



## بهینه‌سازی هیدرودینامیکی ابعاد هندسی شناور خدماتی یدک‌کش (AHTS) به کمک روش الگوریتم ژنتیک

محمد توکلی دخترآبادی<sup>۱</sup>، مهرداد اکبری<sup>۲</sup>، محمد سعید سیف<sup>۳</sup>، ابراهیم امینی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف (شرکت طرح آفرینان پاسارگاد)؛

mohammad\_tavakoli@mech.sharif.ir

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی شریف (شرکت نفت خزر)؛ akbari.mehrdad@gmail.com

<sup>۳</sup> استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی شریف (شرکت طرح آفرینان پاسارگاد)؛ info@tap-company.com

### چکیده

امروزه در صنعت فراساحل زمینه‌های مختلفی از علوم مهندسی فعال شده است. یکی از این زمینه‌ها طراحی و ساخت شناورهای خدماتی می‌باشد. تجهیزات، سوخت، آب، نیروی انسانی و... توسط شناورهای خدماتی انجام می‌گیرد. طراحی بهینه شناورهای خدماتی می‌تواند استهلاک و مصرف سوخت این شناورها را کاهش دهد. در این مقاله ابتدا مطالعه آماری جامعی در مورد شناورهای AHTS انجام شده است و محدوده تغییرات مشخصات فیزیکی آن‌ها استخراج شده است. سپس تعیین مقدار بهینه ابعاد اصلی شناور AHTS با بیشترین کارایی در آب آرام به کمک روش الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است. تابع هدف کاهش مقاومت هیدرودینامیکی و وزن شناور در نظر گرفته شده است. قیده‌های بهینه‌سازی شامل پایداری استاتیکی و محدوده‌های ابعاد و ضرایب هیدرودینامیکی می‌باشد. متغیرهای بهینه‌سازی طول، عرض، ارتفاع آب‌خور و ارتفاع عرشه تا کیل می‌باشد. در نهایت توان مورد نیاز شناور AHTS با ابعاد بهینه تخمین زده. استفاده از بهینه‌سازی ابعاد اصلی روشی هدفمند در فاز طراحی مفهومی می‌باشد که سرعت پیشروی در مراحل بعدی طراحی شناور AHTS را افزایش می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی، هیدرودینامیک، شناور خدماتی یدک‌کش، الگوریتم ژنتیک

### مقدمه

در اواخر قرن بیستم اکتشاف و استخراج نفت در فراساحل به یکی از فعالیت‌های اقتصادی پیشرو در جهان تبدیل شد. هر چه اکتشاف در ساحل بیشتر می‌شد، توجه‌ها به سمت بررسی منابعی جلب شد که امکان داشت در زیر دریا ذخیره شده باشند. با امکان حفاری و نقشه‌برداری زیر آب، محل ذخایر موجود در زیر دریاها نقشه‌برداری شد و انگیزه نقشه‌برداری در زیر آب‌های عمیق و خروشان بوجود آمد. به منظور استخراج این منابع، صنعت بهروزی از دکل‌های حفاری، کشتی‌ها و سکوهای شناور بوجود آمد. برای خدمت‌رسانی به این واحدهای فراساحل، انواع شناورها در طی سال‌ها ساخته شدند. عملیات‌های گوناگونی که شناورهای خدماتی فراساحل انجام می‌دهند عبارتند از:

- نقشه‌برداری در زیر دریا به منظور تعیین مکان نفت و گاز با توجه به زمین‌شناسی بستر دریا.
- یدک‌کشی دکل‌های حفاری و سکوهای ثابت به محل‌های اکتشاف و استخراج، ثابت کردن این سازه‌ها و قراردادن لنگرها و مهارکننده‌ها در محل.
- انتقال افراد و وسایل مورد نیاز مانند لوله‌ها، سوخت، آب شیرین، تجهیزات مکانیکی یدکی، غذا و غیره به سکوها و دکل‌ها.
- انجام عملیات زیر آبی مثل بازرسی سازه سکوها توسط دستگاه‌های ROV<sup>۱</sup>، حمل دستگاه‌های کاهش فشار برای غواصی، عملیات لوله‌گذاری در زیر آب و بازرسی لوله‌ها
- انجام عملیات ضروری<sup>۲</sup> نجات
- حفاری و استخراج به صورت هم‌زمان
- ترکیبی از چندین عملیات ذکر شده

شناورهای خدماتی لنگرکش و یدک‌کش که به طور مختصر AHTS<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند، از بزرگترین انواع شناورهای خدماتی می‌باشند. همانطور که از نام این شناور مشخص است قابلیت انجام عملیات مختلف را دارند و تک‌بدنه می‌باشند. کارایی این شناور شامل حمل لنگرها، زنجیرها و طناب‌های مهار، جابه‌جا کردن دکل‌ها و سکوها و حمل مایحتاج مورد نیاز سکوها می‌باشد. در شکل ۱ نمایی از یک شناور خدماتی یدک‌کش را که دارای تجهیزات عملیات زیر آب است نشان داده شده است.

1- Remote Operated Vehicle

2- عملیاتی به منظور نجات کارکنان سکوها آسیب دیده یا آتش گرفته

3- Anchor Handling Tug Supply Vessel



شکل ۱: شناور خدماتی یدک کش کاسپین ۱

برای محاسبه مقاومت هیدرودینامیکی شناورهای جابجایی<sup>۱</sup> روش‌های مختلفی وجود دارد. در روش Houghes-Prohska به طور کلی مقاومت محاسبه می‌شود و برای شناورهای جابجایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش Holtrop نیز برای شناورهای جابجایی مانند نفت‌کش‌ها، یدک‌کش‌ها، شناورهای ماهیگیری و... مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش Compton برای شناورهای گشت ساحلی و شناورهای تفریحی با شکل پاشنه Transom از دسته شناورهای جابجایی استفاده می‌گردد. روش Fung که برای شناورهای جابجایی با شکل پاشنه Transom که بزرگتر از شناورهایی هستند که در روش Compton مقاومت آن‌ها محاسبه می‌گردد، استفاده می‌شود [۱].

پس از غلبه بر پدیده‌های مختلف در علوم مهندسی و به کارگیری آن‌ها جهت مصارف گوناگون طراحان به فکر بهینه نمودن رفتار و کارایی هر پدیده و یا وسیله ساخته شده می‌افتند. یکی از مهم‌ترین فاکتورها، افزایش سرعت و در واقع کاهش مقاومت‌های بدنه و کاهش وزن شناور می‌باشد. برای این امر نیاز است در مرحله طراحی مفهومی، ابعاد اصلی شناور طوری انتخاب شوند که شناور با کارایی مناسب کمترین وزن و مقاومت را داشته باشد که در نتیجه توان مورد نیاز جهت انتخاب موتور کاهش می‌یابد. از جمله کارهایی که در زمینه بهینه‌سازی شناورهای مختلف انجام شده است می‌توان به تحقیقات زیر اشاره نمود.

وفایی‌صفت، سیف و همکارانشان با در نظر گرفتن پارامترهای اصلی هندسی فرم بدنه شناور تندرو حالت پلنینگ و مقاومت هیدرودینامیکی به عنوان تابع هدف و پایداری عرضی و ناپایداری پروپوزینگ بدنه به عنوان قیدها با استفاده از روابط سویتسکی<sup>۲</sup> برای بدنه‌های منشوری و بهینه‌سازی توسط روش الگوریتم ژنتیک، نمونه بهینه شده هندسی برای فرم بدنه شناور تندرو پلنینگ ارائه نموده‌اند [۲]. گامون<sup>۳</sup> با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی چند هدفه پارامترهای اصلی بدنه شناور ماهی‌گیری در عدد فرود حجمی کمتر از یک پرداخته و نتایج بدست آمده را در حالت واقعی آزمایش نموده است [۳]. مهریزی، توکلی و همکارانشان بهینه‌سازی هیدرودینامیکی چند هدفه شناور تندرو پلنینگ به روش پارتو به کمک الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند و توابع هدف مقاومت‌های هیدرودینامیکی به وزن و سطح خیس شده اسپری جهت کمینه شدن انتخاب شده است [۴]. وفایی‌صفت و همکارانش با در نظر گرفتن زاویه ددرایز متغیر در طول شناور تندرو پلنینگ مشخصه‌های هیدرودینامیکی را تعیین نموده سپس با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی ابعاد هندسی شناور تندرو پلنینگ در سرعت‌های مختلف جهت کمینه کردن نسبت مقاومت هیدرودینامیکی به وزن پرداخته‌اند [۵]. همچنین توکلی و قادری پس از مطالعه آماری جامع بر روی انواع شناورهای تندرو گشتی محدوده تغییرات ابعاد شناورهای تندرو گشتی را تعیین نموده و رابطه‌ی جهت تخمین وزن شناور براساس ابعاد پیشنهاد نموده و در نهایت در محدوده‌های مختلف طول به بهینه‌سازی ابعاد هندسی شناور تندرو گشتی به کمک روش الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند [۶].

### بهینه سازی

یک از روش‌های جدید و مهم برای حل مسائل بهینه سازی استفاده از روش الگوریتم ژنتیک (GA) می‌باشد. رفتار این روش از مکانیسم تکاملی در طبیعت الهام گرفته شده است. این روش با ایجاد جمعیتی تصادفی از افراد که هر یک در قالب کروموزم ارائه می‌شوند، پیاده سازی می‌گردد. سپس افراد موجود در اختیار فرآیند تکامل قرار می‌گیرند. نحو کلی عملکرد الگوریتم ژنتیک مطابق چرخه زیر می‌باشد:

ابتدا افراد موجود در جمعیت تصادفی ایجاد شده ارزیابی می‌شوند. سپس افراد جدید با استفاده از عملگرهای تلفیق و جهش تولید می‌شوند و افراد قدیمی و تکراری از جمعیت جدید حذف می‌گردند. یک تکرار از حلقه یاد شده تحت عنوان ایجاد یک نسل شناخته می‌شود. اولین نسل (نسل صفر) از این فرایند به صورت تصادفی ایجاد شده و سپس عملگرهای ژنتیک با اندازه‌گیری میزان شایستگی آن‌ها براساس تابع هدف تعیین شده جمعیت را از نظر کارایی و مطابقت با هدف مورد ارزیابی قرار می‌دهند. تولید نسل جدید تا زمانی ادامه پیدا می‌کند تا جمعیت نهایی (نسل برتر) در نزدیکترین حالت به هدف قرار گیرد.

1- Displacement  
2- Savitsky  
3- Gammon

با توجه به اهمیت قسمت‌های مختلف یک پدیده و یا هندسه فیزیکی مورد بررسی یک تابع هدف تا چندتابع هدف در بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک می‌توان داشت. در مسائل بهینه‌سازی تک تابع بهینه کردن یک تابع هدف مد نظر می‌باشد و یک جواب بهینه وجود دارد که نسبت به سایر جواب‌ها دارای ارجحیت است و در مسائل چند تابع هدف، هدف بهینه کردن همزمان چند تابع می‌باشد که در برخی موارد این توابع در تضاد با هم می‌باشند به این مفهوم که با بهینه کردن یکی از توابع، تابع دیگر از شرایط بهینه خارج می‌شود. لذا در مسائل چند تابعه تنها یک جواب وجود ندارد که نسبت به همه توابع جواب بهینه باشد، بلکه مجموعه‌ای از جواب‌ها پاسخ مساله است. به طور کلی یک مسئله بهینه‌سازی بر اساس روابط ریاضی به صورت زیر مطرح می‌شود.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } y = f(x) \\ & \text{subject to } g(x) = \{g_1(x), g_2(x), \dots, g_J(x)\} \leq 0 \\ & \quad h(x) = \{h_1(x), h_2(x), \dots, h_K(x)\} \\ & \text{where } x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \in X \end{aligned} \quad (1)$$

که  $x$  بردار متغیرها،  $y$  بردار توابع هدف (برای مسئله‌ای با چند تابع هدف  $f_1(x)$  تابع هدف اول،  $f_2(x)$  تابع هدف دوم و ...)،  $X$  فضای تصمیم‌گیری می‌باشد. در ضمن  $g(x)$  قیود نامساوی و  $h(x)$  قیود مساوی مساله می‌باشند. با استفاده از این الگوریتم می‌توان بسیاری از مسایل بهینه‌سازی را که با الگوریتم‌های استاندارد بهینه‌سازی حل نمی‌شود، حل نمود. از جمله این مسائل می‌توان به مسائلی که تابع هدف در آن‌ها ناپیوسته، غیرقابل تشخیص، اتفاقی و یا به شدت غیرخطی است، اشاره نمود.

برخی از مزایای الگوریتم ژنتیک عبارتند از [۷]:

- الگوریتم ژنتیک به سرعت می‌تواند یک مجموعه بزرگ از راه‌حل‌ها را پوشش نماید. همچنین راه‌حل‌های بد تاثیر منفی بر روی راه‌حل نهایی نداشته و به آسانی حذف می‌شوند.
  - طبیعت الگوریتم ژنتیک به گونه‌ای است که نیازی به دانستن هیچ قاعده‌ای در ارتباط با مسئله مورد حل ندارد و تنها با قواعد داخلی خودش عمل می‌کند. این نکته در مورد مسائل پیچیده بسیار مفید واقع می‌شود.
  - به صورت کارا و موثری فضای مسئله را جستجو می‌کند. بنابراین شانس بیشتری نسبت به روش‌های محلی برای یافتن نقطه بهینه سراسری خواهد داشت.
  - در این روش هیچ نیازی به خطی‌سازی مسئله وجود ندارد.
  - این روش نیازی به محاسبه مشتقات جزئی ندارد.
  - در این روش نمونه‌های بیشتری از مدل‌های محتمل ترنسیت به مدل‌های غیرمحتمل ساخته می‌شود.
- برای انجام بهینه‌سازی به کمک روش الگوریتم ژنتیک ابتدا لازم است تابع هدف (در صورت لزوم توابع هدف)، قیود و متغیرهای مسئله به زبان ریاضی تعریف شوند.
- ابتدا برای تعیین قیود و محدوده پارامترهای طراحی مطالعه آماری جامعی انجام شده است و اطلاعات فنی ۷۹ شناور خدماتی و یدک‌کش جمع‌آوری شده است. با قید از پیش تعیین شده که شناور دارای سطح عرشه ۵۰۰ تا ۶۰۰ متر مربع باشد، نتایج مطالعه آماری به صورت جدول ۱ استخراج گردیده است.

جدول ۱: محدوده‌ها و قیود بدست آمده از مطالعه آماری

پارامترها	مقدار
طول کلی (LOA)	۷۲-۶۶(m)
عرض (B)	۱۶-۱۴/۸(m)
ارتفاع عرشه تا خط مبنا (D)	۷-۶(m)
ارتفاع آب‌خور (T)	۶/۱-۵/۱(m)
ضریب ظرافت ( $C_B$ )	۰/۶ - ۰/۷
$C_{wp}$	۰/۷۷-۰/۶۷
ضریب منشوری عمودی ( $C_{VP}$ )	۰/۹ - ۰/۷۷
ضریب منشوری طولی ( $C_P$ )	۰/۶۸-۰/۵۸
ضریب مقطع عرضی وسط شناور ( $C_M$ )	۰/۹۶-۰/۹۹
Dead Weight	۱۷۰۰ - ۲۴۰۰ (ton)
Lightship	۱۵۵۰-۲۲۰۰ (ton)

حال با تعیین محدوده تغییر پارامترهای اصلی می‌توان متغیرها و قیود بهینه‌سازی را تعیین نمود.

## متغیرهای مسئله

متغیرها پارامترهای می‌باشند که تعیین توابع هدف و قیود مسئله تاثیر گذار می‌باشند و انتظار از انجام بهینه‌سازی تعیین مقدار بهینه متغیرها برای کمینه شدن توابع هدف و نقض نشدن قیود می‌باشد.

در مسئله حاضر متغیرها طول کلی ( $LOA$ )، عرض آبخور ( $B$ )، ارتفاع عرشه تا خط مبنا ( $D$ ) و ارتفاع آخور ( $T$ ) در نظر گرفته شده است و بردار متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x = [x(1) \quad x(2) \quad x(3) \quad x(4)] = [LOA \quad B \quad D \quad T] \quad (2)$$

البته در ادامه تاثیر و ارتباط هریک از متغیرها با توابع هدف و قیود مسئله نشان داده خواهد شد.

## قیود مسئله

قیودی که در مسئله بهینه‌سازی پیش‌رو موثر هستند شامل دو بخش زیر می‌باشند:

۱ - محدوده‌های نسبت ابعاد و ضرایب هیدرودینامیکی

۲ - قید پایداری استاتیکی

هر چه قیود دقیق‌تر و جامع‌تر باشند نتایج بهینه‌سازی منطقی‌تر بوده و به واقعیت نیز نزدیک‌تر خواهد بود.

- محدوده نسبت ابعاد و ضرایب هیدرودینامیکی

با توجه به نیازهای پروژه و مطالعه آماری انجام گرفته روی شناورهای خدماتی یدک‌کش موجود در دنیا، برای نسبت ابعاد اصلی که به عنوان یکی از قیود مسئله در نظر گرفته شده‌اند، محدوده‌ها به شرح زیر می‌باشند.

$$4.46 \leq \frac{LOA}{B} \leq 4.9$$

$$2.31 \leq \frac{B}{D} \leq 2.66$$

$$2.25 \leq \frac{B}{T} \leq 3.75$$

$$9.58 \leq \frac{LOA}{D} \leq 10.3$$

(۳)

همچنین محدوده مربوطه به ضرایب هیدرودینامیکی براساس جدول ۱ به شرح زیر می‌باشد.

$$0.6 \leq C_B \leq 0.7$$

$$0.96 \leq C_M \leq 0.99$$

$$0.58 \leq C_P \leq 0.68$$

$$0.77 \leq C_{VP} \leq 0.9$$

$$0.77 \leq C_{WP} \leq 0.67$$

(۴)

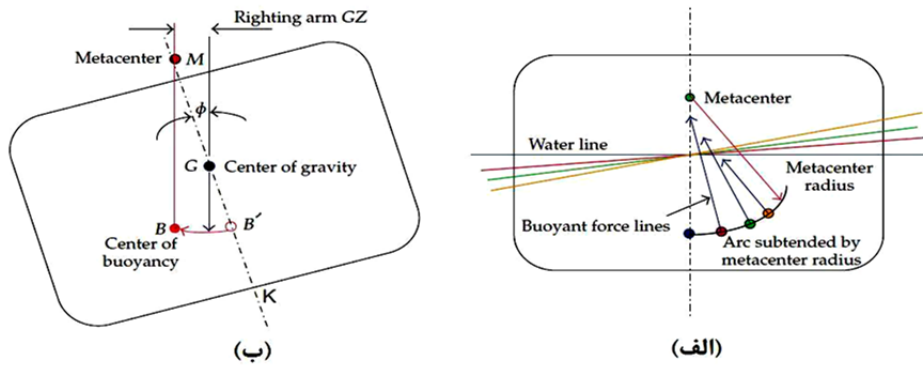
- پایداری استاتیکی

هیدرواستاتیک کشتی، عبارتست از رفتار یک کشتی در آب آرام و بدون موج از نقطه نظر استاتیکی که این موضوع از لحاظ ایمنی و سلامت کشتی، در موقعیت‌های مختلف شناور مطرح است. شرط تداوم شناوری و پایداری، مستقیماً به طراحی بدنه کشتی و جانمایی کلی آن مربوط می‌گردد. از بین رفتن پایداری کشتی بخاطر طراحی اشتباه، استفاده غیر صحیح از کشتی، تصادم، و یا بخاطر شرایط بد دریا هنوز باعث از بین رفتن انسان و نیز چندین کشتی در هر سال می‌گردد. اساس هیدرواستاتیک برای کلیه سازه‌های شناور یکسان است. آنچه که در ادامه می‌آید عبارتست از خلاصه‌ای از کاربرد آن درباره کشتی‌ها.

اگر کشتی در وضعیت تعادل استاتیکی باشد،  $W = \Delta$  و بنابراین طبق قانون ارشمیدس  $\Delta$  برابر است با وزن آب جابجا شده بوسیله کشتی.  $B$  و  $G$  در جهت عمود، باید در یک راستا باشند، هم از دید عرضی و هم از دید طولی کشتی، در غیر اینصورت گشتاورهایی وجود خواهند داشت که باعث انحراف کشتی از وضعیت قائم می‌گردند.

باید توجه داشت که  $B$  در مرکز ثقل آب جابجا شده واقع است، یعنی در مرکز حجم قسمت زیر آبی کشتی (مقدار حجم زیر آبی کشتی با  $\nabla$  نمایش داده می‌شود).

به غیر از حالت‌های ساده‌ی مانند بارج مکعب مستطیل شکل، در بقیه موارد حجم زیر آبی کشتی غیر یکنواخت است در این صورت نه حجم زیر آبی و نه صفحه آب هیچکدام در جلو و عقب خط وسط کشتی<sup>۱</sup> تقارن ندارند. بنابراین محاسبه حجم‌ها و سطوح و تعیین محل مراکز  $F$  مانند  $B$ ، به سادگی انجام نمی‌گیرد. برای محاسبه دستی چندین روش تقریبی انتگرالگیری وجود دارد، مانند روش سیمسون<sup>۲</sup> ولی روش بسیار آسان‌تر و دقیق‌تر استفاده از برنامه‌های کامپیوتری است، که در این ارتباط تعداد زیادی برنامه جهت محاسبات هیدرواستاتیک کشتی وجود دارد. شکل ۲ مقطع عرضی یک کشتی را در محل مراکز ثقل و شناوری نشان می‌دهد. کشتی در شکل ۲-الف) مستقیم و در شکل ۲-ب) بوسیله یک ممان خارجی مثلاً توسط باد شدید به اندازه  $\phi$  درجه غلتش دارد.



شکل ۲: موقعیت نقطه متاسنتر برای زوایای غلتش کوچک (الف) و بازوی گشتاور (ب) [۸]

پس از غلتیدن، شکل قسمت زیر آبی بدنه تغییر می‌کند، یا عبارتی شکل حجم آب جابجا شده تغییر می‌کند بطوریکه مرکز شناوری از  $B$  به  $B'$  تغییر مکان پیدا می‌کند. با فرض اینکه هیچ جسمی در کشتی جابجا نشود، مرکز ثقل در  $G$  بدون تغییر باقی می‌ماند. وزن و نیروی شناوری نیز بدون تغییر و در حال تعادل اند یعنی  $W = \Delta$ . در این حالت اگر از  $B'$  یک خط عمود بر سطح آب رسم شود، این خط در نقطه  $M$  عمود اولیه ای را که از  $B$  بر  $WL$  رسم شده، قطع می‌کند، نقطه  $M$  نقطه متاسنتر<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. برای زوایای کوچک غلتش تا حدود ۱۰ درجه، این نقطه تقریباً ثابت است (شکل ۲-الف)).

برای ارزیابی پایداری شناور، ابتدا باید تعادل آن در حالت سکون (سرعت صفر) بررسی گردد. بدین منظور پایداری عرضی<sup>۴</sup> شناور در زوایای کوچک غلتش مورد توجه قرار می‌گیرد. برای پایدار بودن شناور در حالت استاتیکی باید ممان بازگرداننده<sup>۵</sup> آن حول مرکز ثقل که تابعی از زاویه غلتش<sup>۶</sup> می‌باشد، مثبت باشد:

$$M_R = \Delta \cdot GZ \quad (5)$$

$$GZ = GM \sin \phi \approx GM \cdot \phi$$

$M_R$ : ممان بازگرداننده

$GZ$ : بازوی گشتاور<sup>۷</sup>

$GM$ : ارتفاع متاسنتر (فاصله نقطه متاسنتر از مرکز ثقل)

بنابراین زمانی شناور در زوایای کوچک دارای تعادل پایدار است که مقدار  $GM$  شناور مثبت باشد یعنی  $M$  بالای  $G$  قرار گیرد (شکل ۲).

برای تعیین مقدار واقعی  $GM$  می‌توان از آزمایش کج کردن کشتی<sup>۸</sup> استفاده نمود. ولی می‌توان آنرا محاسبه نیز نمود. با توجه به \* (شکل ۲-ب):

$$GM = KB + BM - KG \quad (6)$$

$KG$ : فاصله مرکز ثقل شناور از کیل

$KB$ : ارتفاع مرکز شناوری در بالای کیل که با توجه به مرکز هندسی سطح مقطع خیس شده قابل محاسبه می‌باشد، همچنین می‌توان از رابطه

تقریبی ماریش<sup>۹</sup> بهره برد.

- 1- Amidships
- 2- Simpson's Rules
- 3- Metacentre
- 4- Transverse Stability
- 5- Restoring Moment
- 6- Roll Angle
- 7- Righting Arm
- 8- Inclining Experiment
- 9- Murrish's rule

$$KB = \frac{5}{6} D_i - \frac{\nabla}{3A_w} \quad (7)$$

$D_i$ : آبخور شناور در حالت سکون

$A_w$ : مساحت صفحه آب

$BM$  با در نظر گرفتن مشخصات هندسی به صورت زیر معین می‌گردد:

$$BM = \frac{I}{\nabla} \quad (8)$$

$I$ : ممان دوم عرضی صفحه آبخور حول خط مرکزی شناور

توجه شود برای مقادیر کوچک زاویه غلتش محل نقطه متاسنتر تقریباً ثابت است اما در زوایای غلتش بزرگ دیگر نمی‌توان از روابط بالا جهت محاسبه  $A_w$  شناور استفاده کرد.

به طور کلی شناوری پایدار خوانده می‌شود که بعد از یک تحریک یا اختلال کوچک به حالت تعادل اولیه برگردد. در صورتیکه این اختلال با گذشت زمان بزرگتر گردد، شناور در آن درجه آزادی ناپایدار می‌باشد.

بنابراین لازم است ارتفاع نقطه متاسنتر از مرکز ثقل بالاتر باشد. قید مربوط به پایداری استاتیکی به صورت  $GM > 2$  وارد مساله می‌گردد. توجه شود که فاصله ۲ متر جهت اطمینان از پایداری استاتیکی شناور در نظر گرفته شد.

### تابع هدف

هدف بهینه‌سازی رسیدن به فرم هندسی برای بدنه شناور خدماتی یک‌کشی می‌باشد که کمترین مقاومت هیدرودینامیکی به بدنه شناور تحمیل شود و کمترین وزن برای سازه تعیین شود که با کمینه شدن این دو بخش از تابع هدف، مصرف سوخت و هزینه اولیه ساخت نیز کاهش می‌یابد. بخش اول تابع هدف، مقاومت هیدرودینامیکی وارده به بدنه شناور می‌باشد که بهینه‌سازی در جهت کمینه کردن آن انجام می‌شود. برای محاسبه مقاومت هیدرودینامیکی شناور خدماتی یک‌کشی از روش هولتروپ و منن<sup>۱</sup> استفاده شده است. این روش برای محاسبه مقاومت کل برای شناورهای جابجایی بکار می‌رود که روابط آن از آنالیز رگرسیون چند مدل آزمایشگاهی توسط هولتروپ و منن در سال ۱۹۷۸ بدست آمده است [۹].

مقاومت هیدرودینامیکی کل حاصل از حرکت شناور در دریا دارای مولفه‌های می‌باشد که در این مسئله مقاومت اصطکاکی ( $R_F$ )، مقاومت موج-ساز ( $R_W$ )، مقاومت فشاری اضافی در ناحیه مغروق پاشنه ( $R_{Tr}$ ) و مقاومت ملحقات ( $R_{App}$ ) به دلیل اهمیت بیشتر نسبت به دیگر مولفه‌های مقاومت مد نظر قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب مقاومت کل از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$R_{total} = (1 + k_1)R_F + R_W + R_{Tr} + R_{App} \quad (9)$$

- مقاومت اصطکاکی ( $R_F$ )

همه سیالات واقعی، دارای ویسکوزیته هستند و در هنگام حرکت باعث بوجود آمدن اصطکاک روی اجسام مجاور و مرزهای ثابت می‌شوند. اهمیت اصطکاک فوق بستگی به نوع سیال و مشخصه‌های جریان دارد.

$$R_F = 0.5\rho V^2 S_{wet} C_{F0} \quad (10)$$

که  $\rho$  چگالی آب برابر ۱۰۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب،  $V$  سرعت شناور،  $S_{wet}$  سطح خیس شده بدنه و  $C_{F0}$  ضریب اصطکاکی می‌باشد. تاکنون برای تعیین  $C_{F0}$  مقادیر و روابط گوناگونی پیشنهاد شده است که هر کدام در یک ناحیه از اعداد رینولدز دارای اعتبار کافی می‌باشد. سرانجام در سال ۱۹۵۷ توسط ITTC رابطه زیر برای این ضریب ارائه شده است.

$$C_{F0} = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (11)$$

$R_n$ : عدد رینولدز دارای رابطه  $\frac{V L_{WL}}{\nu}$  می‌باشد.

سطح خیس شده بدنه یک شناور جابجایی از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$S_{wet} = L_{WL} (2T + B) \sqrt{C_M} (0.453 + 0.4425C_B - 0.2862C_M + 0.003467 \frac{B}{T} + 0.3696C_{wp}) \quad (12)$$

$$1 + k_1 = C_{13} \left[ 0.9 + C_{12} \left( \frac{B}{L_R} \right)^{0.92497} (0.95 - C_P)^{-0.521448} (1 - C_P + 0.0225L_{CB})^{0.6906} \right] \quad (13)$$

$(1+k_1)$  فاکتور فرم می‌باشد که نشان دهنده ارتباط بین مقاومت اصطکاکی و مقاومت ویسکوز فشاری،  $L_R$  طول فرار آب و  $L_{CB}$  طول مرکز بویانسی از انتهای شناور می‌باشد.

$$L_R = L_{WL} (1 - C_P + 0.06 C_P L_{CB} / (4 C_P - 1)) \quad (14)$$

$$C_{12} = \left( \frac{T}{L} \right)^{0.2228446} \quad \text{IF } \frac{T}{L} > 0.05$$

$$C_{12} = 0.479948 \quad \text{IF } \frac{T}{L} < 0.02$$

$$C_{12} = 48.2 \left( \frac{T}{L} - 0.02 \right)^{2.078} \quad \text{IF } 0.02 < \frac{T}{L} < 0.05 \quad (15)$$

$$C_{13} = 1 + 0.003 C_{stern} \quad (16)$$

$C_{stern}$  ضریب مربوط به شکل پاشنه می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۲: شکل پاشنه‌های مختلف و مقدار  $C_{stern}$

شکل پاشنه	$C_{stern}$
v-shape	-10
Normal	0
U-shape	10
Honger	25

- مقاومت موج‌سازی ( $R_W$ )

مقاومت موج سازی در شرایط آب آرام رخ می‌دهد و ناشی از مغروق شدن شناور در موج‌هایی که خود شکل بدنه بوجود می‌آورد، می‌باشد. مقدار مقاومت موج سازی شدیداً به شکل بدنه و قسمت مغروق در آب آن بستگی دارد و مقدار آن برای شناورهای جابجایی با توجه به مغروق بودن قسمت بزرگی از بدنه، قابل توجه می‌باشد.

$$R_W = C_1 C_2 C_5 \nabla \rho g \exp(m_1 F_n^{-0.9} + m_2 \cos(\lambda F_n^{-2})) \quad (17)$$

که  $F_n$  عدد فرود طولی،  $\lambda$  نسبت طول خیس شده به عرض بدنه می‌باشد. برای شناور چند منظوره مورد بررسی  $C_2$  برابر ۱ و  $C_1$  و  $C_5$  براساس مرجع [۹] قابل محاسبه می‌باشد.

$$m_1 = 0.014040 (L_{WL} / T) - 0.7524 (\nabla^{1/3} / L_{WL}) - 4.79323 (B / L_{WL}) - C_{16} \quad (18)$$

$$m_2 = C_{15} C_P^2 \exp(-0.1 * F_n^{-2}) \quad (19)$$

که  $C_{16}$  و  $C_{15}$  براساس مرجع [۹] قابل محاسبه می‌باشد.

- مقاومت فشاری اضافی در ناحیه مغروق پاشنه ( $R_{Tr}$ )

مقاومت فشاری در ناحیه مغروق پاشنه شناور از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$R_{Tr} = 0.5 \rho V^2 A_i C_6 \quad (20)$$

ضریب  $C_6$  از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_6 = 0.2(1 - 0.2 F_{nT}) \quad \text{IF } F_{nT} < 5 \quad (21)$$

$$C_6 = 0 \quad \text{IF } F_{nT} \geq 5$$

که  $F_{nT}$  عدد فرود بر مبنای سطح پاشنه مغروق در آب بوده و از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$F_{nT} = \frac{V}{\sqrt{\frac{2gA_t}{B + B.C_{WP}}}} \quad (22)$$

- مقاومت ملحقات ( $R_{App}$ )

شناورهای باربری نسبت به شناورهای کوچک دارای ملحقات بیشتر در ابعاد بزرگتری می‌باشند که این نکته باعث افزایش و حائز اهمیت شدن مقاومت ملحقات و تجهیزات فرعی در این نوع از شناورها می‌شود.

مقدار مقاومت حاصل از ملحقات برای شناور خدماتی یدک‌کش ۲/۵ درصد مجموع مقاومت‌های معرفی شده تاکنون در نظر گرفته شده است.

$$R_{App} = 0.025(R_F(1+k_1) + R_w + R_{Tr}) \quad (23)$$

بخش دوم تابع هدف تخمین و کاهش وزن می‌باشد. تجهیزات موجود در شناورهای چند منظوره زیاد می‌باشد و برای تخمین وزن کلی این نوع شناورها نیاز است برای هر بخش براساس ظرفیت‌ها و نوع کاربری شناور به طور مجزا وزن تخمین زده و در نهایت وزن کلی شناور استخراج شود. براساس مطالعه آماری انجام شده روی ۷۹ شناور خدماتی یدک‌کش و پژوهش آسن<sup>۱</sup> و بجرهود<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۰ می‌توان وزن سبک<sup>۳</sup> شناور را از رابطه زیر تخمین زد [۱۱].

$$W_{Lightship} = 0.35L_{WL}BD \quad (24)$$

همچنین با توجه به جدول ۱ محدوده وزن باربری شناور مورد نظر بین ۱۷۰۰-۲۴۰۰ تن در نظر گرفته شده است. در نتیجه وزن کلی شناور، مجموع وزن سبک و وزن باربری آن می‌باشد.

### نتایج حاصل از بهینه‌سازی

به طور کلی براساس متغیرها، قیود و تابع هدف ارائه شده جهت بهینه‌سازی به کمک روش الگوریتم ژنتیک می‌توان مسئله را به صورت زیر تعریف نمود:

$$\text{Cost Function: } f = R_{total} + \Delta \quad (25)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} 4.46 \leq \frac{LOA}{B} \leq 4.9, & 2.31 \leq \frac{B}{D} \leq 2.66, & 2.25 \leq \frac{B}{T} \leq 3.75, & 9.58 \leq \frac{LOA}{D} \leq 10.3 \\ 0.6 \leq C_B \leq 0.7, & 0.96 \leq C_M \leq 0.99, & 0.58 \leq C_p \leq 0.68, & 0.77 \leq C_{vp} \leq 0.9, & 0.77 \leq C_{wp} \leq 0.67 \\ GM > 2 \end{cases}$$

Design Variables: LOA, B, D, T

جهت حل مساله بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک بهره برده شد. علت استفاده از این الگوریتم غیرخطی بودن معادلات مورد استفاده می‌باشد. همچنین احتمال آنکه در این روش، الگوریتم در نقاط کمینه محلی متوقف گردد از روش‌های دیگر بهینه‌سازی کمتر است. در نهایت با اجراء بهینه‌سازی مقادیر بهینه ابعاد اصلی شناور AHTS به صورت زیر بدست آمده است. نتایج ابعاد بهینه براساس قیود مسئله در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر بهینه ابعاد اصلی شناور AHTS

متغیرهای طراحی	طول کلی (m)	عرض (m)	ارتفاع عرشه تا خط مبنا (m)	ارتفاع آبخور (m)
مقادیر بهینه متغیرها	۷۱/۶	۱۴/۸	۶/۶۴	۵/۱۴

با توجه به ابعاد بهینه ارائه شده در جدول ۳ می‌توان وزنی حدود ۴۲۲۵ تن برای شناور AHTS با تجهیزات کامل را براساس رابطه (۳۱) تخمین زد. مقاومت کل شناور AHTS با ابعاد ارائه شده در جدول ۳ برابر است با ۴۸۵ کیلو نیوتن و توان مورد نیاز براساس حرکت با سرعت ۱۶ گره دریایی برابر می‌شود با:

$$P = R_{total} \times V = 485 \times 16 \times 0.514 = 3988 \text{ kw} \quad (26)$$

با توجه به اتلاف‌های انرژی موجود در انتقال قدرت از موتور به پروانه و در نهایت تولید قدرت برای رسیدن به سرعت ۱۶ گره دریایی از ضریب OPC استفاده می‌شود که توان خالص مورد نیاز برای انتخاب موتور را تعیین می‌کند.

1- Aasen  
2- Bjrhovde  
3- Light Ship

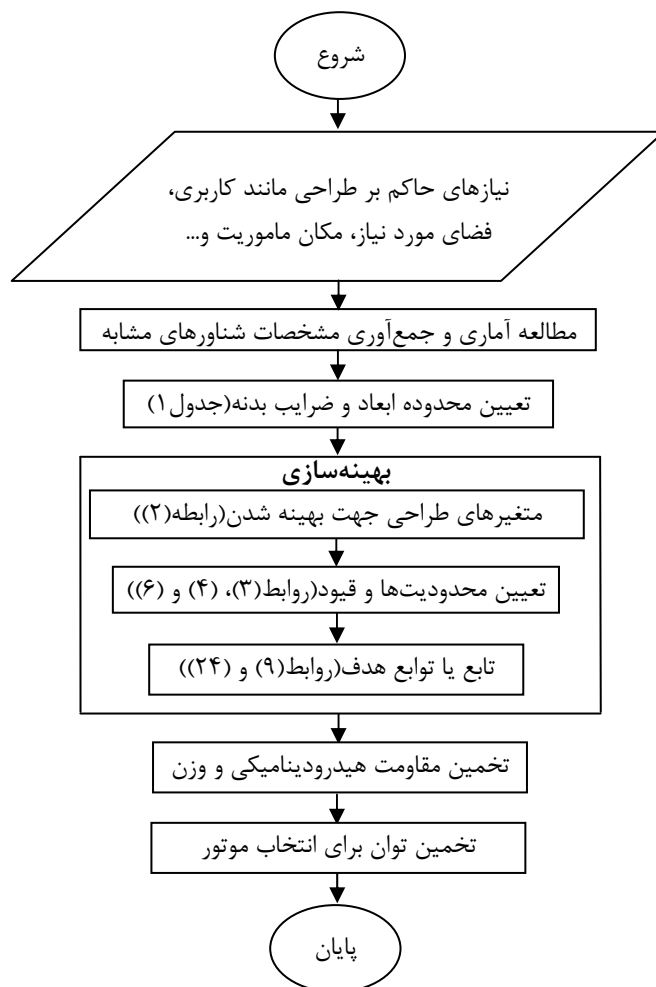


ضریب بازده کل (OPC) از نسبت توان موثر<sup>۱</sup> (EHP) به توان موتور<sup>۲</sup> (BHP) تعیین می‌شود. برای محاسبات سیستم رانش در طراحی مفهومی می‌توان میزان بازده کل را (OPC = ۰/۷) فرض کرد، که اگر سیستم رانش به طور صحیح طراحی شود این میزان بازده کل امکان‌پذیر است. برای اطمینان بیشتر ضریب OPC برابر ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

$$BHP = \left( \frac{EHP}{OPC} \right) \quad (27)$$

در نتیجه توان کل مورد نیاز شناور AHTS چند منظوره برای حرکت با سرعت ۱۶ گره دریایی برابر با ۶۶۴۷ کیلو وات (۸۹۱۰ اسب بخار) تخمین زده می‌شود.

مزیت کار ارائه شده در طراحی مفهومی یک شناور AHTS دیده می‌شود. زیرا به طور معمول در طراحی مفهومی یک شناور جابجایی براساس مطالعه آماری آغاز می‌شود و براساس فضای مفید مورد نیاز و محدوده ابعاد، شناور مشابهی با نیاز انتخاب می‌شود و مراحل بعدی طراحی ادامه پیدا می‌کند. اما در بهینه‌سازی ارائه شده انتخابی هدفمند برای شروع طراحی مفهومی ارائه گردیده است که سرعت پیشروی در مراحل بعدی طراحی را افزایش می‌دهد. از این طریق صرفه‌جویی در هزینه و زمان می‌شود و محصول بهتری طراحی خواهد شد. در شکل ۲ فلوجارت طراحی با استفاده از بهینه‌سازی ارائه گردیده است.



شکل ۳: فلوجارت تعیین ابعاد هندسی بهینه شناور AHTS

### نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شده است با مطالعه آماری ۷۹ شناور AHTS و جمع‌آوری مشخصات فنی این شناورها محدوده‌ای از تغییرات ابعاد اصلی و ضرایب بی‌بعد بدنه شناور مشخص شود. سپس با در نظر گرفتن محدوده تغییرات ابعاد اصلی حاصل از مطالعه آماری به بهینه‌سازی ابعاد اصلی شناور AHTS به کمک روش الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است. تابع هدف کاهش مقاومت هیدرودینامیکی و وزن شناور در نظر گرفته شده است. قیود مسئله فضای عرشه، محدوده‌های تعیین شده از مطالعه آماری و پایداری استاتیکی قرار داده شده است. در نهایت ابعاد بهینه برای طول،

1- Efficiency Horse Power

2- Brake Horse Power

عرض، ارتفاع بدنه و ارتفاع آبخور شناور AHTS تعیین شده و وزن و توان مورد نیاز جهت انتخاب موتور برای این شناور تخمین زده شده است. روش ارائه شده، روشی هدفمند جهت انتخاب ابعاد هندسی در فاز طراحی مفهومی می باشد.

## مراجع

- [۱] نگهداری، م. ر.، "طراحی کشتی به کمک نرم افزار Maxsurf"، انتشارات کانون پژوهش، اصفهان، ۱۳۸۸.
- [۲] وفایی صفت، ع.، سیف، م. س.، مهریزی، ا.، قصاب زاده، م.، "بهینه سازی پارامترهای موثر در عملکرد شناورهای تندرو حالت پروازی برای دستیابی به حداکثر سرعت"، هیجدهمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ماه ۱۳۸۹.
- [3] Gammon, M., "Optimization of Fishing Vessel Using a Multi Objective Genetic Algorithm", Ocean Engineering, Vol. 38, pp. 1054-1064, 2011.
- [۴] مهریزی، ا.، توکلی دخرآبادی، م.، وفایی صفت، ع.، سیف، م. س.، "بهینه سازی چند هدفه هیدرودینامیکی فرم بدنه شناور تندرو پلنینگ به کمک الگوریتم ژنتیک در آب آرام"، مجله علمی پژوهشی مهندسی دریا، ۱۳۹۱.
- [۵] وفایی صفت، ع.، سیف، م. س.، توکلی دخرآبادی، م.، "بهینه سازی هیدرودینامیکی فرم بدنه شناور تندرو پلنینگ با زاویه ددرایز متغیر به کمک الگوریتم ژنتیک"، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دانشگاه تربیت مدرس، دوره ۱۲، شماره ۴، صص ۸۰-۹۰، ۱۳۹۱.
- [۶] توکلی دخرآبادی، م.، قادری، س.، "بهینه سازی هیدرودینامیکی ابعاد اصلی شناور تندرو پلنینگ به کمک الگوریتم ژنتیک در آب آرام"، دومین همایش ملی شناورهای تندرو، تهران، اردیبهشت ۱۳۹۱.
- [7] Haupt R. L., Haupt S. E., "Practical Genetic Algorithms", Second Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey., ISBN 0-471-45565-2, 2004.
- [8] Ibrahim, R.A. and Grace, I.M., "Modeling of Ship Roll Dynamics and Its Coupling with Heave and Pitch", Mathematical Problem in Engineering, Vol. 2010, Article ID 934714, 32 pages, 2010.
- [9] Holtrop, J., Mennen, G.G.J, "An Approximate Power Prediction Method", 1978.
- [10] Grigoropoulos, G., J., Loukakis, T., A., "Resistance and Seakeeping Characteristics of a Systematic Series in the Pre-planing Condition (Part I)", Trans. SNAME, Vol. 110, 2002.
- [11] Aasen, R., Bjorhovde, S., "Early Stage Weight and COG Estimation Using Parametric Formulas and Regression on Historical Data", 69<sup>th</sup> Annual Conference Of Society of Allied Weight Engineers, Inc. Virginia Beach, Virginia, 23-26 May, 2010.
- [12] Kristensen, H., Lutzen, M., "Prediction of Resistance and Propulsion Power of Ship", Report No. 4, Technical University of Denmark and University Southern Denmark, 2012.