مطالعه پارامتریک عملکرد بدنه برای یک زیردریایی توریستی

مهدی بهزاد[۱] منوچهر راد[۲] رضا تقی‌پور[۳] سیدمیثم موسوی‌راد[۳] سیدحمیدسادات‌حسینی[۳]

۱- استادیاردانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف
۲- استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف
۳- دانشجویی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

این مقاله به بحث در مورد تحلیل عملکرد در امواج برای یک نمونه از شناورهای زیر سطحی - زیردریایی توریستی- می پردازد. این بررسی از دیدگاه دریازدگی مسافرین این شناور صورت می پذیرد و تأثیر پارامترهای متفاوت مؤثر در عملکرد این شناور در امواج با استفاده از تئوری نواری بررسی می‌شود. این پارامترها شامل فرم بدنه، وضعیت دریا، جهت امواج، عمق، سرعت و مدت زمان انجام عملیات می باشند. نتایج بررسی نشان می‌دهد که امواج از روبرو بیشتر از امواج از عقب برروی حرکات شناور تاثیر می‌گذارند. همچنین تاثیر مدت زمان سفر، عمق عملیاتی و سرعت شناور بر ضریب عملکرد مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: عملکرد بدنه، امواج، تحلیل طیفی، تئوری نواری، زیر دریایی

PARAMETRIC STUDY OF HULL OPERABILITY IN WAVES FOR A TOURIST SUBMARINE

Abstract

This paper holds a parametric study on seakeeping performance for one kind of submersible vehicles, a tourist submarine. This analyis has been performed from the aspect of motion sickness incidence by using a strip theory hydrodynamics solver. The parameters include sea state, sea direction, depth, speed and duration of operation. Results prove head seas to be more violative than following seas. Moreover, Effect of trip duration, operating depth and vessel forward speed on operability index has been investigated.

Keywords: Hull Operability, Waves, Spectral Analysis, Strip Theory, Submarine

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]

فهرست علائم:

دیفرانسیل زاویه جهت موج	$d\theta$
طیف فرکانسی موج در همه جهات	$S(\omega)$
طیف یک جهته موج دریا	$S(\omega,\theta)$
ارتفاع موج عمده	$H_{\frac{1}{3}}$
سطح زیر منحنی طیف موج	m_0
ممان دوم سطح زیر منحنی طیف موج	m_2
فرکانس متوسط طیف	ω_z
پریود متوسط طیف	T_z
شتاب ثقل	g
فرکانس موج	ω
پاسخ شناور در امواج دریا	$\eta_j(t)$
دامنه موج برخوردی با شناور	$dA(\omega,\theta)$
تابع تبدیل یا عملکرد دامنه پاسخ	$Z_j(\omega,\theta)$
تابع تبدیل یا عملکرد دامنه پاسخ	$Z_R(\omega)$
طیف پاسخ شناور در امواج	$S_R(\omega)$
فرکانس رخداد Z در پاسخ R	N_Z^R
ممان دوم سطح زیر منحنی طیف پاسخ	m_2^R
سطح زیر منحنی طیف پاسخ	m_0^R
انحراف معیار پاسخ شناور	σ

مقدمه

در حالیکه ساخت زیردریایی های سرنشین دار برای اهداف علمی، تحقیقاتی و جنبه های تجاری در سالهای اخیر به واسطهٔ جایگزینی آنان با شناورهای زیرسطحی کنترل شونده از راه دور به شدت کاهش یافته است، اما یک نمونه جدید از شناورهای زیرسطحی سرنشین دار در تعداد بسیار قابل توجه در حال ساخت و تولید می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده‌است. تقریباً ۴۸ نمونه زیردریایی توریستی در طول ده سال اخیر ساخته شده و نیز ۳ نمونه از زیردریایی‌های تجاری بزرگ نیز به مدل های مسافربری تبدیل شده است.

امروزه، عملیات زیردریایی‌های توریستی افزایش بسیاری داشته به گونه ای که در هر سال حدود دومیلیون مسافر به منظور یافتن شانس مشاهده موجودات دریایی به این شناورها روی می آورند و ۱۵۰ میلیون دلار درآمد سالانه این صنعت می‌باشد.

شکل ۱- زیردریایی توریستی V48، طول: 42.8ft، ظرفیت: ۴۸ نفر

زیردریایی توریستی، هنگامی که در زیر یک مسیر دریایی حرکت می کند، نیروها و ممانهای تحریکی را تجربه میکند که در عمل کنترل این حرکات فرکانس پایین، دشوار می باشد و ممکن است منجر به پاسخ‌های خاصی گردد. از این گونه حرکات به نیروها و ممانهای مکش سطح آزاد تعبیر می شود. به‌علت اثر این نیروها و ممان ها، زیردریایی یا خدمه و مسافرین آن ممکن است دچار مشکلاتی چون دریازدگی، بیرون آمدن پروانه از آب و ... شوند. روش های استاندارد بررسی و محاسبه اثرات سطح آزاد بر پایه ترکیب جریان پتانسیل و ضرائب نیمه تجربی مدل های آزمایشگاهی استوار می باشد. در این نمونه چشمه های رانکین در طول بدنه شناور توزیع می‌گردد که شرایط مرزی سطح آزاد را ارضا می کند. قوت چشمه را می‌توان با ارضاء شرط مرزی سطح آزاد و اینکه هیچ سیال نمی تواند از سطح بدنه شنار عبور کند، محاسبه نمود. گسسته سازی بدنه به پانل های مربعی محدود مدل Hess-Smith قابلیت فرمولاسیون و حل دستگاه معادلات جبری را برای بدست آوردن نقاط منفرد مجهول می دهد [۲]. ترکیب نیروها و ممانهای تولید شده از این طریق به همراه تحلیل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]

نیروهای آب عمیق می تواند برای شبیه سازی حرکت شناور در زیر امواج بکار برده شود.

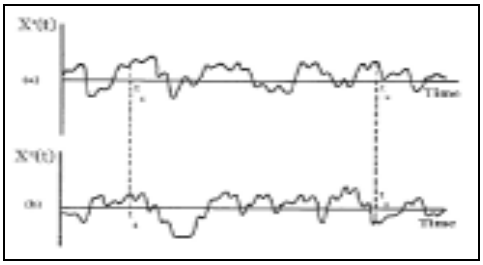
در این مقاله، یک رویه تحلیل برای عملکرد بدنه این شناورها در امواج و بعضی از پارامترهای موثر در این پدیده مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. این پارامتر ها شامل وضعیت دریایی، عمق، سرعت و مدت زمان عملیات می باشند. به منظور دستیابی به این هدف یک الگوریتم محاسباتی مورد استفاده واقع می‌شود که در آن از یک برنامهٔ محاسبات هیدرودینامیکی بوسیلهٔ تئوری نواری کمک گرفته شده است.

فرمولاسیون مسأله

به منظور شناخت بهتر مفهوم تحلیل عملکرد بدنه در امواج مؤلفه های اساسی این تحلیل شامل طبیعت و ماهیت امواج دریا، حرکات ناشی از این امواج در زیر یک مسیر دریایی و معیارهای ارزیابی عملکرد به‌شرح زیر تشریح می‌شوند.

ماهیت امواج دریا

الگوهای موج در یک دریای آزاد همواره با زمان و مکان تغییر می کنند، بطوریکه تحلیل آنها چه با استفاده از تئوری خطی و چه با استفاده از تئوریهای غیر خطی از قبیل استوکس مرتبه دوم بسیار پیچیده است[۳]. موجهای محیطی در سطح دریا پراکنده (Dispersive) و تصادفی (Random) می‌باشند، بطوریکه در مجموع تغییر ارتفاع امواج با زمان در هیچ حالتی منظم نبوده و تصادفی است (شکل ۲). مکانیزم تولید امواج را می توان بیشتر به خاطر اثر بادهای وزنده بر سطح آب دانست. البته عوامل دیگری همچون جزو مد و زلزله نیز تأثیرگذار خواهند بود ولی امواج مؤثر در حرکت شناورها فقط امواج ناشی از باد هستند.



شکل ۲- نمونه ای از تغییر ارتفاع امواج دریا برحسب زمان

مناسب‌ترین نوع داده بدست آمده از امواج تصادفی که از لحاظ عملی هم کاربرد بیشتری دارد، توزیع طیفی آنهاست. اطلاعات ثبت شده تصادفی از ارتفاع امواج h(t) به روشی که منجر به تولید منحنی طیف $S(\omega)$ بر حسب فرکانس موج (ω) شود، پردازش می گردد [۴]. بعبارت دیگر برای یک وضعیت دریایی مشخص یک طیف دریایی متناظر با آن تعریف می‌شود. تابع $S(\omega,\theta)$ چگالی طیف انرژی یا برای سادگی طیف انرژی نامیده می شود که این طیف انرژی جهت دار است و می توان از آن در تمامی جهات برای محاسبه طیف فرکانس انتگرال گرفت.

$$S(\omega)=\int_0^{2\pi} S(\omega,\theta)d\theta \qquad (۱)$$

معمولاً در زمینه های مهندسی اقیانوس و طراحی کشتی فرض می شود که موجها با قله های طویل (Long Crested) هستند به این معنا که حرکات سیال دو بعدی بوده و قلل امواج موازی هستند. با این ساده سازی استفاده از اطلاعات موجود برای طیف فرکانسی امکان پذیر می گردد.

طیف دریا (چگالی طیف) اطلاعاتی بر مبنای متوسط ارتفاع امواج در طول باندهای فرکانسی محدود ارائه می نماید. چون بخش اعظم انرژی امواج در یک بازه کوچک از طول موج آنها قرار دارد که میتواند منجر به تشدید سازه شناور شود، می توان مسیر دریایی را مانند یک فرآیند تصادفی باند باریک (Narrow band) فرض نمود.

به دلایل مختلف در ابتدای کار مطالعه امواج بزرگتر بیشتر مدنظر قرار می گیرد. رایج ترین پارامتری که در این مسأله وارد می شود، $H_{\frac{1}{3}}$ یا ارتفاع موج عمده (Singificant Wave Height) می باشد که بصورت متوسط ارتفاع یک سوم امواج با ارتفاع بیشتر تعریف می شود.

به طور کلی برای محاسبه $H_{\frac{1}{3}}$ از فرمول ذیل استفاده می شود [۴]:

$$H_{\frac{1}{3}} = 4.0\ (m_o)^{\frac{1}{2}} \qquad (۲)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]

در معادله فوق m_o سطح زیر طیف $S(\omega)$ می باشد که در کل بازه فرکانسی ω انتگرال‌گیری شده است. فرکانس متوسط را می توان بصورت تعداد Zero upcrossing ها در واحد زمان تعریف کرد که این به معنی تعداد دفعاتی است که دامنه موج از صفر با شیب مثبت می گذرد.

نتیجه نهایی برای این فرکانس بصورت زیر است [۴]:

$$\omega_z = (\frac{m_2}{m_0})^{\frac{1}{2}} \qquad (۳)$$

پریود متوسط بین Zero upcrossing ها نیز عبارتست از:

$$T_Z = \frac{2\pi}{\omega_z} = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \qquad (۴)$$

پارامترهای فرکانسی دیگر را می توان از مجموعه ممانهای مربوط به شکل طیف بدست آورد [۴]:

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S(\omega) d\omega \quad , \quad n = 0,1,2,... \qquad (۵)$$

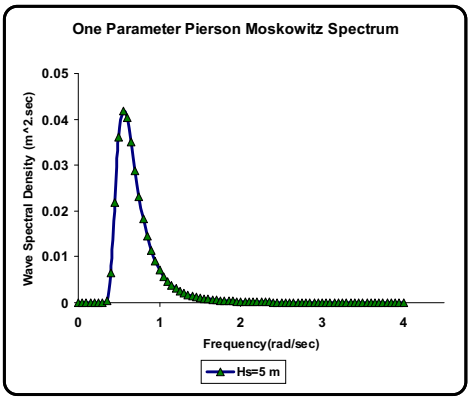
در واقع m_0 واریانس است که متناسب با انرژی کل طیف است. همچنین، m_2 واریانس سرعت و m_4 واریانس شتاب می باشد.

یک مدل مناسب برای دریای کاملاً توسعه یافته (Fully Developed Sea) طیف Pierson Moskowitz(PM) می باشد. این طیف تنها به یک پارامتر ارتفاع موج عمده وابسته است. فرض استفاده از این طیف در این است که دریا کاملاً توسعه یافته می باشد. یعنی طول بادگیر (Fetch) و مدت زمان وزش (Duration) به اندازه کافی زیاد فرض می شوند تا دریا به یک حالت پایدار در مفهوم آماری برسد.

صورت تحلیلی طیف PM برای یک طیف دریایی ایده آل را می توان به فرم زیر نوشت [۵]:

$$S(\omega) = \frac{0.0081g^2}{\omega^5} \times \exp\left[-0.032\left[\frac{g}{H_{\frac{1}{3}}\omega^2}\right]^2\right] \qquad (۶)$$

در شکل ۳ نمونه طیف موج PM برای ارتفاع موج عمده ۵ متر نشان داده شده‌است.



شکل ۳- طیف موج Pierson Moskowitz برای حالت $H_{\frac{1}{3}} = 5m$

حرکات در امواج دریا

یکی از مسائل مهم در این تحقیق تأثیرات امواج دریا بر یک کشتی است که شامل حرکات و بارهای سازه ای می شود. در ساده ترین حالت، امواج دریا به صورت امواج پیشرو با دامنه کوتاه و تغییرات سینوسی بر حسب زمان فرض می شوند. همچنین فرض می شود که حرکات شناور آنقدر کوچک هستند که می توان از تئوری خطی استفاده کرد.

فرض کنیدکه جسم تنهامجاز به حرکت heave و pitch باشد. این دو حرکت در شناورهای معمولی از حرکات در صفحه افقی (sway, yaw) مجزا هستند و با آنها کوپل نمی شوند. بنابراین معادلات کوپل شده حرکات heave و pitch در امواج منظم عبارت است از [۱۰]:

$$\begin{aligned}
&(m+A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 \\
&+ A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_3 e^{i\omega t} \\
&(I_{55}+A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 \\
&+ A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 = F_5 e^{i\omega t}
\end{aligned} \qquad (۷)$$

که در آن η ماتریس حرکات جسم، m جرم کشتی و I_{55} ممان اینرسی جرمی نسبت به محور y می باشد. عبارات A_{jk} به جرم افزوده مربوط می شوند و از نظر فیزیکی A_{jk} مولفه نیرو در راستای حرکت j ام

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]

بواسطه شتاب واحد در راستای حرکت k ام می‌باشد. عبارات B_{jk} به نیروهای دمپینگ هیدرودینامیکی مربوط می شوند و همچنین عبارات C_{jk} نیروها و ممان های برگرداننده هستند که بیان کننده اثرات نیروی هیدرواستاتیکی بر حرکات کشتی می باشد. سمت راست معادله نیز نیروهای تحریک در راستای heave (F_3) و pitch (F_5) می باشد.

معادلات حرکت بیان شده برای شناور با سرعت صفر معتبر هستند. اگر کشتی با سرعت رو به جلوی U در حال حرکت باشد، با فرض خطی بودن روابط و سرعت ثابت، تنها ω تغییر خواهد کرد. در شرایطی که امواج دقیقاً از سمت جلو به کشتی برخورد کنند، هم نیروی تحریک موج و هم حرکات نوسانی کشتی بصورت خطی و هارمونیک فرض می شوند که فرکانس آنها برابر با فرکانس برخورد موج می باشد:

$$\omega_e = \omega + \frac{2\pi}{\lambda/U} = \omega + kU = \omega + \frac{\omega^2}{g}U \quad (۸)$$

همچنین معادلات حرکت می توانند برای حالت شش درجه آزادی تعمیم داده شده و به صورت زیر درآیند:

$$\sum_{j=1}^{6}\eta_j[-\omega_e{}^2(M_{ij}+A_{ij}) + i\omega_e B_{ij} + C_{ij}] = AF_i \quad (۹)$$

که F_i نیروی تحریک بر واحد دامنه موج (A) و M_{ij} المان متناسب از ماتریس جرم می باشد. این دستگاه معادلات خطی به روش ماتریس معکوس حل شده و حرکات جسم (η_j) را نتیجه می دهد. در نتیجه در حالت کلی حرکات بدنه (η_j) به فرم زیر به دست می آید :

$$\eta_j = A\sum_{j=1}^{6}[D_{ij}]^{-1}F_i \quad (۱۰)$$

که در آن Dij نشان دهنده کل ماتریس درون کروشه سمت چپ معادله (۹) می باشد.نسبت $\frac{\eta_j}{A}$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$Z_j(\omega,U,\theta) = \frac{\eta_j}{A} = \sum_{j=1}^{6}[D_{ij}]^{-1}F_i \quad (۱۱)$$

از نظر فیزیکی، معادله فوق دامنهٔ حرکات جسم در مد زام نسبت به موج با دامنه واحد، فرکانس ω و جهت θ می باشد. البته خود جسم نیز با سرعت پیشروی U حرکت می کند. نسبت ارائه شده در معادله (۱۱) را معمولاً Response Amplitude Operator(RAO) می گویند. در صورت معلوم بودن جرم اضافی، دمپینگ، تحریک و نیروهای هیدرواستاتیکی ، RAO می تواند از معادله (۹) محاسبه شود. هر گونه نتیجه گیری درباره عملکرد شناور در امواج که بر اساس امواج منظم باشد کاربرد عملی ندارد لذا بررسی حرکات شناور در امواج و تعیین پارامترهای طراحی از جمله ممان خمشی و مقاومت افزوده باید در شرایط واقعی دریا انجام شود. با تعیین طیف امواج دریا، می توان نتایج را تعمیم داد. اگر طیف امواج را با توزیع نرمال تخمین زده و پاسخ جسم به هر جزء از موج به صورت $Z(\omega,\theta)$ مشخص شود خواهیم داشت:

$$\eta_j(t) = \mathrm{Re}\iint Z_j(\omega,\theta)e^{i\omega t}dA(\omega,\theta) \quad (۱۲)$$

مهم ترین فرض در این رابطه برقراری اصل برهم نهی خطی است. مانند خود امواج، پاسخ نیز در معادله (۱۲) یک متغیر تصادفی است. خواص آماری پاسخ مشابه خواص آماری امواج است به استثناء طیف انرژی پاسخ که باید در توان دوم RAO ضرب شود. بنابراین اگر زیرنویس R نشان دهنده هر یک از اجزاء پاسخ باشد خواهیم داشت:

$$S_R(\omega) = |Z_R(\omega)|^2 S(\omega) \quad (۱۳)$$

که $Z_R(\omega)$، RAO برای پاسخ R و $S(\omega)$ طیف امواج می باشد. بنابراین معادله (۱۳) می تواند برای بدست آوردن طیف پاسخ استفاده شود که با داشتن طیف پاسخ خواهیم داشت:

$$m_i^R = \int_0^\infty \omega^i S_R(\omega)d\omega, \qquad i = 0,1,2,... \quad (۱۴)$$

$$\sigma = RMS = \sqrt{m_0^R}$$

در نتیجه بحث می تواند بر اساس پاسخ ماکزیمم و یا مؤثر صورت پذیرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]

معیارهای ارزیابی عملکرد

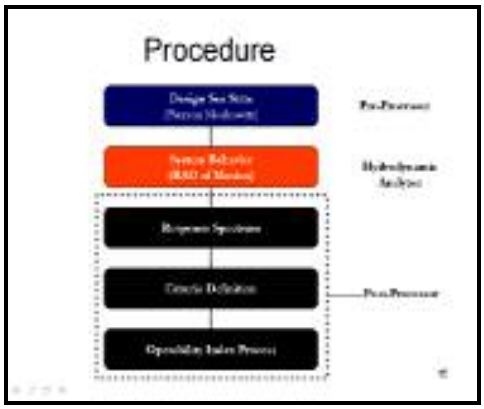
برآورد تاکتیکی بر اساس تعریف یک سری معیار خاص امکان پذیر است که هر کدام از این معیارها به گونه ای متناسب با یک مسأله محدود کننده عملیاتی می باشد. به عنوان مثال، معیاری مثل دریازدگی مربوط به محدودیت حرکات عمودی یک شناور به واسطهٔ قابلیت سکونت شناور توسط مسافرین و خدمهٔ آن می باشد و یا Deck Wetness یک عامل محدود ساز مرتبط با حرکات عمودی شناور به واسطهٔ ورود آب به سطح عرشه آن شناور می باشد. بعضی از این معیارها با ماکزیمم کمیت وقوع در یک مدت زمان معین سر و کار دارند در حالی که بعضی دیگر با فرکانس وقوع آنها، در یک زمان معین مربوط می باشد. مثلاً دریازدگی عاملی است که با جذر متوسط مربعات شتاب عمودی شناور سرو کار دارد. در حالیکه شکافت سطح بواسطه برج زیردریایی وابسته به فرکانس این رخداد می باشد. با تعریف معیارهای منطقی و مناسب برای تحلیل پاسخ ها چه از نوع وابسته به ماکزیمم و چه از نوع وابسته به فرکانس می توان پاسخ و در نتیجه عملکرد آن شناور را به گونه ای منطقی و متناسب با واقعیت مطالعه کرد.

رویهٔ تحلیل

رویهٔ تحلیل برای پیش‌برد این تحقیق شامل سه بخش می باشد.

۱- پیش پردازنده (مدلساز)
۲- تحلیلگر هیدرودینامیکی (تئوری نواری)
۳- پس پردازنده تحلیلگر طیفی

شکل ۴ فلوچارت رویه ای را که توسط آن تحلیل عملکرد شناور در امواج صورت گرفته است را نشان می دهد.



شکل ۴- فلوچارت بررسی عملکرد شناور در امواج

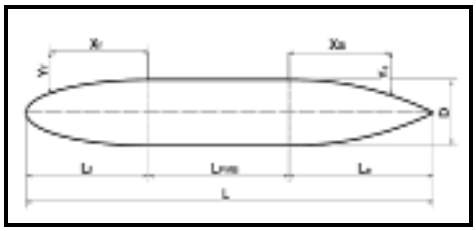
پیش پردازنده (مدلساز)

پیش پردازنده یک سری کد نوشته شده در نسخه 6.5 از نرم افزار MATLAB می باشد [۱۲]. که به واسطه آن مدل هندسی زیردریایی به عنوان یک ورودی برای نرم افزار تحلیل گر دینامیکی آماده می گردد. هندسه بدنه زیردریایی شامل سه بخش است:

۱- ورودی (ENTRANCE)
۲- بدنه میانی موازی
(PARALLEL MIDDLE BODY)
۳- خروجی یا فرار (RUN)

هر کدام از این اجزاء به صورت یک شکل دوران یافته است که به ترتیب بیضی برای ورودی، خط برای بخش میانی و سهمی برای خروجی می باشد.

شکل ۵ هندسهٔ زیردریایی و اجزاء آن را که در پیش پردازنده تهیه شده است نشان می دهد.



شکل ۵- هندسه و اجزاء زیردریایی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]

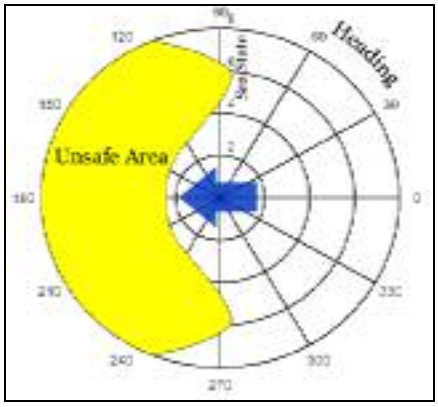
تحلیل‌گر هیدرودینامیکی

به منظور انجام محاسبات هیدرودینامیکی زیردریایی توریستی، بدنه آن در نسخهٔ ۶ از نرم افزار MOSES [۱۳] مدل شده است. MOSES با کمک تئوری نواری قادر به محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و نیروهای موج وارد بر بدنه شناور دارای سرعت پیشروی است که هر یک از این موارد را بر حسب فرکانس برخورد محاسبه می‌کند. نتیجه این بخش بدست آوردن تابع تبدیل بدنه زیردریایی بر حسب یک بازه مشخص فرکانسی از امواج برخوردی در دریاست. در مورد صحت نرم افزار MOSES، یک مجموعه کامل از اجراهای آزمایشی و مقایسه نتایج آن با نرم افزارهای دیگر و شرایط آزمایش عملی، در جایگاه اینترنتی شرکت تهیه کننده (مرجع [۱۳]) وجود دارد. این نرم افزار از دو فایل ورودی استفاده می کند که یکی از آنها با مدل فیزیکی (هندسی) شناور سروکار دارد و دیگری با یک سری از دستورات که توسط آنها محاسبات تابع تبدیل بدنه (عملکرد دامنه پاسخ RAO) انجام می شود. این دو فایل، هر دو توسط پیش پردازنده تولید می گردند.

پس پردازنده

طیف پاسخ و در نتیجه فرآیند دستیابی به نمودار ارزیابی عملکرد (SEAKEEPING OPERATING ENVELOPE, SOE) به واسطه نوشته شدن یک کد در نسخه ۶/۵ نرم افزار MATLAB بدست آمده است. این کد با گرفتن فایل خروجی RAO از نرم افزار MOSES به عنوان ورودی و تولید طیف پاسخ با داشتن RAO و طیف دریایی که در معادله ۱۳ توصیف شده است کار می کند.

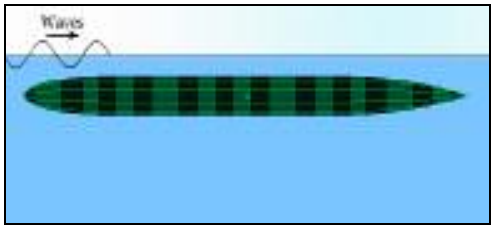
با استفاده از این طیف پاسخ، نرم افزار قادر به یافتن انحراف معیار شتاب حرکات heave و مقایسه آنها با معیار برای دستیابی به محدوده های بحرانی است. در نتیجه این عمل نمودارهای ارزیابی عملکرد (SOE) تولید می گردند که به طرز کاملاً مؤثری در مطالعه ارزیابی بدنه شناور کارایی دارند. شکل ۶ یک نمونه از نمودار ارزیابی عملکرد SOE را نشان می دهد. سطح پررنگ شده در شکل مربوط به محدوده ای است که شناور در آن قادر به انجام موفقیت آمیز مأموریت خود به واسطه محدودیت (نقص معیار) نیست. بنابراین یک ضریب عملکرد می تواند از تقسیم مساحت سطح عملیاتی امن (سطح سفید در شکل) به کل مساحت موجود تعریف شود.



شکل ۶- نمونه از نمودار SOE

نتایج عددی

زیردریایی توریستی که در این تحلیل در نظر گرفته شده است، دارای طول ۳۰۰ فوت و ماکزیمم قطر ۳۰ فوت می باشد که قابلیت انتقال ۱۰۰ مسافر را دارا می باشد. شکل ۷ فرم بدنه زیردریایی و موقعیت آن را در عمق ۳۰ فوتی زیر سطح آزاد نشان می دهد.



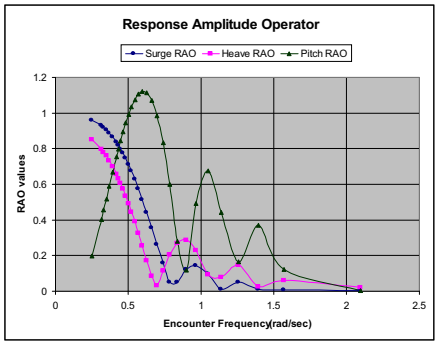
شکل ۷- فرم بدنه زیردریایی در نرم افزار MOSES

عمق عملیاتی که بدنه برای انجام مأموریت درآن نظر گرفته شده است به ترتیب ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ فوت از خط مرکزی زیردریایی تا بالا در نظر گرفته شده است. همچنین دریای خزر به عنوان محیط انجام عملیات زیردریایی انتخاب گردید. بر پایه تحقیقات گراهام و همکارانش [۷]، تغییرات ارتفاع موج عمده در دریای خزر دارای ماکزیمم مقدار ۵ متر می باشد. بنابراین

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]

محدودهٔ تغییرات ارتفاع امواج دریا برای مدلسازی محیط، از حدود صفر تا ۵ متر درنظر گرفته شد. علاوه بر این مسیر دریایی به کمک طیف ایده آل یک پارامتری پیرسون موسکویچ که قبلاً به آن اشاره شد، مدل گردید.

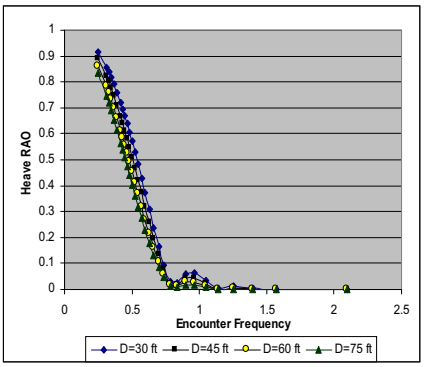
در شکل ۸ نتایج نمونه تابع تبدیل سیستم (RAO) برای بدنه شناور در سرعت ۳ گره و عمق عملیاتی ۳۰ فوت و برخورد امواج از روبرو نشان داده شده است.



شکل ۸- نمودارهای RAO در سرعت ۳ گره و عمق ۳۰ فوت و برخورد امواج از روبرو

همانگونه که در شکل ۸ دیده‌می‌شود، زیردریایی توریستی مورد بحث دارای فرکانسهای طبیعی heave در حدود ۰/۲۵، ۰/۹ و ۱/۲۵ رادیان برثانیه می باشد. بعد از این فرکانسها دیگر هیچگونه تحریک محسوسی در شناور مشاهده نمی شود. این مسأله می تواند به این دلیل باشد که توزیع نیروی امواج بر روی زیردریایی با تغییر فرکانس موج تغییر کرده بگونه‌ای که در بعضی از فرکانسها نیروی موج حداقل و در بعضی از فرکانسها حداکثر میگردد و دیگر اینکه این فرکانسها خارج از فرکانس طبیعی بدنه هستند که این به معنی عدم رزنانس در سیستم تلقی می گردد.

همچنین از شکل ۹ مشاهده می شود که مقادیر RAO با افزایش مقدار عمق کاهش می یابند. بنابراین می توان انتظار داشت که بدنه زیردریایی در عمق های بیشتر عملکرد بهتری داشته باشد.



شکل ۹- تاثیر عمق بر RAO در حرکت heave

به عنوان معیار، مسأله دریازدگی در سفر دریایی یا MSI (Motion Sickness Incidence) مسافرین در نظر گرفته شده که بر طبق مرجع [۸]، MSI به طور عمده زمانی اتفاق می افتد که جذر متوسط مربعات ریشه شتاب پاسخ بدنه در جهت heave از یک مقدار مشخص که در جدول (۱) برای مدت زمانهای مختلف عملیات نشان داده شده است، بیشتر گردد.

جدول ۱- معیار دریازدگی برحسب مدت زمان سفر

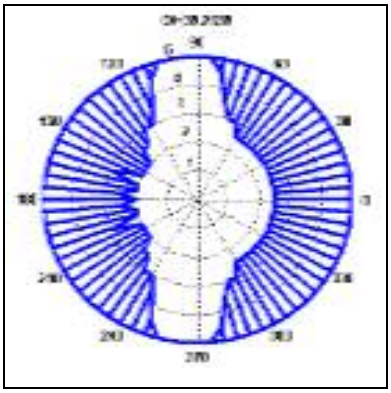
Trip Duration (hour)	Acceleration Criteria (rms)
0.5	0.1g
1	0.08g
2	0.05g
8	0.03g

شکلهای ۱۰ الی ۱۳، SOEهای مربوط به بدنه زیردریایی را در عمق عملیاتی ۳۰ فوت و سرعت پیشروی ۱۱ گره برای مدت های مختلف عملیات نشان می دهند. از نتایج، این گونه برداشت می گردد که امواج از روبرو به نسبت امواج از عقب بیشتر منجر به نقض معیار می شوند. همچنین ، برای اکثر جهات امواج و سرعت های پیشروی، محدودهٔ کوچکی در اطراف 90^{o} (امواج Beam Seas) هرگز دچار نقص معیار نمی شود. این مسأله مستقل از عمقی است که شناور در آن مشغول به انجام عملیات می باشد. همچنین، برای هرجهت موجی، می توان به یک وضعیت دریایی بحرانی دست پیدا کرد. همینطور، مشاهده می شود که ضریب عملکرد (OI) به طرز محسوسی از مقدار اولیه

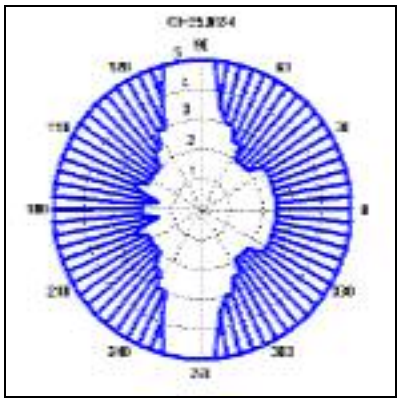
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]

خود، ۳۹/۷٪ در شکل ۱۰ به ۱۵/۸٪ در شکل ۱۳ کاهش یافته است. این مسأله می تواند به این صورت توجیه گردد که MSI (دریازدگی)، عملکرد بدنه را بیشتر به شتاب پاسخ بدنه محدود می کند. در نتیجه انتظار می رود که معیار در مدت زمانهای مسافرت طولانی بیشتر نقض شود.

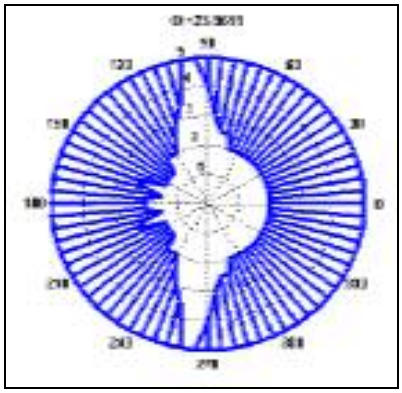
همچنین اگر نمودار ضرائبOI بر حسب سرعت برای مدت و اعماق مختلف عملیات رسم گردد، بررسی تأثیر پارامترهای سرعت و مدت زمان انجام سفر در عملکرد بدنه امکان‌پذیر خواهد بود.



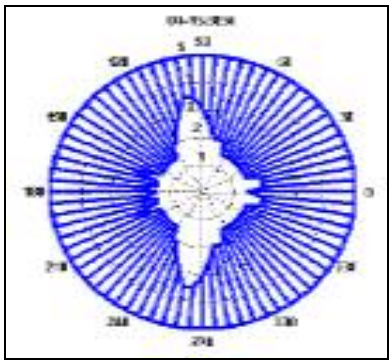
شکل ۱۰- نمودار OI برای مدت زمان 0.5 ساعت، عمق ۳۰ فوت و سرعت ۱۱ گره



شکل ۱۱- نمودار OI برای مدت زمان ۱ ساعت، عمق ۳۰ فوت و سرعت ۱۱ گره



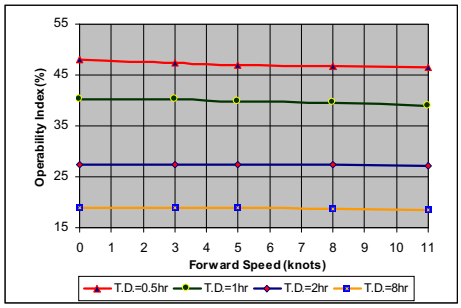
شکل ۱۲- نمودار OI برای مدت زمان ۲ ساعت، عمق ۳۰ فوت و سرعت ۱۱ گره



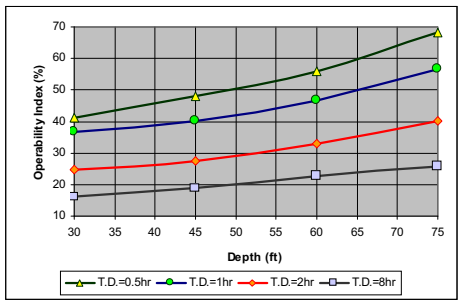
شکل ۱۳- نمودار OI برای مدت زمان ۸ ساعت ، عمق ۳۰ فوت و سرعت ۱۱ گره

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ این اطلاعات را فراهم می آورند. همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود OI برای یک مدت زمان معین به آرامی با افزایش سرعت کاهش می یابد. به همین ترتیب، در یک سرعت ثابت، OI به طرز چشمگیری در نتیجه افزایش مدت زمان معین کاهش می یابد. این دو مسأله نشان می دهند که ابعاد و اندازهٔ زیردریایی که در این مورد بررسی گردیده است به گونه ای است که ضریب عملکرد آن به شدت با طولانی شدن زمان سفر کاهش می یابند در حالیکه پارامتر سرعت تأثیر اندکی بر آن دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]



شکل ۱۴- نمودار تغییرات OI برحسب سرعت برای مدت زمانهای متفاوت در عمق ۳۰ فوت



شکل ۱۵- نمودار تغییرات OI برحسب عمق برای مدت زمانهای متفاوت

شکل ۱۵ اطلاعاتی را در خصوص تأثیر پارامتر عمق در ضریب عملکرد زیردریایی می دهد. همانگونه که در نمودار دیده می شود، ضریب عملکرد در نتیجه افزایش عمق عملیات افزایش و بواسطهٔ طولانی شدن مدت زمان سفر کاهش می یابد. به عبارت دیگر، عملکرد به شدت به پارامترهای عمق و مدت زمان وابسته است. این مسأله صحیح است، چرا که تأثیر امواج بر بدنه زیردریایی با افزایش عمق کاهش یافته است. این کاهش به گونه ای است که انتظار می رود که در عمق معادل طول موج λ هیچ نیروی موجی به بدنه وارد نشود.

نتایج

۱- برای تمام عمق ها و سرعت های عملیاتی، امواج از روبرو بیشتر از امواج از عقب منجر به نقض معیار در نظرگرفته شده می گردند.

۲- تقریباً برای همه اعماق و سرعت عملیاتی، محدودهٔ کوچکی در اطراف 90^{o} (Beam Seas) وجود دارد که کمتر معیار را نقض می کند.

۳- با بررسی نمودارهای SOE ، برای هر جهت موج مشخص، یک نقطه منحصر به فرد بحرانی همواره قابل دستیابی است که در آن نقطه معیار شروع به نقض شدن میکند.

۴- ضریب عملکرد با افزایش سرعت کاهش می یابد، اما تابع بسیار ضعیفی از سرعت است و تقریباً میتوان تاثیر پارامتر سرعت را در این مورد (زیردریایی با طول ۳۰ فوت) نادیده گرفت.

۵- ضریب عملکرد با افزایش عمق عملیاتی شناور افزایش می یابد و در ضمن تابع قوی از این پارامتر در مقایسه با سرعت می باشد.

۶- ضریب عملکرد شدیدا به مدت زمان سفر وابسته است، به گونه ای که با طولانی تر شدن زمان سفر، ضریب عملکرد شناور به شدت کاهش می‌یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]

مراجع

1. Tourist submarines, V48 submersible, www.sub-find.com/v48.htm
2. Crook, T. P., (1994), An Initial Assessment of Free Surface Effects on Submerged Bodies, M. S. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California.
3. Goda, Y, 2000, "Random Seas and Design of Maritime Structures", 2nd Edition, World Scientific Pub. Co.
4. Bhattacharyya, R, 1978 "Dynamics of Marine Vehicles", John Wiley & Sons.
5. J.M.J. Journée and Jakob Pinkster, Introduction in Ship Hydromechanics, April 2002, http://www.ocp.tudelft.nl/mt/journee, May 24, 2003.
6. Faltinsen, O. M., 1980, "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", Cambridge University Press.
7. Graham, C., Cardone, V.J., Ceccacci, E. A., Parsons, M. J, Cooper, C and Stear, J., 2002, "Challenges to Wave Hindcasting in the Caspian Sea", 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting Preprints, Alberta Canada.
8. University-National Oceanographic Laboratory System, www.mlml.calstate. edu/unols/fic/smr/ocsmr-ver1.pdf
9. Birk, L. and Clauss, G. F, 2001 "Automated Hull Optimization of Offshore Structures Based on Rational Seakeeping Criteria", Proceedings of 11th ISOPE, Stavenger
10. Papulias, F. A, "Ship Dynamics", http://www.web.nps.navy.mil/~me/tsse/TS4001/docs_support.htm, April 13, 2003.
11. Newman, 1977, J. N, Marine Hydrodynamics, MIT Press
12. MATLAB User Manual, www.matlab.com
13. Moses User Manual, Ultramarine Inc. ww.ultramarine.com

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.2.2]