها اجازه نمی دهند که چاه  $i$  در دوره  $l$  بیش از یک بار خدمات مذکور را دریافت کند.

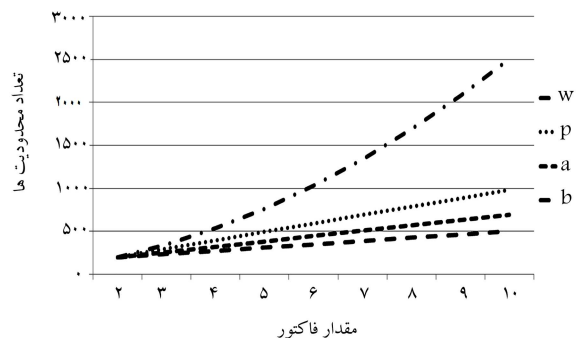
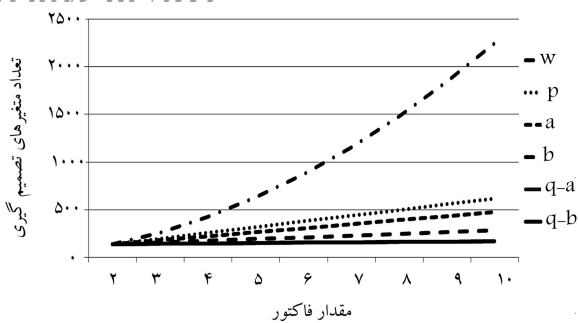
$$\sum_k (x_{ikl}^{H_1 e} + \sum_{j \neq i} \sum_{H_\tau} x_{ijk}^{H_1 H_\tau}) \leq \sum_r e_{rl} Z_{ir}^{H_1} \quad \forall i \in W, H_1 \in \{a, b\}, l \in P \quad (14)$$

رعایت سقف زمانی دوره های برنامه ریزی مسئله یعنی  $D$  برای زمان رسیدن خدمت رسان سرچاهی  $k$  یا خدمت رسان درون چاهی  $m$  در دوره  $l$  به ایستگاه مرکزی در قالب دسته محدودیت های مندرج در عبارات ۱۵ و ۱۶ بیان شده است. ضمناً اگر این خدمت رسان ها در ابتدای دوره  $l$  از ایستگاه مرکزی خارج نشوند، مقدار  $S_{kl}^e$  و  $S_{ml}^{e_l}$  به صورت اجباری برابر با صفر خواهند بود. در واقع در این محدودیت ها ارتباط منطقی بین متغیرهای زمان بندی و دودویی مربوط به ایستگاه مرکزی برقرار می شود

$$S_{kl}^e \leq \sum_j \sum_H D x_{jkl}^{sH} \quad \forall k \in A, l \in P \quad (15)$$

$$S_{ml}^{e_l} \leq \sum_j D y_{jml}^{sb} \quad \forall m \in B, l \in P \quad (16)$$

همچنین در ادامه عبارات ۱۷ و ۱۸ اطمینان حاصل می کنند که زمان آغاز ارائه خدمت  $a$  توسط خدمت رسان سرچاهی  $k$  یا ارائه خدمت  $b$  توسط خدمت رسان



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 عددصحيح مختلط معرفی شده دارای ابعاد بزرگ و پیچیده‌ی است. به‌طورکلی فرایند حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحيح مختلط در زمره‌ی یک مسئله تحت شرایط Np-hard قرار می‌گیرد.<sup>[۲۰]</sup> 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 چندجمله‌ی نیستند.<sup>[۲۱]</sup> حال با توجه به این‌که این مدل زیرمجموعه‌ی از مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی حمل‌ونقل است، یک مسئله‌ی Np-hard است و روش‌های حل دقیق موجود قادر به حل آن در یک زمان چندجمله‌ی نیستند. در این شرایط توسعه‌ی حدود پایین و همچنین الگوریتم‌های حل ابتکاری (هیورستیک) و فرآینتکاری (متاهیورستیک) برای این‌گونه مسائل اهمیت فراوانی می‌یابد.

یکی از روش‌های ساده برای توسعه‌ی حد پایین، حل مدل برنامه‌ریزی خطی حاصل از آزادسازی الزام عددصحيح بودن متغیرهای تصمیم‌گیری در مدل اصلی برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط و در نظر گرفتن مقدار بهینه‌ی تابع هدف مسئله‌ی آزاد شده به عنوان حد پایین مسئله اصلی است. به‌طور حتم حل مدل آزاد شده جدید بسیار آسان‌تر از مدل اصلی عددصحيح 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 مسئله اصلی دارد؛ بنابراین در چنین شرایطی نیاز به استفاده از روش‌هایی با کارایی بیشتر احساس می‌شود. اگر فضای چندوجهی<sup>۷</sup>

جدول ۳. تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل.

متغیرهای تصمیم‌گیری:	تعداد
• دودویی	$w^2p(4a+b) + w(bp + 2q^a + 2q^b)$
• پیوسته	$wp(2a+b) + p(a+b)$
مجموع متغیرها	$w^2p(4a+b) + p(a+b) + 2w(ap + bp + q^a + q^b)$
محدودیت‌ها:	تعداد
= •	$w(2ap + 2bp + p + 2) + p(a+b)$
≥ •	$w^2p(4a+b) + wbp(a+1)$
≤ •	$wp(2a+b+2) + 2p(a+b)$
مجموع محدودیت‌ها	$w^2p(4a+b) + 3p(a+b) + w(abp + 4ap + 4bp + 3p + 2)$

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 ۱۴ متغیرهای دودویی خدمت‌رسان‌ها مقدار یک گرفتند، متغیرهای زمان‌بندی متناظر آنها نیز مقدار بگیرند. ثانیاً زمان آغاز خدمت درون‌چاهی باید پس از خدمت‌رسان سرچاهی باشد.

$$S_{iml}^{b'} \geq S_{ikl}^b + d_{il}^b - M$$

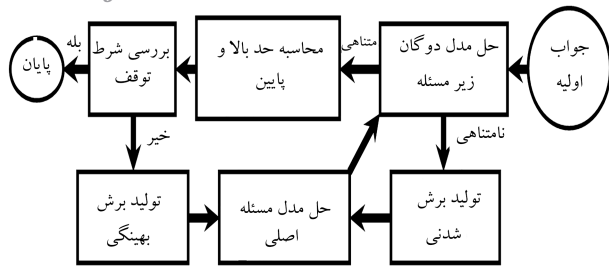
$$(2 - x_{ikl}^{be} - y_{iml}^{be} - \sum_{j \neq i} \sum_{H} x_{ijkl}^{bH} - \sum_{j \neq i} y_{ijml}^{bb})$$

$$\forall i \in W, k \in A, m \in B, l \in P \quad (29)$$

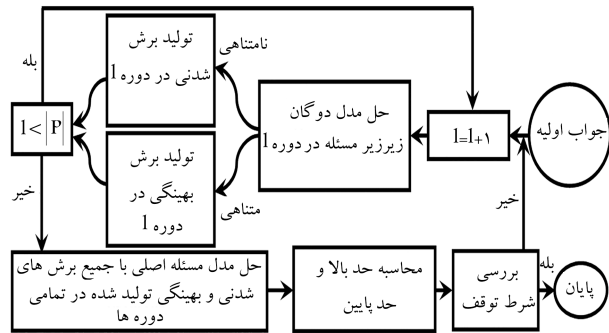
به‌منظور بحث درباره‌ی پیچیدگی محاسباتی مدل برنامه‌ریزی عددصحيح معرفی شده، لازم است تا مطابق با جدول ۳ اجزای تشکیل‌دهنده‌ی مدل یعنی تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل بر اساس پارامترهای ورودی مسئله بررسی شوند. عامل‌هایی که در تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل تأثیرگذار هستند، عبارت‌اند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

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



شکل ۴. الگوریتم اول بر مبنای روش بندرز.



شکل ۵. الگوریتم دوم بر مبنای 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 زیر مسئله 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  $\epsilon/1$  برسد یا تعداد تکرارهای اجرا شده بیشتر از مقدار تعیین شده‌ی باشد یا زمان سپری شده از آغاز اجرای الگوریتم بیشتر از مقدار تعیین شده‌ی 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 در نظر گرفته شود. روش تعیین جواب اولیه و شرط توقف در تمام الگوریتم‌هایی که در ادامه بدان پرداخته خواهد شد، به همین شکل محاسبه و به کار گرفته 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.<sup>[۴۰]</sup> کاربرد این روش در مواجهه با مسائلی است که بتوان زیر مسئله و در نتیجه دوگان زیر مسئله را به  $n$  زیر مسئله<sup>۱۴</sup> و در نتیجه به  $n$  دوگان زیر مسئله<sup>۱۵</sup> تجزیه کرد و در نتیجه بتوان در هر تکرار به جای یک برش بهیجگی یا شدنی، در مجموع  $n$  برش اعم از بهیجگی یا شدنی تولید و به مسئله اصلی بندرز اضافه کرد. با توجه به این‌که زیر مسئله و در نتیجه دوگان زیر مسئله 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 بهیجگی یعنی تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی مسئله تولید و به مسئله اصلی اضافه خواهد شد. حال با عنایت به روش مذکور، الگوریتم دوم برای به دست آوردن یک حد پایین بر مبنای روش L-shaped به صورت طرح پاره در شکل ۵ آمده است. در الگوریتم دوم، منظور از دوگان زیر مسئله، دوگان مدلی است که در آن دسته

مسئله اصلی با  $Q$  نام‌گذاری شود، به منظور 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 عدد صحیح مختلط استوار شده است تا با به کارگیری روش تجزیه‌ی مسائل با ابعاد بزرگ (که قابلیت حل شدن توسط حل‌کننده‌های تجاری را ندارند) و جستجو در فضای خود ساخته، نهایت استفاده را از ساختار پیچیده‌ی مسئله ببرند.<sup>[۳۲]</sup> روش‌های تجزیه در مسائل فراوانی با ماهیت مسیریابی یا زمان بندی به کار گرفته شده‌اند؛ مانند مسیریابی هواپیما و مسئله‌ی زمان بندی خدمه،<sup>[۳۳+۳۴]</sup> زمان بندی و مسیریابی وسایل حمل و نقل،<sup>[۳۵]</sup> زمان بندی تور<sup>[۳۶]</sup> و زمان بندی قطارهای شهری.<sup>[۳۷]</sup> دو رویکرد اصلی تجزیه برای بهره بردن کافی از ساختار مسئله وجود دارد: تجزیه متغیرها و تجزیه محدودیت‌ها.<sup>[۳۷]</sup> در این بخش ابتدا الگوریتم‌های توسعه دهنده‌ی حدود پایین برای مسئله که مبتنی بر روش‌های شناخته شده‌ی بندرز با رویکرد تجزیه متغیرها و آزادسازی لاگرانژ با رویکرد تجزیه محدودیت‌ها هستند، معرفی می‌شوند و سپس در بخش نتایج عددی مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند.

#### ۱.۴. الگوریتم اول

روش بندرز اولین بار به منظور حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دارای محدودیت‌های پیچیده، ابداع و معرفی شد.<sup>[۳۸]</sup> پس از آن سیر تکاملی متنوعی را در قالب مقالات و متون علمی طی کرد.<sup>[۳۹]</sup> ایده‌ی اصلی این روش بر مبنای تجزیه مسئله و تولید محدودیت‌های الزام آور در قالب برش‌های بهیجگی<sup>۸</sup> و برش‌های شدنی<sup>۹</sup> تا حد تکمیل مسئله‌ی تجزیه شده نسبت به مسئله‌ی اولیه<sup>۱۰</sup> است. در هر تکرار این روش، مسئله‌ی اولیه با ثابت کردن متغیرهای عدد صحیح، به یک زیر مسئله<sup>۱۱</sup> و سپس دوگان زیر مسئله<sup>۱۲</sup> با تنها متغیرهای پیوسته تبدیل می‌شود که به آسانی قابل حل است. مسئله‌ی اصلی بندرز<sup>۱۳</sup> حاصل آزادسازی مسئله‌ی اولیه در شرایطی است که فقط شامل متغیرهای عدد صحیح است. هر جواب بهینه‌ی از مسئله اصلی بندرز که بیان‌گر یک حد پایین در شرایط تابع هدف کمیته‌سازی برای مسئله اولیه است، به عنوان مقادیر ثابت جدید متغیرهای عدد صحیح در دوگان زیر مسئله در نظر گرفته شده و بدین ترتیب یک دوگان زیر مسئله جدید ساخته می‌شود. از طریق حل دوباره‌ی دوگان زیر مسئله جدید، مقادیر متغیرهای دوگان زیر مسئله و یک حد بالا در شرایط تابع هدف کمیته‌سازی برای مسئله اولیه به دست می‌آید و در نهایت یک برش بندرز (اعم از بهیجگی یا شدنی) تشکیل و به مسئله اصلی بندرز اضافه می‌شود. حال مجدداً با معرفی برش جدید بندرز، مسئله اصلی بندرز دوباره حل می‌شود و به همین ترتیب روش بندرز به طور 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 بر مبنای 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 دوره‌ی به چاه‌ها ارائه نشود. در نتیجه، مقدار تابع هدف برابر است با مجموع هزینه‌ی کمبود بسامد مورد نیاز خدمت  $a$  و  $b$  به ازای تمام چاه‌ها. بنابراین، در این جواب هزینه‌های سفر و کاهش تولید نیز برابر با صفر خواهند بود. منظور از دوگان زیر مسئله،

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 مبتنی بر 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 مسئله اصلی، جواب‌های تقریبی قابل قبولی را برای مسئله اصلی ایجاد می‌کند که عمدتاً از این جواب‌ها می‌توان به عنوان یک حد پایین در سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهره گرفت. در واقع هدف از به‌کارگیری الگوریتم مبتنی بر 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.

به منظور ورود به بحث لازم است ابتدا تحلیلی راجع به 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 مشتمل بر 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 مبتنی بر 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 به نظر 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. همان‌طور که 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 به صورت 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 هر یک از هفت حالت اشاره شده، الگوریتم سوم برای به دست آوردن یک حد پایین بر مبنای روش آزادسازی لاگرانژ طبق گام‌های زیر اجرا می‌شود:

گام ۱. در نظر گرفتن یک جواب اولیه به عنوان  $UB$ ،  $LB = -\infty$  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  $Ax \leq b$  به طوری که:

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

گام ۵. اگر پس از دو تکرار متوالی در مقدار  $LB$  بهبودی حاصل نشد، آنگاه  $\theta = \frac{\theta}{4}$ .

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

## ۵. نتایج عددی

در این بخش، به بررسی نتایج عددی به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های معرفی‌شده در تولید حدود پایین مدل ریاضی پرداخته می‌شود. به دلیل 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، الگویی از اطلاعات موجود در شرکت نفت فلات قاره‌ی ایران است. همان‌گونه که در بخش مقدمه بدان اشاره شد، حوزه 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. در حال حاضر، تعداد چاه‌های این سه میدان به ترتیب برابر با ۵۳، ۴۴ و ۵ است. تعداد خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی مستقر در هر یک از این سکوها به ترتیب بین ۱ تا ۳ است. زمان و هزینه‌ی سفر این خدمت‌رسان‌ها بین چاه‌ها، به ترتیب باتوجه به فواصل معمول بین چاه‌های نفتی در همین میدان‌های مشترک و متناسب با نرخ‌های اجاره‌ی آنها در نظر گرفته شده است. نظر به این‌که برنامه‌ی کاری کارکنان جزایر و سکوه‌های نفتی در این شرکت در قالب طرح اقماری (یعنی ۱۵ روز کار، 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 روزانه کارکنان، بدون/با اضافه‌کاری بین ۱۲ تا ۱۵ ساعت در نظر گرفته می‌شود. مبنای سایر موارد نظیر بسامد و مجموعه‌های ترکیبیات مجاز دریافت خدمات، جزئیات زمانی خدمات، هزینه‌های کاهش تولید و کمبود خدمات نیز بر اساس اطلاعات واحد بالادستی امور

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 درآمده است. ضمناً برای هر نمونه مسئله، اختلاف نسبی بین دو الگوریتم به صورت  $100\% \times \frac{(LB_{L-shaped} - LB_{Benders})}{LB_{Benders}}$  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 به ترتیب برابر با ۴۸ و ۲۲ تکرار است. به عبارتی دیگر مجموع تعداد برش‌های شدنی و بهینگی تولید شده توسط الگوریتم‌های اول و دوم به ترتیب برابر با ۴۸ و  $330 = 15 \times 22$  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 به ترتیب 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 به ازای 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 به دست آمده به صورت  $100\% \times \frac{(LB_{LR-Max} - LB_{LR-Min})}{LB_{LR-Min}}$  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. در واقع 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 به ترتیب برابر با ۳۵، ۱۲، ۱۰، ۶۷، ۳۵، ۱۰ و ۷۲ تکرار است. به عبارتی 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 به ترتیب 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 فزاینده‌ی پرداخته می‌شود.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های با چاه‌های ۲، ۳ و ۴ مقادیر حدود پایین به دست آمده 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 به دست آورده است. البته لازم است در این‌جا به این نکته مهم اشاره شود که الگوریتم دوم یک الگوریتم دقیق و همگرا به جواب

فنی شرکت نفت فلات قاره‌ی ایران به دست آمده است. اطلاعات کلی راجع به میدان‌های مشترک مذکور نظیر تعداد چاه‌ها، در صفحات وب<sup>۱۶</sup> قابل مشاهده است. به منظور انجام بررسی و مقایسه‌های مذکور، کدنویسی مدل ریاضی مسئله و الگوریتم‌ها در محیط نرم‌افزار GAMS ۲۴.۱۰.۲ 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) i3 CPU M 3۷۰ processor at ۲/۴ GHz و حافظه‌ی کوتاه‌مدت (RAM) ۴ GB 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 ( $|Q_i^H|$ )، به طوری که  $i \in W, H \in \{a, b\}$  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 به صورت تصادفی و با به کارگیری توابع توزیع تصادفی بدین صورت تولید شده است: تعداد مجموعه‌های ترکیبات مجاز دریافت خدمات ( $|Q_i^H|$ ) به طوری که  $i \in W, H \in \{a, b\}$  از مجموعه‌ی  $\{1, 2, 3\}$  و در نهایت تعداد خدمت‌رسان‌های سرچاهی و درون‌چاهی ( $|A|, |B|$ ) به ترتیب از مجموعه‌های  $\{1, 2\}$ ،  $\{2, 3\}$ ،  $\{3, 6\}$  و به ترتیب از ۱۰ و به ترتیب از مجموعه‌های  $\{2, 4\}$ ،  $\{3, 6\}$  برای تعداد چاه‌های بیشتر از ۱۰. همچنین سایر مقادیر ثابت از طریق به کارگیری تابع توزیع یکنواخت بدین صورت تولید شده‌اند: سقف زمانی دوره‌ها ( $D$ ) از بازه‌ی  $[15, 12]$ ، جزئیات زمانی خدمات ( $d^a, d^b, d_1^b, d_2^b$ ) به ترتیب از بازه‌های  $([1, 1/5], [2, 2/5], [1, 1/5])$ ، هزینه‌ی کاهش تولید چاه‌ها ( $O_i$ ) به طوری که  $i \in W$  از بازه‌ی  $[800, 1000]$ ، هزینه‌های کمیود خدمات  $a$  و  $b$  چاه‌ها ( $R_i^a, R_i^b$ ) به ترتیب از بازه‌های  $([500, 800], [5600, 8400])$ ، بسامد خدمات  $a$  و  $b$  چاه‌ها ( $F_i^a, F_i^b$ ) به ترتیب از مجموعه‌های  $\{1, 2\}$ ،  $\{4, 5, 6, 7\}$  و اعضای زیرمجموعه‌های ترکیبات مجاز خدمات  $a$  و  $b$  چاه‌ها ( $Q_i^H$ ) از مجموعه‌ی  $\{0, 1\}$  به طوری که  $i \in W, H \in \{a, b\}$ ، مدت زمان سفر خدمت‌رسان‌ها بین چاه‌ها و ایستگاه مرکزی ( $t_{ij}^a, t_{ij}^b$ ) به ترتیب از بازه‌های  $([0/0.2, 0/3.2], [0/0.2, 0/3.9])$  و هزینه‌ی سفر خدمت‌رسان‌ها بین چاه‌ها و ایستگاه مرکزی ( $c_{ij}^a, c_{ij}^b$ ) به ترتیب به صورت  $(250 \times t_{ij}^a, 167 \times t_{ij}^b)$ . به ازای هر یک از نمونه‌ها، یکی از اعضای مجموعه‌ی  $\{2, \dots, 55\}$  به عنوان تعداد چاه‌ها ( $|W|$ ) انتخاب می‌شود و از تعداد دوره‌ها ( $|P|$ ) نیز به میزان ۱۵ برای تمام نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. مقادیر مذکور به گونه‌ی 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، به وجود آید. شرط تعیین شده برای توقف در تمام الگوریتم‌ها بدین صورت 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 مبتنی بر روش دقیق بندرز و الگوریتم سوم مبتنی بر روش فزاینده‌ی 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 فزاینده‌ی مقایسه می‌شوند.

جدول ۴ نتایج حاصل از اعمال الگوریتم‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. در این

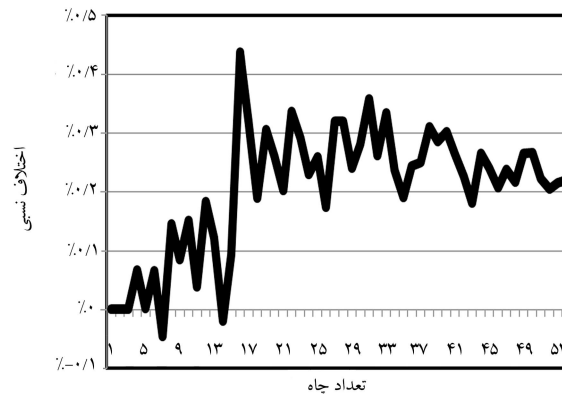
جدول ۴. نتایج حاصل از اعمال الگوریتم‌های اول و دوم بر روی نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

اختلاف نسبی	الگوریتم دوم مبتنی بر روش L-shaped			الگوریتم اول مبتنی بر روش بندرز			تعداد چاه	اختلاف نسبی	الگوریتم دوم مبتنی بر روش L-shaped			الگوریتم اول مبتنی بر روش بندرز			تعداد چاه
	تکرار	حد پایین	زمان	تکرار	حد پایین	زمان			تکرار	حد پایین	زمان	تکرار	حد پایین	زمان	
۰.۰۱%	۹۰۰	۱۸	۱۹۶۵۳۵.۰۷	۹۰۰	۲۷	۱۹۶۵۱۴.۱۸	۲۹	۰.۰۰%	۱۱.۱۰	۳	۱۴۰۸۶.۴۷	۶.۲۱	۹	۱۴۰۸۶.۴۷	۲
۰.۰۶%	۹۰۰	۲۰	۲۰۱۸۸۳.۵۹	۹۰۰	۴۶	۲۰۱۷۶۵.۸۸	۳۰	۰.۰۰%	۴۳.۲۹	۱۱	۱۶۹۳۰.۵۷	۲۹.۱۸	۳۲	۱۶۹۳۰.۵۷	۳
۰.۰۸%	۹۰۰	۲۰	۲۱۷۳۳۲.۲۶	۹۰۰	۴۰	۲۱۷۱۶۸.۳۴	۳۱	۰.۰۰%	۳۹.۶۴	۹	۲۶۶۰۳.۴۴	۴۴.۰۴	۳۷	۲۶۶۰۳.۴۴	۴
۰.۰۳%	۹۰۰	۱۷	۲۰۶۰۷۸.۴۰	۹۰۰	۳۳	۲۰۶۰۲۱.۷۹	۳۲	۰.۰۵%	۵۰.۱۲۲	۱۰۰	۳۵۸۱۶.۸۴	۱۴۶.۴۷	۱۰۰	۳۵۷۹۹.۶۳	۵
۰.۰۵%	۹۰۰	۱۶	۲۰۲۱۵۰.۹۷	۹۰۰	۲۵	۲۰۲۰۵۵.۵۷	۳۳	۰.۲۶%	۶۴۴.۴۴	۱۰۰	۲۷۴۸۱.۷۸	۱۷۶.۳۰	۱۰۰	۲۷۴۱۱.۲۴	۶
۰.۰۵%	۹۰۰	۱۵	۲۰۱۸۸۵.۱۱	۹۰۰	۲۳	۲۰۱۸۸۶.۵۳	۳۴	۰.۳۵%	۹۰۰	۷۳	۵۴۲۸۶.۲۵	۲۳۶.۶۴	۱۰۰	۵۴۰۹۵.۲۴	۷
۰.۰۵%	۹۰۰	۱۵	۲۱۳۸۴۳.۱۲	۹۰۰	۲۱	۲۱۳۷۳۵.۵۷	۳۵	۰.۵۸%	۹۰۰	۴۲	۴۵۳۰۰.۳۴	۲۸۲.۸۷	۱۰۰	۴۵۰۴۰.۹۳	۸
۰.۰۶%	۹۰۰	۱۵	۲۲۲۸۱۹.۷۰	۹۰۰	۲۸	۲۲۲۶۸۶.۲۵	۳۶	۰.۵۸%	۹۰۰	۳۵	۴۲۵۰۱.۳۷	۲۶۳.۵۷	۱۰۰	۴۲۲۵۷.۸۱	۹
۰.۰۵%	۹۰۰	۱۴	۲۳۳۷۱۵.۰۴	۹۰۰	۱۹	۲۳۳۶۰۰.۰۴	۳۷	۰.۸۳%	۹۰۰	۳۲	۶۳۰۰۳.۴۸	۳۴۱.۶۰	۱۰۰	۶۲۴۸۲.۱۶	۱۰
۰.۰۵%	۹۰۰	۱۶	۲۴۴۳۲۹.۴۴	۹۰۰	۲۹	۲۴۴۱۹۶.۳۹	۳۸	۰.۲۱%	۹۰۰	۳۴	۷۹۹۶۰.۱۴	۷۰۳.۲۷	۱۰۰	۷۹۷۹۲.۰۴	۱۱
۰.۰۲%	۹۰۰	۱۴	۲۳۸۰۴۲.۲۴	۹۰۰	۲۲	۲۳۷۹۸۴.۲۸	۳۹	۰.۳۷%	۹۰۰	۳۲	۷۴۱۹۸.۴۱	۴۶۸.۸۳	۱۰۰	۷۳۹۲۲.۵۶	۱۲
۰.۰۲%	۹۰۰	۱۱	۲۳۵۸۸۲.۱۲	۹۰۰	۱۶	۲۳۵۸۳۱.۹۹	۴۰	۰.۴۸%	۹۰۰	۳۳	۹۰۳۹۷.۵۱	۴۷۳.۹۷	۱۰۰	۸۹۹۶۹.۷۳	۱۳
۰.۰۲%	۹۰۰	۱۲	۲۵۵۸۷۹.۶۰	۹۰۰	۱۷	۲۵۵۸۳۱.۱۲	۴۱	۰.۳۹%	۹۰۰	۳۱	۸۰۸۸۴.۴۸	۷۱۹.۹۹	۱۰۰	۸۰۵۷۱.۰۶	۱۴
۰.۰۴%	۹۰۰	۱۵	۲۷۹۲۶۷.۸۳	۹۰۰	۲۷	۲۷۹۱۴۷.۴۹	۴۲	۰.۳۸%	۹۰۰	۲۷	۸۹۸۹۶.۴۹	۸۶۹.۰۷	۱۰۰	۸۹۵۵۸.۱۸	۱۵
۰.۰۲%	۹۰۰	۱۲	۳۰۵۱۲۰.۲۵	۹۰۰	۱۷	۳۰۵۱۵۰.۵۳	۴۳	۰.۳۴%	۹۰۰	۲۷	۱۰۱۶۰۰.۱۳	۷۳۸.۸۳	۱۰۰	۱۰۱۲۵۷.۹۵	۱۶
۰.۰۱%	۹۰۰	۱۲	۳۰۲۹۲۷.۰۸	۹۰۰	۱۶	۳۰۲۸۸۹.۳۸	۴۴	۰.۱۳%	۹۰۰	۲۶	۱۲۰۰۷۴.۴۹	۹۰۰	۸۸	۱۱۹۹۲۷.۸۵	۱۷
۰.۰۴%	۹۰۰	۱۳	۲۴۹۴۱۳.۴۲	۹۰۰	۲۳	۲۴۹۳۲۲.۷۱	۴۵	۰.۲۵%	۹۰۰	۲۸	۱۱۹۳۴۹.۳۳	۶۶۸.۳۱	۱۰۰	۱۱۹۰۵۵.۱۴	۱۸
۰.۰۲%	۹۰۰	۱۱	۳۴۱۰۱۰.۹۶	۹۰۰	۱۴	۳۴۰۹۵۶.۹۳	۴۶	۰.۱۵%	۹۰۰	۲۵	۱۲۱۳۱۴.۴۷	۹۰۰	۹۵	۱۲۱۱۲۷.۵۸	۱۹
۰.۰۱%	۹۰۰	۱۱	۲۹۸۸۲۲.۳۳	۹۰۰	۱۴	۲۹۸۷۷۷.۶۷	۴۷	۰.۱۰%	۹۰۰	۲۶	۱۱۶۶۳۹.۴۸	۹۰۰	۷۶	۱۱۶۵۱۷.۶۴	۲۰
۰.۰۲%	۹۰۰	۱۱	۳۲۷۴۹۳.۵۶	۹۰۰	۱۶	۳۲۷۴۳۷.۸۰	۴۸	۰.۱۳%	۹۰۰	۲۳	۱۴۹۱۰۷.۷۲	۹۰۰	۷۰	۱۴۸۹۱۱.۳۳	۲۱
۰.۰۱%	۹۰۰	۹	۳۵۱۹۰۴.۲۳	۹۰۰	۱۱	۳۵۱۸۷۰.۰۷	۴۹	۰.۱۰%	۹۰۰	۲۰	۱۵۹۶۶۵.۸۷	۹۰۰	۵۷	۱۵۹۵۱۱.۵۲	۲۲
۰.۰۳%	۹۰۰	۱۲	۳۳۰۹۵۸.۰۳	۹۰۰	۱۸	۳۳۰۸۷۴.۳۶	۵۰	۰.۰۱%	۹۰۰	۱۲	۱۴۱۹۶۵.۱۹	۹۰۰	۳۷	۱۴۱۹۴۶.۵۵	۲۳
۰.۰۲%	۹۰۰	۱۱	۳۳۲۷۵۶.۷۳	۹۰۰	۱۴	۳۳۲۷۰۳.۶۰	۵۱	۰.۰۶%	۹۰۰	۲۱	۱۸۵۹۲۵.۱۵	۹۰۰	۴۵	۱۸۵۸۱۱.۶۶	۲۴
۰.۰۱%	۹۰۰	۸	۳۱۹۶۰۲.۴۱	۹۰۰	۱۰	۳۱۹۵۸۳.۶۶	۵۲	۰.۰۹%	۹۰۰	۱۹	۱۶۹۸۰۷.۳۲	۹۰۰	۴۱	۱۶۹۶۷۸.۷۰	۲۵
۰.۰۱%	۹۰۰	۱۲	۳۷۰۱۳۳.۹۲	۹۰۰	۱۷	۳۷۰۱۰۱.۸۶	۵۳	۰.۱۱%	۹۰۰	۲۲	۱۵۲۰۴۰.۳۸	۹۰۰	۶۰	۱۵۱۸۸۰.۷۰	۲۶
۰.۰۳%	۹۰۰	۱۱	۳۷۲۸۰۳.۶۰	۹۰۰	۱۴	۳۷۲۶۹۹.۵۸	۵۴	۰.۰۵%	۹۰۰	۲۰	۱۸۹۳۵۱.۹۳	۹۰۰	۴۲	۱۸۹۲۶۲.۴۱	۲۷
۰.۰۱%	۹۰۰	۸	۳۵۴۵۸۸.۷۰	۹۰۰	۱۰	۳۵۴۵۴۳.۳۹	۵۵	۰.۰۸%	۹۰۰	۲۰	۱۸۰۲۹۴.۵۹	۹۰۰	۳۶	۱۸۰۱۵۰.۶۷	۲۸

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 دوره‌ی 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 بر مبنای روش‌های معروف بندرز، L-shaped و آزادسازی لاگراژ 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



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  $\frac{(LB_{LR} - Max - LB_{L-shaped})}{LB_{L-shaped}} \times 100\%$  محاسبه شده‌اند، در ازای تعداد چاه‌ها در قالب نموداری ترسیم شوند، شکل ۶ حاصل می‌شود.



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	تکرار	زمان
۲	۱۳۹۵۸.۲۶	۱۰۰	۳۱.۶۴	۱۴۰۸۶.۴۷	۱۰۰	۴۲.۰۹	۱۴۰۸۶.۴۷	۱۰۰	۴۳.۶۳	۱۰۰	۳۹.۷۹
۳	۱۶۹۰۲.۷۲	۱۰۰	۵۰.۱۲	۱۶۹۰۸.۸۵	۱۰۰	۴۰.۷۶	۱۶۹۳۰.۵۷	۱۰۰	۷۰.۸۳	۱۰۰	۴۲.۵۸
۴	۲۶۴۴۰.۸۴	۱۰۰	۶۲.۰۷	۲۶۵۰۳.۴۸	۱۰۰	۵۳.۸۸	۲۶۶۰۳.۴۴	۱۰۰	۹۱.۴۲	۱۰۰	۵۶.۱۹
۵	۳۵۶۸۲.۵۱	۱۰۰	۵۸.۱۱	۳۵۷۴۷.۳۴	۱۰۰	۷۵.۲۳	۳۵۸۴۰.۸۶	۱۰۰	۷۲۱.۶۴	۱۰۰	۶۴.۹۱
۶	۲۷۳۷۸.۸۰	۱۰۰	۶۵.۴۴	۲۷۳۸۵.۵۲	۱۰۰	۹۲.۶۴	۲۷۴۸۲.۲۵	۱۰۰	۵۹۱.۵۵	۱۰۰	۷۰.۵۷
۷	۵۴۰۱۳.۱۵	۱۰۰	۹۳.۲۷	۵۴۲۷۷.۰۲	۱۰۰	۱۸۸.۹۹	۵۴۳۲۲.۱۵	۲	۹۰۰	۲	۹۰.۲۷
۸	۴۴۹۸۹.۲۲	۱۰۰	۱۱۳.۳۸	۴۵۱۹۸.۴۷	۱	۹۰۰	۴۵۲۷۹.۵۰	۱	۹۰۰	۱	۱۲۱.۲۸
۹	۴۲۲۲۷.۹۱	۱۰۰	۹۹.۶۱	۴۲۴۲۸.۹۴	۱	۹۰۰	۴۲۵۶۳.۲۳	۱	۹۰۰	۱	۹۸.۴۸
۱۰	۶۲۷۳۱.۲۲	۱۰۰	۱۳۰.۰۰	۶۲۷۹۱.۱۳	۱	۹۰۰	۶۳۰۵۶.۶۸	۱	۹۰۰	۱	۱۵۲.۶۴
۱۱	۷۹۹۲۰.۸۲	۱۰۰	۲۷۴.۸۱	۷۹۹۵۸.۸۴	۱	۹۰۰	۸۰۰۸۱.۳۵	۱	۹۰۰	۱	۲۷۶.۱۷
۱۲	۷۳۹۰۰.۸۷	۱۰۰	۲۰۱.۰۴	۷۳۹۹۳.۱۰	۱	۹۰۰	۷۴۲۲۷.۱۰	۱	۹۰۰	۱	۱۷۸.۶۸
۱۳	۹۰۲۶۷.۴۱	۱۰۰	۲۰۲.۲۲	۹۰۳۴۶.۸۰	۱	۹۰۰	۹۰۵۶۳.۵۰	۱	۹۰۰	۱	۱۴۶.۶۱
۱۴	۸۰۶۹۶.۰۰	۱۰۰	۳۲۹.۳۸	۸۰۸۱۵.۶۲	۱	۹۰۰	۸۰۹۸۳.۲۸	۱	۹۰۰	۱	۳۲۵.۸۱
۱۵	۸۹۶۱۶.۶۵	۷۸	۹۰۰	۸۹۸۰۲.۷۸	۱	۹۰۰	۸۹۸۷۹.۰۹	۱	۹۰۰	۱	۳۸۸.۴۶
۱۶	۱۰۱۴۵۷.۵۴	۱۰۰	۴۱۸.۲۳	۱۰۱۵۵۷.۳۵	۱	۹۰۰	۱۰۱۶۹۵.۲۵	۱	۹۰۰	۱	۲۷۹.۹۰
۱۷	۱۲۰۳۲۸.۶۵	۱۰۰	۴۷۱.۷۲	۱۲۰۳۸۷.۶۸	۱	۹۰۰	۱۲۰۵۹۹.۴۰	۱	۹۰۰	۱	۴۵۷.۳۴
۱۸	۱۱۹۴۵۷.۶۰	۱۰۰	۲۹۴.۷۰	۱۱۹۲۹۲.۰۴	۱	۹۰۰	۱۱۹۲۳۳.۴۵	۱	۹۰۰	۱	۳۳۸.۷۸
۱۹	۱۲۱۳۳۷.۱۶	۷۸	۹۰۰	۱۲۱۲۹۲.۲۷	۱	۹۰۰	۱۲۱۵۴۴.۳۴	۱	۹۰۰	۱	۳۳۷.۰۹
۲۰	۱۱۶۷۵۷.۱۶	۱۰۰	۵۷۸.۹۰	۱۱۶۷۷۴.۰۸	۱	۹۰۰	۱۱۶۹۹۶.۷۸	۱	۹۰۰	۱	۵۷۷.۵۲
۲۱	۱۴۹۱۹۷.۵۸	۹۰۰	۹۰۰	۱۴۹۳۱۵.۶۶	۱	۹۰۰	۱۴۹۴۹۷.۸۱	۱	۹۰۰	۱	۶۲۶.۶۳
۲۲	۱۵۹۱۲.۹۱	۹۰۰	۹۰۰	۱۵۹۸۰.۹۸۷	۱	۹۰۰	۱۵۹۹۹۹.۹۸	۱	۹۰۰	۱	۷۸۵.۱۷
۲۳	۱۴۲۲۰.۲۶۶	۹۰۰	۹۰۰	۱۴۲۲۵۱.۲۵	۱	۹۰۰	۱۴۲۴۴۳.۹۶	۱	۹۰۰	۱	۸۷۷.۰۵
۲۴	۱۸۶۳۲۶.۲۶	۹۰۰	۹۰۰	۱۸۶۱۴۵.۰۵	۱	۹۰۰	۱۸۶۴۶۷.۱۹	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۲۵	۱۷۰۰۴۷.۴۵	۹۰۰	۹۰۰	۱۶۹۸۶۸.۷۰	۱	۹۰۰	۱۷۰۱۹۸.۱۳	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۲۶	۱۵۲۲۹۵.۸۳	۹۰۰	۹۰۰	۱۵۲۱۶۴.۳۲	۱	۹۰۰	۱۵۲۴۳۵.۸۹	۱	۹۰۰	۱	۷۴۷.۷۲
۲۷	۱۸۹۴۱۴.۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۱۸۹۵۴۱.۸۷	۱	۹۰۰	۱۸۹۶۸۲.۳۱	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۲۸	۱۸۰۵۴۸.۵۴	۹۰۰	۹۰۰	۱۸۰۵۱۸.۷۴	۱	۹۰۰	۱۸۰۸۷۲.۷۶	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۲۹	۱۹۶۸۹۰.۲۶	۹۰۰	۹۰۰	۱۹۶۷۹۵.۹۹	۱	۹۰۰	۱۹۷۱۶۵.۴۴	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۰	۲۰۲۱۳۱.۳۱	۹۰۰	۹۰۰	۲۰۲۰۴۵.۲۱	۱	۹۰۰	۲۰۲۳۶۸.۹۳	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۱	۲۱۷۵۸۰.۲۸	۹۰۰	۹۰۰	۲۱۷۵۵۹.۹۲	۱	۹۰۰	۲۱۷۹۴۴.۶۳	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۲	۲۰۶۴۳۶.۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۲۰۶۴۲۶.۲۸	۱	۹۰۰	۲۰۶۸۱۷.۴۶	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۳	۲۰۲۴۰۳.۰۵	۹۰۰	۹۰۰	۲۰۲۳۴۶.۷۸	۱	۹۰۰	۲۰۲۶۸۰.۴۰	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۴	۲۰۱۵۳۶.۵۱	۹۰۰	۹۰۰	۲۰۱۶۳۷.۲۲	۱	۹۰۰	۲۰۱۹۵۹.۴۳	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۵	۲۱۴۰۴۲.۲۹	۹۰۰	۹۰۰	۲۱۴۰۹۷.۵۳	۱	۹۰۰	۲۱۴۳۵۰.۶۸	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۶	۲۲۳۹۷۹.۲۵	۹۰۰	۹۰۰	۲۲۳۹۲۸.۲۸	۱	۹۰۰	۲۲۳۹۴۴.۶۷	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۷	۲۳۳۰۲۰.۷۸	۹۰۰	۹۰۰	۲۳۳۲۸۹.۰۱	۱	۹۰۰	۲۳۳۲۸۳.۲۰	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۸	۲۴۴۴۵۳.۹۴	۹۰۰	۹۰۰	۲۴۴۷۵۶.۵۶	۱	۹۰۰	۲۴۴۹۳۹.۷۱	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۳۹	۲۳۸۴۲۷.۲۲	۹۰۰	۹۰۰	۲۳۸۳۸۱.۳۰	۱	۹۰۰	۲۳۸۷۸۲.۴۲	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۰	۲۳۶۲۰.۸۶۶	۹۰۰	۹۰۰	۲۳۶۲۲۲.۶۸	۱	۹۰۰	۲۳۶۵۵۷.۸۹	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۱	۲۵۶۲۸۰.۱۰	۹۰۰	۹۰۰	۲۵۶۲۵۴.۴۱	۱	۹۰۰	۲۵۶۶۵۵.۶۱	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۲	۲۷۹۵۴۲.۷۵	۹۰۰	۹۰۰	۲۷۹۶۵۳.۴۰	۱	۹۰۰	۲۸۰۰۰۸.۰۶	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۳	۳۰۵۵۳۲.۶۳	۹۰۰	۹۰۰	۳۰۵۵۶۱.۹۵	۱	۹۰۰	۳۰۵۹۰۳.۲۸	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۴	۳۰۳۰۸۹.۲۳	۹۰۰	۹۰۰	۳۰۳۲۷۲.۳۲	۱	۹۰۰	۳۰۳۴۷۴.۹۱	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۵	۲۴۹۶۰.۲۰۳۰	۹۰۰	۹۰۰	۲۴۹۷۹۶.۳۴	۱	۹۰۰	۲۵۰۰۷۵.۹۸	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۶	۳۴۱۴۲۳.۳۷	۹۰۰	۹۰۰	۳۴۱۳۶۹.۱۹	۱	۹۰۰	۳۴۱۸۳۳.۴۷	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۷	۲۹۹۱۱۸.۶۰	۹۰۰	۹۰۰	۲۹۹۱۳۲.۵۵	۱	۹۰۰	۲۹۹۴۴۲.۰۴	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۸	۳۲۷۷۷۸.۹۷	۹۰۰	۹۰۰	۳۲۷۹۲۰.۸۳	۱	۹۰۰	۳۲۸۲۷۴.۷۰	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۴۹	۳۵۲۱۹۹.۶۳	۹۰۰	۹۰۰	۳۵۲۳۱۱.۵۹	۱	۹۰۰	۳۵۲۶۶۶.۳۹	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۵۰	۳۳۳۲۲۷.۷۸	۹۰۰	۹۰۰	۳۳۳۱۴۱.۲۷	۱	۹۰۰	۳۳۳۱۳۹.۵۶	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۵۱	۳۳۳۰۹۵.۳۵	۹۰۰	۹۰۰	۳۳۳۲۶۲.۱۶	۱	۹۰۰	۳۳۳۴۴۳.۵۲	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۵۲	۳۱۹۸۵۳.۰۷	۹۰۰	۹۰۰	۳۲۰۰۷۲.۶۱	۱	۹۰۰	۳۲۰۳۱۵.۵۴	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۵۳	۳۷۰۴۷۲.۶۳	۹۰۰	۹۰۰	۳۷۰۵۶۷.۸۰	۱	۹۰۰	۳۷۰۸۹۳.۸۸	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۵۴	۳۷۳۰۸۵.۵۷	۹۰۰	۹۰۰	۳۷۳۲۴۰.۳۵	۱	۹۰۰	۳۷۳۶۰۹.۳۹	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰
۵۵	۳۵۴۸۱۲.۹۵	۹۰۰	۹۰۰	۳۵۵۰۶۴.۴۴	۱	۹۰۰	۳۵۵۳۶۹.۴۷	۱	۹۰۰	۱	۹۰۰

اختلاف نسبی	حالت هفتم			حالت ششم			حالت پنجم			تعداد چاه
	زمان	تکرار	حد پایین	زمان	تکرار	حد پایین	زمان	تکرار	حد پایین	
۰.۹۳%	۳۰.۷۸	۱۰۰	۱۳۹۵۸.۲۶	۳۶.۹۷	۱۰۰	۱۴۰۸۶.۴۷	۳۹.۹۱	۱۰۰	۱۳۹۵۸.۲۶	۲
۰.۲۹%	۳۸.۵۴	۱۰۰	۱۶۸۸۱.۰۱	۶۰.۸۲	۱۰۰	۱۶۹۰۸.۸۵	۴۰.۳۸	۱۰۰	۱۶۹۰۲.۷۲	۳
۱.۰۰%	۴۶.۸۸	۱۰۰	۲۶۳۴۰.۸۸	۷۸.۵۳	۱۰۰	۲۶۵۰۳.۴۸	۵۶.۸۵	۱۰۰	۲۶۴۴۰.۸۴	۴
۰.۷۱%	۶۴.۸۸	۱۰۰	۳۵۵۸۸.۹۹	۷۳۶.۶۵	۱۰۰	۳۵۷۴۷.۳۴	۷۲.۷۶	۱۰۰	۳۵۶۸۲.۵۱	۵
۰.۷۳%	۶۲.۴۴	۱۰۰	۲۷۲۸۲.۰۷	۶۹۷.۷۲	۱۰۰	۲۷۳۸۵.۵۲	۷۹.۲۱	۱۰۰	۲۷۳۷۸.۸۰	۶
۰.۶۶%	۷۶.۱۸	۱۰۰	۵۳۹۶۸.۰۲	۹۰۰	۲	۵۴۲۷۷.۰۲	۱۱۸.۶۱	۱۰۰	۵۴۰۱۳.۱۵	۷
۰.۸۲%	۱۰۶.۳۸	۱۰۰	۴۴۹۱۲.۴۳	۹۰۰	۱	۴۵۲۰۴.۵۵	۱۲۹.۸۸	۱۰۰	۴۴۹۸۹.۲۲	۸
۱.۰۳%	۱۰۱.۲۱	۱۰۰	۴۲۱۲۸.۳۲	۹۰۰	۱	۴۲۴۲۸.۹۴	۱۱۴.۳۲	۱۰۰	۴۲۲۲۷.۹۱	۹
۰.۹۳%	۱۳۷.۱۵	۱۰۰	۶۲۴۷۴.۶۶	۹۰۰	۱	۶۲۷۹۱.۱۴	۱۷۶.۴۵	۱۰۰	۶۲۷۳۱.۲۲	۱۰
۰.۳۸%	۲۳۱.۳۴	۱۰۰	۷۹۷۷۷.۵۳	۹۰۰	۱	۷۹۹۵۹.۰۲	۵۸۲.۳۷	۱۰۰	۷۹۹۲۰.۸۲	۱۱
۰.۷۵%	۱۵۰.۲۸	۱۰۰	۷۳۶۷۷.۴۳	۹۰۰	۱	۷۳۹۹۲.۶۵	۳۳۱.۹۳	۱۰۰	۷۳۹۰۰.۸۷	۱۲
۰.۷۰%	۱۷۳.۶۶	۱۰۰	۸۹۹۳۱.۶۶	۹۰۰	۱	۹۰۳۳۰.۶۴	۴۰۴.۴۱	۱۰۰	۹۰۲۶۷.۴۱	۱۳
۰.۶۳%	۲۷۸.۹۴	۱۰۰	۸۰۴۷۶.۳۵	۹۰۰	۱	۸۰۸۱۶.۶۰	۶۱۱.۶۴	۱۰۰	۸۰۶۹۶.۰۰	۱۴
۰.۴۲%	۳۲۶.۲۵	۱۰۰	۸۹۵۰۶.۵۰	۹۰۰	۱	۸۹۸۰۳.۱۰	۵۹۲.۵۴	۱۰۰	۸۹۶۱۶.۶۵	۱۵
۰.۴۴%	۲۹۹.۱۲	۱۰۰	۱۰۱۲۴۹.۴۱	۹۰۰	۱	۱۰۱۵۵۶.۸۳	۵۶۲.۹۹	۱۰۰	۱۰۱۴۵۷.۵۴	۱۶
۰.۵۷%	۳۹۵.۹۰	۱۰۰	۱۱۹۹۱۹.۵۶	۹۰۰	۱	۱۲۰۲۸۹.۸۹	۹۰۰	۳۶	۱۲۰۳۲۸.۶۵	۱۷
۰.۶۴%	۲۴۱.۸۶	۱۰۰	۱۱۸۹۷۱.۹۰	۹۰۰	۱	۱۱۹۲۹۵.۸۳	۶۳۷.۰۲	۱۰۰	۱۱۹۴۵۷.۶۰	۱۸
۰.۴۰%	۳۷۳.۸۲	۱۰۰	۱۲۱۰۵۶.۸۴	۹۰۰	۱	۱۲۱۲۸۶.۳۹	۸۰۴.۸۸	۱۰۰	۱۲۱۳۳۷.۸۶	۱۹
۰.۴۱%	۱۷۸.۷۴	۱۰۰	۱۱۶۵۱۳.۴۸	۹۰۰	۱	۱۱۶۷۷۳.۶۲	۹۰۰	۷۷	۱۱۶۷۵۷.۱۶	۲۰
۰.۴۰%	۵۴۸.۳۸	۱۰۰	۱۴۸۱۹۹.۴۰	۹۰۰	۱	۱۴۹۳۱۶.۶۲	۹۰۰	۱	۱۴۹۲۰۲.۵۰	۲۱
۰.۳۰%	۶۷۸.۰۴	۱۰۰	۱۵۹۵۰۶.۲۲	۹۰۰	۱	۱۵۹۸۰۹.۹۶	۹۰۰	۱	۱۵۹۷۲۰.۰۸	۲۲
۰.۳۶%	۷۸۸.۱۲	۱۰۰	۱۴۱۹۳۵.۱۷	۹۰۰	۱	۱۴۲۲۵۱.۲۵	۹۰۰	۳۶	۱۴۲۲۲۱.۹۲	۲۳
۰.۳۵%	۹۰۰	۹۹	۱۸۵۸۱۱.۶۶	۹۰۰	۱	۱۸۶۱۵۰.۷۴	۹۰۰	۱	۱۸۶۳۱۷.۹۴	۲۴
۰.۳۱%	۹۰۰	۹۹	۱۶۹۶۷۸.۷۰	۹۰۰	۱	۱۶۹۸۶۸.۶۸	۹۰۰	۲	۱۷۰۰۷۴.۳۲	۲۵
۰.۳۷%	۶۴۵.۳۱	۱۰۰	۱۵۱۸۷۵.۷۶	۹۰۰	۱	۱۵۲۱۶۴.۶۴	۹۰۰	۲۱	۱۵۲۳۳۲.۱۹	۲۶
۰.۲۲%	۹۰۰	۹۲	۱۸۹۲۵۹.۳۷	۹۰۰	۱	۱۸۹۵۴۲.۵۱	۹۰۰	۱	۱۸۹۴۲۸.۸۰	۲۷
۰.۴۰%	۹۰۰	۸۰	۱۸۰۱۴۸.۰۵	۹۰۰	۱	۱۸۰۵۱۸.۷۴	۹۰۰	۲	۱۸۰۶۰۱.۶۰	۲۸
۰.۳۴%	۹۰۰	۶۱	۱۹۶۴۸۸.۷۹	۹۰۰	۱	۱۹۶۷۹۶.۰۰	۹۰۰	۱	۱۹۷۰۱۶.۸۳	۲۹
۰.۳۱%	۸۵۵.۹۸	۱۰۰	۲۰۱۷۴۷.۷۵	۹۰۰	۱	۲۰۲۰۴۵.۲۱	۹۰۰	۱	۲۰۲۰۹۶.۰۶	۳۰
۰.۳۶%	۹۰۰	۹۱	۲۱۷۱۶۴.۹۳	۹۰۰	۱	۲۱۷۵۶۲.۵۹	۹۰۰	۱	۲۱۷۶۱۳.۳۹	۳۱
۰.۳۹%	۹۰۰	۷۲	۲۰۶۰۱۹.۱۰	۹۰۰	۱	۲۰۶۴۲۵.۹۸	۹۰۰	۱	۲۰۶۴۸۴.۱۹	۳۲
۰.۳۱%	۹۰۰	۵۴	۲۰۲۰۴۸.۶۰	۹۰۰	۱	۲۰۲۳۴۸.۴۳	۹۰۰	۱	۲۰۲۴۸۱.۶۷	۳۳
۰.۳۹%	۹۰۰	۴۸	۲۰۱۱۸۳.۴۸	۹۰۰	۱	۲۰۱۶۳۷.۲۲	۹۰۰	۱	۲۰۱۶۷۶.۶۱	۳۴
۰.۲۹%	۹۰۰	۴۵	۲۱۳۷۳۵.۵۷	۹۰۰	۱	۲۱۴۱۰۷.۳۶	۹۰۰	۱	۲۱۴۰۴۱.۷۸	۳۵
۰.۲۵%	۹۰۰	۶۰	۲۲۲۶۸۶.۲۵	۹۰۰	۱	۲۲۳۰۲۷.۹۶	۹۰۰	۱	۲۲۲۹۸۸.۱۱	۳۶
۰.۲۹%	۹۰۰	۳۹	۲۳۲۶۰۰.۰۴	۹۰۰	۱	۲۳۲۸۹۹.۰۲	۹۰۰	۱	۲۳۳۰۸۳.۵۰	۳۷
۰.۳۰%	۹۰۰	۶۴	۲۴۴۱۹۵.۹۲	۹۰۰	۱	۲۴۴۷۶۹.۹۷	۹۰۰	۱	۲۴۴۳۶۶.۰۱	۳۸
۰.۳۴%	۹۰۰	۴۷	۲۳۷۹۸۲.۸۲	۹۰۰	۱	۲۳۸۳۸۱.۳۰	۹۰۰	۱	۲۳۸۴۶۷.۴۸	۳۹
۰.۳۱%	۹۰۰	۳۲	۲۳۵۸۳۱.۹۹	۹۰۰	۱	۲۳۶۱۷۷.۰۶	۹۰۰	۱	۲۳۶۲۵۷.۰۹	۴۰
۰.۳۲%	۹۰۰	۳۶	۲۵۵۸۳۱.۱۲	۹۰۰	۱	۲۵۶۲۵۳.۴۶	۹۰۰	۱	۲۵۶۳۴۰.۹۱	۴۱
۰.۳۱%	۹۰۰	۵۶	۲۷۹۱۴۷.۴۹	۹۰۰	۱	۲۷۹۶۵۳.۴۲	۹۰۰	۱	۲۷۹۵۲۵.۲۸	۴۲
۰.۲۵%	۹۰۰	۳۶	۳۰۵۱۵۰.۵۳	۹۰۰	۱	۳۰۵۵۶۱.۹۵	۹۰۰	۱	۳۰۵۵۲۱.۰۱	۴۳
۰.۱۹%	۹۰۰	۳۵	۳۰۲۸۸۹.۳۸	۹۰۰	۱	۳۰۳۲۷۳.۲۳	۹۰۰	۱	۳۰۳۰۶۹.۴۲	۴۴
۰.۳۱%	۹۰۰	۵۰	۲۴۹۳۰۹.۲۲	۹۰۰	۱	۲۴۹۷۹۶.۵۱	۹۰۰	۱	۲۴۹۶۰۱.۵۴	۴۵
۰.۲۶%	۹۰۰	۳۰	۳۴۰۹۵۶.۹۳	۹۰۰	۱	۳۴۱۳۸۱.۰۹	۹۰۰	۱	۳۴۱۴۳۳.۴۲	۴۶
۰.۲۲%	۹۰۰	۳۰	۲۹۸۷۷۷.۴۷	۹۰۰	۱	۲۹۹۱۲۷.۰۰	۹۰۰	۱	۲۹۹۱۱۰.۰۶	۴۷
۰.۲۶%	۹۰۰	۳۴	۳۲۷۴۱۷.۱۶	۹۰۰	۱	۳۲۷۹۱۸.۰۴	۹۰۰	۱	۳۲۷۷۸۰.۹۷	۴۸
۰.۲۳%	۹۰۰	۲۳	۳۵۱۸۷۰.۰۷	۹۰۰	۱	۳۵۲۳۱۱.۵۹	۹۰۰	۱	۳۵۲۲۱۱.۲۲	۴۹
۰.۲۹%	۹۰۰	۴۱	۳۳۰۸۷۴.۳۶	۹۰۰	۱	۳۳۱۴۱۱.۳۳	۹۰۰	۱	۳۳۱۳۲۹.۳۹	۵۰
۰.۲۸%	۹۰۰	۲۹	۳۳۲۷۰۳.۶۰	۹۰۰	۱	۳۳۳۲۶۴.۵۱	۹۰۰	۱	۳۳۳۱۱۲.۸۲	۵۱
۰.۲۳%	۹۰۰	۲۰	۳۱۹۵۸۳.۷۶	۹۰۰	۱	۳۲۰۰۳۶.۷۸	۹۰۰	۱	۳۱۹۸۴۰.۲۷	۵۲
۰.۲۱%	۹۰۰	۳۷	۳۷۰۱۰۱.۳۹	۹۰۰	۱	۳۷۰۵۴۸.۴۳	۹۰۰	۱	۳۷۰۴۶۳.۲۲	۵۳
۰.۲۴%	۹۰۰	۲۸	۳۷۲۶۹۹.۵۸	۹۰۰	۱	۳۷۳۲۴۳.۱۲	۹۰۰	۱	۳۷۳۰۷۷.۸۶	۵۴
۰.۲۳%	۹۰۰	۲۲	۳۵۴۵۴۰.۳۲	۹۰۰	۱	۳۵۵۰۶۶.۰۳	۹۰۰	۱	۳۵۴۸۶۰.۷۵	۵۵



(با توجه به حساسیت‌های آن) می‌تواند متوقف باشد که در صورت انحراف از آن، جریمه‌ی در تابع هدف در نظر گرفته شود. همچنین نظریه این‌که، خدمت‌رسانی به چاه‌های نفتی در بستر دریا صورت می‌گیرد، در مدل توسعه داده شده، جنبه‌ی تغییرات آب‌وهوایی و تأثیر آن به صورت مؤلفه‌های احتمالی در زمان‌های سفر و خدمت‌رسانی در نظر گرفته 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 بدین وسیله حدود پایین به دست آمده توسط الگوریتم آزادسازی لاگرانژ در این مقاله بهبود یابد.

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 به دست آورد.

مسئله‌ی مسیریابی دوره‌ی گروه‌های خدمات فنی چاه‌ها در میدان‌های نفتی مشترک فراساحلی مسئله‌ی است که به ندرت 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 کاربردی‌تر شدن مدل این مقاله، در نظر گرفتن زمان خدمت درون‌چاهی به صورت احتمالی و در نظر گرفتن بیشینه‌ی زمانی است که تولید چاه‌های مشترک

### پانویس‌ها

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).

## Archive of SID

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 stochastic 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 Research 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. Corr ea, 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. J nger, T. M. Lieblich, 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).