

ارائه‌ی یک مدل ریاضی و روش حل فراابتکاری برای تعیین ترکیب ناوگان شناورهای عملیات جست‌وجو و نجات دریایی (مطالعه‌ی موردی: مراکز نجات خلیج فارس و دریای عمان)

احسان صفایی (کارشناس ارشد)

علی حسین‌زاده کاشان* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۱۳۶-۱)
دوری (۱-۳۵)، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۳-۱۶

حمل‌ونقل دریایی، از مقرون به‌صرفه‌ترین راه‌های انتقال کالاها تلقی می‌شود. با وجود این، سوانح دریایی این موضوع را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از مسائل پراهمیت در کاهش خسارت‌های ناشی از وقوع سوانح دریایی، برنامه‌ریزی نحوه‌ی به‌کارگیری ناوگان شناورهای در دسترس مراکز نجات دریایی است. در این پژوهش، با به‌کارگیری مفاهیم عمومی مسئله‌ی با نام تعیین ترکیب ناوگان دریایی، یک مدل ریاضی دوهدفه، از نوع برنامه‌ریزی اعداد مختلط ارائه شده است که به تعیین ترکیب، استقرار و تعدیل ناوگان شناورهای یک مرکز نجات دریایی می‌پردازد. این مسئله، به‌صورت آزمایشی بر روی اطلاعات مرتبط با مراکز نجات دریایی جنوب ایران به کارگرفته شده است و توسط تلفیقی از یک الگوریتم ابتکاری و الگوریتم فراابتکاری راهبردهای تکاملی گروهی، بهینه‌سازی شده است. نتایج به‌گونه‌ی بوده که علاوه بر پوشش‌دهی حداکثری تقاضا (از جنس سوانح دریایی) و تعدیل ناوگان به بهترین شکل ممکن، هزینه‌ی بهره‌برداری مناسبی از ناوگان شناورها حاصل شده است.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی ناوگان، عملیات جست‌وجو و نجات (SAR/S&R)، مسئله‌ی تعیین تعداد و ترکیب ناوگان دریایی (MFSMP)، استقرار ناوگان، الگوریتم راهبردهای تکاملی گروهی (GES).

ehsan.Safaei@Modares.ac.ir
a.Kashan@Modares.ac.ir

۱. مقدمه

معمولاً همان مرجع ملی دریانوردی در هر کشور است که به برنامه‌ریزی امور مرتبط با دریانوردی می‌پردازد (همچون سازمان بنادر و دریانوردی در ایران). تحت نظر این سازمان و برای تسهیل و تسریع بررسی سوانح دریایی و بهبود رویه‌ی مدیریت عملیات جست‌وجو و نجات دریایی، آب‌های تحت حاکمیت هر کشور به چندین بخش تقسیم می‌شود و مسئولیت هر بخش به یک مرکز داده می‌شود تا مدیریت و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با خدمات جست‌وجو و نجات دریایی در آن بخش، بر عهده‌ی یک مرکز واحد باشد که به آن، مرکز هماهنگی نجات دریایی (MRCC)^۴ گفته می‌شود.^۱ واضح است که برنامه‌ریزی ناوگان مورد استفاده در این مراکز بسیار حائز اهمیت است.

محققان دانش تحقیق در عملیات (OR)^۵، برای برنامه‌ریزی ناوگان در مسائل حمل‌ونقل، مسئله‌ی تعیین تعداد و ترکیب ناوگان (FSMP)^۶ یا مسئله‌ی تعیین ترکیب ناوگان (FCP)^۷ را در حالت کلی مطرح کرده‌اند.^۱ این مسئله با کمی فاصله‌ی زمانی، در حوزه‌ی دریایی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، رویکردهای پیشنهادی موجود برای این مسئله در حالت عمومی، لزوماً در حوزه‌ی دریایی نیز

حدود نیم قرن است که بحث ایمنی حمل‌ونقل دریایی، وجهه‌ی جهانی پیدا کرده است. به‌طور خاص، می‌توان به تأسیس سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO)^۱ اشاره کرد. با مدیریت این سازمان، پیمان‌نامه‌های بین‌المللی متعددی به منظور ارتقای امنیت کشتیرانی، حفظ جان افراد و دارایی‌ها در دریا به تصویب رسیده است.^۱ پیمان‌نامه‌ی جست‌وجو و نجات دریایی (SAR)^۲، از شاخص‌ترین این پیمان‌نامه‌هاست.^۱ یکی از مسائلی که همواره مورد تأکید این پیمان‌نامه‌ها بوده است بحث به‌کارگیری ناوگان حمل‌ونقل مناسب در عملیات جست‌وجو و نجات دریایی است. با توجه به وجود محدودیت‌ها در تهیه‌ی این ناوگان، برنامه‌ریزی نحوه‌ی بهره‌گیری از آن‌ها (به‌خصوص شناورها)^۳، از موارد پراهمیت است. از نظر یک سازمان تصمیم‌گیرنده، این برنامه‌ریزی باید به‌گونه‌ی باشد که علاوه بر پوشش‌دهی مناسب مناطق آبی مورد نظر، هزینه‌ی تدارک و بهره‌گیری از ناوگان نیز کمینه باشد. این سازمان تصمیم‌گیرنده،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۸/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۷/۸/۱۹، پذیرش ۱۳۹۷/۹/۱۳.

DOI:10.24200/J65.2018.7338.1817

کارا نیستند. از این رو، مسئله‌ی تعیین تعداد و ترکیب ناوگان دریایی (MFSMP) به‌طور مجزا در پیشینه‌ی موضوع، مطرح شده است.^[۵] به‌طور کلی، مسئله‌ی MFSMP شامل تصمیم‌گیری در مورد تعداد هرکدام از انواع شناورهای مورد نیاز برای پاسخ‌گویی به تقاضا است. معمولاً، تابع هدف این مسئله به دنبال کمینه‌سازی انواع هزینه‌ها در به‌کارگیری ناوگان است. در این مسئله، نیاز است که میزان تقاضا تخمین زده شود. برای تضمین شدنی بودن نحوه‌ی اداری ناوگان، محدودیت‌هایی نیاز است که ظرفیت منابع را نیز در نظر بگیرد. این منابع می‌توانند مواردی چون زمان و تعداد شناورهای در دسترس باشند. علاوه‌بر این، محدودیت‌هایی نیاز است که منجر به پوشش تقاضا شود.^[۵]

در بیشتر اوقات، مسئله‌ی MFSMP با مسئله‌ی استقرار ناوگان^[۸]، گره می‌خورد. مسئله‌ی استقرار ناوگان، در رده‌ی مسائل برنامه‌ریزی فنی قرار می‌گیرد و معمولاً نحوه‌ی تخصیص شناورها به مسیرهای دریایی، در آن مطرح می‌شود. اگرچه در این مسئله، ناوگان پایه‌ی شناورها معلوم است، اما در برخی مواقع، از طریق تعدیل ناوگان^[۹]، یک مقدار انعطاف‌پذیری در ناوگان پایه ایجاد می‌شود.^[۶] در این پژوهش، با به‌کارگیری مفاهیم عمومی مسئله‌ی MFSMP و در نظر گرفتن شرایط واقعی، یک مدل ریاضی برای تعیین ترکیب ناوگان شناورهای عملیات جست‌وجو و نجات در مراکز هماهنگی نجات دریایی، طراحی می‌شود.

ساختار این مقاله به این شرح است: در ادامه‌ی این بخش به مرور پیشینه‌ی مسئله‌ی MFSMP پرداخته می‌شود. در بخش ۲، مسئله‌ی اصلی این پژوهش و مفروضات در نظر گرفته شده تشریح می‌شود و یک مدل ریاضی طراحی می‌گردد. در بخش ۳، مطالعه‌ی موردی و داده‌های مرتبط با آن بیان می‌شود. در بخش ۴، مدل ریاضی متناظر با مطالعه‌ی موردی، با یک روش مناسب بهینه‌سازی، حل می‌شود. در آخر و در بخش ۵، به جمع‌بندی موضوع و ذکر نتایج پرداخته می‌شود.

۱.۱. مرور پژوهش‌های پیشین

اولین نوآوری در حوزه‌ی مسائل MFSMP به سال ۱۹۵۴ برمی‌گردد که در آن دانتزینگ و فالکرسون با استفاده از برنامه‌ریزی خطی^[۱۰] مدلی را برای تعیین کمینه‌ی تعداد شناورهای تانکری همگن برای پاسخ‌گویی به تقاضا در یک بازه‌ی زمانی مشخص ارائه کردند.^[۷] شوارتز در سال ۱۹۶۸ اولین مسئله‌ی MFSMP فنی را مطرح کرد. در این مسئله، محموله‌ی معینی باید در یک زمان تعیین شده، میان بنادر مبدأ و مقصد حمل شود. هدف این مسئله، تعیین تعداد هرکدام از شناورهای مورد نیاز برای انجام این جابه‌جایی است. این مسئله توسط برنامه‌ریزی اعداد مختلط مدل‌سازی شده است.^[۸] اوپرت و همکاران در سال ۱۹۷۲ اولین مسئله‌ی MFSMP راهبردی را مطرح کردند. آن‌ها مسئله‌ی طراحی ناوگان دریایی بخش بازرگانی ایالات متحده‌ی آمریکا را در نظر گرفتند و از طریق برنامه‌ریزی خطی، بهترین ترکیب ناوگان تانکرها را به دست آوردند.^[۹] جیکومار و سولومون در سال ۱۹۸۷ بر روی کمینه‌سازی تعداد شناورهای یک‌کش^[۱۱] همگن، برای کشیدن تعداد مشخصی از دونه‌ها^[۱۲] کار کردند. آن‌ها با توجه به شرایط مسئله، یک مدل مبتنی بر اعداد صحیح را طراحی و آن را با الگوریتم پیشنهادی خود حل کردند.^[۱۰] پزنتی در سال ۱۹۹۵، یک روش ابتکاری را برای پشتیبانی از تصمیم خرید و استفاده از شناورهای کانتینری ناهمگن مطرح کرد. در این روش، تصمیمات راهبردی در سطح فنی نیز ارزیابی می‌شوند و بازخورد آن‌ها نیز مدنظر قرار می‌گیرد و پس از آن، تصمیمات راهبردی، اصلاح یا نهایی می‌شوند.^[۱۱] ژینلیان و همکاران در سال ۲۰۰۰ بر روی مسئله‌ی توسعه‌ی ناوگان شناورها در طول زمان، برای پاسخ‌گویی به

الگوی مشخصی از تقاضا پرداختند. در این مسئله، هر سال شناورها می‌توانند تعدیل شوند. ژینلیان و همکاران در این مسئله از برنامه‌ریزی پویا بهره بردند و برای بحث استقرار ناوگان نیز از برنامه‌ریزی خطی استفاده کردند.^[۱۲] سامپراکوز و همکاران در سال ۲۰۰۳ تحقیقی را بر روی شناورهای کانتینری همگن در یک سامانه‌ی حمل‌ونقل ساحلی در دریای اژه انجام دادند. آن‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی اعداد مختلط، مدلی را برای تعیین تعداد این شناورها ارائه کردند که با مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه نیز آمیخته می‌شود.^[۱۳] سیگرد و همکاران در سال ۲۰۰۵ بر روی مسئله‌ی راهبردی راه‌اندازی یک سامانه‌ی جدید کشتیرانی خطی برای حمل‌ونقل کانتینری از نروژ تا اروپای مرکزی کار کردند. آن‌ها به امکان‌سنجی ساخت پانزده نوع متفاوت از شناورها، برای تأمین سرعت و تناوب پاسخ‌گویی به تقاضاها پرداختند. این مسئله از طریق مسئله‌ی افزایش‌بندی مجموعه‌ها^[۱۴] مدل‌سازی و به وسیله‌ی روش شاخه و ارزش حل شد.^[۱۲] زنگ و وانگ در سال ۲۰۰۷ مسئله‌ی در سطح برنامه‌ریزی راهبردی را برای حمل‌ونقل زغال‌سنگ‌ها در چین مطرح کردند که در آن علاوه‌بر بحث تعیین ترکیب ناوگان نا همگن، بحث زمان‌بندی شناورها هم مطرح بود. برای مدل‌سازی این مسئله از برنامه‌ریزی عدد صحیح^[۱۵] و برای حل آن از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع^[۱۶] استفاده شد. مینگ و وانگ در سال ۲۰۱۰، مسئله‌ی MFSMP فنی را برای یک شرکت کشتیرانی کانتینری خطی مطرح کردند. این مسئله شامل نحوه‌ی استقرار ناوگان نا همگن موجود و تصمیم‌گیری در مورد کرایه دادن یا کرایه گرفتن شناورها بود. آن‌ها برای رویارویی با تقاضای غیرقطعی، از برنامه‌ریزی محدودیت‌های مبتنی بر شانس^[۱۷] بهره گرفتند.^[۱۶] گلاره و مینگ در سال ۲۰۱۰ بحث دوره‌های زمانی کرایه کردن، کرایه گرفتن و کناره‌گذاری شناور را در مسئله‌ی استقرار ناوگان مطالعه کردند. حاصل این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی اعداد مختلط شد.^[۱۷] آلواریز و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱ بحث عدم قطعیت در قیمت خرید و فروش شناورها را در مسئله‌ی نوسازی ناوگان در نظر گرفتند.^[۱۸] ونگ و مینگ در سال ۲۰۱۲ بر روی مسئله‌ی استقرار ناوگان یک مؤسسه‌ی کشتیرانی خطی کار می‌کردند، آن‌ها فقط امکان کرایه دادن و کرایه گرفتن را به منظور ابزار تعدیل ناوگان در نظر گرفتند.^[۱۹] مینگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ بر روی مسئله‌ی برنامه‌ریزی چنددوره‌ی ناوگان شناورهای کانتینری موجود در یک شرکت کشتیرانی خطی کار کردند. آن‌ها تقاضا را غیرقطعی در نظر گرفتند و برای حل مسئله از روش‌های تفکیک‌سازی^[۱۸] و آزادسازی لاگرانژ بهره بردند.^[۲۰] هیرا و همکاران در سال ۲۰۱۶ بر روی مسئله‌ی استقرار ناوگان کانتینری در کانال پاناما کار کردند. آن‌ها در مسئله‌ی خود علاوه‌بر در نظر گرفتن رفت و آمد موجود در کانال پاناما، به سناریو بندی مسئله بر روی تقاضا نیز پرداختند و با استفاده از برنامه‌ریزی اعداد مختلط مسئله را به‌طور دقیق حل کردند.^[۲۱] ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۷، یک برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ی را برای مسئله‌ی کرایه‌گیری شناورها در یک شرکت کشتیرانی حمل‌کننده‌ی مواد شیمیایی نروژی ارائه دادند و اهمیت در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت را به خوبی تبیین کردند. آن‌ها در مدل خود علاوه‌بر در نظر گرفتن موضوع استقرار ناوگان، بحث سرعت خدمت‌دهی را نیز در نظر گرفتند.

۲. تعریف مسئله

در این بخش، با استفاده از مفاهیم مسئله‌ی MFSMP، یک مدل ریاضی طراحی می‌شود که هدف آن تصمیم‌گیری در مورد تعداد و ترکیب ناوگان شناورهای ایستگاه‌های تحت نظارت یک مرکز هماهنگی نجات دریایی است. نحوه‌ی تخصیص و استقرار

۱.۲. مدل سازی ریاضی

معرفی مجموعه های مسئله:

C : مجموعه مراکز هماهنگی نجات دریایی که هرکدام مسئولیت چندین ایستگاه را بر عهده دارند و با نماد c مشخص می شوند ($c \in C$);

S : مجموعه ایستگاه های جست و جو و نجات دریایی که هرکدام با نماد s مشخص می شوند ($s \in S$);

V : مجموعه انواع شناورها که با نماد v مشخص می شوند ($v \in V$);

A : مجموعه انواع هوانوردها که با نماد a مشخص می شوند ($a \in A$);

M : مجموعه مأموریت های از پیش تعریف شده که با نماد m مشخص می شوند ($m \in M$);

V_m^{MIS} : مجموعه شناورهای توانا برای انجام مأموریت نوع m ($V_m^{MIS} \subseteq V$);

A_m^{MIS} : مجموعه هوانوردهای توانا برای انجام مأموریت نوع m ($A_m^{MIS} \subseteq A$);

V_s^{STA} : مجموعه شناورهایی که قابلیت استفاده از آن ها در ایستگاه $s \in S$ وجود دارد ($V_s^{STA} \subseteq V$);

V^{POOL} : مجموعه شناورهایی که امکان اشتراک گذاری آن ها بین ایستگاه های مرکزی که به آن تعلق دارند، وجود دارد ($V^{POOL} \subseteq V$);

V^{CO} : مجموعه شناورهایی که در صورت نیاز، قابلیت کرایه داده شدن به خارج از مرکز را دارند ($V^{CO} \subseteq V$);

V^{LAY} : مجموعه شناورهایی که امکان کرایه دادن آن ها به خارج از مرکز وجود ندارد و ممکن است در صورت بی کاری، کنار گذاشته شوند ($V^{LAY} \subseteq V$);

V^{CI} : مجموعه شناورهایی که در صورت لزوم، امکان کرایه گرفته شدنشان از سایر سازمان ها وجود دارد ($V^{CI} \subseteq V$).

معرفی داده های ورودی مسئله:

N_v : تعداد شناور موجود $v \in V$ که تحت مالکیت یک مرکز هماهنگی نجات دریایی مشخص است (ناوگان پایه);

$x_{s,a}$: تعداد هوانورد $a \in A$ که در صورت لزوم، توانایی کمک رسانی به ایستگاه $s \in S$ را داراست;

C_v^m : میزان ساعت ظرفیت خدمت رسانی شناور $v \in V$ ، برای انجام مأموریت $m \in M$ ($v \notin V_m^{MIS} \Leftrightarrow C_v^m = 0$) در دوره برنامه ریزی;

C_v^T : میزان ساعت ظرفیت خدمت رسانی شناور $v \in V$ ، برای انجام کل مأموریت های قابل انجام ($\sum_{m \in M} C_v^m \leq C_v^T$) در دوره برنامه ریزی;

C_a^m : میزان ساعت ظرفیت خدمت رسانی هوانورد $a \in A$ ، برای انجام مأموریت $m \in M$ ($a \notin A_m^{MIS} \Leftrightarrow C_a^m = 0$) در دوره برنامه ریزی;

$h_{s,a}^m$: میزان ساعت هایی در دوره برنامه ریزی که در صورت نیاز، هوانورد $a \in A$ توانایی کمک رسانی به ایستگاه $s \in S$ را برای انجام مأموریت $m \in M$ دارد ($h_{s,a}^m = x_{s,a} \times C_a^m$);

$D_{m,s}$: میزان ساعت های تقاضای عملیات جست و جو و نجات دریایی برای انجام مأموریت $m \in M$ در ایستگاه $s \in S$ در دوره برنامه ریزی;

F_v : متوسط هزینه ثابت بهره گیری از یک شناور $v \in V$ در دوره برنامه ریزی;

J_v : متوسط هزینه متغیر بهره گیری از یک شناور $v \in V$ در یک ساعت;

O_v : متوسط صرفه جویی حاصل از کرایه دادن یک شناور نوع $v \in V$ در دوره برنامه ریزی ($v \notin V^{CO} \Leftrightarrow O_v = 0$);

ناوگان شناورها در ایستگاه های یک مرکز هماهنگی نجات دریایی و مشخص شدن میزان کمبود و مازاد در ناوگان از خروجی های اصلی این مدل ریاضی است. در ادامه و در چند بخش، مفروضات و جزئیات اصلی این مسئله ذکر می شود. سعی شده است که این مفروضات، برگرفته از واقعیت موجود باشد.

-- نوع و نحوه برنامه ریزی: در هر مرکز هماهنگی نجات دریایی، یک ناوگان پایه مشخصی وجود دارد که در سطح برنامه ریزی راهبردی، توسط مرجع ملی دریانوردی تعیین شده است. طبیعتاً در سطح راهبردی و در هنگام تعیین این ناوگان پایه، درک دقیقی از میزان تقاضای آتی وجود نداشته است و این میزان، در برنامه ریزی فنی شفاف تر می شود. مسئله ای این پژوهش، از جانب یک مرکز هماهنگی نجات دریایی، به موضوع می نگرد و به دنبال آن است که در سطح برنامه ریزی فنی، بهترین نحوه بهره برداری از ناوگان شناورهای موجود را در راستای پاسخ گویی به تقاضا تعیین کند. برای این کار، علاوه بر تعدیل ناوگان (از طریق ابزارهایی چون کرایه دادن و کرایه گرفتن)، بهترین نحوه استقرار و استفاده از ناوگان موجود تعیین می شود. بنابراین، در ساختار مدل ریاضی طراحی شده، علاوه بر مسئله MFSMP، مسئله استقرار ناوگان نیز مطرح است.

-- ایستگاه های جست و جو و نجات دریایی: محلی که ناوگان شناورها در آن جا مستقر می شود تا در صورت نیاز به عملیات بپردازند، ایستگاه جست و جو و نجات دریایی نامیده می شود. هرکدام از این ایستگاه ها در حوزه ای یکی از مراکز هماهنگی نجات دریایی قرار دارند.^[۱۳] در مسئله ای این پژوهش، مفروض است که محل قرارگیری این ایستگاه ها معین است.

-- ناوگان عملیات جست و جو و نجات دریایی: در مسئله ای این پژوهش، طبیعتاً دارای یک ناوگان پایه ی ناهمگن هستیم. بنابراین، شناورهای این ناوگان دارای مشخصات فیزیکی و محدودیت های سازگاری متفاوتی هستند (همچون میزان آب خور) که بر روی مسئله تأثیرگذار خواهد بود. علاوه بر این، مفروض است که هر دو دسته از ناوگان هوایی و آبی (شناورها) وجود دارند؛ ولی فقط ناوگان شناورها قابل برنامه ریزی و تعدیل است. در واقع، مفروض است که میزان توانایی خدمت دهی ناوگان هوایی مشخص و برنامه ریزی ناوگان شناورها متأثر از آن است. این فرض در بیشتر موارد فرضی محدودکننده نیست و در شرایط واقعی نیز وجود دارد. در بسیاری از کشورها، ناوگان هوایی مستقلی در اختیار سازمان های مسئول جست و جو و نجات دریایی نیست و آن ها در هنگام نیاز به هوانوردها به همکاری با سایر سازمان ها (همچون سازمان های نظامی) می پردازند.

-- مأموریت های جست و جو و نجات دریایی: منظور از مأموریت در مسئله ای این پژوهش، عملیاتی است که توسط شناورها یا هوانوردهای یک مرکز هماهنگی نجات دریایی انجام پذیر است. مفروض است که این مأموریت ها متناظر با سوانح دریایی هستند و بلافاصله پس از اعلان سوانح انجام می شوند.

-- عرضه و تقاضای خدمت: در مسئله ای این پژوهش، تقاضا بر حسب زمان (ساعت) خدمت مورد نیاز در دوره برنامه ریزی مطرح می شود؛ زیرا می توان از آمارهای ثبت شده مراکز مربوط که معمولاً بر حسب زمان (زمان انجام مأموریت ها) است، استفاده کرد. علاوه بر این، هر شناوری دارای یک نرخ ظرفیت خدمت دهی برای مأموریت های مختلف است که در یک دوره زمانی مشخص قابل برآورد است.

$$\sum_{s \in S} x_{s,v} \leq N_v \quad \forall v \in V \quad (4)$$

$$\left(N_v - \sum_{s \in S} x_{s,v} \right) \cdot \sum_{s \in S} k_{s,v} = 0 \quad \forall v \in V^{CI} \quad (5)$$

$$\sum_{v \in V \setminus V^{CI}} k_{s,v} = 0 \quad \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{v \in V \setminus V_s^{STA}} (x_{s,v} + k_{s,v}) = 0 \quad \forall s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{v \in V_m^{MIS}} x_{s,v} + \sum_{a \in A_m^{MIS}} x_{s,a} + \sum_{v \in V_m^{MIS}} k_{s,v} \geq b_{m,s} \quad \forall s \in s, m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{v \in V} x_{s,v} + \sum_{a \in A} x_{s,a} + \sum_{v \in V} k_{s,v} \geq e_s \quad \forall s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{s \in S} (h_{s,v}^m + u_{s,v}^m) = 0 \quad \forall m \in M, v \in V \setminus V_m^{MIS} \quad (10)$$

$$h_{s,v}^m \leq x_{s,v} C_v^m \quad \forall m \in M, s \in S, v \in V \quad (11)$$

$$u_{s,v}^m \leq k_{s,v} C_v^m \quad \forall m \in M, s \in S, v \in V \quad (12)$$

$$\sum_{m \in M} h_{s,v}^m \leq x_{s,v} C_v^T \quad \forall s \in S, v \in V \quad (13)$$

$$\sum_{m \in M} u_{s,v}^m \leq k_{s,v} C_v^T \quad \forall s \in S, v \in V \quad (14)$$

$$\sum_{s \in S} q_{s,s',v}^m \leq h_{s',v}^m + u_{s',v}^m \quad \forall m \in M, v \in V, (s, s') \in R_v \quad (15)$$

$$\sum_{m \in M} q_{s,s',v}^m = 0 \quad \forall v \in V, (s, s') \notin R_v \quad (16)$$

$$\sum_{v \in V_m^{MIS}} h_{s,v}^m + \sum_{v \in V_m^{MIS}} u_{s,v}^m + \sum_{a \in A_m^{MIS}} h_{s,a}^m + \sum_{(s,s') \in R_v} \sum_{v \in V_m^{MIS}} q_{s,s',v}^m - \sum_{(s',s) \in R_v} \sum_{v \in V_m^{MIS}} q_{s',s,v}^m \geq D_{m,s} \quad \forall m \in M, s \in S \quad (17)$$

$$R_v = \{(s, s') \in S \times S : w_{s,s'} \leq \gamma_v\} \quad \forall v \in V \quad (18)$$

$$x_{s,v}, k_{s,v} \in \{\mathbb{N}, \{0\}\} \quad \forall s \in S, v \in V \quad (19)$$

$$h_{s,v}^m, u_{s,v}^m \geq 0 \quad \forall s \in S, v \in V, m \in M \quad (20)$$

$$q_{s',s,v}^m \geq 0 \quad \forall s', s \in S, v \in V \quad (21)$$

رابطه ۱ بیان می‌کند که مسئله باید به‌ازای هر مرکز هماهنگی نجات دریایی یک‌بار حل شود. تابع هدف ۲، به کمیته‌سازی تفاوت مجموع ساعت‌های عرضه‌ی نجات و مجموع ساعت‌های مورد تقاضای نجات در ایستگاه‌های یک مرکز هماهنگی نجات دریایی می‌پردازد. در این تابع، فقط ساعت عرضه‌ی شناورهای ناوگان پایه موردنظر هستند. در واقع، این تابع هدف به دنبال این است تا نحوه‌ی استقرار ناوگان پایه به‌گونه‌ی باشد که اگر بنا بر هر دلیلی، امکان کرایه‌ی شناورها وجود نداشت، احتمال کمترین ریسک ممکن شویم. در رابطه‌ی ۳، تابع هدف دوم، به دنبال کمیته‌سازی انواع هزینه‌های به‌کارگیری از شناورهاست. در این رابطه، کرایه دادن شناور، صرفه‌جویی (معادل درآمد) تلقی می‌شود. محدودیت ۴ بیان می‌کند که مجموع شناورهای استقرار

L_v : متوسط کل هزینه ناشی از بی‌کاری (کنارگذاری) یک شناور $v \in V$ در دوره‌ی برنامه‌ریزی ($v \notin V^{LAY} \Leftrightarrow L_v = \infty$)؛

I_v : متوسط کل هزینه ناشی از کرایه کردن یک شناور نوع $v \in V$ در دوره‌ی برنامه‌ریزی ($v \notin V^{CI} \Leftrightarrow I_v = \infty$).

$b_{m,s}$: کمیته‌ی تعداد شناورها و هواوردهای توانا برای انجام مأموریت $m \in M$ در ایستگاه $s \in S$ که توسط فرماندهی مرکز هماهنگی نجات دریایی مربوط تعیین می‌شود؛

e_s : کمیته‌ی تعداد شناورها و هواوردهای مستقر در ایستگاه $s \in S$ که توسط فرماندهی مرکز هماهنگی نجات دریایی مربوط تعیین می‌شود؛

$w_{s,s'}$: فاصله‌ی میان دو ایستگاه $s \in S$ و $s' \in S$ با فرض این‌که اگر $s=s'$ باشد، $w_{s,s'} = \infty$ است؛

γ_v : بیشینه‌ی فاصله‌ی مجاز میان دو ایستگاه یک مرکز، برای به اشتراک‌گذاری شناور $v \in V$ ($v \notin V^{POOL} \Leftrightarrow \gamma_v = 0$).

R_v : مجموعه‌ی از زوج ایستگاه‌های (s, s') که قادر هستند تا به اشتراک‌گذاری شناور $v \in V$ بپردازند ($w_{s,s'} \leq \gamma_v$) با این شرایط که این شناور در ایستگاه s' مستقر است. تعریف این مجموعه به صورت $R_v = \{(s, s') \in S \times S : w_{s,s'} \leq \gamma_v\}$ است.

معرفی متغیرهای مسئله:

$x_{s,v}$: تعداد (عدد صحیح) شناور $v \in V$ که در دوره‌ی برنامه‌ریزی در ایستگاه $s \in S$ مورد نیاز و از ناوگان پایه قابل تخصیص است؛

$k_{s,v}$: تعداد (عدد صحیح) کمبود شناور $v \in V$ در دوره‌ی برنامه‌ریزی در ایستگاه $s \in S$ که در صورت امکان باید کرایه شود؛

$h_{s,v}^m$: مجموع ساعت‌هایی که شناور $v \in V$ باید در دوره‌ی برنامه‌ریزی در ایستگاه $s \in S$ به انجام مأموریت $m \in M$ بپردازد؛

$u_{s,v}^m$: مجموع ساعت‌هایی که به کرایه کردن شناور $v \in V$ در دوره‌ی برنامه‌ریزی در ایستگاه $s \in S$ برای انجام مأموریت $m \in M$ نیاز است؛

$q_{s,s',v}^m$: مجموع ساعت‌هایی که ایستگاه $s \in S$ قادر است تا برای انجام مأموریت $m \in M$ از شناور $v \in V$ مستقر در ایستگاه $s' \in S$ بهره‌مند شود، به شرط آن‌که $(s, s') \in R$ باشد (استفاده‌ی اشتراکی).

مدل ریاضی طراحی شده، در روابط ریاضی ۱ تا ۲۱ نمایش داده شده است.

$$Model_c \quad \forall c \in C : \quad (1)$$

$$Z_1 = \text{Min} \sum_{s \in S} \left| \sum_{v \in V} \sum_{m \in M} h_{s,v}^m + \sum_{a \in A} \sum_{m \in M} h_{s,a}^m - \sum_{m \in M} D_{m,s} \right| \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Z_2 = \text{Min} \sum_{s \in S} \sum_{v \in V} & \left(F_v x_{s,v} + J_v \sum_{m \in M} h_{s,v}^m \right) \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{v \in V} \left(F_v k_{s,v} + J_v \sum_{m \in M} u_{s,v}^m \right) \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{v \in V} (I_v k_{s,v}) \\ & + \sum_{v \in V^{LAY}} L_v \left(N_v - \sum_{s \in S} x_{s,v} \right) \\ & - \sum_{v \in V^{CO}} O_v \left(N_v - \sum_{s \in S} x_{s,v} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \min \sum_i \alpha_i + \beta_i \\ x_i = \alpha_i - \beta_i \quad \forall i \\ \alpha_i, \beta_i \geq 0 \quad \forall i \end{aligned} \quad (24)$$

با توجه به موارد بیان شده و روابط ۲۴، تابع هدف موجود در رابطه ۲ به صورت روابط ۲۵ خطی سازی می شود.

$$\begin{aligned} Z_1 = \min \sum_{s \in S} \alpha_s + \beta_s \\ \sum_{v \in V} \sum_{m \in M} h_{s,v}^m + \sum_{a \in A} \sum_{m \in M} h_{s,a}^m - \sum_{m \in M} D_{m,s} = \alpha_s - \beta_s \\ \forall s \in S, \alpha_s, \beta_s \geq 0 \quad \forall s \in S \end{aligned} \quad (25)$$

خطی سازی رابطه ۵: محدودیت ۵ به علت وجود عملگر ضرب در میان دو متغیر غیرخطی است. با یک ترفند ساده، این محدودیت خطی می شود. فرض کنید که x و y ، متغیرهایی پیوسته و بزرگ تر از یا مساوی با صفر هستند. می خواهیم به خطی سازی رابطه $xy = 0$ پردازیم. برای این کار از روابط ۲۶ استفاده می شود که در آن w برابر یک عدد بسیار بزرگ و ρ برابر یک متغیر دودویی است.

$$\begin{aligned} x \leq \rho.w \\ y \leq (1 - \rho).w \end{aligned} \quad (26)$$

محدودیت موجود در رابطه ۵ به صورت روابط ۲۷، خطی سازی می شود.

$$\begin{aligned} \left(N_v - \sum_{s \in S} x_{s,v} \right) \leq \rho.w \quad \forall v \in V^{CI} \\ \sum_{s \in S} k_{s,v} \leq (1 - \rho).w \quad \forall v \in V^{CI} \\ \rho \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (27)$$

۳. معرفی مطالعه موردی

با توجه به موقعیت جغرافیایی و راهبردی مناطق دریایی جنوب ایران و تردد سالیانه ی بیش از ده ها هزار فرزند کشتی نفت کش و تجاری و شناورهای سنتی غیراستاندارد این مناطق به عنوان یکی از مناطق بالقوه ی بروز سوانح دریایی محسوب می شود.^[۲۳] از این رو، قصد داریم تا مسئله ی مطرح شده در بخش قبل را به صورت آزمایشی بر روی اطلاعات مرتبط با مراکز نجات خلیج فارس و دریای عمان به کار بگیریم. تمام داده های مورد نیاز برای پیاده سازی مسئله، از طرح ملی جست و جو و نجات دریایی ایران،^[۲۳] مجموعه ی گزارش های کمیته های سوانح مراکز هماهنگی نجات دریایی ایران، آمارهای سوانح دریایی سازمان بنادر و دریانوردی ایران، بخش نامه ی بین المللی ۰۴/Circ - MSC - MEPC،^[۲۵] شناسنامه ی شناورها و بنادر ایران، جداول و کتابچه های تعرفه ی نرخ های کرایه گیری شناورها و مصاحبه ی تلفنی با افراد مسئول در مراکز هماهنگی نجات دریایی جنوب ایران حاصل شده است.

مطابق شکل ۱، سازمان بنادر و دریانوردی جمهوری اسلامی ایران، آب های جنوبی ایران را به چهار ناحیه تقسیم کرده است که هرکدام از این نواحی تحت

یافته (از یک نوع) نباید از تعداد در دسترس آن بیشتر باشد. محدودیت ۵ بیان می کند که اگر همه ی تعداد در دسترس یک نوع شناور، تخصیص داده نشده است، مجاز به کرایه گرفتن از آن نوع شناور نیستیم. محدودیت ۶ تضمین می کند که شناورهایی که امکان کرایه شدنشان در مرکز نجات مربوط وجود ندارد، کرایه نشوند. محدودیت ۷ تضمین می کند که شناورهایی که قابلیت استفاده شدن در برخی از ایستگاه ها را ندارند، در آن ایستگاه ها مستقر نشوند. محدودیت ۸ بیان می کند که کل تعداد وسایل نجات مورد استفاده در یک ایستگاه، برای انجام یک مأموریت مشخص، دست کم برابر یک مقدار از پیش تعیین شده باشد. محدودیت ۹ نیز بیان می کند که تعداد کلیه ی وسایل نجات مورد استفاده در یک ایستگاه، دست کم برابر یک مقدار از پیش تعیین شده باشد. محدودیت ۱۰ تضمین می کند که مجموع ساعت های خدمت دهی شناورها برای انجام مأموریتی که توانایی انجام آن را ندارند، برابر صفر باشد. محدودیت های ۱۱ تا ۱۴ کران های بالایی را برای مجموع ساعت های خدمت دهی قابل عرضه، مشخص کرده اند. در محدودیت ۱۵ نیز برای ساعت هایی که یک نوع شناور مستقر در یک ایستگاه می تواند برای انجام یک مأموریت خاص، در سایر ایستگاه ها به کار برده شود (استفاده ی اشتراکی)، یک کران بالا تعیین شده است. محدودیت ۱۶ تضمین می کند که ایستگاه هایی که توانایی اشتراک گذاری یک شناور مشخص را ندارند، به اشتراک گذاری آن شناور نپردازند. محدودیت ۱۷ نیز تضمین می کند که میزان ساعت های خدمت دهی عرضه شده برای مأموریت های مختلف در هر ایستگاه (از طریق شناورهای موجود، هوانوردی، شناورهای کرایه گرفته شده و اشتراک گذاری شناورها)، کمتر از میزان تقاضای موجود نباشد. رابطه ی ۱۸، مجموعه ی زوج ایستگاه هایی را که قادرند به اشتراک گذاری یک شناور خاص بپردازند، مشخص کرده است. رابطه های ۱۹ تا ۲۱ نیز به تعریف جنس و نوع متغیرهای مسئله پرداخته اند.

مدلی که در این بخش ارائه شده است، به علت وجود برخی از روابط، حالت غیرخطی دارد. در این بخش به خطی سازی کامل این مدل پرداخته می شود تا بتوان ادعا کرد که مدل ارائه شده، یک مدل برنامه ریزی اعداد مختلط (MIP) ^{۱۹} است.

خطی سازی رابطه ۲: تابع هدف نشان داده شده در رابطه ۲ به علت وجود عملگر قدرمطلق غیرخطی است. با به کارگیری یک ترفند که توسط فرانسویس نیز مورد استفاده قرار گرفته است،^[۲۴] به خطی سازی رابطه ۲ می پردازیم. فرض کنید که به دنبال کمیته سازی قدرمطلق یک متغیر هستیم. برای مقدار $|x|$ حالت های موجود در رابطه ۲۲ وجود دارد که در آن متغیرهای α و β متغیرهایی پیوسته و بزرگ تر از یا مساوی با صفر هستند که همواره دست کم یکی از آن ها صفر است. بنابراین می توان با در نظر گرفتن معادلات ریاضی $|x| = \alpha + \beta$ و $x = \alpha - \beta$ ، مسئله ی $\min |x|$ را به صورت رابطه ی ۲۳ خطی کرد.

$$|x| = \begin{cases} x = \alpha & x \geq 0 \\ x = -\beta & x < 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \min \alpha + \beta \\ x = \alpha - \beta \\ \alpha, \beta \geq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

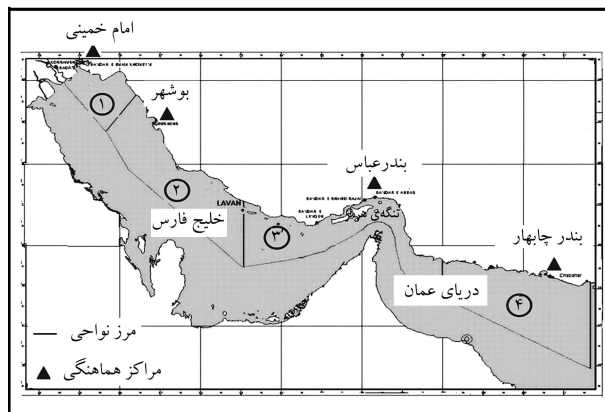
حال اگر به دنبال کمیته سازی مسئله ی $\min \sum_i |x_i|$ باشیم، مسئله ی خطی سازی شده ی نشان داده شده در روابط ۲۳ کمی تغییر می کند و به صورت روابط ۲۴ بیان می شود.

جدول ۱. ایستگاه‌های جست‌وجو و نجات دریایی در خلیج فارس و دریای عمان به تفکیک مراکز هماهنگی نجات دریایی.

نام ایستگاه	کد	نام ایستگاه	کد	نام ایستگاه	کد
امام خمینی	۱-۵۰۱	اروند کنار	۱-۵۰۲	سجافی	۱-۵۰۳
خرمشهر	۱-۵۰۴	آبادان	۱-۵۰۵	نهر قصر	۱-۵۰۶
چونیده	۱-۵۰۷	خور دورق	۱-۵۰۸	ماهشهر	۱-۵۰۹
بحرکان	۱-۵۱۰	دیلم	۱-۵۱۱	امام حسن	۱-۵۱۲
بوشهر	۲-۵۰۱	خارگ	۲-۵۰۲	عامری	۲-۵۰۳
دیر	۲-۵۰۴	عساولیه	۲-۵۰۵	گناوه	۲-۵۰۶
کنگان	۲-۵۰۷	ریگ	۲-۵۰۸	صلح آباد	۲-۵۰۹
هلبله	۲-۵۱۰	شیف	۲-۵۱۱	رستمی	۲-۵۱۲
لاور	۲-۵۱۳	سیراف	۲-۵۱۴	شیرینو	۲-۵۱۵
نخل تقی	۲-۵۱۶	بیدخون	۲-۵۱۷		
بندرعباس	۳-۵۰۱	لنگه	۳-۵۰۲	کیش	۳-۵۰۳
جاسک	۳-۵۰۴	قشم	۳-۵۰۵	ابوموسی	۳-۵۰۶
لاوان	۳-۵۰۷	سیری	۳-۵۰۸	رجایی	۳-۵۰۹
باهنز	۳-۵۱۰	تیاب	۳-۵۱۱	هرمز	۳-۵۱۲
لافت	۳-۵۱۳	پهل	۳-۵۱۴	چارک	۳-۵۱۵
آفتاب	۳-۵۱۶	مقام	۳-۵۱۷	نخیلوه	۳-۵۱۸
چیرویه	۳-۵۱۹	مغویه	۳-۵۲۰	کنگ	۳-۵۲۱
باسعیدو	۳-۵۲۲	خمیر	۳-۵۲۳	سوزا	۳-۵۲۴
بستانه	۳-۵۲۵	درگهان	۳-۵۲۶	رمچاه	۳-۵۲۷
کلاهی	۳-۵۲۸	سیریک	۳-۵۲۹	کوه مبارک	۳-۵۳۰
چابهار	۴-۵۰۱	بهشتی	۴-۵۰۲	پسایندر	۴-۵۰۳
کنارک	۴-۵۰۴	زرآباد	۴-۵۰۵	تنگ	۴-۵۰۶
پژم	۴-۵۰۷	تیس	۴-۵۰۸	رمین	۴-۵۰۹
بریس	۴-۵۱۰	گواتر	۴-۵۱۱	گوگسر	۴-۵۱۲

۴. حل مدل ریاضی متناظر با مطالعه‌ی موردی

مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله، به نوعی درون خود ساختاری شبیه مسئله‌ی تخصیص تعمیم‌یافته (GAP) دارد. [۲۲] از مسائل کلاسیک بهینه‌سازی ترکیباتی است که سخت بودن آن (NP-Hard) [۲۳] ثابت شده است. بنابراین



شکل ۱. مناطق و مراکز هماهنگی نجات دریایی خلیج فارس و دریای عمان (مقیاس نقشه ۸-۱۰).

سرپرستی یک مرکز هماهنگی نجات دریایی است که خود دارای ایستگاه‌های پراکنده است. [۲۴] این ایستگاه‌ها در جدول ۱، مشخص شده‌اند.

در مراکز هماهنگی نجات دریایی جنوب ایران، ۱۵ نوع شناور و ۲ نوع هوانورد استفاده می‌شود که تعداد آن‌ها به تفکیک مراکز نجات، در جدول ۲ مشخص شده است. علاوه بر این، ۲۱ نوع مأموریت متفاوت، برای تشریح عملیاتی که انجام می‌پذیرد، قابل تعریف است که در جدول ۳ مشخص شده است. در ادامه به چند نکته که در تعیین داده‌های ورودی مسئله در نظر گرفته شده است، اشاره می‌شود:

- تقاضای ایستگاه‌ها از طریق برآورد تعداد مأموریت‌های مورد نیاز از داده‌های تاریخی و ضرب آن در متوسط زمان انجام آن مأموریت حاصل می‌شود.
- در میزان ظرفیت کلی خدمت‌رسانی هر شناور، فرض شده است که در ۲۰ درصد اوقات، شناورها بنا بر دلایلی چون خرابی و تعمیرات دوره‌ی در دسترس نیستند.
- بیشینه‌ی فاصله‌ی مجاز میان دو ایستگاه برای اشتراک‌گذاری یک شناور (70)، از طریق در نظرگیری متوسط سرعت شناور و بیشینه‌ی زمان مجاز تا رسیدن به محل عملیات به دست آمده است؛ بنابراین هر شناور، مجاز به اشتراک‌گذاری بین ایستگاه‌هایی است که بتواند در زمان قابل قبولی از ایستگاه دارنده‌ی شناور به محدوده‌ی ایستگاه خواستار آن برسد.
- فواصل میان ایستگاه‌های هر مرکز (به واحد مایل دریایی)، به‌طور دقیق از طریق نرم‌افزار Google Earth (نسخه‌ی ۶.۰.۰.۳) به دست آمده است و نیازی به در نظرگیری فرض‌های محدودکننده (همچون فاصله‌ی اقلیدسی) نیست.

معمولاً، کمینه‌ی مدت زمان اجاره‌ی شناورها در قرارداد اجاره‌ی زمانی سه ماهه است. [۲۶] علاوه بر این، در فصول مختلف سال شرایط آب‌وهوایی خاص و قابل‌تصور برای هر منطقه‌ی دریایی وجود دارد و شرایط حمل‌ونقل دریایی و وقوع اغلب سوانح دریایی می‌تواند متأثر از آن باشد. از این رو، فرض می‌شود که انتخاب دوره‌ی برنامه‌ریزی سه‌ماهه (متناظر با فصل‌های سال)، یک انتخاب مناسب برای طول دوره‌ی برنامه‌ریزی باشد. معقول بودن و پذیرفتنی بودن این فرض، با استفاده از روش آماری طراحی بلوک‌های کاملاً تصادفی شده (RCBD) 2^0 ، که از زیرمجموعه‌های مدل‌های رگرسیونی 2^1 است، ثابت شده که ذکر آن از حوصله‌ی مقاله خارج است.

در این پژوهش، داده‌های تاریخی متناظر با فصل بهار در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. تعداد و انواع تجهیزات حمل و نقلی در ناوگان پایه‌ی مراکز هماهنگی نجات دریایی خلیج فارس و دریای عمان.

نام شناور هوانورد	کُد	مرکز امام خمینی	مرکز بوشهر	مرکز بندرعباس	مرکز چابهار
شناور ناجی	V۰۱	۵	۶	۸	۳
قایق نجات	V۰۲	۱۰	۱۳	۱۹	۷
قایق جست‌وجو	V۰۳	۳	۴	۴	۲
شناور گشت ساحلی	V۰۴	۲	۲	۲	۱
هواناو	V۰۵	۲	۳	۳	۱
آمیولانس دریایی	V۰۶	۳	۳	۵	۲
شناور آتش‌نشان (نوع عادی)	V۰۷	۳	۵	۹	۳
شناور آتش‌نشان (نوع مجهز)	V۰۸	۱	۲	۳	۰
جت‌اسکی	V۰۹	۶	۸	۱۱	۲
شناور نفربر	V۱۰	۲	۲	۳	۱
شناور یدک‌کش	V۱۱	۳۴	۲۹	۲۳	۱۱
شناور دریاپاک	V۱۲	۱	۲	۲	۱
دوبه (نوع عادی)	V۱۳	۴	۶	۵	۳
دوبه (نوع مجهز)	V۱۴	۱	۲	۲	۱
شناور شناورگذار	V۱۵	۱	۱	۲	۱
بالگرد SAR	A۰۱	۱	۲	۷	۳
هواپیما SAR	A۰۲	۰	۱	۲	۱

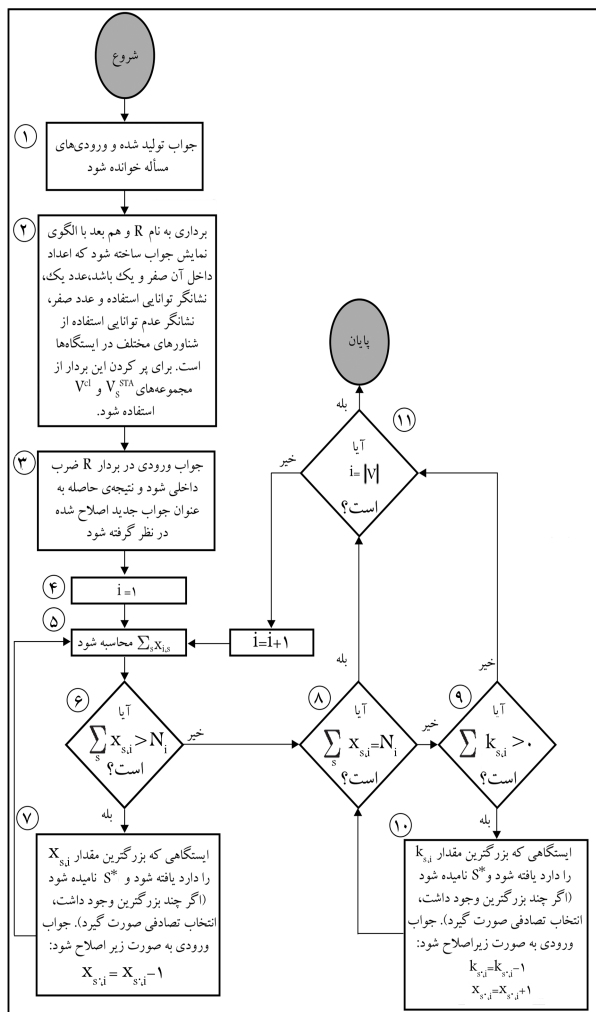
جدول ۳. انواع مأموریت‌های جست‌وجو و نجات دریایی مورد نیاز در مراکز هماهنگی نجات دریایی خلیج فارس و دریای عمان.

نام مأموریت	کُد	نام مأموریت	کُد
جست‌وجوی ساحلی	M۰۱	گشت زنی	M۱۲
جست‌وجوی فراساحلی	M۰۲	اطفاء حریق (غیرگسترده)	M۱۳
جابه‌جایی افراد تحت خطر (تعداد کم)	M۰۳	اطفاء حریق (گسترده)	M۱۴
جابه‌جایی افراد تحت خطر (تعداد زیاد)	M۰۴	یدک‌کشی	M۱۵
انجام خدمات پزشکی (آسیب سطحی)	M۰۵	سوخت‌رسانی اضطراری	M۱۶
انجام خدمات پزشکی (آسیب شدید)	M۰۶	آبرسانی اضطراری	M۱۷
از آب‌گیری افراد در حال غرق شدن	M۰۷	پایش هوایی آلودگی	M۱۸
جابه‌جایی و تخلیه‌ی محموله‌های تحت خطر (تعداد کم)	M۰۸	جمع‌آوری و کنترل آلودگی‌های دریایی (حجم کم)	M۱۹
جابه‌جایی و تخلیه‌ی محموله‌های تحت خطر (تعداد زیاد)	M۰۹	جمع‌آوری و کنترل آلودگی‌های دریایی (حجم زیاد)	M۲۰
نجات شناورهای به گل نشسته	M۱۰	نصب علائم کمک ناوبری	M۲۱
برطرف کردن نقص فنی شناورها	M۱۱		

۱.۴. موارد پیش‌نیازی برای پیاده‌سازی روش حل

الگوی نمایش جواب (کدگذاری جواب)^{۲۶}: در مسئله‌ی این پژوهش، چندین متغیر عدد صحیح و پیوسته وجود دارد. میان بیشتر این متغیرها وابستگی وجود دارد. بنابراین اگر در مسئله، تعداد ایستگاه‌ها برابر $|S|$ و تعداد انواع شناورها برابر $|V|$ باشد، الگوی نمایش جواب می‌تواند به صورت خطی و توسط یک بردار حاوی اعداد صحیح نمایش داده شود که تعداد عناصر آن برابر $|S| \times 2|V|$ است. قسمتی

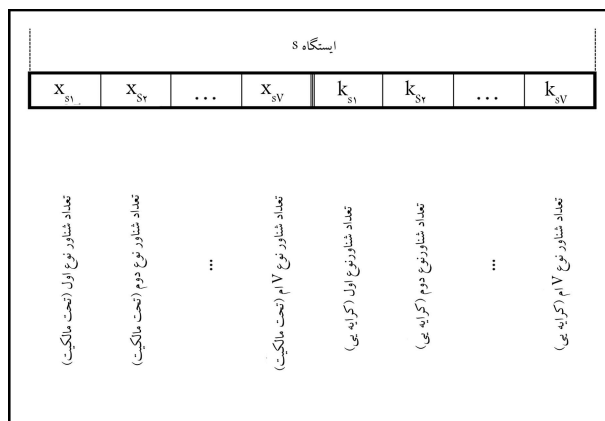
مسئله‌ی این پژوهش نیز ممکن است در رده‌ی مسائل سخت قرار گیرد. اثبات علمی این موضوع، امری پیچیده است و نیازمند استفاده از مفهوم تبدیل (تقلیل) تورینگ^{۲۴} است. بنابراین در این بخش فقط به بیان این گفته تحت یک فرضیه اکتفا می‌شود. اما اگر حتی فرض شود که مسئله، در رده‌ی مسائل ساده (رده‌ی P)^{۲۵} قرار دارد نیز شرایطی وجود دارد که استفاده از روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری را در حل مسئله‌ی این مقاله توجیه می‌کند؛ معمولاً برای مسائلی که در سطح برنامه‌ریزی فنی قرار دارند، توازن میان کیفیت جواب‌ها و مدت زمان حل آن‌ها باید وجود داشته باشد. روش‌های فراابتکاری می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای این دسته از مسائل باشد.^[۲۸] علاوه بر این، ممکن است ساختار مسئله در رده‌ی مسائل ساده باشد، ولی ابعاد آن به گونه‌ی بزرگ باشد که حل دقیق در زمان منطقی و با سخت‌افزارهای در دسترس مقدور نباشد. این حالت برای مسئله‌ی حاضر وجود دارد. با استفاده از نرم‌افزار GAMS (نسخه‌ی ۲۳) و ابزار حل‌کننده‌ی CPLEX و رایانه‌ی با مشخصات پردازنده‌ی مرکزی ۲/۳ گیگاهرتزی و حافظه‌ی دسترسی تصادفی ۴ گیگابایتی، مسئله‌ی موردنظر به‌ازای داده‌های هیچ کدام از مراکز هماهنگی نجات مطالعه‌ی موردی، نتوانست به صورت دقیق حل شود و نرم‌افزار GAMS، خطای مربوط به کمبود حافظه را اعلام کرد.



شکل ۳. روندنمای مرحله‌ی اول الگوریتم ابتکاری برای مدیریت محدودیت‌های مسئله.

به سایر الگوریتم‌ها جواب بهتری ارائه کند، وجود ندارد. اما می‌توان با استفاده از روش‌هایی همچون تجزیه و تحلیل دورنمای فضای مسئله (FLA) ^{۲۵} برای یک نمونه‌ی خاصی از مسئله ^{۲۶} و مدنظر قرار دادن ویژگی‌های مربوط به آن الگوریتم حل را هوشمندانه انتخاب کرد. این روش، با استفاده از جست‌وجوی محلی ^{۲۷} ساده و در نظرگیری برخی از شاخص‌های آماری شکل حدودی فضای جست‌وجوی مسئله را حدس می‌زند. ^[۲۸]

با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (نسخه‌ی ۲۰۱۴)، روش FLA برای مطالعه‌ی موردی این پژوهش به کار برده شده و این نتایج حاصل شده است: بهینه‌های محلی ^{۲۸} در این مسئله، به حالت خاصی هم‌گرا نمی‌شوند و به‌طور یک‌نواخت در فضای جواب پراکنده هستند ولی فاصله‌ی میان آن‌ها زیاد نیست. علاوه بر این، دشواری نسبی در حل مسئله وجود خواهد داشت و با یک فضای جواب مسطح ناهموار ^{۲۹} روبرو هستیم که تعداد بهینه‌های محلی زیادی در آن وجود دارد و جواب‌های همسایه از همبستگی کمی نسبت به هم برخوردارند. برای چنین مسائلی، الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر تک جواب ^{۴۰} پیشنهاد می‌شود. ^[۲۸] با توجه به این‌که بخشی از مسئله‌ی این پژوهش، به نوعی دارای ساختار گروه‌بندی است (گروه‌بندی شناورهای تحت مالکیت یک مرکز هماهنگی نجات دریایی در ایستگاه‌ها)، از یک



شکل ۲. طرح الگوی نمایش جواب.

از این بردار که مربوط به ایستگاه فرضی s است در شکل ۲ نشان داده شده است.

برآزش کیفیت جواب‌ها ^{۲۷}: با توجه به این‌که در مسئله‌ی این پژوهش، توابع هدف نشان داده شده در روابط ۲ و ۳، به صورت توابعی خودبسنده ^{۲۸} هستند، آن‌ها بدون هیچ تغییری، در الگوریتم حل مورد نظر، به کار برده می‌شوند. چالش موجود، دو هدفه بودن مسئله است. منطقی است که اولویت تابع هدف اول، بالاتر باشد؛ زیرا در صورت نبود امکان کرایه کردن شناورها، باید قابل قبول‌ترین نحوه‌ی استقرار آن‌ها به دست آید. بنابراین می‌توان از رویکرد بهینه‌سازی ترتیبی لکسیکوکراف بهبودیافته ^{۲۹} بهره‌مند شد. مطابق این روش، پس از بهینه‌سازی تابع هدف اول (فقط) و به دست آوردن مقدار بهینه‌ی آن یک مقدار آزادسازی ^{۳۰} برای آن در نظر گرفته می‌شود و با حفظ نتیجه (تحت عنوان محدودیت)، به بهینه‌سازی تابع هدف دوم پرداخته می‌شود. ^[۲۹] بنابراین، پس از بهینه‌سازی تابع هدف اول (رابطه‌ی ۲)، محدودیتی که در رابطه‌ی ۲۸ نشان داده شده است، به مسئله اضافه می‌شود و بعد به بهینه‌سازی تابع هدف دوم (رابطه‌ی ۳) پرداخته می‌شود. در رابطه‌ی ۲۸ برابر مقدار بهینه‌ی به دست آمده برای تابع هدف اول و δ همان میزان آزادسازی است. در این پژوهش δ برابر 0.01 مقدار بهینه‌ی تابع هدف اول در نظر گرفته می‌شود.

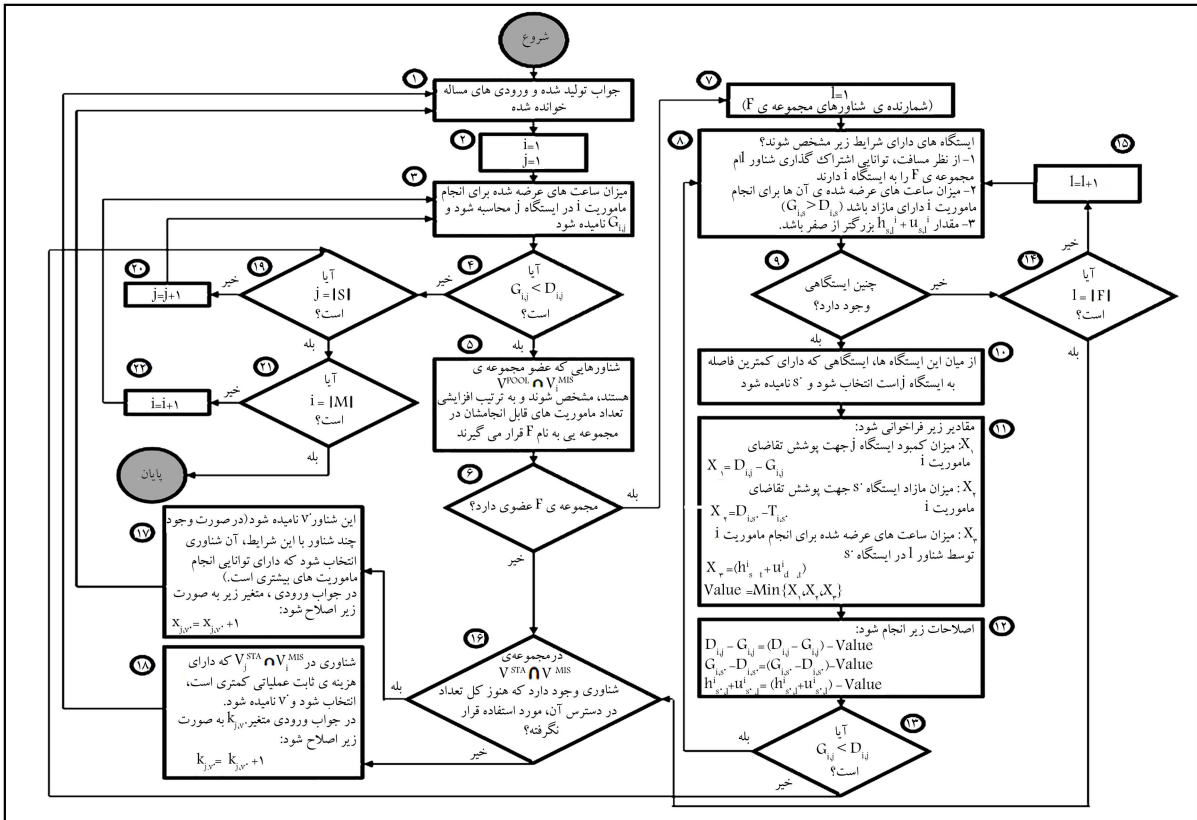
$$\sum_{s \in S} \left| \sum_{v \in V} \sum_{m \in M} h_{s,v}^m + \sum_{a \in A} \sum_{m \in M} h_{s,a}^m - \sum_{m \in M} D_{m,s} \right| \leq F_1^* + \delta \quad (28)$$

نحوه‌ی مدیریت محدودیت‌ها ^{۳۱}:

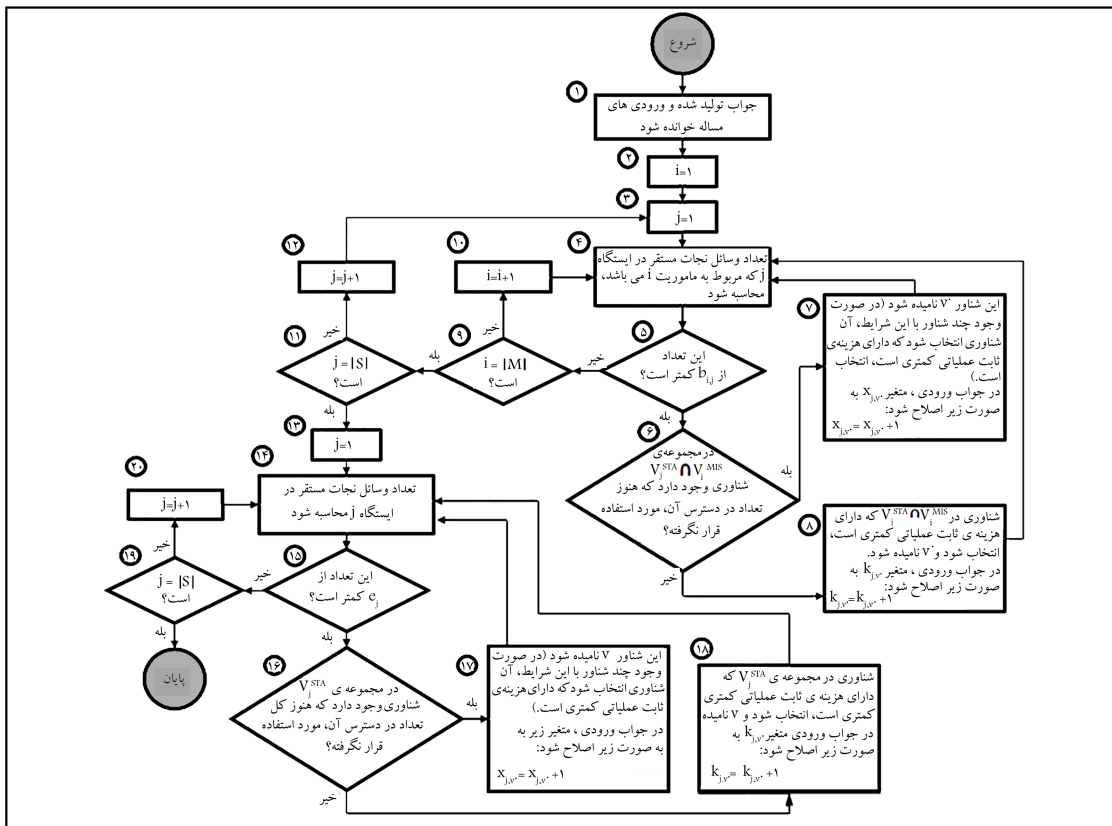
در روش‌های ابتکاری و فراابتکاری، مدام بر روی الگوی نمایش جواب تغییراتی ایجاد می‌شود تا به جواب مطلوب رسیده شود. این تغییرات ممکن است مسئله را از فضای جواب‌های شدنی خارج کند. ^[۲۸] در این پژوهش، برای مدیریت محدودیت‌های مسئله، یک الگوریتم ابتکاری ^{۳۲} طراحی شده است که با رویکردهای رمزگشایی هدفمند ^{۳۳} و تعمیر ^{۳۴} الگوی نمایش جواب‌های ایجاد، مانع از خارج شدن مسئله از فضای شدنی می‌شود. این الگوریتم ابتکاری، دارای سه مرحله است که ترتیب اعمال آن‌ها مهم است و خروجی هر مرحله، ورودی مرحله‌ی بعدی است. روندنمای مراحل این الگوریتم در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است.

۲.۴. تعیین روش حل مناسب

در حالت کلی، الگوریتم بهینه‌سازی که در تمام مسائل کارا باشد و همواره نسبت



شکل ۴. روندنمای مرحله‌ی دوم الگوریتم ابتکاری برای مدیریت محدودیت‌های مسئله.



شکل ۵. روندنمای مرحله‌ی سوم الگوریتم ابتکاری برای مدیریت محدودیت‌های مسئله.

الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر تک‌جواب با عنوان الگوریتم راهبردهای تکاملی گروهی (GES) ^{۴۱} استفاده می‌کنیم.

۳.۴. معرفی الگوریتم فراابتکاری GES

حسین‌زاده کاشان و همکاران در سال ۲۰۱۵ به توسعه‌ی هدفمند الگوریتم راهبردهای تکاملی (ES) ^{۴۲} پرداختند و با استفاده از مفهوم کدگذاری گروهی ^{۴۳}، الگوریتمی به نام راهبردهای تکاملی گروهی (GES) را برای استفاده در مسائل بهینه‌سازی از نوع گروه‌بندی، مطرح کردند. ^[۳۰] در این الگوریتم، به مانند خانواده‌ی روش‌های بهینه‌سازی ES، برای تولید جمعیت جواب‌ها، از عملگرهای همسایه‌ساز ترکیب مجدد (تقاطع) و جهش استفاده می‌شود. اما با توجه به ساختار کدگذاری گروهی GES، تغییراتی اساسی در این عملگرها به وجود آمده است. عملگر ترکیب مجدد، به جای ژن‌ها، بر روی گروه‌ها اعمال می‌شود. معادله‌ی مربوط به عملگر جهش نیز از طریق کمی‌سازی درجه‌ی تفاوت (یا شباهت) میان دو گروه کمی‌سازی شده و در آن از توزیع بتا استفاده شده است. تولید جواب‌ها در GES نیز بر اساس یک روش ابتکاری به نام NSG ^{۴۴} است که به طور کامل در مقاله‌ی مرجع تشریح شده است. ^[۳۰]

۴.۴. نتایج عددی و تحلیل عملکرد الگوریتم GES

با استفاده از الگوریتم GES و به‌کارگیری نرم‌افزار MATLAB (نسخه‌ی ۲۰۱۴)، اقدام به حل مسئله با توجه به مطالعه‌ی موردی شده است. نتایج به دست آمده، در جداول ۴ و ۵ به نمایش درآمده است. مقدار تابع هدف دوم بیانگر آن است که برنامه‌ریزی به دست آمده برای تعیین ترکیب ناوگان شناورها چه میزان هزینه برای یک مرکز نجات دارد. این مقدار می‌تواند توسط تصمیم‌گیرندگان مراکز هماهنگی نجات دریایی نسبت به حالت موجود مقایسه شود.

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم GES در مطالعه‌ی موردی، مسائلی با ابعاد کوچک (کمتر از ۶ ایستگاه، ۶ وسیله‌ی نقلیه و ۳ مأموریت)، این الگوریتم توانسته است جواب دقیق را به دست آورد. برای مسائل با ابعاد متوسط نیز، جواب قابل قبولی حاصل شده است. برای مثال، مسئله‌ی با ۱۰ ایستگاه، ۱۰ شناور و ۵ مأموریت که قابلیت حل شدن دقیق توسط نرم‌افزار GAMS را داشته مورد آزمایش قرار گرفته است. جواب بهینه‌ی سراسری تابع هدف اول که از نرم‌افزار GAMS به دست آمده است برابر ۸،۶۴۶ بوده است $(f(s^*))$. GES نیز جواب ۱،۸۸۴، ۲۰ را به دست آورده است $(f(s))$. یکی از شاخص‌های بررسی عملکرد روش‌های فراابتکاری، محاسبه‌ی مقدار $\frac{|f(s) - f(s^*)|}{f(s^*)}$ ^[۲۸] است. مقدار این شاخص برای مثال

جدول ۴. مقادیر توابع هدف و زمان حل مسئله به تفکیک مراکز هماهنگی نجات دریایی.

نام مراکز هماهنگی نجات دریایی	بندر امام خمینی	بندر بوشهر	بندر عباس	بندر چابهار
مقدار تابع هدف	۱۴،۸۳۳	۱۷،۷۵۶	۲۳،۴۴۵	۹،۸۵۳
دوم	میلیون	میلیون	میلیون	میلیون
	تومان	تومان	تومان	تومان

مطرح شده برابر ۰/۰۸۲۴ است که نشان از عملکرد نسبتاً خوب الگوریتم GES دارد.

یک روش دیگر برای تحلیل عملکرد GES، استفاده از حد بالای جواب برای مسئله است. ^[۲۸] همان‌طور که قبلاً گفته شد، مدل ریاضی متناظر با مطالعه‌ی موردی، به ازای هیچ کدام از مراکز هماهنگی نجات نتوانست به صورت دقیق حل شود و پیچیدگی مسئله باعث شد تا نرم‌افزار GAMS، خطای کمی در حافظه را اعلام کند. بهترین جواب یافته شده توسط این نرم‌افزار در طول روند حل، مشخص است و می‌توان آن را به‌عنوان یک حد بالا در نظر گرفت. جواب‌های به دست آمده از طریق الگوریتم GES برای تمام مراکز، کمتر (بهتر) از این حد بالاست.

۵. نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهاد برای مطالعات آتی

با توجه به وجود محدودیت‌ها در تهیه و تدارک ناوگان شناورهای عملیات جست‌وجو و نجات دریایی، برنامه‌ریزی نحوه‌ی بهره‌گیری از آن‌ها از موارد پراهمیت و یک نیاز بین‌المللی است. در این پژوهش و برای نخستین بار، با استفاده از مفاهیم مسئله‌ی MFSMP، اقدام به طراحی مسئله‌ی برای پاسخ‌گویی به این نیاز شد و در نهایت یک مدل ریاضی دهدفه از نوع برنامه‌ریزی اعداد مختلط ارائه شد. نوآوری اصلی در این مسئله از حیث کاربرد آن و به کارگیری مسئله‌ی MFSMP در حوزه‌ی ناوگان جست‌وجو و نجات دریایی و توجه به یک مسئله‌ی موجود و واقعی است. غیر از این، نوآوری‌های دیگری در حاشیه و در ساخت مدل ریاضی یا حل آن وجود داشت. مثلاً در نظر گرفتن امکان اشتراک داخلی شناورها در میان ایستگاه‌های یک مرکز نجات به‌عنوان یک روش تعدیل ناوگان و همچنین، طراحی یک الگوریتم ابتکاری برای مدیریت محدودیت‌های مدل ریاضی که قادر است هر جواب نشدنی حاصل شده از عملگرهای همسایه‌ساز را به نزدیک‌ترین جواب شدنی موجود تبدیل کند.

در این پژوهش، سعی شد تا مدل ریاضی با دنیای واقعی تطبیق داده شود و نه برعکس. در حالی که خلاف این موضوع، در بسیاری از مقالات موجود در حوزه‌ی تعیین ترکیب ناوگان دریایی، به وفور یافت می‌شود. آن‌ها به صرف ایجاد نوآوری‌های روش‌گرایانه، برخی از واقعیات موجود را کنار گذاشته‌اند و در تحقیقات خود، ساده‌سازی‌های و فرض‌هایی را در نظر گرفته‌اند که در شرایط واقعی وجود ندارد. اقلیدسی بودن فواصل (خط مستقیم)، مشخص و قطعی بودن تقاضا، تک‌هدفه بودن مدل‌های توسعه داده شده، همگن بودن شناورها و محدود بودن روش‌های تعدیل ناوگان از مواردی است که به‌وفور یافت می‌شود.

این مسئله، به‌طور نمونه بر روی اطلاعات مرتبط با مراکز هماهنگی نجات دریایی جنوب ایران به کار گرفته شد. ساختار این نمونه از مسئله به‌گونه‌ی بود که امکان بهینه‌سازی دقیق آن میسر نبود. از این رو، به تعیین یک روش فراابتکاری مناسب پرداخته شد و الگوریتم GES انتخاب و اجرا شد و تعداد و نحوه‌ی ترکیب ناوگان شناورها در ایستگاه‌های مراکز هماهنگی نجات دریایی به همراه چگونگی تعدیل آن‌ها در یک دوره‌ی برنامه‌ریزی سه‌ماهه (فصل بهار) مشخص شد. نتایج به‌گونه‌ی بود که علاوه بر پوشش دهی حداکثری تقاضا و تعدیل ناوگان به بهترین شکل ممکن، هزینه‌ی بهره‌برداری مناسبی از ناوگان شناورها حاصل شد که حدود ۱۹ میلیارد تومان است.

امید است که مسئله‌ی ارائه شده در پژوهش حاضر، شروعی برای انجام پژوهش‌های

جدول ۵. جزئیات نتایج حاصل از حل مسئله مطالعه‌ی موردی به تفکیک مراکز هماهنگی نجات دریایی.

کد شناور	مرکز بندر امام خمینی (ره)		مرکز بندر بوشهر		مرکز بندر عباس		مرکز چابهار	
	تعداد شناورهای استقرار یافته در ایستگاه‌ها	تعداد کمیود در ایستگاه‌ها	تعداد شناورهای استقرار یافته در ایستگاه‌ها	تعداد کمیود در ایستگاه‌ها	تعداد شناورهای استقرار یافته در ایستگاه‌ها	تعداد کمیود در ایستگاه‌ها	تعداد شناورهای استقرار یافته در	تعداد کمیود در ایستگاه‌ها
V۰۱	۱ - S۰۱(۱), ۱ - S۰۲(۱), ۱ - S۰۳(۳)	۱ - S۰۳(-۱)	۲ - S۰۲(۲), ۲ - S۰۳(۱) ۲ - S۰۴(۳), ۲ - S۰۶(۲) ۲ - S۰۷(۱)	۳ - S۰۱(۳), ۳ - S۰۲(۱) ۳ - S۰۳(۱), ۳ - S۰۴(۱) ۳ - S۰۵(۱)	۴ - S۰۱(۱), ۴ - S۰۲(۱) ۴ - S۰۳(۱)			
	۱ - S۰۱(۲), ۱ - S۰۲(۲), ۱ - S۰۵(۴), ۱ - S۰۷(۱), ۱ - S۰۲(۱), ۱ - S۰۵(۱)		۲ - S۰۱(۲), ۲ - S۰۲(۱) ۲ - S۰۳(۲), ۲ - S۰۴(۱) ۲ - S۰۵(۳), ۲ - S۰۸(۱) ۲ - S۱۲(۱), ۲ - S۱۶(۱) ۲ - S۱۷(۱)	۳ - S۰۳(۲), ۳ - S۰۴(۲) ۳ - S۰۵(۲), ۳ - S۰۶(۲) ۳ - S۰۷(۳), ۳ - S۰۹(۱) ۳ - S۱۱(۱), ۳ - S۱۴(۱) ۳ - S۱۶(۱), ۳ - S۲۵(۱) ۳ - S۳۷(۱)	۴ - S۰۲(۱), ۴ - S۰۳(۱) ۴ - S۰۴(۳), ۳ - S۰۶(۱) ۴ - S۰۹(۱)			
V۰۳	۱ - S۰۱(۱), ۱ - S۰۵(۱), ۱ - S۱۰(۱)		۲ - S۰۳(۱), ۲ - S۰۹(۱) ۲ - S۱۱(۲)	۳ - S۱۰(۱), ۳ - S۱۲(۱) ۳ - S۱۵(۱), ۳ - S۲۹(۱)	۴ - S۰۴(۱), ۴ - S۱۰(۱)			
V۰۴	۱ - S۰۲(۱), ۱ - S۰۴(۱)		۲ - S۰۳(۱), ۲ - S۰۹(۱)	۳ - S۰۸(۱), ۳ - S۱۳(۱)	۴ - S۰۵(۱)			
V۰۵	۱ - S۰۱(۱), ۱ - S۰۴(۱)		۲ - S۰۵(۱), ۲ - S۱۳(۱)	۳ - S۰۸(۱)	۴ - S۱۰(۱)			
V۰۶	۱ - S۰۱(۱), ۱ - S۰۵(۱)		۲ - S۰۱(۱), ۲ - S۰۴(۱)	۳ - S۰۱(۱), ۳ - S۰۳(۱) ۳ - S۰۴(۱), ۳ - S۰۵(۱) ۳ - S۰۶(۱)	۴ - S۰۱(۱), ۴ - S۰۵(۱)			
V۰۷	۱ - S۰۱(۱), ۱ - S۰۲(۱), ۱ - S۰۴(۱)	۱ - S۰۵(-۱) ۱ - S۰۴(-۱)	۲ - S۰۳(۳), ۲ - S۰۸(۱) ۲ - S۰۹(۳)	۳ - S۰۲(۱), ۳ - S۰۳(۱) ۳ - S۰۴(۱), ۳ - S۰۶(۱) ۳ - S۰۷(۱), ۳ - S۰۹(۱) ۳ - S۱۰(۱)	۴ - S۰۱(۱), ۴ - S۰۲(۱) ۴ - S۰۳(۱)			
V۰۸	۱ - S۰۲	۱ - S۰۵(-۱)	۲ - S۰۵(۱), ۲ - S۱۳(۱)	۳ - S۰۲(۱), ۳ - S۰۴(۱)	۴ - S۰۱(۱), ۴ - S۰۲(۱)			
V۰۹	۱ - S۰۱(۱), ۱ - S۰۷(۱), ۱ - S۰۸(۱), ۱ - S۱۰(۱)		۲ - S۰۱(۱), ۲ - S۰۵(۱) ۲ - S۰۶(۱), ۲ - S۱۳(۱) ۲ - S۱۴(۱), ۲ - S۱۵(۱)	۳ - S۰۱(۱), ۳ - S۰۲(۱) ۳ - S۰۸(۱), ۳ - S۰۹(۱) ۳ - S۱۰(۱), ۳ - S۱۱(۱) S۱۲(۱), ۳ - S۱۳(۱) ۳ - S۱۴(۱)	۴ - S۰۹(۱)			

ادامه‌ی جدول ۵.

تعداد کمبود در ایستگاه‌ها	مرکز چابهار	تعداد کمبود در ایستگاه‌ها	مرکز بندر عباس	تعداد کمبود در ایستگاه‌ها	مرکز بندر بوشهر	مرکز بندر امام خمینی (ره)	کد شناور
	تعداد شناورهای استقرار یافته در		تعداد شناورهای استقرار یافته در ایستگاه‌ها		تعداد شناورهای استقرار یافته در ایستگاه‌ها	تعداد شناورهای استقرار یافته در ایستگاه‌ها	
	$4 - S^0 1(1)$	$2 - S^0 1(-1)$	$3 - S^0 2(1), 3 - S^0 3(1)$ $3 - S^0 4(1)$	$2 - S^0 5(-1)$	$2 - S^0 1(1), 2 - S^0 2(1)$ $2 - S^0 1(1), 2 - S^0 5(1)$	$1 - S^0 1(1),$ $1 - S^0 3(1)$ $1 - S^0 1(7),$ $1 - S^0 2(4),$ $1 - S^0 3(5)$	۷۱۰
	$4 - S^0 1(2), 4 - S^0 2(2)$ $4 - S^0 3(2), 4 - S^0 4(3)$ $4 - S^{11}(2)$	$2 - S^{12}(-1)$ $2 - S^0 9(-2)$ $2 - S^0 8(-1)$ $2 - S^0 3(-2)$ $2 - S^0 2(-1)$	$3 - S^0 1(3), 3 - S^0 4(2)$ $3 - S^0 5(8), 3 - S^0 6(4)$ $3 - S^0 7(2), 3 - S^{10}(1)$ $3 - S^{15}(1), 3 - S^{17}(1)$	$2 - S^0 9(-1)$ $2 - S^0 1(-1)$	$2 - S^0 1(5), 2 - S^0 2(4)$ $2 - S^0 3(4), 2 - S^0 4(3)$ $2 - S^0 5(5), 2 - S^0 6(1)$ $2 - S^0 7(1), 2 - S^0 8(1)$ $2 - S^{10}(1), 2 - S^{12}(1)$ $2 - S^{13}(1), 2 - 14(1)$ $2 - S^{16}(1)$	$1 - S^0 4(4)$ $1 - S^0 5(5),$ $1 - S^0 6(1)$ $1 - S^0 7(1),$ $1 - S^0 8(1)$ $1 - S^0 9(1),$ $1 - S^{10}(1)$ $1 - S^{11}(1)$	۷۱۱
	$4 - S^0 1(1)$		$3 - S^0 1(1), 3 - S^0 5(1)$		$2 - S^0 1(1), 2 - S^0 5(1)$	$1 - S^0 3(1)$	۷۱۲
	$4 - S^0 2(1), 4 - S^0 3(1)$ $4 - S^0 4(2)$		$3 - S^0 1(1), 3 - S^0 2(1)$ $3 - S^0 3(1), 3 - S^0 4(1)$ $3 - S^0 5(1)$		$2 - S^0 1(2), 2 - S^0 3(1)$ $2 - S^0 4(1), 2 - S^0 5(1)$	$1 - S^0 1(1),$ $1 - S^0 4(1)$ $1 - S^0 5(1)$	۷۱۳
	$4 - S^0 1(1)$		$3 - S^0 6(1), 3 - S^0 9(1)$		$2 - S^0 2(1)$		۷۱۴
	$4 - S^0 1(1)$		$3 - S^0 1(1), 3 - S^0 6(1)$		$2 - S^0 1(1)$	$1 - S^0 3(1)$	۷۱۵

میان مرز دو مرکز هماهنگی نجات دریایی؛ استفاده از مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته برای تخمین میزان و نوع بروز سوانح در بازه‌های زمانی متفاوت؛ در نظرگیری بحث‌های قابلیت اطمینانی^{۴۵} (همچون افزونگی^{۴۶}) در هنگام تعدیل ناوگان شناورهای نجات.

مرتبط با برنامه‌ریزی ناوگان جست‌وجو و نجات دریایی باشد. از این رو، مواردی مرتبط با موضوع پژوهش حاضر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود که به توسعه‌ی برنامه‌ریزی ارائه شده کمک شایانی می‌کند؛ در نظر گرفتن بحث اشتراک ناوگان، در

پانوشته‌ها

1. international maritime organization (IMO)
2. international convention on maritime search and rescue (SAR)
3. vessels
4. maritime rescue coordination centre (MRCC)

5. operation research (OR)
6. fleet size and mix problem
7. fleet composition problem
8. fleet deployment
9. fleet adjustment
10. linear programming (LP)

11. tug vessels
12. barge
13. set partitioning problem
14. branch-and-price algorithm
15. integer programming (IP)
16. tabu search (TS) algorithm
17. chance-constrained programming
18. decomposition
19. mixed integer programming (MIP)
20. randomized complete block design (RCBD)
21. regression models
22. generalized assignment problem (GAP)
23. non-deterministic polynomial-time hard
24. turing reduction
25. polynomial time (PTIME / P)
26. representation (Encoded Solution)
27. fitness
28. self-sufficient
29. modified lexicographic method
30. relaxation
31. constraint handling
32. heuristic
33. decoding strategy
34. repairing strategy
35. fitness landscape analysis (FLA)
36. instance
37. local search (LS) algorithm
38. local optimum
39. rugged plain
40. single-solution based metaheuristic
41. grouping evolution strategies algorithm
42. evolution strategies
43. group encoding
44. new solution generator (NSG) algorithm
45. reliability
46. redundancy

منابع (References)

1. Leary, D. "International maritime organization (IMO)", *Yearbook of International Environmental Law*, **24**(1), p. 564 (2014).
2. Singh, N., *International Maritime Law Conventions*, Stevens, **8**(4), (1983).
3. Kopacz, Z., Morgas, W. and Urbanski, J. "The maritime safety system, its main components and elements", *The Journal of Navigation*, **54**(02), pp. 199-211 (2001).
4. Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M. and et al. "Industrial aspects and literature survey: fleet composition and routing", *Computers & Operations Research*, **37**(12), pp. 2041-2061 (2010).
5. Pantuso, G., Fagerholt, K. and Hvattum, L.M. "A survey on maritime fleet size and mix problems", *European Journal of Operational Research*, **235**(2), pp. 341-349 (2014).
6. Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B. and et al. "Ship routing and scheduling in the new millennium", *European Journal of Operational Research*, **228**(3), pp. 467-483 (2013).
7. Dantzig, G.B. and Fulkerson, D.R. "Minimizing the number of carriers to meet a fixed schedule", *Naval Research Logistics Quarterly*, **1**(3), pp.217-222 (1954).
8. Schwartz, N. "Discrete programs for moving known cargos from origins to destinations on time at minimum bargeline fleet cost", *Transportation Science*, **2**(2), pp. 134-145 (1968).
9. Everett, J.L., Hax, A.C., Lewinson, V. and et al. "Optimization of a fleet of large tankers and bulkers: a linear programming approach," *Marine Technology*, **9**(4), pp. 430-438 (1972).
10. Jaikumar, R. and Solomon, M.M. "The tug fleet size problem for barge line operations: a polynomial algorithm", *Transportation Science*, **21**(4), pp. 264-272 (1987).
11. Pesenti, R. "Hierarchical resource planning for shipping companies", *European Journal of Operational Research*, **86**(1), pp. 91-102 (1995).
12. Xinlian, X., Tengfei, W. and Daisong, C. "A dynamic model and algorithm for fleet planning", *Maritime Policy & Management*, **27** (1), pp. 53-63 (2000).
13. Sambracos, E., Paravantis, J.A., Tarantilis, C.D. and et al. "Dispatching of small containers via coastal freight liners: the case of the aegean sea", *European Journal of Operational Research*, **12**(2), pp. 365-381 (2004).
14. Sigurd, M.M., Ulstein, N.L., Nygreen, B. and et al., *Ship Scheduling With Recurring Visits and Visit Separation Requirements*, Springer (2005).
15. Zeng, Q. and Yang, Z., *Model Integrating Fleet Design and Ship Routing Problems For Coal Shipping*, in Computational science-ICCS 2007, Springer (2007).
16. Meng, Q. and Wang, T. "A chance constrained programming model for short-term liner ship fleet planning problems", *Marit. Pol. Mgmt*, **37**(4), pp. 329-346 (2010).
17. Gelareh, S. and Meng, Q. "A novel modeling approach for the fleet deployment problem within a short-term planning horizon", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **46** (1), pp. 76-89 (2010).
18. Alvarez, J.F., Tsilingiris, P., Engebretsen, E.S. and et al. "Robust fleet sizing and deployment for industrial and independent bulk ocean shipping companies", *INFOR: Information Systems and Operational Research*, **49**(2), pp. 93-107 (2011).
19. Wang, S. and Meng, Q. "Liner ship fleet deployment with container transshipment operations", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **48**(2), pp. 470-484 (2012).
20. Meng, Q., Wang, T. and Wang, S. "Multi-period liner ship fleet planning with dependent uncertain container shipment demand", *Maritime Policy & Management*, **42**(1), pp. 43-67 (2015).
21. Herrera, M., Agrell, P.J., Manrique-de-Lara-Peñate, C. and et al. "Vessel capacity restrictions in the fleet deployment problem: an application to the Panama Canal", *Annals of Operations Research*, **253**(2), pp.869-845 (2017).
22. Wang, X., Fagerholt, K. and Wallace, S.W. "Planning for charters: a stochastic maritime fleet composition and deployment problem", *Omega*, **79**, pp.54-66 (2018).

23. "Iran National Maritime Search and Rescue (SAR) Plan", *Iran Ports and Maritime Organization*, Tehran, (In Persian) (2015).

24. Francis, R.L., McGinnis, L.F. and White, J.A., *Facility Layout and Location: An Analytical Approach*, Pearson College Division (1992).

25. Embankment, A. "Casualty related matters reports on marine casualties and incidents", International Maritime Organization (IMO), London, (2014).

26. Kavussanos, M.G. and Alizadeh-M, A.H. "Seasonality patterns in dry bulk shipping spot and time charter freight rates", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **37** (6), pp. 443-467 (2001).

27. Gary, M.R. and Johnson, D.S., *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-completeness*, WH Freeman and Company, New York (1979).

28. Talbi E.-G., *Metaheuristics: From Design to Implementation*, John Wiley & Sons (2009).

29. Marler, R.T. and Arora, J.S. "Survey of multi-objective optimization methods for engineering", *Structural and multidisciplinary optimization*, **26**(6), pp. 369-395 (2004).

30. Kashan, A.H., Akbari, A.A. and Ostadi, B. "Grouping evolution strategies: an effective approach for grouping problems", *Applied Mathematical Modelling*, **39**(9), pp. 2703-2720 (2015).