

# مسیریابی دوره‌ی شناورهای خدماتی با پنجره‌ی زمانی در صنعت نفت دریایی

روح‌اله ابقانی بزدلی (دانشجوی دکتری)  
عبدالحمید اشراق‌نای جهرمی\* (استاد)  
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۵۱-۳۹)  
دوره ۱، شماره ۲/۲، ص. ۱۳۹-۵۱

به منظور نگهداشت تولید نفت در مناطق دریایی، شرکت ملی نفت ایران با به‌کارگیری شناورهای پشتیبان و شناورهای سرچاهی متحرک، به‌صورت دوره‌ی خدمات عمومی و خدمات چاه‌ها را به تجهیزات مستقر در سکوهای سرچاهی نفت ارائه می‌کند. اما در این میان، شناورهای سرچاهی متحرک، خود نیازمند دریافت خدمات از شناورهای پشتیبان در دوره‌های مشخص و پنجره‌های زمانی معین هستند. شناورها در مقایسه با نیاز خدماتی تعداد کمی دارند؛ اما دارای هزینه‌ی جابه‌جایی بالایی هستند. به‌منظور مسیریابی دوره‌ی شناورهای خدماتی، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های جابه‌جایی و کمبود خدمات معرفی شده است. همچنین یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله معرفی شده و عملکرد آن با اعمال روی داده‌های واقعی ارزیابی شده است. نتایج عددی حاکی از سرعت عمل الگوریتم در دست‌یابی به جواب‌های مناسب در زمان بسیار کم در مقایسه با الگوریتم‌های موجود است.

واژگان کلیدی: مسیریابی دوره‌ی، شناورهای خدماتی، سکوهای سرچاهی نفت، پنجره‌ی زمانی، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، الگوریتم ابتکاری.

## ۱. مقدمه

یکی از عوامل اصلی تولید باثبات چاه‌های نفتی دریایی در شرکت ملی نفت ایران، اجرای برخی برنامه‌های منظم در زمینه‌ی خدمات عمومی و خدمات چاه‌ها برای تجهیزات نصب شده در سکوهای سرچاهی نفت است. گریس‌کاری و روان‌کاری و تنظیم شیرها و اتصالات سرچاهی، ثبت فشار و حرارت سرچاهی و نمونه‌گیری از نفت سرچاه مثال‌هایی از خدمات عمومی‌اند. پمپاژ حلال درون چاهی برای رفع موانع آسفالتی، نمودارگیری و ماسه‌شویی چاه‌ها مثال‌هایی از خدمات چاه‌ها هستند. شرکت ملی نفت ایران در مناطق دریایی خود، این برنامه‌ها را با به‌کارگیری دو نوع شناور خدماتی شامل شناورهای پشتیبان و شناورهای سرچاهی متحرک عملیاتی می‌کند. اما در این میان، خود شناورهای سرچاهی متحرک نیازمند دریافت خدماتی نظیر تأمین گازوئیل، آب، مواد شیمیایی و ادوات جانبی عملیاتی نظیر پمپ‌های اسیدکاری، نیروژن و کلیه‌ی متعلقات مربوط از سوی شناورهای پشتیبان در دوره‌های مشخص و پنجره‌های زمانی معینی هستند. در واقع شناورهای سرچاهی متحرک دارای دو نقش متفاوت‌اند. از یک طرف آنها نقش تأمین‌کننده‌ی خدمات چاه‌ها برای سکوهای سرچاهی نفتی دارند و از طرف دیگر نقش دریافت‌کننده‌ی خدمات عمومی از سوی شناورهای پشتیبان دارند. شکل ۱ طرح‌واره‌ی دو نقش متفاوت یک شناور سرچاهی متحرک (که با رنگ قرمز نشان داده شده است) را که در حال ارائه‌ی خدمت چاه‌ها

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۵/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۱/۲، پذیرش ۱۳۹۷/۱۱/۲۸

DOI:10.24200/J65.2019.51278.1903

ighani\_roohollah@ie.sharif.edu  
eshragh@sharif.edu

به سکوی سرچاهی نفت و دریافت خدمت عمومی از یک شناور پشتیبان (که با رنگ سبز نشان داده شده است) می‌باشد، نشان می‌دهد. شناورهای خدماتی مذکور در صنعت نفت دریایی، نقش آمادی بسیار مهمی را در نگهداشت و استمرار کیفیت و کمیت تولید نفت بازی می‌کنند. این شناورها بسیار گران‌قیمت هستند و در مقایسه با میزان نیازمندی‌های سکوهای سرچاهی به اجرای برنامه‌های خدماتی، تعدادشان بسیار کم است. بنابراین، به‌کارگیری آنها بدون یک برنامه‌ریزی مناسب، از یک‌طرف می‌تواند به افزایش قابل‌توجه هزینه‌های فرصت از دست رفته در تولید نفت به دلیل کمبود خدمات مذکور منجر شود و از طرف دیگر می‌تواند تحمیل هزینه‌های گزاف جابه‌جایی شناورهای خدماتی را به دنبال داشته باشد. بنابراین هدف ما استفاده بیشینه از ظرفیت شناورهای خدماتی با توجه به محدودیت‌های زمانی و عملیاتی به‌منظور کمینه کردن این هزینه‌هاست. در واقع مسئله‌ی مسیریابی دوره‌ی شناورهای خدماتی با پنجره‌ی زمانی عبارت است از یافتن یک برنامه‌ی مسیر مناسب برای شناورهای خدماتی در تمام دوره‌های برنامه‌ریزی مسئله با در نظر گرفتن نیازمندی‌های سکوهای سرچاهی به خدمات عمومی و خدمات چاه‌ها و همچنین در نظر گرفتن نیازمندی‌های شناورهای سرچاهی متحرک به خدمات عمومی که باید در پنجره‌های زمانی معین شده‌ی تأمین شوند. در این مسئله، هدف کمینه‌سازی هزینه‌های جابه‌جایی شناورها و هزینه‌های کمبود خدمات است.

مسئله‌ی این مقاله ارتباط نزدیکی به مسئله‌ی مسیریابی دوره‌ی وسایل حمل‌ونقل



شکل ۱. شناور سرچاهی متحرک در حال دریافت خدمت از شناور پشتیبانی و ارائه‌ی خدمت به سکوی سرچاهی.

مسافر بین سکوهای نفتی و پایانه‌های مسافری خشکی، [۲۶-۲۳] برنامه‌ریزی تأمین سوخت گازوئیل برای دکل‌های حفاری و سکوهای نفتی از طریق رفت‌وآمد 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 مجهز به گروه کارورزان، [۲۸] مسئله‌ی مسیریابی خدمت‌دهنده‌های سرچاهی سیار و شناورهای پشتیبان به‌منظور ارائه‌ی خدمات فنی و پشتیبان به سکوهای سرچاهی مستقر در خلیج فارس. [۲۹]

این مسئله با توجه به در نظر گرفتن مؤلفه‌ی پنجره‌ی زمانی در کنار مؤلفه‌های ارتباطی بین شناورهای پشتیبان و شناورهای سرچاهی متحرک و سایر محدودیت‌های زمان‌بندی، دارای جنبه‌های پیچیده‌تری نسبت به مسئله‌ی PVRPTW است. به همین دلیل، در این مقاله یک مدل ریاضی جدید و همچنین یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای مشخصه‌های عملیاتی، ارائه شده است. تا آن‌جا که ما مطلع هستیم، مسئله‌ی مدنظر این مقاله تاکنون مطالعه و بررسی قرار نگرفته و در نتیجه هیچ مدل ریاضی برای آن تاکنون ارائه نشده است. همچنین الگوریتم ابتکاری پیشنهادی نیز کاملاً جدید است.

## ۲. تشریح مسئله

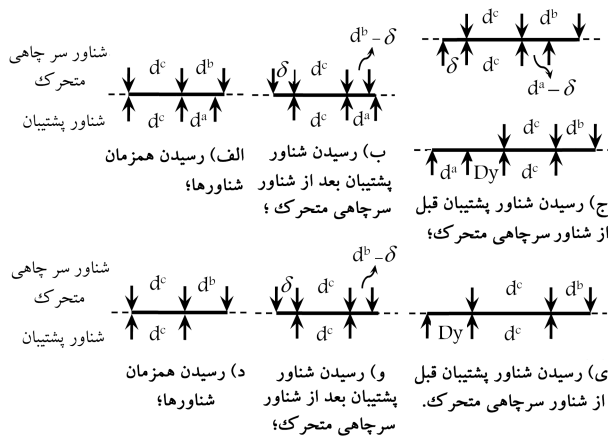
مجموعه‌ی از سکوهای سرچاهی ( $W$ ) نیازمند دو نوع خدمت هستند. این خدمات‌ها عبارت‌اند از خدمات عمومی و خدمات چاه‌ها که به ترتیب توسط دو مجموعه شناورهای پشتیبان ( $A$ ) و شناورهای سرچاهی متحرک ( $B$ ) ارائه می‌شوند؛ به طوری که همواره رابطه‌ی  $|B| \leq |A|$  برقرار است. دلیل این رابطه ناشی از این است که وفق الزامات فنی و مهندسی اعلام شده توسط واحدهای فنی بالادستی، در تمام افق‌های برنامه‌ریزی، همواره نیازمندی سکوهای سرچاهی به خدمات عمومی نسبت به خدمات چاه‌ها از کمیت به مراتب بیشتری برخوردار بوده و هزینه‌های سرمایه‌ی شناورهای سرچاهی متحرک از شناورهای پشتیبان بیشتر است و به همین نسبت شرکت ملی نفت ایران تعداد شناورهای سرچاهی متحرک کمتری را نسبت به تعداد شناورهای پشتیبان در مالکیت خود دارد. اعضای هر مجموعه مانند یکدیگر هستند. هیچ شناور پشتیبانی نمی‌تواند کار یک شناور سرچاهی متحرک را انجام دهد و برعکس.

در این مسئله مجموعه‌ی دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ی با سقف زمانی  $D$  برای هر دوره است؛ به طوری که در این افق، هر یک از سکوهای سرچاهی نیازمند دریافت خدمات عمومی ( $a$ ) و سرچاهی ( $b$ ) با مقدار بسامد  $F_i^H$  و مجموعه‌ی ترکیبات مجاز دریافت خدمت  $Q_i^H$  هستند که  $H \in \{a, b\}$ ،  $i \in W$  است و همچنین شناورهای سرچاهی متحرک نیازمند دریافت خدمات عمومی ( $c$ ) با مقدار بسامد  $F_m^c$  و مجموعه‌ی ترکیبات مجاز دریافت خدمت  $Q_m^c$  در پنجره‌ی زمانی  $[e_m, l_m]$  هستند که  $m \in B$  و همگی در ابتدای هر دوره برنامه‌ریزی توسط واحدهای فنی بالادستی مشخص می‌شوند. برای مثال یک مسئله با افق برنامه‌ریزی ۵ دوره‌ی را در نظر بگیرید که در آن برای سکوی سرچاهی شماره ۱ مقادیر بسامد خدمت برابر با  $F_1^a = 3$  و  $F_1^b = 2$  و  $Q_1^a = \{(1; 3), (1; 4), (2; 5), (2; 4)\}$  و  $Q_1^b = \{(1; 2), (2; 4), (2; 5)\}$  است. در این مثال سکوی سرچاهی شماره ۱ به‌منظور دریافت خدمت  $a$  به میزان سه مرتبه در افق برنامه‌ریزی ۵ دوره‌ی دارای دو انتخاب در مجموعه  $Q_1^a$  است. اگر عضو اول مجموعه یعنی  $(1; 2; 4)$  انتخاب شود، این سکو باید در دوره‌های ۱، ۲ و ۴ خدمت  $a$  را از شناور پشتیبان دریافت کند. اما اگر عضو دوم انتخاب شود، لازم است در دوره‌های ۲، ۳ و ۵ خدمت مورد نیاز را دریافت نماید.

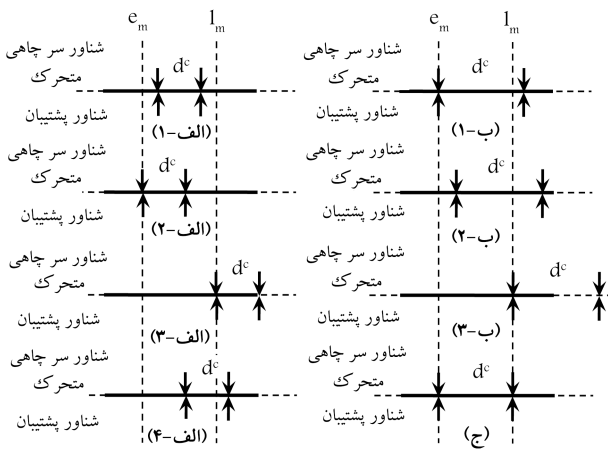
با پنجره‌ی زمانی (PVRPTW) پیدا می‌کند. مسئله‌ی PVRPTW یک مسئله‌ی عمومیت داده شده از مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسیله‌ی حمل‌ونقل (VRP) است و هدف از آن تعیین مسیریابی با نقاط شروع و پایان در یک ایستگاه مرکزی برای یک ناوگان وسایل حمل‌ونقل در خلال دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی است؛ به گونه‌ی که مشتریان دریافت خدمات در پنجره‌ی زمانی معینی پذیرای این ناوگان باشند. در مسئله‌ی ما این مشتریان، همان شناورهای سرچاهی متحرک هستند با این تفاوت که در برخی از دوره‌های مسئله، آنها دو نقش دارند. در یک نقش، آنها یک تأمین‌کننده هستند و خدمات چاه‌ها را به سکوهای سرچاهی ارائه می‌کنند و در نقش دیگر، آنها یک مشتری هستند و در پنجره‌ی زمانی مشخصی، دریافت‌کننده‌ی خدمت از شناورهای پشتیبان در محل یکی از سکوهای سرچاهی (که محل ثابتی نیست) می‌باشند.

سیر تکامل پیشینه‌ی موضوع در ارتباط با مدل‌های ریاضی و روش‌های حل معرفی شده برای مسئله‌ی PVRPTW نشان می‌دهد که هدف بسیاری از آنها تاکنون (که البته هدف این مقاله نیز هست)، مدل‌سازی مسائل موجود در دنیای واقعی است. [۱] نمونه‌ی از این مسائل در حوزه‌ی خدمات شهری و روستایی، مسائلی نظیر جمع‌آوری مواد بازیافتی و زباله‌های درون‌شهری، [۲-۶] جمع‌آوری شیراز مزارع و کشاورزان، [۷، ۸] توزیع خون بین بیمارستان‌ها، [۹] توزیع نامه‌ها و بسته‌های پستی، [۱۰] پشتیبانی و نگهداشت ماشین‌های خودکار ارائه‌دهنده‌ی نوشیدنی، سیگار و ... در سطح شهر، [۱۱] تخصیص و مسیریابی مربیان کمک‌آموزشی برای کودکان ناتوان در سطح شهر، [۱۲] مدل‌سازی برنامه‌ی زمان‌بندی قطارهای شهری با توجه به ظرفیت قطارها و پنجره‌های زمانی، [۱۳] مسیریابی کارورزهای ماهر برای نگهداری و تعمیرات پله‌های برقی و آسان‌بر در سطح شهر، [۱۴] توزیع فرآورده‌های 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 بالگردها برای ارائه‌ی خدمات حمل‌ونقل



شکل ۲. وضعیت‌های مختلف رسیدن شناورها به یک سکوی سرچاهی در یک دوره.



شکل ۳. تمام وضعیت‌های موجه در مقایسه‌ی بین مدت زمان خدمت  $c$  و پنجره‌ی زمانی.

می‌دهد و پس از سپری شدن زمان  $d^c$ ، شناورها به‌طور مستقل به ارائه‌ی خدمات  $a$  و  $b$  به سکو به‌ترتیب به میزان  $d^b$  و  $d^a$  می‌پردازند و نهایتاً سکو را به مقاصد بعدی ترک می‌کنند. همان‌گونه که در شکل ۲ می‌بینید، سکوی سرچاهی بی‌نیاز از دریافت خدمت  $a$  در وضعیت‌های (د)، (و) و (ی) است؛ زیرا در این وضعیت‌ها، هدف از حضور شناور پشتیبان در سکو صرفاً ارائه‌ی خدمت  $c$  به شناور سرچاهی متحرک است. در وضعیت‌های (ب)، (ج) و (و)، زمانی که شناور دوم به سکو مراجعه می‌کند، شناور اول، فرایند ارائه‌ی خدمت خود را متوقف می‌کند و فرایند خدمت  $c$  آغاز می‌شود و پس از سپری شدن زمان  $d^c$ ، باقی‌مانده‌ی فرایند متوقف شده ارائه‌ی خدمت خود را ادامه می‌دهد. همان‌طور که در وضعیت‌های (ج) و (ی) نشان داده شده است، شناور پشتیبان به‌منظور ارائه‌ی خدمت  $c$  به شناور سرچاهی متحرک، به میزان حداکثر  $Dy$  در محل سکوی سرچاهی منتظر می‌ماند.

$[e_m, l_m]$  نمایانگر پنجره‌ی زمانی از نوع سخت است؛ بدین معنا که در یک دوره‌ی زمانی مشخص، یک شناور پشتیبان مجاز نخواهد بود که قبل از  $e_m$  یا بعد از  $l_m$  در محل یک سکوی سرچاهی خدمت  $c$  را به شناور سرچاهی متحرک  $m$  به‌طوریکه  $(m \in B)$  ارائه‌کند. همان‌طور که پیشتر بدان اشاره شد، این خدمت‌رسانی متناظر با رخداد یکی از حالات اول و دوم از شش حالت ممکن است. از زاویه‌ی مقایسه بین مدت‌زمان خدمت  $c$  و پنجره‌ی زمانی مذکور، شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی

به‌همین ترتیب سکوی سرچاهی شماره ۱ به‌منظور دریافت خدمت  $b$  به میزان دو مرتبه در افق برنامه‌ریزی ۵ دوره‌ی دارای چهار انتخاب در مجموعه  $Q^b$  است. اگر عضو اول مجموعه یعنی (۳؛ ۱) انتخاب شود، باید این سکو در دوره‌های ۱ و ۳ خدمت  $b$  را از شناور سرچاهی متحرک دریافت کند؛ اما اگر عضو سوم یعنی (۵؛ ۲) انتخاب شود، آن‌گاه در دوره‌های ۲ و ۵ خدمت مورد نیاز را دریافت می‌کند. این مثال عیناً برای شناورهای سرچاهی متحرک نیز به همین صورت است. تعداد شناورها در ابتدای مسئله مشخص است و این تعداد در مقایسه با میزان نیازمندی به خدمت، بسیار کمتر است و بنابراین همواره مقداری کمبود در هر دوره برنامه‌ریزی برای سه‌نوع خدمت اتفاق می‌افتد که برای هر واحد کمبود خدمت، هزینه‌ی معادل با  $R^H$  در نظر گرفته شده است به‌طوری‌که  $(H \in \{a, b, c\})$ .

مسئله دارای یک ایستگاه مرکزی به عنوان نقطه‌ی شروع و پایان تورهای شناور است که در این مقاله با نماد  $o$  نشان داده می‌شود. اگر در خلال یک دوره، هر یک از آنها اعم از پشتیبان و سرچاهی متحرک، ایستگاه مرکزی را ترک کنند، باید در خلال همان دوره به ایستگاه مرکزی بازگردند. مدت‌زمان مورد نیاز برای ارائه‌ی خدمات  $a, b, c$ ، به‌ترتیب برابر با مقادیر ثابت و معین  $d^a, d^b, d^c$  است و مستقل از سکوی سرچاهی و شناور است. همچنین مدت‌زمان سفر شناورهای پشتیبان و سرچاهی متحرک بین ایستگاه مرکزی و سکوهای سرچاهی را به‌ترتیب با  $t_{ij}$  و  $t'_{ij}$  و هزینه‌ی سفر آنها را به‌ترتیب با  $c_{ij}$  و  $c'_{ij}$  نشان می‌دهیم که  $(i, j \in W \cup \{o\}, i \neq j)$ . به دلیل هزینه‌های گراف به‌کارگیری شناورهای سرچاهی متحرک، انتظار آنها در محل سکوهای سرچاهی به‌منظور دریافت خدمت  $c$  از شناور پشتیبان مجاز نیست، اما شناور پشتیبان حداکثر به میزان  $Dy$  می‌تواند برای ارائه‌ی خدمت مذکور به شناور سرچاهی متحرک منتظر شود. ضمناً شناور پشتیبان نمی‌تواند هم‌زمان خدمات  $a$  و  $c$  را ارائه دهد. شناور سرچاهی متحرک نیز نمی‌تواند خدمت  $c$  را هم‌زمان با ارائه‌ی خدمت  $b$  به سکوی سرچاهی، از شناور پشتیبان دریافت کند.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، شناورهای سرچاهی متحرک علاوه بر نقش تأمین‌کننده‌ی خدمات چاه‌ها برای سکوهای سرچاهی، همانند سکوها در نقش دریافت‌کننده‌ی خدمات  $c$  از شناورهای پشتیبان نیز هستند، با این تفاوت که مثل آنها دارای مکان ثابتی نیستند. به همین دلیل زمانی که یک شناور سرچاهی متحرک برای ارائه‌ی خدمات چاه‌ها به یکی از سکوهای سرچاهی مراجعه می‌کند، آن‌گاه می‌تواند در صورت نیاز و در پنجره‌ی زمانی معین شده، خدمات لازم را در محل آن سکو از یکی از شناورهای پشتیبان دریافت کند. در مجموع در محل یک سکوی سرچاهی در یک دوره‌ی برنامه‌ریزی، امکان رخداد شش حالت مختلف وجود دارد: حالت اول، ارائه‌ی خدمت  $b$  به سکو توسط یک شناور سرچاهی متحرک و همچنین ارائه‌ی خدمات  $a$  و  $c$  به ترتیب به سکو و همان شناور سرچاهی متحرک توسط یک شناور پشتیبان؛ حالت دوم، ارائه‌ی خدمت  $b$  به سکو توسط یک شناور سرچاهی متحرک و همچنین ارائه‌ی خدمت  $c$  به همان شناور سرچاهی متحرک توسط یک شناور پشتیبان؛ حالت سوم، ارائه‌ی خدمات  $a$  و  $c$  به سکو به ترتیب توسط یک شناور پشتیبان و یک شناور سرچاهی متحرک؛ حالت چهارم، ارائه‌ی خدمت  $a$  به سکو توسط یک شناور پشتیبان؛ حالت پنجم، ارائه‌ی خدمت  $b$  به سکو توسط یک شناور سرچاهی متحرک؛ و نهایتاً حالت ششم، عدم مراجعه هیچ شناوری اعم از پشتیبان و سرچاهی متحرک به سکو. شکل ۲ وضعیت‌های مختلفی از لحظه‌ی رسیدن شناورها به یک سکوی سرچاهی را در یک دوره نشان می‌دهد.

وضعیت‌های (الف)، (ب) و (ج) به حالت اول و (د)، (و) و (ی) به حالت دوم مربوط می‌شوند. برای مثال در وضعیت (الف) شناورها به‌طور هم‌زمان به سکو می‌رسند؛ به‌طوری‌که ابتدا شناور پشتیبان خدمت  $c$  را به شناور سرچاهی متحرک ارائه

وضعیت‌های موجه در محل یک سکوی سرچاهی در یک دوره‌ی مشخص است. اگر  $d^c > l_m - e_m$ ، وضعیت‌های موجه که در جواب نهایی می‌تواند حاصل شود، عبارت‌اند از (الف-۱)، (الف-۲)، (الف-۳) و (الف-۴)، ولی اگر  $d^c > l_m - e_m$  آنگاه وضعیت‌های موجه ممکن عبارت‌اند از عبارت‌اند از (ب-۱)، (ب-۲)، (ب-۳) و در نهایت اگر  $d^c = l_m - e_m$  فقط وضعیت موجه (ج) است. در واقع در تمام وضعیت‌های موجه در شکل ۳، ارائه‌ی خدمت  $c$  به شناور سرچاهی متحرک توسط شناور پشتیبان، در پنجره‌ی زمانی تعیین شده آغاز می‌شود.

### ۳. مدل ریاضی

به‌منظور مدل‌سازی مسئله، مدل ریاضی مسئله‌ی PVRP در مقاله [۲] به عنوان مدل مینا استفاده شده و سپس براساس مؤلفه‌های عملیاتی این مقاله تغییر و تکامل یافته و در نهایت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (Mixed Integer Programming) ارائه شده است. پیش از بررسی تابع هدف و محدودیت‌های مدل، به معرفی پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری مدل که شامل دو دسته متغیرهای دودویی و پیوسته‌اند، می‌پردازیم.

پارامترها به همراه توضیحات به شرح زیرند:

$W$ : مجموعه‌ی سکوهای سرچاهی؛

$A$ : مجموعه‌ی شناورهای پشتیبان؛

$B$ : مجموعه‌ی شناورهای سرچاهی متحرک؛

$P$ : مجموعه‌ی دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی؛

$D$ : سقف زمانی دوره‌های برنامه‌ریزی؛

$a$ : نماد خدمت عمومی برای ارائه به سکوی سرچاهی؛

$b$ : نماد خدمت سرچاهی برای ارائه به سکوی سرچاهی؛

$c$ : نماد خدمت عمومی برای ارائه به شناور سرچاهی متحرک؛

$F_i^H$ : بسامد خدمت موردنیاز از نوع  $H$  برای سکوی سرچاهی  $i$  در افق برنامه‌ریزی  $(i \in W, H \in \{a, b\})$ ؛

$Q_i^H$ : مجموعه‌ی ترکیبات مجاز دریافت خدمت از نوع  $H$  برای سکوی سرچاهی  $i$  در افق برنامه‌ریزی  $(i \in W, H \in \{a, b\})$ ؛

$F_m^c$ : بسامد خدمت موردنیاز از نوع  $c$  برای شناور سرچاهی متحرک  $m$  در افق برنامه‌ریزی  $(m \in B)$ ؛

$Q_m^c$ : مجموعه‌ی ترکیبات مجاز دریافت خدمت از نوع  $c$  برای شناور سرچاهی  $m$  در افق برنامه‌ریزی  $(m \in B)$ ؛

$[e_m, l_m]$ : پنجره‌ی زمانی دریافت خدمت از نوع  $c$  برای شناور سرچاهی متحرک  $m$  در افق برنامه‌ریزی  $(m \in B)$ ؛

$R^H$ : هزینه‌ی هر واحد کمبود خدمت از نوع  $H$  برای سکوهای سرچاهی و شناورهای پشتیبان در افق برنامه‌ریزی  $(H \in \{a, b, c\})$ ؛

$o$ : نماد ایستگاه مرکزی؛

$d^a$ : مدت زمان موردنیاز برای ارائه‌ی خدمت از نوع  $a$ ؛

$d^b$ : مدت زمان موردنیاز برای ارائه‌ی خدمت از نوع  $b$ ؛

$d^c$ : مدت زمان موردنیاز برای ارائه‌ی خدمت از نوع  $c$ ؛

$t_{ij}$ : مدت زمان سفر شناورهای پشتیبان بین ایستگاه مرکزی و سکوهای سرچاهی  $(i, j \in W \cup \{o\}, i \neq j)$ ؛

$t'_{ij}$ : مدت زمان سفر شناورهای سرچاهی متحرک بین ایستگاه مرکزی و سکوهای

سرچاهی  $(i, j \in W \cup \{o\}, i \neq j)$ ؛

$c_{ij}$ : هزینه‌ی سفر شناورهای پشتیبان بین ایستگاه مرکزی و سکوهای سرچاهی  $(i, j \in W \cup \{o\}, i \neq j)$ ؛

$c'_{ij}$ : هزینه‌ی سفر شناورهای سرچاهی متحرک بین ایستگاه مرکزی و سکوهای سرچاهی  $(i, j \in W \cup \{o\}, i \neq j)$ ؛

$Dy$ : حداکثر زمان مجاز شناور پشتیبان برای انتظار به‌منظور رسیدن شناور سرچاهی متحرک به محل سکوی سرچاهی و دریافت خدمت از نوع  $c$ .

متغیرهای دودویی به همراه توضیحات به شرح زیرند:

$x_{ikl}^a$ : اگر شناور پشتیبان  $k$  در دوره‌ی  $l$  خدمت  $a$  را به سکوی سرچاهی  $i$  ارائه کند، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود  $(i \in W, k \in A, l \in P)$ ؛

$x_{ikml}^c$ : اگر شناور پشتیبان  $k$  در دوره‌ی  $l$  در محل سکوی سرچاهی  $i$  خدمت  $c$  را به شناور سرچاهی متحرک  $m$  ارائه کند، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود  $(i \in W, k \in A, m \in B, l \in P)$ ؛

$x_{ijk}$ : اگر شناور پشتیبان  $k$  در دوره‌ی  $l$  از  $i$  به  $j$  برود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود  $(i, j \in W \cup \{o\}, i \neq j, k \in A, l \in P)$ ؛

$x_{ijl}^b$ : اگر یک شناور سرچاهی متحرک در دوره‌ی  $l$  از  $i$  به  $j$  برود و خدمت  $b$  را به سکوهای سرچاهی مذکور ارائه کند، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود  $(i, j \in W \cup \{o\}, i \neq j, l \in P)$ ؛

$Z_r^H$ : اگر ترکیب خدمت  $r$  برای سکوی سرچاهی  $i$  برای ارائه‌ی خدمت  $H$  انتخاب شود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود  $(H \in \{a, b\}, i \in W)$ ؛

$Z_{mr}^c$ : اگر ترکیب خدمت  $r$  برای شناور سرچاهی متحرک  $m$  برای ارائه‌ی خدمت  $c$  انتخاب شود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود  $(m \in B, r \in P)$ ؛

همچنین متغیرهای پیوسته در این مدل عبارت‌اند از:

$S_{jki}$ : زمان رسیدن شناور پشتیبان  $k$  در دوره‌ی  $l$  به  $j$   $(j \in W \cup \{o\}, k \in A, l \in P)$ ؛

$S'_{ji}$ : زمان رسیدن یک شناور سرچاهی متحرک در دوره‌ی  $l$  به سکوی سرچاهی  $j$   $(j \in W, l \in P)$ ؛

$S'_{iol}$ : زمان رسیدن یک شناور سرچاهی متحرک به ایستگاه مرکزی که از سکوی سرچاهی  $i$  به سوی ایستگاه حرکت کرده است  $(i \in W, l \in P)$ ؛

$Delay_{ikl}$ : مدت زمان انتظار شناور پشتیبان  $k$  در محل سکوی سرچاهی  $i$  به‌منظور ارائه‌ی خدمت  $c$  به یک شناور سرچاهی متحرک در دوره‌ی  $l$   $(i \in W, k \in A, l \in P)$ .

در این مسئله به‌دنبال کمیته‌کردن هزینه‌های جابه‌جایی شناورها و هزینه‌های کمبود خدمات هستیم. بخش هزینه‌های جابه‌جایی شناورها بین سکوهای سرچاهی و ایستگاه مرکزی مطابق رابطه‌ی ۱، هزینه‌های کمبود خدمات مطابق رابطه‌های ۲ و ۳ است:

$$Obj_1 = \sum_i \sum_j \sum_l \left( c_{ij} x_{ijl}^b + \sum_k c_{ijk} x_{ijk} \right) \quad (1)$$

$$Obj_2 = \sum_i \left( R^a (F_i^a - \sum_k \sum_l x_{ikl}^a) + R^b (F_i^b - \sum_j \sum_l x_{ijl}^b) \right) \quad (2)$$

$$Obj_3 = \sum_m R^c \left( F_m^c - \sum_i \sum_k \sum_l x_{ikml}^c \right) \quad (3)$$

دسته محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ شرایطی را فراهم می‌کنند که اگر در هر دوره، شناورها از ایستگاه مرکزی خارج شوند یا به یک سکوی سرچاهی مراجعه کنند، در همان دوره باید به ایستگاه مرکزی بازگردند یا سکو را ترک کنند.

$$\sum_j x_{ijl}^b = \sum_j x_{jil}^b \quad \forall i \in W \cup \{o\}, l \in P \quad (16)$$

$$\sum_j x_{ijkl} = \sum_j x_{jikl} \quad \forall i \in W \cup \{o\}, k \in A, l \in P \quad (17)$$

رعایت سقف زمانی برای زمان رسیدن شناورها در هر دوره به ایستگاه مرکزی در قالب دسته محدودیت‌های مندرج در رابطه‌های ۱۸ و ۱۹ بیان شده است. همچنین در ادامه رابطه‌های ۱۸ و ۲۰ اطمینان می‌دهند که زمان رسیدن شناورها به یک سکوی سرچاهی در هر دوره در صورت فعال شدن متغیرهای دودویی مربوطه، مقداری حداکثر برابر با سقف زمانی دوره‌های برنامه‌ریزی مسئله بگیرد و در غیر این صورت برابر با صفر شود. ضمناً اگر این شناورها در ابتدای یک دوره از ایستگاه مرکزی خارج نشوند، مقدار  $S'_{jl}$ ،  $S'_{ol}$  و  $S'_{ijl}$  به صورت اجباری برابر با صفر خواهند بود. در واقع در این محدودیت‌ها ارتباط منطقی بین متغیرهای زمان‌بندی و دودویی مربوطه برقرار می‌شود.

$$S_{jkl} \leq \sum_i D x_{ijkl} \quad \forall j \in W \cup \{o\}, k \in A, l \in P \quad (18)$$

$$S_{iol}' \leq \sum_j D x_{ioj}^b \quad \forall i \in W, l \in P \quad (19)$$

$$S_{jl}' \leq \sum_i D x_{ijl}^b \quad \forall j \in W, l \in P \quad (20)$$

رابطه‌های ۲۱ و ۲۲ دسته محدودیت‌های زمان‌بندی برای زمانی هستند که شناورها در یک دوره برای ارائه خدمات از ایستگاه مرکزی به محل یک سکوی سرچاهی عزیمت کرده‌اند. ضمناً در این رابطه‌ها و سایر رابطه‌های مشابه نماد  $M$  به معنای یک عدد بزرگ است.

$$S_{jkl} \geq t_{oj} - M(1 - x_{ojkl}) \quad \forall j \in W, k \in A, l \in P \quad (21)$$

$$S_{jl}' \geq t_{oj}' - M(1 - x_{ojl}^b) \quad \forall j \in W, l \in P \quad (22)$$

دسته محدودیت‌های زمان‌بندی مربوط به زمانی که شناورها در یک دوره پس از ارائه خدمات در یک سکوی سرچاهی برای بازگشت به ایستگاه مرکزی یا برای ارائه خدمات به یک سکوی سرچاهی دیگر می‌روند، در رابطه‌های ۲۳ تا ۲۵ آمده‌اند.

$$S_{jkl} \geq S_{ikl} + d^a x_{ikl}^a + d^c \left( \sum_m x_{ikml}^c \right) + t_{ij} + Delay_{ikl} - M(1 - x_{ijkl}) \quad \forall i \in W, j \in W \cup \{o\}, i \neq j, k \in A, l \in P \quad (23)$$

$$S_{jl}' \geq S_{il}' + d^b + d^c \left( \sum_k \sum_m x_{ikml}^c \right) + t_{ij}' - M(1 - x_{ijl}^b) \quad \forall i, j \in W, i \neq j, l \in P \quad (24)$$

$$S_{iol}' \geq S_{il}' + d^b + d^c \left( \sum_k \sum_m x_{ikml}^c \right) + t_{io}' - M(1 - x_{ioj}^b) \quad \forall i \in W, l \in P \quad (25)$$

بنابراین تابع هدف مدل برابر با کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های مذکور مطابق عبارت ۴ بصورت زیر می‌باشد:

$$Minimize \quad Obj = Obj_1 + Obj_2 + Obj_3 \quad (4)$$

حال به بررسی محدودیت‌های مدل ریاضی می‌پردازیم. دسته محدودیت‌های عبارات ۵ و ۶ تضمین می‌کنند تا از مجموعه‌های  $Q_i^a$ ،  $Q_i^b$  و  $Q_m^c$  در جواب‌های موجه مدل، برای سکوهای سرچاهی یکی از ترکیب‌های مجاز دریافت خدمت  $a$  و یکی از ترکیب‌های خدمت  $b$  و برای شناورهای سرچاهی متحرک یکی از ترکیب‌های مجاز دریافت خدمت  $c$  انتخاب شوند؛

$$\sum_r Z_{ir}^H = 1 \quad \forall i \in W, H \in \{a, b\} \quad (5)$$

$$\sum_r Z_{mr}^c = 1 \quad \forall m \in B \quad (6)$$

رابطه‌های ۷، ۸ و ۹ بیانگر یک رابطه منطقی بین انتخاب ترکیب خدمات  $a$ ،  $b$  و  $c$  و متغیرهای تصمیم مربوطه هستند. در ضمن این محدودیت‌ها اجازه نمی‌دهند که در یک دوره، سکوهای سرچاهی و شناورهای سرچاهی متحرک بیش از یک بار خدمات مذکور را دریافت کنند. در این عبارات  $e_{rl}$  برابر یک است اگر دوره  $l$  در ترکیب خدمت  $r$  وجود داشته باشد و در غیر این صورت برابر صفر است.

$$\sum_k x_{ikl}^a \leq \sum_r e_{rl} Z_{ir}^a \quad \forall i \in W, l \in P \quad (7)$$

$$\sum_j x_{ijl}^b \leq \sum_r e_{rl} Z_{ir}^b \quad \forall i \in W, l \in P \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_k x_{ikml}^c \leq \sum_r e_{rl} Z_{mr}^c \quad \forall m \in B, l \in P \quad (9)$$

رابطه‌های ۱۰ تا ۱۳ بیانگر روابط منطقی بین متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به شناورها هستند.

$$x_{ikl}^a \leq \sum_j x_{ijkl} \quad \forall i \in W, k \in A, l \in P \quad (10)$$

$$\sum_k \sum_m x_{ikml}^c \leq \sum_j x_{ijl}^b \quad \forall i \in W, l \in P \quad (11)$$

$$\sum_m x_{ikml}^c \leq \sum_j x_{ijkl} \quad \forall i \in W, k \in A, l \in P \quad (12)$$

$$\sum_j x_{ijkl} \leq x_{ikl}^a + \sum_m x_{ikml}^c \quad \forall i \in W, k \in A, l \in P \quad (13)$$

دسته محدودیت‌های اشاره شده در رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ اطمینان می‌دهند که شناورها در هر دوره، برای خدمت‌رسانی حداکثر یک‌بار می‌توانند از ایستگاه مرکزی خارج شوند. همچنین عبارت ۱۴ اجازه می‌دهد که شناورهای پشتیبان در هر دوره حداکثر یک‌بار به یک سکوی سرچاهی مراجعه کنند.

$$\sum_j x_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i \in W \cup \{o\}, k \in A, l \in P \quad (14)$$

$$\sum_j x_{ojl}^b \leq |B| \quad \forall j \in W, l \in P \quad (15)$$

محدودیت ۲۶ بیان‌گر میزان بیشینه‌ی مدت زمان انتظار مجاز شناور پشتیبان در محل هر یک از سکوها‌ی سرچاهی برای ارائه‌ی خدمت  $c$  به یک شناور سرچاهی متحرک است.

$$Delay_{ikl} \leq Dy(\sum_m x_{ikml}^c) \quad \forall i \in W, k \in A, l \in P \quad (26)$$

در رابطه‌های ۲۷ و ۲۸، تلاقی متغیرهای زمان‌بندی شناورهای پشتیبان و سرچاهی متحرک در شرایطی که قرار است خدمت  $c$  در محل یک سکوی سرچاهی در یک دوره صورت پذیرد، در قالب یک رابطه‌ی منطقی بیان شده است. در واقع این محدودیت الزام می‌کند که اولاً اگر خدمت  $c$  اتفاق افتاد و در نتیجه آن به دلیل رابطه‌ی ۹ متغیر دودویی مربوطه مقدار یک گرفت، متغیرهای زمان‌بندی متناظر آنها نیز با توجه به توالی عملیات مقادیر متناسب بگیرند.

$$S_{ikl} - S_{il'} \leq d^b + M(1 - \sum_m x_{ikml}^c) \quad \forall i \in W, k \in A, l \in P \quad (27)$$

$$S_{ikl} - S_{il'} \geq -d^a x_{ikl}^a - Delay_{ikl} - M(1 - \sum_m x_{ikml}^c) \quad \forall i \in W, k \in A, l \in P \quad (28)$$

در این الگوریتم، فهرست اطلاعات عبارت است از فهرست به روز شده‌ی اطلاعات ورودی مسئله شامل  $F_m^a, F_m^b, F_m^c, Q_m^a, Q_m^b, Q_m^c$ . در واقع زمانی که برای اولین بار هر تکرار الگوریتم اجرا می‌شود، فهرست اطلاعات برابر است با اطلاعات ورودی مسئله. حال پس از هر تورسازی برای شناورها، فهرست اطلاعات به‌روزی می‌شود و بقیه‌ی الگوریتم براساس آخرین فهرست اطلاعات ادامه پیدا می‌کند. در این الگوریتم، فهرست سیاه عبارت است از فهرست نشانه‌ها و مشخصه‌هایی که الگوریتم را به سمت تولید جواب‌های ناموجه سوق می‌دهد. در واقع زمانی که برای اولین بار هر تکرار الگوریتم اجرا می‌شود، فهرست سیاه یک فهرست تهی و بدون عضو است. حال هر زمان که الگوریتم در حین مسیریابی برای شناورها نتواند تورهای موجهی بسازد، مشخصه‌هایی از مسئله را که منجر به این وضعیت می‌شود، در فهرست سیاه نگهداری می‌کند. به عبارت بهتر فهرست سیاه کمک خواهد کرد تا از به‌کارگیری یک ترکیب پایه اولیه‌ی که منجر به جواب موجه نخواهد شد (طبق تجربه‌ی تکرارهای قبلی)، جلوگیری کند. فهرست تکراری عبارت است از فهرست نشانه‌ها و مشخصه‌هایی که الگوریتم را به سمت تولید جواب‌های موجه تکراری در تکرارهای قبلی سوق می‌دهد. در واقع زمانی که برای اولین بار هر تکرار الگوریتم اجرا می‌شود، فهرست تکراری یک فهرست تهی و بدون عضو است. حال هر زمان که الگوریتم در حین مسیریابی برای شناورها تورهای موجهی بسازد، مشخصه‌هایی از مسئله را که منجر به این وضعیت می‌شود، در فهرست تکراری نگهداری می‌کند. به عبارت بهتر فهرست تکراری کمک خواهد کرد تا از به‌کارگیری یک ترکیب پایه‌ی اولیه که منجر به جواب موجه تکراری شود (طبق تجربه تکرارهای قبلی)، جلوگیری کند. الگوریتم ابتکاری پیشنهادی یک الگوریتم تکرار شونده است که فلوچارت نحوه‌ی اجرای هر تکرار آن در شکل ۴ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بدنه‌ی اجرایی در هر تکرار به چهار بخش تقسیم می‌شود. در بخش اول در قالب یک حلقه‌ی تکرار شونده، تا جایی که شرایط موجه بودن فراهم باشد و نیازهای خدماتی رفع شود، بر اساس یک  $IBC^{abc}$ ، تورهای موجه مربوطه برای رفع هم‌زمان سه نوع خدمت ساخته می‌شوند تا به‌طور هم‌زمان نیازهای خدمت  $c$  برای شناورهای سرچاهی متحرک با توجه به پنجره‌های زمانی معین و نیازهای خدمات  $a$  و  $b$  برای سکوها‌ی سرچاهی مورد توجه قرار گیرد. در هر تکرار از این بخش، ابتدا تمام  $IBC^{abc}$ های ممکن براساس آخرین تغییرات فهرست اطلاعات، فهرست سیاه و فهرست تکراری ساخته می‌شوند و از بین آنها  $IBC^{abc}$ ی انتخاب

در نهایت دسته محدودیت‌های ۲۹ و ۳۰ اطمینان می‌دهند که ارائه‌ی خدمت  $c$  به شناورهای سرچاهی متحرک توسط شناورهای پشتیبان در پنجره‌های زمانی تعیین شده صورت پذیرد.

$$S_{il'} \geq \sum_k \sum_m e_m x_{ikml}^c - d^b - M(1 - \sum_k \sum_m x_{ikml}^c) \quad \forall i \in W, l \in P \quad (29)$$

$$S_{il'} \leq \sum_k \sum_m l_m x_{ikml}^c + M(1 - \sum_k \sum_m x_{ikml}^c) \quad \forall i \in W, l \in P \quad (30)$$

#### ۴. الگوریتم ابتکاری

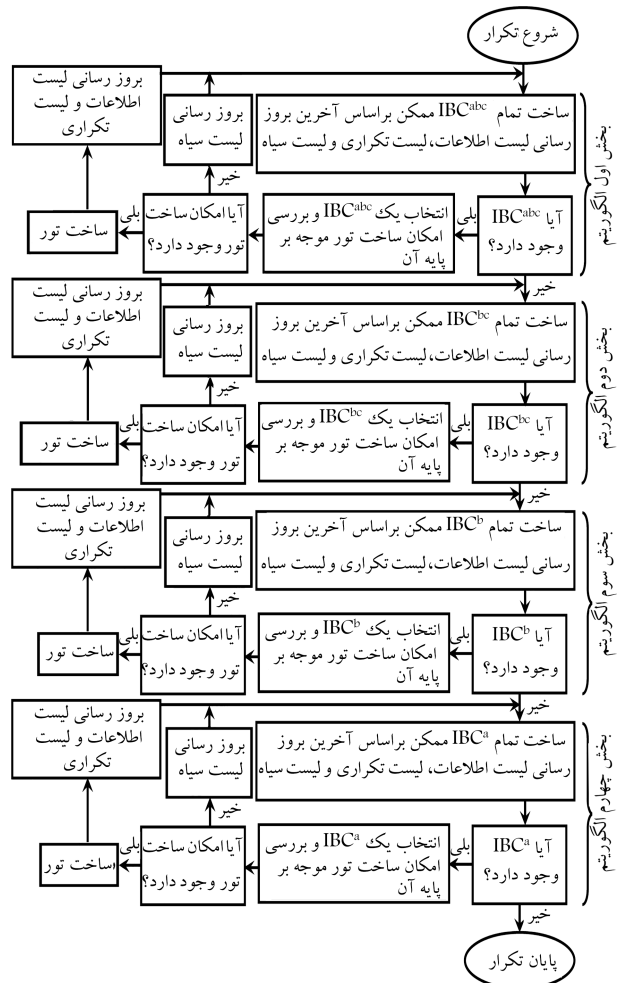
همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، مسئله‌ی PVRPTW یکی از زیرمجموعه‌های عمومیت داده شده‌ی مسئله کلاسیک VRP، که یکی از معروف‌ترین مسائل بهینه‌سازی ترکیبی NP-hard است، می‌باشد. پیچیدگی مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی حمل‌ونقل بررسی شده و ثابت شده است که این مسئله و تمام مسائل زیرمجموعه‌ی آن که هر کدام از بعدی آن را عمومیت می‌بخشند، به ازای تمام نموده‌های ورودی، با الگوریتم حلی در زمان چندجمله‌یی قابل حل نیستند<sup>[۳۰]</sup> و مسئله‌ی مورد نظر این مقاله نیز NP-hard است. روش‌های حل ابتکاری و فرالابتکاری برای این‌گونه مسائل کاربردی است؛ با بررسی مقالات روند روبه رشد توسعه‌ی الگوریتم‌های ابتکاری و فرالابتکاری در دهه‌ی اخیر به‌خوبی به چشم می‌خورد. در این بخش یک الگوریتم ابتکاری به‌منظور حل مسئله معرفی می‌شود که بر پایه‌ی شرایط عملیاتی مسئله توسعه داده شده است.

چهار نوع ترکیب پایه‌ی اولیه که به اختصار با  $IBC^{abc}$ ،  $IBC^{bc}$ ،  $IBC^b$  و  $IBC^a$  نشان داده می‌شوند، به ترتیب با  $(m, q_m^c, i, q_i^b)$ ،  $(m, q_m^c, i, q_i^a, q_i^b)$ ،  $(m, q_m^c, i, q_i^b)$  و  $(i, q_i^a)$  تعریف می‌شوند و در آنها  $m \in B$  معرف یکی از شناورهای

مذکور و ساخت یک تور جدید، اگر در زیرتورهای  $z \rightarrow o \rightarrow k \rightarrow j$  سکوی  $i$  را اضافه کنیم، باید مجدداً موجه بودن تورهای شناورهای  $m'$  و  $m''$  را که به لحاظ زمان بندی به این تور وابسته اند، به همراه تورهای  $o \rightarrow k \rightarrow j \rightarrow i \rightarrow o$  یا  $o \rightarrow i \rightarrow j \rightarrow k \rightarrow o$  برای شناور پشتیبان مذکور از لحاظ زمان بندی و رعایت پنجره زمانی بررسی کنیم و اگر در زیرتور  $o \rightarrow k \rightarrow j$  این سکوی را اضافه کنیم، صرفاً موجه بودن تور  $o \rightarrow k \rightarrow j \rightarrow i \rightarrow o$  را از نظر زمان بندی و پنجره زمانی بررسی کنیم. در هر حال در این بخش با اضافه کردن سکوی  $i$  در تمام ظرفیت های خالی شناورهای پشتیبان، در نهایت توری متعلق به یکی از شناورها انتخاب می شود که ضمن موجه بودن، دارای کمترین هزینه باشد. اگر پس از بررسی تمام حالات اضافه کردن سکوی در ظرفیت های خالی شناورها در تمام دوره های مشترک، امکان تورسازی هم زمان شناورها وجود نداشته باشد، آنگاه مشخصه های مربوط به این وضعیت در فهرست سیاه ذخیره می شود. اگر در هر یک از دوره های مشترک، توری برای شناورها ساخته شد، مشخصه های مربوط به تورها در فهرست تکراری ذخیره می شوند و مقادیر باقی مانده  $F_i^a, F_i^b, F_m^c$  و مجموعه های  $Q_i^a, Q_i^b, Q_m^c$  به روزرسانی شده و در فهرست اطلاعات ذخیره می شوند و مجدداً نسبت به ساخت تمام  $IBC^{abc}$  های ممکن اقدام و روند توضیح داده شده تکرار می شود تا جایی که دیگر  $IBC^{abc}$  بی با حداقل یک دوره مشترک وجود نداشته باشد که در این وضعیت به بخش دوم می رویم.

در بخش دوم با یک رویکرد تکرار شونده، بر اساس یک  $IBC^{bc}$  با بیشترین دوره های مشترک بین  $q_m^a$  و  $q_i^b$ ، تورهای موجه برای رفع دو نوع خدمت ساخته می شوند تا به طور هم زمان نیازهای خدمت  $c$  برای شناورهای سرچاهی متحرک با توجه به پنجره های زمانی معین و نیازهای خدمت  $b$  برای سکوهای سرچاهی مورد توجه قرار گیرد. کلیدی گام های این بخش مشابه بخش اول است با این تفاوت که تمامی اقدامات بر مبنای یک  $IBC^{bc}$  انجام می شود.

در بخش سوم در یک فرایند تکراری، بر اساس یک  $IBC^b$ ، تورهای تکمیلی موجه به منظور رفع نیازهای خدمت  $b$  برای سکوهای سرچاهی ساخته می شوند. در هر تکرار از این بخش، ابتدا تمام  $IBC^b$  های ممکن بر اساس آخرین تغییرات فهرست اطلاعات، فهرست سیاه و فهرست تکراری ساخته می شوند و از بین آنها  $IBC^b$  بی انتخاب می شود که دارای بیشترین  $F_i^b$  است. اگر هیچ  $IBC^b$  بی با  $F_i^b$  بزرگ تر از صفر یافت نشد، به بخش چهارم می رویم. اما چنانچه بیش از یک  $IBC^b$  دارای چنین شرایطی بودند، از بین آنها یکی را به طور تصادفی انتخاب می کنیم. اکنون برای هر دوره متعلق به  $IBC^b$  انتخابی، باید یک تور برای یکی از شناورهای سرچاهی متحرک بسازیم و موجه بودن از نظر زمان بندی را بررسی کنیم. برای یک شناور سرچاهی متحرک با اندیس  $m$ ، با دو حالت مواجه هستیم. یا در حال حاضر دارای هیچ توری نیست که در این صورت تنها تور ممکن  $o \rightarrow i \rightarrow o$  است یا این که دارای یک تور مانند  $o \rightarrow k \rightarrow j \rightarrow i \rightarrow o$  است به این معنا که علاوه بر ارائه خدمت  $b$  در محل سکوهای  $j$  و  $k$  توسط شناور سرچاهی متحرک  $m$ ، در محل سکوی  $j$  ارائه خدمت  $c$  به شناور سرچاهی متحرک  $m$  در پنجره زمانی  $[e_m, l_m]$  توسط یکی از شناورهای پشتیبان انجام می شود. حال به منظور اضافه کردن سکوی  $i$  در تور مذکور و ساخت یک تور جدید، اگر در زیرتور  $(j) \rightarrow o \rightarrow k \rightarrow j$  یا  $(j) \rightarrow i \rightarrow k \rightarrow j$  سکوی  $i$  را اضافه کنیم، به دلیل امکان تغییر در زمان بندی مسیر، باید مجدداً موجه بودن تور شناور پشتیبان مذکور را به همراه تور جدید  $o \rightarrow k \rightarrow j \rightarrow i \rightarrow o$  یا  $o \rightarrow i \rightarrow j \rightarrow k \rightarrow o$  بررسی کنیم و اگر در زیرتورهای  $(j) \rightarrow k \rightarrow j$  یا  $(j) \rightarrow i \rightarrow k \rightarrow j$  سکوی  $i$  را اضافه کنیم، صرفاً موجه بودن تورهای  $o \rightarrow k \rightarrow j \rightarrow i \rightarrow o$  یا  $o \rightarrow i \rightarrow j \rightarrow k \rightarrow o$  را از نظر زمان بندی و رعایت پنجره زمانی بررسی کنیم و اگر در هر یک از دوره های مشترک، توری برای شناورهای سرچاهی متحرک  $m' \neq m'' \neq m$  یا  $m' \neq m'' \neq m$  وجود داشته باشد، آنگاه مشخصه های مربوط به این وضعیت در فهرست سیاه ذخیره می شود. اگر در هر یک از دوره های مشترک، توری برای شناورها ساخته شد، مشخصه های مربوط به تورها در فهرست تکراری ذخیره می شوند و مقادیر باقی مانده  $F_i^a, F_i^b, F_m^c$  و مجموعه های  $Q_i^a, Q_i^b, Q_m^c$  به روزرسانی شده و در فهرست اطلاعات ذخیره می شوند و مجدداً نسبت به ساخت تمام  $IBC^{abc}$  های ممکن اقدام و روند توضیح داده شده تکرار می شود تا جایی که دیگر  $IBC^{abc}$  بی با حداقل یک دوره مشترک وجود نداشته باشد که در این وضعیت به بخش دوم می رویم.



شکل ۴. فلوچارت نحوه اجرای یک تکرار از الگوریتم ابتکاری.

می شود که دارای بیشترین دوره های مشترک بین  $q_m^c, q_i^a, q_i^b$  است. اگر هیچ  $IBC^{abc}$  بی با حداقل یک دوره مشترک یافت نشد، به بخش دوم می رویم. اما چنانچه بیش از یک  $IBC^{abc}$  دارای چنین شرایطی بودند، از بین آنها یکی را به طور تصادفی انتخاب می کنیم. در مثال پیش گفته،  $\{(1, (1; 3)), (1, (1; 4)), (1, (2; 4)), (2, (2; 3)), (2, (2; 4))\}$  و  $\{(1, (2; 4)), (2, (1; 4)), (2, (2; 4))\}$  سه ترکیب پایه با یک دوره مشترک هستند. اکنون برای هر دوره مشترک در  $IBC^{abc}$  انتخابی، باید یک تور برای شناور سرچاهی متحرک  $m$  و یک تور برای یکی از شناورهای پشتیبان بسازیم و برای هر دوی آنها موجه بودن از نظر زمان بندی و رعایت پنجره زمانی  $[e_m, l_m]$  را بررسی کنیم. برای شناور سرچاهی متحرک  $m$  فقط تور ممکن  $o \rightarrow i \rightarrow o$  است. زیرا تا قبل از این بخش، الگوریتم اجازه نداشته است به صورت مستقل برای شناورهای سرچاهی متحرک به منظور صرفاً رفع نیازهای خدمت  $b$  برای سکوهای سرچاهی تور بسازد. برای هر شناور پشتیبان، با دو حالت مواجه هستیم. یا در حال حاضر دارای هیچ توری نیست که در این صورت تنها تور ممکن  $o \rightarrow i \rightarrow o$  است یا این که دارای یک تور مانند  $o \rightarrow k \rightarrow j \rightarrow i \rightarrow o$  است؛ به این معنا که در محل سکوهای  $j$  و  $k$  ارائه خدمت  $c$  به شناورهای سرچاهی متحرک  $m'$  و  $m''$  در پنجره های زمانی  $[e_{m'}, l_{m'}]$  و  $[e_{m''}, l_{m''}]$  انجام می شود؛ بطوری که  $m' \neq m'' \neq m$  زیرا در هر دوره یک شناور سرچاهی متحرک بیش از یکبار خدمت  $c$  را دریافت نمی کند. حال به منظور اضافه کردن سکوی  $i$  در تور

از صفر یافت نشود، که در این وضعیت تا این‌جا یک تکرار از الگوریتم به پایان می‌رسد.

## ۵. نتایج عددی

در این بخش، به بررسی نتایج عددی به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ابتکاری معرفی شده می‌پردازیم. به‌دلیل نبود مسائل مشابه در سایر مقالات که منطبق با شرایط عملیاتی مسئله‌ی مورد نظر این مقاله باشند، ۸۰ نمونه مسئله‌ی واقعی منبث از هشت میدان نفتی مختلف در نظر گرفته شده و نتایج الگوریتم ابتکاری با نتایج حاصل از اعمال حل‌کننده‌ی CPLEX روی مدل ریاضی و همچنین نتایج حاصل از به‌کارگیری رویکردهای برنامه‌ریزی فعلی که مبتنی بر سازوکارهای غیرنظام‌مند و بهترین تجارب به دست آمده است، مقایسه شده‌اند. جدول ۱ اطلاعات مربوط به این میدان‌های نفتی را شامل تعداد سکوهای سرچاهی و شناورها، متوسط زمان سفر شناورها بین سکوها به ساعت و کمینه و بیشینه‌ی آنها، متوسط هزینه‌ی سفر بین سکوها به واحد پولی و کمینه و بیشینه‌ی آنها، تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی به روز، هزینه‌ی کمبود هر واحد خدمات  $a$ ،  $b$  و  $c$  به واحد پولی، زمان ارائه‌ی خدمات  $a$ ،  $b$  و  $c$  به ساعت، بیشینه‌ی زمان مجاز انتظار یک شناور پشتیبان به ساعت و سقف زمانی دوره‌ها به ساعت نشان می‌دهد. به‌منظور انجام مقایسه‌ها، کدنویسی الگوریتم ابتکاری، مدل ریاضی مسئله و حل آن به کمک حل‌کننده‌ی CPLEX ۱۲٫۶ در محیط برنامه‌نویسی Visual C++ انجام شده است و در بستر یک کامپیوتر با مشخصات سخت‌افزاری کوتاه‌مدت ۱۶GB (RAM) اجرا شده و مدت ۸ ساعت به‌عنوان حد توقف اجرای کد در نظر گرفته شد. برای همه‌ی نمونه‌ها، CPLEX بدون حصول به جواب بهینه، به حد زمانی توقف رسید و بهترین مقدار تابع هدف در حد زمانی توقف، به‌منظور مقایسه با نتایج حاصل از اعمال الگوریتم ابتکاری در نظر گرفته شد. ضمناً برای همه‌ی نمونه‌ها، الگوریتم ابتکاری با حد زمانی ۸ ساعت یا ۱۰۰۰ تکرار (هرکدام که زودتر واقع شود) اجرا شد و بهترین نتیجه‌ی حاصل تا حدود توقف در نظر گرفته شد. جدول ۲ یک جمع‌بندی از نتایج محاسباتی نمونه مسائل مذکور را نشان می‌دهد که در آن  $Z_C$ ،  $Z_{CPLEX}$  و  $Z_H$  به ترتیب معرف جواب حاصل از برنامه‌ریزی موجود، CPLEX و الگوریتم ابتکاری‌اند. برای هر نمونه مسئله، جواب اولین تکرار الگوریتم ابتکاری و زمان صرف شده برای آن، زمان صرف شده برای اولین تکراری که جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی شده بهبود پیدا می‌کنند، به دست آمده است. در نهایت میزان تفاوت نسبی بین جواب الگوریتم ابتکاری و به‌ترتیب جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود که نحوه‌ی محاسبه آنها به‌ترتیب به صورت  $(Z_{CPLEX} - Z_H) / Z_{CPLEX} \times 100$  و  $(Z_C - Z_H) / Z_C \times 100$  است، نشان داده شده است. در نمونه‌های میدان رشادت، جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به‌طور متوسط به ترتیب به مقدار  $4.7\%$  و  $5.21\%$  بهبود یافته‌اند و الگوریتم ابتکاری جواب‌های بهتری را نسبت به CPLEX به‌طور میانگین بعد از  $5/1$  تکرار با زمان  $40/9$  ثانیه و نسبت به برنامه‌ریزی موجود به‌طور میانگین بعد از  $1/2$  تکرار با زمان  $9/15$  ثانیه به دست می‌دهد. همچنین الگوریتم ابتکاری در اولین تکرار، نسبت به CPLEX در ۵ نمونه از ۱۰ و نسبت به جواب‌های برنامه‌ریزی موجود، در ۸ نمونه از ۱۰، جواب بهتری را تولید کرده است.

در نمونه‌های میدان نصر، جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به‌طور متوسط به ترتیب به مقدار  $3/1$ ٪ و  $4/15$ ٪ بهبود یافته‌اند. در بدترین حالت، در

سرچاهی متحرک  $m$  را از نظر زمان‌بندی بررسی کنیم. در هر حال در این بخش با اضافه کردن سکوی  $i$  در تمام ظرفیت‌های خالی شناورهای سرچاهی متحرک، در نهایت توری متعلق به یکی از شناورهای سرچاهی متحرک انتخاب می‌شود که ضمن موجه بودن، دارای کمترین هزینه باشد. اگر پس از بررسی تمام حالات اضافه کردن سکو در ظرفیت‌های خالی شناورهای سرچاهی متحرک در تمام دوره‌های متعلق به IBC<sup>b</sup> انتخابی، امکان تورسازی وجود نداشته باشد، آنگاه مشخصه‌های مربوط به این وضعیت در فهرست سیاه ذخیره می‌شود. اگر در هر یک از این دوره‌ها، تورسازی برای شناورهای سرچاهی متحرک انجام شد، مشخصه‌های مربوط به تورهای موجه ساخته شده در فهرست تکراری و مقادیر باقیمانده  $F_i^b$  و مجموعه‌ی  $Q_i^b$  به‌روزرسانی و در فهرست اطلاعات ذخیره می‌شوند و مجدداً نسبت به ساخت تمام IBC<sup>b</sup>‌های ممکن اقدام می‌شود و روند توضیح داده شده تکرار می‌شود تا جایی که دیگر IBC<sup>b</sup>‌ی با  $F_i^b$  بزرگتر از صفر یافت نشود، که در این وضعیت به بخش چهارم می‌رویم.

در نهایت در بخش چهارم در یک فرایند تکراری، براساس یک IBC<sup>a</sup>، تورهای تکمیلی موجه به‌منظور رفع نیازهای خدمت  $a$  برای سکوهای سرچاهی ساخته می‌شوند. در هر تکرار از این بخش، ابتدا تمام IBC<sup>a</sup>‌های ممکن براساس آخرین تغییرات فهرست اطلاعات، فهرست سیاه و فهرست تکراری ساخته می‌شوند و از بین آنها IBC<sup>a</sup>‌ی انتخاب می‌شود که دارای بیشترین  $F_i^a$  است. اگر هیچ IBC<sup>a</sup>‌ی با  $F_i^a$  بزرگتر از صفر یافت نشود، در این‌جا یک تکرار الگوریتم به پایان می‌رسد. اما چنانچه بیش از یک IBC<sup>a</sup> دارای چنین شرایطی بودند، از بین آنها یکی را به‌طور تصادفی انتخاب می‌کنیم. اکنون برای هر دوره متعلق به IBC<sup>a</sup> انتخابی، باید یک تور برای یکی از شناورهای پشتیبان بسازیم و موجه بودن از نظر زمان‌بندی را بررسی کنیم. برای یک شناور پشتیبان، با دو حالت مواجه هستیم. یا در حال حاضر دارای هیچ توری نیست که در این صورت تنها تور ممکن  $o \rightarrow i \rightarrow o$  است یا این‌که دارای یک تور مانند  $o \rightarrow (j) \rightarrow k \rightarrow o$  است؛ به این معنا که علاوه بر ارائه‌ی خدمت  $a$  در محل سکوهای  $j$  و  $k$  توسط شناور پشتیبان مذکور، در محل سکوی  $j$  خدمت  $c$  توسط این شناور پشتیبان به شناور سرچاهی متحرک  $m$  در پنجره‌ی زمانی  $[e_m, l_m]$  انجام می‌شود. حال به منظور اضافه کردن سکوی  $i$  در تور مذکور و ساخت یک تور جدید، اگر در زیرتور  $(j) \rightarrow o$  سکوی  $i$  را اضافه کنیم، به‌دلیل امکان تغییر در زمان‌بندی مسیر، باید مجدداً موجه بودن تور شناور سرچاهی متحرک  $m$  را به همراه تور جدید  $o \rightarrow (j) \rightarrow k \rightarrow o$  برای شناور پشتیبان مذکور از نظر زمان‌بندی و رعایت پنجره‌ی زمانی بررسی کنیم و اگر در زیرتورهای  $(j) \rightarrow k$  یا  $k \rightarrow o$  سکو را اضافه کنیم، صرفاً موجه بودن تورهای  $o \rightarrow (j) \rightarrow i \rightarrow k \rightarrow o$  یا  $o \rightarrow (j) \rightarrow k \rightarrow i \rightarrow o$  را برای شناور پشتیبان مذکور را از نظر زمان‌بندی بررسی کنیم. در هر حال در این بخش با اضافه کردن سکو در تمام ظرفیت‌های خالی شناورهای پشتیبان، در نهایت توری متعلق به یکی از شناورهای پشتیبان انتخاب می‌شود که ضمن موجه بودن، دارای کمترین هزینه باشد. اگر پس از بررسی تمام حالات اضافه کردن سکو در ظرفیت‌های خالی شناورها در تمام دوره‌های متعلق به IBC<sup>a</sup>، امکان تورسازی وجود نداشته باشد، آنگاه مشخصه‌های مربوط به این وضعیت در فهرست سیاه ذخیره می‌شود. اگر در هر یک از این دوره‌ها، تورسازی برای شناورهای پشتیبان انجام شد، مشخصه‌های مربوط به تورهای موجه ساخته شده در فهرست تکراری و مقادیر باقی‌مانده‌ی  $F_i^a$  و مجموعه‌ی  $Q_i^a$  به‌روزرسانی و در فهرست اطلاعات ذخیره می‌شوند و مجدداً نسبت به ساخت تمام IBC<sup>a</sup>‌های ممکن اقدام می‌شود و روند توضیح داده شده تکرار می‌شود تا جایی که دیگر IBC<sup>a</sup>‌ی با  $F_i^a$  بزرگتر



جدول ۱. اطلاعات مربوط به میادین نفتی.

میدان نفتی	W	A	B	$\bar{t}$	$t_{min}$	$t_{max}$	$\bar{t}'$	$t'_{min}$	$t'_{max}$	$\bar{c}$	$c_{min}$	$c_{max}$	$\bar{c}'$	$c'_{min}$	$c'_{max}$
رشادت	۷	۲	۱	۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۳۲	۰/۲۴	۰/۰۴	۰/۴۷	۱۵/۶۷	۲/۸۲	۳۱/۳۴	۳۶/۵۸	۶/۵۷	۷۳/۱۳
نصر	۸	۲	۱	۰/۲۱	۰/۰۶	۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۱	۰/۷۴	۲۰/۴۲	۶/۳۲	۴۸/۵۷	۴۷/۶۶	۱۴/۷۵	۱۱۳/۳۶
درود	۱۰	۲	۱	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۲۴	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۳۶	۸/۹۸	۲/۲۱	۲۳/۶	۲۰/۹۵	۵/۱۵	۵۵/۰۸
ابوذر	۱۱	۲	۱	۰/۲	۰/۰۳	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۰۴	۰/۶۸	۲۰/۲۷	۲/۷۶	۴۵/۱۶	۴۷/۳	۶/۴۳	۱۰۵/۳۹
فروزان	۱۴	۳	۲	۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۶۵	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۹۷	۲۵/۷	۲/۹۸	۶۴/۲۲	۵۹/۹۸	۶/۹۶	۱۴۹/۸۶
بهرگانسر	۱۵	۳	۲	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۳۴	۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۵۱	۱۴/۹۸	۲/۶۱	۳۳/۵۸	۴۳/۹۶	۶/۰۹	۷۸/۳۷
نوروز	۱۶	۳	۲	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۲	۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۳	۱۰/۴۲	۲/۱۴	۱۹/۹	۲۴/۳۲	۴/۹۹	۴۶/۴۴
سلمان	۲۸	۴	۳	۰/۲	۰/۰۲	۰/۴۹	۰/۳	۰/۰۲	۰/۷۴	۱۹/۷۶	۱/۵۲	۴۸/۶۱	۴۶/۱۲	۳/۵۵	۱۱۳/۴۳

برای همه نمونه ها =  $|P| = 7, R^a = 2500, R^b = 5000, R^c = 11250, d^a = 3, d^b = 4, d^c = 3, Dy = 2, D = 12$

جدول ۲. نتایج عددی برای نمونه مسائل.

نمونه	$Z_{C_{PLEX}}$	$Z_C$	الگوریتم ابتکاری														
			تکرار اول			تکراری که $Z_H \leq Z_{C_{PLEX}}$			تکراری که $Z_H \leq Z_C$			نتایج در حد توقف					
			زمان	$Z_H$	تکرار	زمان	$Z_H$	تکرار	زمان	$Z_H$	تکرار	زمان	$Z_H$	تکرار			
۱	۱۰۶۵۲۸/۴	۱۰۶۶۶۲/۶	۱۰۱۸۲۸/۵	۱	۸	۱۰۱۸۲۸/۵	۱	۸	۱۰۱۸۲۸/۵	۱	۸	۱۰۱۸۲۸/۵	۱۰۰۰	۸۷۳۷	۴/۶۵٪	۴/۷۷٪	
۲	۱۰۹۱۳۱/۱	۱۰۶۷۷۹/۳	۱۰۱۸۴۹/۸	۱	۷/۵	۱۰۱۸۴۹/۸	۱	۷/۵	۱۰۱۸۴۹/۸	۱	۷/۵	۱۰۱۸۴۹/۸	۱۰۰۰	۷/۵	۷۲۶۲/۵	۶/۹۱٪	۴/۸۶٪
۳	۱۶۴۹۴۳/۵	۱۱۹۸۹۳/۳	۱۱۴۲۱۷/۸	۱	۸/۵	۱۱۴۲۱۷/۸	۱	۸/۵	۱۱۴۲۱۷/۸	۱	۸/۵	۱۱۴۲۱۷/۸	۱۰۰۰	۱۷	۱۱۱۷۶۹/۴	۳۵/۲۹٪	۴/۷٪
۴	۹۹۰۸۰/۸	۱۰۱۹۲۸/۷	۹۹۲۹۲/۹	۶	۸/۵	۹۹۲۹۲/۹	۶	۸/۵	۹۹۲۹۲/۹	۶	۸/۵	۹۹۲۹۲/۹	۱۰۰۰	۸/۵	۹۹۲۹۲/۹	۲/۴۲٪	۵/۱۴٪
۵	۱۰۶۶۰۲/۳	۱۰۹۳۶۶/۶	۱۰۴۳۰۰/۸	۱	۵	۱۰۴۳۰۰/۸	۱	۵	۱۰۴۳۰۰/۸	۱	۵	۱۰۴۳۰۰/۸	۱۰۰۰	۵	۱۰۴۳۰۰/۸	۲/۲٪	۴/۶۷٪
۶	۱۱۹۱۹۵/۳	۱۱۴۵۲۷/۴	۱۱۱۸۸۹/۷	۱	۴	۱۱۱۸۸۹/۷	۱	۴	۱۱۱۸۸۹/۷	۱	۴	۱۱۱۸۸۹/۷	۱۰۰۰	۴	۱۱۱۸۸۹/۷	۸/۳۲٪	۴/۵۹٪
۷	۱۰۹۰۵۲/۲	۱۱۱۹۷۵/۲	۱۰۹۲۷۱/۸	۵	۵۷	۱۰۶۸۵۳/۹	۵	۵۷	۱۰۶۸۵۳/۹	۵	۵۷	۱۰۶۸۵۳/۹	۱۰۰۰	۱۱	۱۰۹۲۷۱/۸	۲/۲۱٪	۴/۷۶٪
۸	۱۱۱۶۲۱/۱	۱۱۶۵۸۵/۳	۱۱۱۷۶۸/۷	۸	۵/۵	۱۰۹۳۷۷/۱	۸	۵/۵	۱۰۹۳۷۷/۱	۸	۵/۵	۱۱۱۷۶۸/۷	۱۰۰۰	۵/۵	۱۱۱۷۶۸/۷	۲/۱۶٪	۶/۳۳٪
۹	۱۱۱۵۰۹/۵	۱۱۴۱۲۴/۵	۱۱۶۸۳۲/۶	۲	۸	۱۰۹۳۲۹/۱	۲	۸	۱۰۹۳۲۹/۱	۲	۸	۱۱۶۸۳۲/۶	۱۰۰۰	۸	۱۰۹۳۲۹/۱	۴/۳۱٪	۶/۵٪
۱۰	۱۲۶۶۶/۹	۱۳۱۹۲۱/۸	۱۲۹۳۳۶/۳	۲۵	۸	۱۲۹۳۳۶/۳	۲۵	۸	۱۲۹۳۳۶/۳	۲۵	۸	۱۲۹۳۳۶/۳	۱۰۰۰	۸	۱۲۹۳۳۶/۳	۱/۸۸٪	۵/۷۹٪
۱	۷۸۷۷۵/۱	۷۹۲۸۹/۶	۷۶۶۱۳/۱	۱	۷/۵	۷۶۶۱۳/۱	۱	۷/۵	۷۶۶۱۳/۱	۱	۷/۵	۷۶۶۱۳/۱	۱۰۰۰	۷/۵	۷۶۶۱۳/۱	۳/۱۳٪	۳/۷۶٪
۲	۸۸۸۲۷/۱	۸۷۰۲۰/۵	۹۱۷۸۳/۹	۹	۳/۵	۸۶۷۳۴/۸	۹	۳/۵	۸۶۷۳۴/۸	۹	۳/۵	۸۶۷۳۴/۸	۱۰۰۰	۳/۵	۸۶۷۳۴/۸	۵/۲۶٪	۳/۲۹٪
۳	۷۸۸۶۲/۱	۷۹۵۵۲/۱	۷۷۰۵۲/۳	۱	۸	۷۷۰۵۲/۳	۱	۸	۷۷۰۵۲/۳	۱	۸	۷۷۰۵۲/۳	۱۰۰۰	۸	۷۷۰۵۲/۳	۲/۸۲٪	۳/۶۶٪
۴	۹۸۷۳۹/۲	۱۰۲۷۷/۵	۹۶۸۱۵/۴	۳	۸/۵	۹۶۸۱۵/۴	۳	۸/۵	۹۶۸۱۵/۴	۳	۸/۵	۹۶۸۱۵/۴	۱۰۰۰	۲۴	۹۶۸۱۵/۴	۲/۴۱٪	۴/۸۵٪
۵	۱۰۸۶۷۲/۷	۱۱۱۳۴۸/۷	۱۰۶۸۴۴/۷	۴	۳/۵	۱۰۹۰۰۱/۵	۴	۳/۵	۱۰۹۰۰۱/۵	۴	۳/۵	۱۰۶۸۴۴/۷	۱۰۰۰	۳/۵	۱۰۶۳۷۱/۷	۲/۱۲٪	۴/۴۷٪
۶	۱۲۱۲۷۸/۷	۱۲۱۳۶۲/۸	۱۱۶۹۲۵/۳	۱	۴/۵	۱۱۶۹۲۵/۳	۱	۴/۵	۱۱۶۹۲۵/۳	۱	۴/۵	۱۱۶۹۲۵/۳	۱۰۰۰	۴/۵	۱۱۶۹۲۵/۳	۴/۱۱٪	۴/۱۱٪
۷	۱۰۸۸۰۴/۵	۱۱۱۳۷۹/۱	۱۰۹۳۲۹/۹	۲۶	۴/۵	۱۰۹۳۲۹/۹	۲۶	۴/۵	۱۰۹۳۲۹/۹	۲۶	۴/۵	۱۰۹۳۲۹/۹	۱۰۰۰	۴۰	۱۰۹۳۲۹/۹	۲/۱۶٪	۴/۴۲٪
۸	۱۱۱۳۷۲/۷	۱۱۳۹۳۱/۸	۱۰۹۰۵۱/۱	۷۰۳	۴	۱۲۱۷۱۱/۳	۴	۱۲۱۷۱۱/۳	۱۰۹۰۵۱/۱	۷۰۳	۴	۱۲۱۷۱۱/۳	۱۰۰۰	۲۷۸/۵	۱۱۳۹۳۱/۸	۲/۰۸٪	۴/۲۸٪
۹	۱۲۶۴۱۳/۷	۱۲۸۹۸۳/۴	۱۲۴۴۵۵/۹	۱	۴/۵	۱۲۴۴۵۵/۹	۱	۴/۵	۱۲۴۴۵۵/۹	۱	۴/۵	۱۲۴۴۵۵/۹	۱۰۰۰	۴/۵	۱۲۴۴۵۵/۹	۱/۹٪	۳/۸۵٪
۱۰	۱۱۶۲۷۲/۵	۱۱۷۰۸۸/۴	۱۲۴۲۷۷/۱	۷/۵	۴۱	۱۱۴۳۲۶/۷	۴۱	۷/۵	۱۲۴۲۷۷/۱	۷/۵	۴۱	۱۱۴۳۲۶/۷	۱۰۰۰	۴۱	۱۱۶۸۶۳/۶	۴/۱۶٪	۴/۸۳٪
۱	۱۹۱۰۶۴/۲	۱۸۳۸۳۶/۱	۱۸۳۷۳۴/۶	۱	۱۱/۵	۱۸۳۷۳۴/۶	۱	۱۱/۵	۱۸۳۷۳۴/۶	۱	۱۱/۵	۱۸۳۷۳۴/۶	۱۰۰۰	۱۱/۵	۱۸۳۷۳۴/۶	۹/۰۷٪	۵/۵٪
۲	۱۸۳۶۶۱/۳	۱۹۱۴۷۶/۵	۱۸۶۲۵۱/۷	۸	۹	۱۸۶۲۵۱/۷	۸	۹	۱۸۶۲۵۱/۷	۸	۹	۱۸۶۲۵۱/۷	۱۰۰۰	۹	۱۸۶۲۵۱/۷	۱/۳۳٪	۵/۳۶٪
۳	۱۹۳۷۴۷/۲	۲۰۰۵۴/۱	۱۹۳۸۱۹/۳	۸	۱۲/۵	۱۹۳۸۱۹/۳	۸	۱۲/۵	۱۹۳۸۱۹/۳	۸	۱۲/۵	۱۹۳۸۱۹/۳	۱۰۰۰	۱۲/۵	۱۹۳۸۱۹/۳	۲/۶۲٪	۶/۱۶٪
۴	۱۹۶۱۹۷	۲۰۳۶۲۰/۷	۱۹۶۱۳۳/۹	۳	۷	۱۹۶۱۳۳/۹	۳	۷	۱۹۶۱۳۳/۹	۳	۷	۱۹۶۱۳۳/۹	۱۰۰۰	۷	۲۰۱۳۴۰/۵	۲/۵۳٪	۶/۰۹٪
۵	۲۱۱۱۵۱/۲	۲۱۶۱۹۶/۶	۲۰۸۷۸۹	۱	۸/۵	۲۰۸۷۸۹	۱	۸/۵	۲۰۸۷۸۹	۱	۸/۵	۲۰۸۷۸۹	۱۰۰۰	۸/۵	۲۰۸۷۸۹	۳/۵۴٪	۵/۷۹٪
۶	۱۹۳۶۷۸/۱	۱۸۸۹۸۶/۱	۱۸۳۷۲۲/۲	۱	۶/۵	۱۸۳۷۲۲/۲	۱	۶/۵	۱۸۳۷۲۲/۲	۱	۶/۵	۱۸۳۷۲۲/۲	۱۰۰۰	۶/۵	۱۸۳۷۲۲/۲	۷/۷٪	۵/۴۱٪
۷	۱۹۸۴۴۵/۴	۲۰۶۱۲۶/۶	۱۹۳۷۷۱/۲	۱	۹	۱۹۳۷۷۱/۲	۱	۹	۱۹۳۷۷۱/۲	۱	۹	۱۹۳۷۷۱/۲	۱۰۰۰	۹	۱۹۳۷۷۱/۲	۲/۵۴٪	۶/۰۸٪
۸	۱۷۸۵۹۶/۴	۱۷۸۹۵۵/۹	۱۷۳۸۵۳/۱	۱	۸/۵	۱۷۳۸۵۳/۱	۱	۸/۵	۱۷۳۸۵۳/۱	۱	۸/۵	۱۷۳۸۵۳/۱	۱۰۰۰	۸/۵	۱۷۳۸۵۳/۱	۵/۳۲٪	۵/۵۱٪
۹	۱۹۱۱۵۳/۹	۲۰۱۱۳۲/۸	۱۸۸۹۲۰/۳	۸	۷	۱۸۸۹۲۰/۳	۸	۷	۱۸۸۹۲۰/۳	۸	۷	۱۸۸۹۲۰/۳	۱۰۰۰	۷	۱۸۸۹۲۰/۳	۱/۳٪	۶/۳٪
۱۰	۱۸۸۶۹۷/۷	۱۹۳۸۹۳/۳	۱۸۸۶۹۶/۵	۲	۵/۵	۱۸۸۶۹۶/۵	۲	۵/۵	۱۸۸۶۹۶/۵	۲	۵/۵	۱۸۸۶۹۶/۵	۱۰۰۰	۵/۵	۱۸۸۶۹۶/۵	۲/۶۵٪	۵/۲۶٪

ادامه‌ی جدول ۲.

نمونه	$Z_{CPLX}$	$Z_C$	الگوریتم ابتکاری											
			نتایج در حد توقف			تکراری که $Z_H \leq Z_C$			تکراری که $Z_H \leq Z_{CPLX}$			تکرار اول		
			زمان	$Z_H$	تکرار	زمان	$Z_H$	تکرار	زمان	$Z_H$	تکرار	زمان	$Z_H$	
۱	۱۰۶۵۲۸/۴	۱۰۶۶۶۳/۶	۱۰۱۸۲۸/۵	۸	۱	۱۰۱۸۲۸/۵	۸	۱	۱۰۱۸۲۸/۵	۸	۱	۱۰۱۸۲۸/۵	۸	۱
۲	۱۰۹۱۳۱/۱	۱۰۶۷۷۹/۸	۱۰۱۸۴۹/۸	۷/۵	۱	۱۰۱۸۴۹/۸	۷/۵	۱	۱۰۱۸۴۹/۸	۷/۵	۱	۱۰۱۸۴۹/۸	۷/۵	۱
۳	۱۶۴۹۴۳/۵	۱۱۱۹۸۹/۳	۱۱۴۲۱۷/۸	۸/۵	۲	۱۱۱۷۶۹/۴	۸/۵	۱	۱۱۴۲۱۷/۸	۸/۵	۱	۱۱۴۲۱۷/۸	۸/۵	۲
۴	۹۹۰۸۰/۸	۱۰۱۹۲۸/۷	۹۹۲۹۲/۹	۸/۵	۱	۹۹۲۹۲/۹	۴۹/۵	۶	۹۹۲۹۲/۹	۸/۵	۶	۹۹۲۹۲/۹	۸/۵	۶
۵	۱۰۶۶۰۲/۳	۱۰۹۳۶۶/۶	۱۰۴۳۰۰/۸	۵	۱	۱۰۴۳۰۰/۸	۵	۱	۱۰۴۳۰۰/۸	۵	۱	۱۰۴۳۰۰/۸	۵	۱
۶	۱۱۹۱۹۵/۳	۱۱۴۵۲۷/۴	۱۱۱۸۸۹/۷	۴	۱	۱۱۱۸۸۹/۷	۴	۱	۱۱۱۸۸۹/۷	۴	۱	۱۱۱۸۸۹/۷	۴	۱
۷	۱۰۹۰۵۲/۲	۱۱۱۹۷۵/۲	۱۰۹۲۷۱/۸	۵	۱۱	۱۰۹۲۷۱/۸	۵۷	۵	۱۰۶۸۵۳/۹	۵	۱۱	۱۰۹۲۷۱/۸	۵	۱۱
۸	۱۱۱۶۲۱/۱	۱۱۶۵۸۵/۳	۱۱۱۷۶۸/۷	۵/۵	۱	۱۱۱۷۶۸/۷	۴۰/۵	۸	۱۰۹۳۷۷/۱	۵/۵	۱	۱۱۱۷۶۸/۷	۵/۵	۱
۹	۱۱۱۵۰۹/۵	۱۱۴۱۲۴/۵	۱۱۶۸۳۲/۶	۲	۸	۱۰۹۳۲۹/۱	۱۷	۲	۱۰۹۳۲۹/۱	۲	۸	۱۱۶۸۳۲/۶	۲	۸
۱۰	۱۲۶۶۶۱/۹	۱۳۱۹۲۱/۸	۱۲۹۳۳۶/۳	۸	۲۵	۱۲۹۳۳۶/۳	۲۱۲	۲۵	۱۲۴۳۱۸/۲	۲۵	۸	۱۲۹۳۳۶/۳	۲۵	۸
۱	۷۸۷۷۵/۱	۷۹۲۸۹/۶	۷۶۶۱۳/۱	۷/۵	۱	۷۶۶۱۳/۱	۷/۵	۱	۷۶۶۱۳/۱	۷/۵	۱	۷۶۶۱۳/۱	۷/۵	۱
۲	۸۸۸۲۷/۱	۸۷۰۲۰/۵	۸۶۷۳۴/۸	۳/۵	۹	۸۶۷۳۴/۸	۳۰/۵	۹	۸۶۷۳۴/۸	۳/۵	۹	۸۶۷۳۴/۸	۳/۵	۹
۳	۷۸۸۶۲/۱	۷۹۵۵۲/۱	۷۷۰۵۲/۳	۱	۸	۷۷۰۵۲/۳	۱	۸	۷۷۰۵۲/۳	۱	۸	۷۷۰۵۲/۳	۱	۸
۴	۹۸۷۳۹/۲	۱۰۱۲۷۷/۵	۹۶۸۱۵/۴	۳	۲۴	۹۶۸۱۵/۴	۳	۲۴	۹۶۸۱۵/۴	۳	۲۴	۹۶۸۱۵/۴	۳	۲۴
۵	۱۰۸۶۷۲/۷	۱۱۱۳۴۸/۷	۱۰۶۸۴۴/۷	۴	۳/۵	۱۰۶۸۴۴/۷	۱۵/۵	۴	۱۰۶۸۴۴/۷	۴	۳/۵	۱۰۶۸۴۴/۷	۴	۳/۵
۶	۱۲۱۲۷۸/۷	۱۲۱۳۶۲/۸	۱۱۶۹۲۵/۳	۴/۵	۱	۱۱۶۹۲۵/۳	۴/۵	۱	۱۱۶۹۲۵/۳	۴/۵	۱	۱۱۶۹۲۵/۳	۴/۵	۱
۷	۱۱۱۸۸۰/۴/۵	۱۱۱۹۶۹/۳	۱۰۹۳۶۳/۲	۸	۱۲۹/۵	۱۰۹۳۶۳/۲	۱۲۹/۵	۲۶	۱۰۹۳۶۳/۲	۸	۱۲۹/۵	۱۰۹۳۶۳/۲	۲۶	۸
۸	۱۱۱۳۷۲/۷	۱۱۳۹۳۱/۸	۱۱۳۹۳۱/۸	۶۲	۳۱۶۷/۵	۱۱۳۹۳۱/۸	۳۱۶۷/۵	۷۰۳	۱۰۹۰۵۱/۱	۷۰۳	۴	۱۲۱۷۱/۳	۷۰۳	۴
۹	۱۲۶۴۱۳/۷	۱۲۸۹۸۳/۴	۱۲۴۴۵۵/۹	۴/۵	۱	۱۲۴۴۵۵/۹	۴/۵	۱	۱۲۴۴۵۵/۹	۴/۵	۱	۱۲۴۴۵۵/۹	۴/۵	۱
۱۰	۱۱۶۲۷۲/۵	۱۱۷۰۸۸/۴	۱۱۴۳۶۷/۱	۷/۵	۴۱	۱۱۴۳۶۷/۱	۱۵۶/۵	۴۱	۱۱۴۳۶۷/۱	۷/۵	۴۱	۱۱۴۳۶۷/۱	۷/۵	۴۱
۱	۱۹۱۰۶۴/۲	۱۸۳۷۳۴/۶	۱۸۳۷۳۴/۶	۱	۱۱/۵	۱۸۳۷۳۴/۶	۱	۱۱/۵	۱۸۳۷۳۴/۶	۱	۱۱/۵	۱۸۳۷۳۴/۶	۱	۱۱/۵
۲	۱۸۳۶۶۱/۳	۱۹۱۹۷۶/۵	۱۸۶۲۵۱/۷	۹	۱	۱۸۶۲۵۱/۷	۶۸/۵	۸	۱۸۱۳۸۰/۳	۹	۱	۱۸۶۲۵۱/۷	۹	۱
۳	۱۹۳۷۴۷/۲	۲۰۱۰۵۴/۱	۱۹۳۸۱۹/۳	۲۰/۵	۱	۱۹۳۸۱۹/۳	۹۴/۵	۸	۱۹۱۲۸۶	۲۰/۵	۱	۱۹۳۸۱۹/۳	۲۰/۵	۱
۴	۱۹۶۱۹۷	۲۰۳۶۲۰/۷	۱۹۶۱۳۳/۹	۳	۷	۱۹۶۱۳۳/۹	۲۴	۷	۱۹۶۱۳۳/۹	۳	۷	۱۹۶۱۳۳/۹	۳	۷
۵	۲۱۱۱۵۱/۲	۲۱۶۱۹۶/۶	۲۰۸۷۸۹	۱	۸/۵	۲۰۸۷۸۹	۱	۸/۵	۲۰۸۷۸۹	۱	۸/۵	۲۰۸۷۸۹	۱	۸/۵
۶	۱۹۳۶۷۸/۱	۱۸۸۹۸۶/۱	۱۸۳۷۲۲/۲	۱	۶/۵	۱۸۳۷۲۲/۲	۱	۶/۵	۱۸۳۷۲۲/۲	۱	۶/۵	۱۸۳۷۲۲/۲	۱	۶/۵
۷	۱۹۸۶۴۵/۴	۲۰۶۱۲۶/۶	۱۹۳۷۷۱/۲	۱	۹	۱۹۳۷۷۱/۲	۹	۹	۱۹۳۷۷۱/۲	۱	۹	۱۹۳۷۷۱/۲	۱	۹
۸	۱۷۸۵۹۶/۴	۱۷۸۹۵۵/۹	۱۷۳۸۵۳/۱	۸/۵	۱	۱۷۳۸۵۳/۱	۸/۵	۱	۱۷۳۸۵۳/۱	۸/۵	۱	۱۷۳۸۵۳/۱	۸/۵	۱
۹	۱۹۱۱۵۳/۹	۲۰۱۱۳۲/۸	۱۸۸۹۲۰/۳	۸	۷	۱۸۸۹۲۰/۳	۵۶	۸	۱۸۸۹۲۰/۳	۸	۷	۱۸۸۹۲۰/۳	۸	۷
۱۰	۱۸۸۶۹۷/۷	۱۹۳۸۹۳/۳	۱۸۸۶۹۲/۵	۲	۵/۵	۱۸۸۶۹۲/۵	۱۲	۲	۱۸۸۶۹۲/۵	۲	۵/۵	۱۸۸۶۹۲/۵	۲	۵/۵

رشدت

بهر

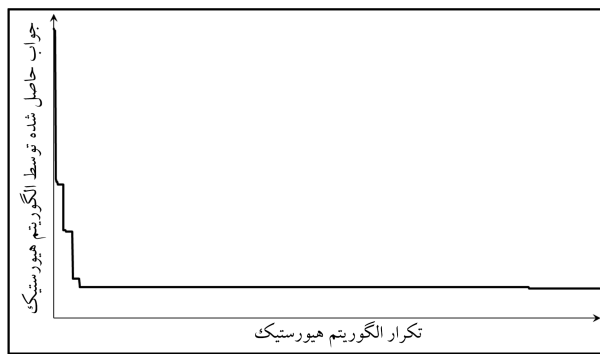
درد

نمونه‌ی ۸، الگوریتم ابتکاری جواب بهتری را نسبت به CPLEX بعد از ۷۰۳ تکرار با زمان ۳۱۶۷/۵ ثانیه و نسبت به برنامه‌ریزی موجود بعد از ۶۲ تکرار با زمان ۲۷۸/۵ ثانیه به دست می‌دهد. اما در سایر نمونه‌ها، الگوریتم ابتکاری جواب‌های بهتری را نسبت به CPLEX به‌طور میانگین بعد از ۹/۶۷ تکرار با زمان ۴۲/۲۸ ثانیه و نسبت به برنامه‌ریزی موجود به‌طور میانگین بعد از ۳/۳۴ تکرار با زمان ۱۸/۱۷ ثانیه به دست می‌دهد. همچنین الگوریتم ابتکاری در اولین تکرار، نسبت به CPLEX در ۴ نمونه از ۱۰ نمونه و نسبت به جواب‌های برنامه‌ریزی موجود، در ۵ نمونه از ۱۰ نمونه، جواب بهتری را تولید کرده است.

در نمونه‌های میدان درود، جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به‌طور متوسط به ترتیب به مقدار ۳/۸۶٪ و ۵/۷۳٪ بهبود یافته‌اند. الگوریتم ابتکاری جواب‌های بهتری را نسبت به CPLEX به‌طور میانگین بعد از ۳/۴ تکرار با زمان ۲۹/۹ ثانیه و نسبت به برنامه‌ریزی موجود به‌طور میانگین در اولین تکرار با زمان ۸/۵ ثانیه به دست می‌دهد. همچنین الگوریتم ابتکاری در اولین تکرار، نسبت به

در ۵ نمونه از ۱۰ نمونه و نسبت به برنامه‌ریزی موجود، در هر ۱۰ نمونه، جواب بهتری را تولید کرده است.

در نمونه‌های میدان فروزان، جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به‌طور متوسط به ترتیب به مقدار ۷/۶۷٪ و ۹/۸۲٪ بهبود یافته‌اند. الگوریتم ابتکاری جواب‌های بهتری را نسبت به CPLEX به‌طور میانگین بعد از ۱/۱ تکرار با زمان ۱۵/۶ ثانیه و نسبت به برنامه‌ریزی موجود به‌طور میانگین در اولین تکرار با زمان



شکل ۶. نمودار رفتار کلی الگوریتم ابتکاری.

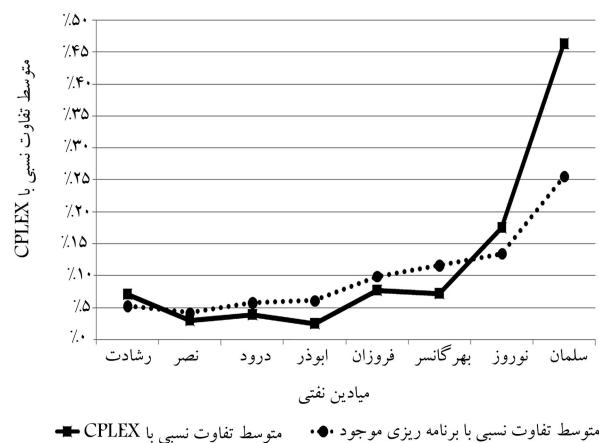
را تصدیق می‌کند، زیرا الگوریتم ابتکاری پس از ۱۰ تکرار اجرا جواب موجهی در ۹۵٪ موارد بهتر از جواب CPLEX و در ۹۸٫۷۵٪ موارد بهتر از برنامه‌ریزی موجود ارائه می‌کند. بنابراین الگوریتم از نظر مدت زمان اجرا می‌تواند سریع ارزیابی شود؛ زیرا برای دستیابی به یک جواب موجه خیلی خوب، کافی است تا الگوریتم در تعداد تکرارهای کمی اجرا شود؛ هرچند که اجرای الگوریتم در تعداد تکرارهای بیشتر منجر به جواب‌های بهتری خواهد شد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله‌ی مسیریابی دوره‌ی شناورهای خدماتی با پنجره‌ی زمانی در صنعت نفت دریایی با رویکرد نگهداشت تولید نفت در مناطق دریایی با عاملیت شرکت ملی نفت ایران در خلیج فارس معرفی شد. این مسئله ضمن این‌که به لحاظ پیشینه‌ی موضوع به مسئله‌ی شناخته شده PVRPTW نزدیک است، دارای یک مشخصه‌ی عملیاتی جدیدی است که در پژوهش‌های پیشین بدان پرداخته نشده و آن مشخصه عبارت است از این‌که برخی از این شناورهای خدماتی دارای ماهیت دوگانه‌ی خدمت‌رسان - خدمت‌گیرنده هستند. در واقع شناورهای سرچاهی متحرک از یک طرف نیازمند دریافت خدمات عمومی از شناورهای پشتیبان در پنجره‌های زمانی و از طرف دیگر مأمور به ارائه‌ی خدمات چاه‌ها به سکوه‌های سرچاهی‌اند.

ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آبیخته با در نظر گرفتن فرضیات عملیاتی مورد نظر این مقاله توسعه داده شد. سپس به دلیل پیچیدگی مسئله و عدم امکان دستیابی به جواب‌های بهینه توسط الگوریتم‌های دقیق و همچنین به منظور بهبود روش‌های حل تجربی و غیرنظام‌مند موجود، یک الگوریتم ابتکاری چابک و با حافظه‌ی عملیاتی دقیق با قابلیت ثبت و ضبط کلیه‌ی وقایع، برای حل این مسئله، به طوری‌که از لحاظ سرعت عمل و کیفیت جواب الگوریتم‌های موجود را بهبود بخشد، ارائه شد.

به منظور ارزیابی الگوریتم ابتکاری، نتایج حاصل از اعمال الگوریتم ابتکاری روی ۸۰ نمونه مسئله واقعی مربوط به ۸ میدان نفتی مستقر در خلیج فارس، با نتایج حل‌کننده‌ی CPLEX و برنامه‌ریزی موجود مقایسه شد و مشخص شد که برای هر یک از نمونه مسائل، جواب حاصل از الگوریتم ابتکاری جواب دو الگوریتم دیگر را در شرایط اجرایی مساوی بهبود می‌دهد. برای مثال، در بخش مقایسه با CPLEX، در میان تمام نمونه‌ها، کمترین بهبود در جواب مربوط به نمونه‌ی پنجم میدان ابودر با میزان ۱٫۰۳٪ و بیشترین بهبود در جواب مربوط به نمونه‌ی سوم میدان سلمان با میزان ۴۷٫۴۹٪ به دست آمد. همچنین در بخش مقایسه با نتایج برنامه‌ریزی موجود، کمترین بهبود به نمونه‌ی دوم میدان نصر با میزان ۳٫۲۹٪ و بیشترین بهبود



شکل ۵. نمودار مقادیر متوسط تفاوت نسبی بین جواب الگوریتم ابتکاری و جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود.

۱۳٫۹۵ ثانیه به دست می‌دهد. همچنین الگوریتم ابتکاری در اولین تکرار، نسبت به CPLEX در ۹ نمونه از ۱۰ نمونه و نسبت به برنامه‌ریزی موجود، در ۱۰ نمونه، جواب بهتری را تولید کرده است.

در نمونه‌های میدان بهرگانسر، جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به طور متوسط به ترتیب به مقدار ۷٫۱۵٪ و ۱۱٫۵۶٪ بهبود یافته‌اند. الگوریتم ابتکاری جواب‌های بهتری را نسبت به CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به طور میانگین در اولین تکرار با زمان ۱۶٫۲ ثانیه به دست می‌دهد.

در نمونه‌های میدان نوروز، جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به طور متوسط به ترتیب به مقدار ۱۷٫۴۹٪ و ۱۳٫۳۹٪ بهبود یافته‌اند. الگوریتم ابتکاری جواب‌های بهتری را نسبت به CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به طور میانگین در اولین تکرار با زمان ۱۷٫۷ ثانیه به دست می‌دهد.

در نمونه‌های میدان سلمان، جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به طور متوسط به ترتیب به مقدار ۴۶٫۳۵٪ و ۲۵٫۴۹٪ بهبود یافته‌اند. الگوریتم ابتکاری جواب‌های بهتری را نسبت به CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به طور میانگین در اولین تکرار با زمان ۵۰٫۸۵ ثانیه به دست می‌دهد.

شکل ۵ نمودار مقادیر متوسط تفاوت نسبی بین جواب الگوریتم ابتکاری و به ترتیب جواب‌های CPLEX و برنامه‌ریزی موجود را نسبت به میدان‌های نفتی با اندازه نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که در آن با افزایش تعداد سکوه‌های سرچاهی در میدان‌ها، متوسط تفاوت نسبی بیشتر می‌شود. برای مثال برای میدان رشادت با ۷ سکوی سرچاهی، متوسط صرفه‌جویی در هزینه‌ها در جواب‌های الگوریتم ابتکاری نسبت به CPLEX و برنامه‌ریزی موجود به ترتیب برابر با ۷٫۰۴٪ و ۵٫۲۱٪ هستند، در حالی که برای میدان سلمان با ۲۸ سکوی سرچاهی، مقادیر مربوطه به ترتیب به ۴۶٫۳۵٪ و ۲۵٫۴۹٪ افزایش یافته‌اند. بنابراین انتظار داریم که اعمال الگوریتم ابتکاری برای نمونه‌های با اندازه‌ی بزرگ‌تر صرفه‌جویی بیشتری در هزینه‌ها نسبت به دو الگوریتم دیگر فراهم کند.

اگر برای هر یک از نمونه‌ها، نموداری رسم کنیم که در محور عمودی آن بهترین جواب به دست آمده توسط الگوریتم ابتکاری در خلال تکرارهای مختلف و در محور افقی آن شماره‌ی تکرار الگوریتم باشد، آنگاه به طور متوسط، شکل ۶ نمایانگر رفتار کلی تمام آن نمودارها برای نمونه‌های مذکور خواهد بود. همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، الگوریتم ابتکاری در تکرارهای اولیه با شیب تندی جواب‌های موجه تولید شده را بهبود می‌بخشد. نتایج محاسباتی مندرج در جدول ۲ این موضوع

به سکوهای سرچاهی در بستر دریا صورت می‌گیرد، پیشنهاد می‌شود جنبه‌ی تغییرات آب‌وهوایی و تأثیر آن به‌صورت مؤلفه‌های احتمالی در زمان‌های سفر و خدمت‌رسانی، به‌عنوان یکی از زمینه‌های تحقیقات آتی در جهت توسعه و تکمیل مدل این مقاله مدنظر قرار گیرد. دوم، با در نظر گرفتن عوامل عملیاتی بیشتر در مسائل، ضمن پیچیده‌تر کردن مدل‌های ریاضی به دلیل بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله، نیازمند آن خواهیم بود تا الگوریتم‌های حل جدیدی را که می‌توانند در ادامه‌ی الگوریتم ابتکاری این مقاله باشند، توسعه دهیم. به دلیل پیچیدگی‌های موجود در فرایند بهینه‌سازی مسئله‌ی مدنظر این تحقیق و فقدان مطالعات مشابه، در وهله‌ی نخست از روش‌های حل فراابتکاری استفاده نشد و ابتدا یک الگوریتم ابتکاری پایه مبتنی بر مفهوم ترکیب پایه‌ی اولیه و بر اساس شرایط عملیاتی مسئله به‌منظور حل مسئله معرفی شده است؛ اما می‌توان به‌عنوان ایده‌ی برای توسعه‌ی روش‌های حل برای مسئله‌ی موردنظر این مقاله در تحقیقات آتی بدان توجه کرد. برای مثال الگوریتم ابتکاری موجود این قابلیت را دارد که با الگوریتم جستجوی ممنوع یا دیگر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت مثل الگوریتم ژنتیک ترکیب شود و با تشکیل یک الگوریتم ترکیبی جدید، ضمن بررسی نقاط قوت و ضعف الگوریتم ابتکاری این مقاله، جواب‌های با کیفیت‌تری ارائه شود. سوم، به دلیل پیچیدگی و ابعاد بزرگ مدل‌های ریاضی ارائه شده، توسعه‌ی حدود پایین مناسب که منبعث از این مدل‌های ریاضی باشند، می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ی سوم توسعه‌ی موضوع این مقاله در نظر گرفته شود.

به نمونه‌ی سوم میدان سلمان با میزان ۲۶/۷۸٪ حاصل شد. همچنین نتایج عددی حاکی از این بود که الگوریتم ابتکاری در تولید جواب‌های با کیفیت دارای سرعت عمل زیادی است به‌گونه‌ی که در همان تکرارهای اولیه جواب‌های بسیار خوبی به دست می‌دهد. بنابراین می‌توان با صرف زمان کوتاهی در مقایسه با دو الگوریتم دیگر و با تعداد تکرارهای کمتر، جواب‌های مناسبی به دست آورد. به‌طور کلی سه زمینه‌ی توسعه‌ی در ادامه‌ی موضوع مدنظر این مقاله قرار دارد. اول، در بسیاری از نمونه مسائل واقعی دیگری که در حوزه‌ی عملیاتی فراساحلی نفت و گاز در بخش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل وجود دارد، مشخصه‌ها و عامل‌های عملیاتی پیچیده‌ی دیگری نیز وجود دارند که می‌توانند مورد مطالعه قرار بگیرند و مدل ریاضی این مقاله را اصلاح و تکمیل کنند. در این مقاله، مسئله‌ی مسیریابی دوره‌ی شناورهای خدماتی با پنجره‌ی زمانی در صنعت نفت دریایی تحت شرایط آب‌وهوایی خلیج فارس مدل‌سازی شده است. خلیج فارس در مقایسه با دریاها و اقیانوس‌های عمیق، جزء آب‌های کم‌عمق محسوب می‌شود و به دلیل اتصال سکوهای سرچاهی به کف دریا (برخلاف سکوهای نفتی شناور در آب‌های عمیق) و پیش‌بینی‌های دقیق هواشناسی از شرایط آب و هوایی، عدم قطعیت‌ها در زمینه‌ی زمان ارائه‌ی خدمت و سفر شناورهای خدماتی برای افق برنامه‌ریزی پیش رو قابل چشم‌پوشی است. اما از آن‌جا که مسئله‌ی پیش روی این مقاله، به ندرت مورد تحقیق قرار گرفته و یک زمینه‌ی بسیار مستعد برای انجام تحقیقات آتی است، از زوایای مختلف قابل ادامه و تکمیل است. نظر به این‌که، خدمت‌رسانی

## منابع (References)

- 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 and E. Wasil, Ed., 43, pp. 73-102, Springer, New York (2008).
- Beltrami, E. and Bodin, L. "Networks and vehicle routing for municipal waste collection", *Networks*, **4**(1), pp. 65-94 (1974).
- 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).
- Baptista, S., Oliveira, R.C. and Zuquete, E. "A period vehicle routing case study", *Eur. J. Oper. Res.*, **139**(2), pp. 220-229 (2002).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- Rusdiansyah, A. and Tsao, D. "An integrated model of the periodic delivery problems for vending-machine supply chains", *J. Food Eng.*, **70**(3), pp. 421-434 (2005).
- 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).
- 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).
- Blakeley, F., Arguello, B., Cao, B. and et al. "Optimizing periodic maintenance operations for Schindler elevator corporation", *Interfaces*, **33**(1), pp. 67-79 (2003).
- Cornillier, F., Boctor, F.F., Laporte, G. and et al. "A heuristic for the multi-period petrol station replenish-

- ment 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”, *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-Weare, 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, I.d.S., Filho, I.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. Lenstra, J.K. and Rinnooy Kan, A.H.G. “Complexity of vehicle routing problem with time windows”, *Networks*, **11**, pp. 221-227 (1981).