

آنالیز هیدرودینامیکی حرکات شناور با استفاده از بررسی اثر جرم افزوده در شناورهای تندرو

محمد رضا نگهداری^۱، شهرام جانباز^۱، عطاالله قره چاهی^۱، اسماعیل شفیع زاده^۱

^۱عضو هیئت علمی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

چکیده

امروزه شناورهای تندرو با قابلیت های حرکتی ویژه نظیر دستیابی به سرعت های بالا از مهمترین عوامل در توان دفاعی یک کشور محسوب می شوند. از این رو مطالعه و بررسی ویژگی های ساختاری این شناورها از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. زمانی که یک شناور بخواهد در یک سیال با شتاب حرکت کند، بخشی از سیال اطراف جسم همراه با آن به حرکت درآمده و شتاب می گیرد که به این بخش از سیال جرم افزوده می گویند. بنابراین نیروی مورد نیاز برای ایجاد شتاب بیش از حاصل ضرب جرم جسم در شتاب آن می باشد، این مقدار نیروی اضافی را ناشی از جرم افزوده می دانند که به آن نیروی جرم افزوده گفته می شود. در این مقاله با استفاده از نرم افزار Seakeeper برای تعیین نیروی جرم افزوده کشتی و مقایسه مقدار این نیرو برای اشکال مختلف فرم بدنه در یک شناور تندرو می پردازیم.

کلمات کلیدی: حرکت هیو، حرکت پیچ، آنالیز Seakeeping

مقدمه

حرکت یک کشتی در امواج دریا دارای ۶ درجه آزادی شامل حرکات خطی (سرج، اسوی و هیو^۱) و حرکات دورانی (پیچ، یاو و رول^۲) می باشد. بررسی حرکات شناور با ۶ درجه آزادی و با در نظر گرفتن هر شش حرکت بسیار پیچیده می باشد. بنابراین بسته به شرایط حرکت می توان ترکیبی از دو یا چند نوع از این حرکات را در نظر گرفت. به عنوان مثال برای بررسی حرکات عمودی شناور، از ترکیب دو حرکت هیو و پیچ استفاده می شود. برای تحلیل حرکت کشتی در موج از تئوری موج سینوسی استفاده می شود، بنابراین پاسخ کشتی به موج سینوسی نیز تابع سینوسی بصورت زیر خواهد بود:

$$y_j(t) = |y_j| e^{iS_e t} \quad , \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

که در آن:

S_e : فرکانس برخورد موج به کشتی

$|y_j|$: دامنه حرکت کشتی در مد حرکتی j ام که بصورت عدد مختلط می باشد.

با توجه به قانون دوم نیوتن، معادله حرکت کشتی در دریا را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\sum_{k=1}^6 \Delta_{jk} \ddot{y}_k(t) = F_j(t) \quad , \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

که یک دستگاه معادله دیفرانسیل خطی با شش معادله می باشد و در آن:

j و k : معرف مدهای حرکتی کشتی

Δ_{jk} : ماتریس جرم کشتی که شامل ممانهای اینرسی و پارامتر جرم کشتی است.

$\ddot{y}_k(t)$: شتاب کشتی در مد حرکتی k ام

$F_j(t)$: کل نیروهای وارد شده به کشتی در مد حرکتی j ام

به طور کلی معادله حرکت کشتی با ۶ درجه آزادی بصورت رابطه (۳) می باشد.

$$\sum_{k=1}^6 [-S_e^2 (\Delta_{jk} + A_{jk}) + iS_e B_{jk} + C_{jk}] |y_k| = F_{Ij} + F_{Dj} \quad , \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

در رابطه فوق:

S_e : فرکانس برخورد

Δ_{jk} : ماتریس جرم کشتی

A_{jk} : ضریب جرم افزوده^۳ در حرکت j ام بر اثر حرکت k ام

B_{jk} : ضریب میرایی^۴ در حرکت j ام بر اثر حرکت k ام

¹ - Surge, Sway and Heave

² - Pitch, Yaw and Roll

³ - Added mass coefficient

⁴ - Damping coefficient

C_{jk} : ضریب هیدرواستاتیک برگشتی^۵ C_{jk} در حرکت Z ام بر اثر حرکت k ام
 $|y_k|$: دامنه حرکت کشتی در مد حرکتی k ام

F_{Dj} و F_{Ij} : نیروهای هیدرودینامیکی وارده به کشتی بر اثر حرکات کشتی در دریا که به مجموع آنها نیروهای تحریک^۶ نیز گفته می شود.
 ضرایب موجود در رابطه فوق تابعی از عوامل مختلف از جمله فرم بدنه شناور، فرکانس برخورد موج و سرعت شناور می باشند. همانطور که قبلاً نیز بیان شد با استفاده از تئوری نواری می توان مسائل هیدرودینامیک سه بعدی را به حالت دو بعدی که دارای حل ساده تر می باشند، تبدیل نمود. تئوری نواری بیان می کند که تغییرات سرعت سیال اطراف بدنه کشتی در جهت طول شناور (X) ناچیز بوده و عمدتاً در دو راستای دیگر (Y و Z) می باشد. بنابراین می توان یک کشتی را به تعدادی نوار یا مقاطع مختلف تقسیم نمود و نیروهای وارد بر کشتی را از مجموع نیروهای وارده بر این مقاطع بدست آورد.

همانطور که پیش تر نیز اشاره گردید بسته به شرایط حرکت می توان از حرکات شش گانه یک شناور، ترکیبی از دو یا چند نوع از این حرکات را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق بدلیل اهمیت حرکات عمودی شناور، بررسی و مطالعه حرکات شناور با استفاده از ترکیب دو حرکت هیو و پیچ انجام گرفته است.

با استفاده از معادله حرکت کشتی دارای ۶ درجه آزادی می توان شرایط فوق را بصورت روابط زیر برای کوپل حرکات هیو و پیچ بدست آورد. برای حرکت هیو می توان نوشت:

$$(M + A_{33})\ddot{y}_3 + B_{33}\dot{y}_3 + C_{33}y_3 + A_{35}\ddot{y}_5 + B_{35}\dot{y}_5 + C_{35}y_5 = F_3 e^{iS_e t} \quad (4)$$

و برای حرکت پیچ داریم:

$$(I_5 + A_{55})\ddot{y}_5 + B_{55}\dot{y}_5 + C_{55}y_5 + A_{53}\ddot{y}_3 + B_{53}\dot{y}_3 + C_{53}y_3 = F_5 e^{iS_e t} \quad (5)$$

که در روابط فوق:

M : جرم کل کشتی

I_5 : ممان اینرسی حرکت پیچ

و ضرایب A و B و C به ترتیب مربوط به ضرایب جرم افزوده، ضریب میرایی و ضریب هیدرواستاتیک برگشتی که اندیس ۳ از ماتریس های ضرایب مربوط به حرکت هیو و اندیس ۵ مربوط به مد حرکتی پیچ می باشد.

F_3 : نیروی تحریک حرکت هیو

F_5 : ممان تحریک حرکت پیچ

y ، \dot{y} و \ddot{y} : به ترتیب برابر با جابجایی، سرعت و شتاب مربوط به حرکات هیو و پیچ می باشد. حل معادلات مربوط به حرکات هیو و پیچ بصورت زیر توسط Bhattacharyya ارائه گردید:

$$\begin{aligned} P &= C_{33} - (m + A_{33})S_e^2 + iB_{33}S_e \\ Q &= C_{35} - A_{35}S_e^2 + iB_{35}S_e \\ R &= C_{53} - A_{53}S_e^2 + iB_{53}S_e \\ S &= C_{55} - (I_5 + A_{55})S_e^2 + iB_{55}S_e \end{aligned} \quad (6)$$

و رفتار شناور در برابر پاسخ به حرکات هیو و پیچ برابر است با:

$$\begin{aligned} Z_3 &= \frac{F_5 Q - F_3 S}{QR - PS}, \text{ heave response} \\ Z_5 &= \frac{F_3 R - F_5 P}{QR - PS}, \text{ pitch response} \end{aligned} \quad (7)$$

مشخصات شناور مورد بررسی

در این قسمت سعی بر آن است تا با مطالعه حرکات شناور به آنالیز Seakeeping و بررسی اثر جرم افزوده روی یک نمونه شناور تندرو، از این جنبه رفتار شناور را مورد ارزیابی قرار دهیم. در جدول (۱) مشخصات شناور مورد بررسی که یک شناور تندرو تک بدنه می باشد، آورده شده است و در شکل (۱) نیز فرم و شکل بدنه شناور نشان داده شده است.

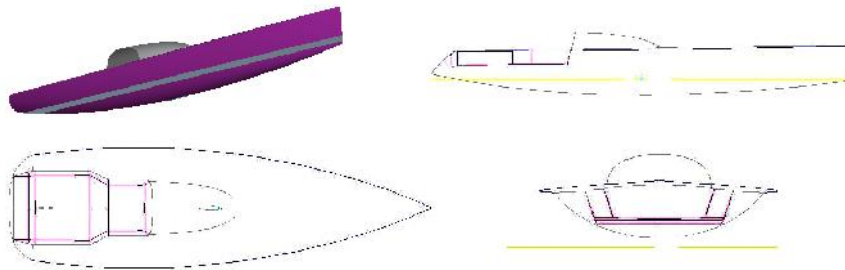
جدول (۱): مشخصات شناور

مقدار	مشخصات کشتی
15 ton	جابجایی

⁵ - Hydrostatic restoring coefficient

⁶ - Exciting force

طول	14 m
عرض	5.6 m
ارتفاع	2.5 m
آبخور	0.5 m



شکل(۱): فرم و شکل بدنه شناور

همچنین برای مطالعه و بررسی رفتار شناور در امواج از طیف موج جان سوپ^۷ استفاده شده است. این طیف موج بر مبنای طیف پیشنهادی ITTC ارائه شده است که البته به لحاظ مشخصات فیزیکی موج از جمله ارتفاع، دوره و ... کمی متفاوت با طیف موج ITTC می باشد. در جدول (۲) مشخصات دیگر موج مورد استفاده آمده است.

جدول (۲): مشخصات موج مورد استفاده برای بررسی رفتار و حرکات شناور

مقدار	مشخصات موج
JONSWAP	نوع
4 m	ارتفاع
5.6 m	میانگین پریود
9.72 knots	سرعت باد
3.14 rad	زاویه برخورد موج به سینه شناور

به منظور مطالعه رفتار و حرکات شناور، بررسی ها در چندین حالت و برای اشکال مختلف فرم بدنه شناور انجام گرفته است و نتایج این تحلیل ها در قسمت های بعد آورده شده است. هدف از این تحقیق مقایسه این حالات و در نهایت دستیابی به حالت مطلوب و بهینه می باشد.

نتایج

محاسبات با استفاده از نرم افزار Seakeeper انجام گرفته و در هر مرحله نمودارهای رفتار شناور در امواج (RAO)^۸ با استفاده از حرکات هیو و پیچ استخراج شده و مقادیر این حرکات در سرعت های مختلف نیز بدست آمده است. همچنین مقادیر نیروی حاصل از جرم افزوده نیز در سرعت های مختلف و برای اشکال مختلف فرم بدنه شناور تعیین شده است که می توان با مقایسه آنها به نتیجه گیری جهت دستیابی به حالت مطلوب دست یافت. در شکل (۲) نمودار رفتار حرکات شناور (RAO) مربوط به شناور با استفاده از فرم بدنه شناور از شکل (۱) بدست آمده و نتایج عددی مربوط به حرکات شناور و نیز مقادیر مربوط به نیروی ناشی از جرم افزوده مربوط به این حالت و در سرعت های مختلف در جدول (۳) مشخص شده است.

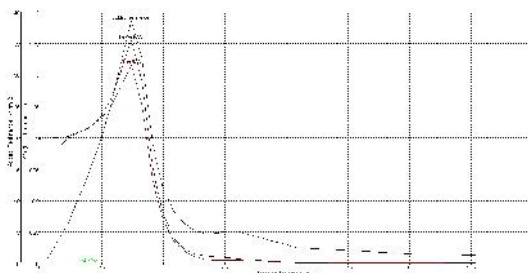
جدول (۳): نتایج عددی مقادیر نیروی حاصل از جرم افزوده و نیز حرکات هیو و پیچ شناور

سرعت شناور (knots)	Added resistance(kN)	Heave motion(m ²)	Pitch motion(rad ²)
۱۵	۱۵,۱۲۸	۱,۰۷	۰,۰۰۶۹۷
۲۰	۱۵,۲۰۱	۱,۱۳	۰,۰۰۸۱۸
۲۵	۱۵,۴۹۳	۱,۲۰۶	۰,۰۰۹۶۷
۳۰	۱۵,۹۵۵	۱,۳	۰,۰۱۱۳۴

^۷ - JONSWAP Wave Spectra

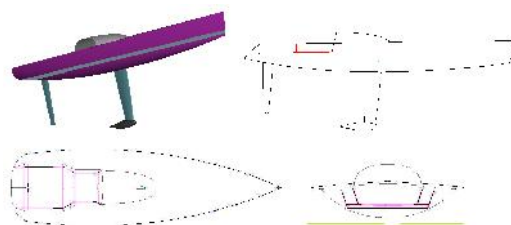
^۸- Response Amplitude Operator

۳۵	۱۶,۵۳	۱,۴۲۶	۰,۰۱۳۵۱
۴۰	۱۷,۱۴۲	۱,۵۸۱	۰,۰۱۵۸۵
۴۵	۱۷,۷۰۷	۱,۷۳۳	۰,۰۱۷۴۸
۵۰	۱۸,۲۹۹	۱,۹۰۳	۰,۰۱۹۲۳



شکل (۲): نمودار رفتار حرکات شناور (RAO) مربوط به حرکات هیو و پیچ شناور

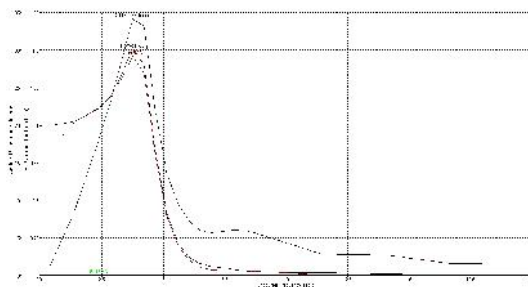
مشابه نتایج فوق برای حالتی که شناور به یک فویل مجهز گردد، بدست آمده است. در شکل (۳) فرم و شکل بدنه شناور همراه با فویل مربوط به این حالت نشان داده شده است. نتایج این بررسی مطابق با شکل (۴) و نیز جدول (۴) مشخص شده است. مقایسه نتایج عددی این حالت مطابق با شکل (۳) و فرم بدنه ارائه شده در شکل (۱) نشان می دهد که وجود فویل نیز در تغییر رفتار شناور نیز موثر خواهد بود.



شکل (۳): فرم و شکل بدنه شناور

جدول (۴): نتایج عددی مقادیر نیروی حاصل از جرم افزوده و نیز حرکات هیو و پیچ شناور

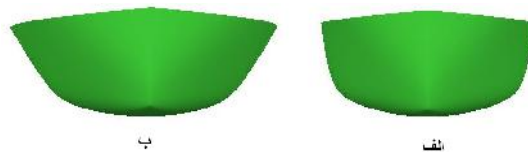
سرعت شناور (knots)	Added resistance(kN)	Heave motion(m ²)	Pitch motion(rad ²)
۱۵	۱۵,۵۰۲	۱,۰۵۶	۰,۰۰۶۸۷
۲۰	۱۵,۵۲	۱,۱۱۲	۰,۰۰۸۲۵
۲۵	۱۵,۶۹۹	۱,۱۸۲	۰,۰۰۹۸۶
۳۰	۱۶,۰۲۶	۱,۲۷۱	۰,۰۱۱۷۸
۳۵	۱۶,۵۳۳	۱,۳۸۷	۰,۰۱۴۰۱
۴۰	۱۷,۱۳۵	۱,۵۲۶	۰,۰۱۶۱۸
۴۵	۱۷,۷۸۸	۱,۶۸۱	۰,۰۱۸۱۸
۵۰	۱۸,۵۰۴	۱,۸۷۳	۰,۰۲۰۶۲



شکل (۴): نمودار رفتار حرکات شناور (RAO) مربوط به حرکات هیو و پیچ شناور

همچنین بررسی های انجام گرفته روی اشکال مختلف فرم بدنه شناور نشان داده است که مقادیر نیروهای ناشی از جرم افزوده با توجه به این فاکتور تغییر خواهد کرد. به عنوان مثال مطابق با شکل (۵) دو حالت برای فرم بدنه نشان داده شده است و مقادیر نیروهای ناشی از جرم افزوده برای این دو

حالت مطابق با جدول (۵) بدست آمده است. از مقایسه این دو حالت می توان دریافت که تاثیر شکل و فرم بدنه در حرکات شناور و به خصوص مقاومت حرکتی شناور موثر خواهد بود، چرا که بسته به جابجایی سیال اطراف بدنه نیروی مورد نیاز برای رانش شناور افزایش یا کاهش خواهد یافت. با توجه به شکل بدنه و افزایش نیروی ناشی از جرم افزوده، مقدار نیروی مورد نیاز برای رانش شناور افزایش می یابد.



شکل (۵): اشکال فرم بدنه شناور

جدول (۵): نتایج عددی مقادیر مربوط به نیروهای حاصل از جرم افزوده مربوط به شکل (۵)

سرعت شناور (knots)	Added resistance(kN) (مربوط به حالت الف)	Added resistance(kN) (مربوط به حالت ب)
۱۵	۱۰,۳۶	۱۰,۸۵۳
۲۰	۱۰,۴۴۱	۱۰,۹۱۱
۲۵	۱۰,۶۶۴	۱۱,۱۱۳
۳۰	۱۱,۰۳۲	۱۱,۴۶۷
۳۵	۱۱,۴۵۱	۱۱,۹
۴۰	۱۱,۹۳۳	۱۲,۳۶
۴۵	۱۲,۵۸	۱۲,۹۵۱
۵۰	۱۳,۳۴۴	۱۳,۷۰۸

نتیجه گیری

در این مقاله ضمن مطالعه رفتار شناور در شرایط امواج دریا، حرکات شناور و بدلیل اهمیت حرکات عمودی کوپل حرکات هیو و پیچ مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی مقادیر نیروی حاصل از جرم افزوده متاثر از فاکتور فرم بدنه در حالت های مختلف بدست آمده و مورد مقایسه عددی قرار گرفت. از این نتایج می توان دریافت که طراحی فرم و شکل بدنه شناور به خصوص در شناورهای تندرو همواره مورد تاکید و دارای اهمیت می باشد. از این رو دستیابی به فرم مطلوب و بهینه با بررسی پارامترهای موثر در عملکرد هیدرودینامیکی شناورها مورد نظر طراحان بوده است. همچنین بایستی در نظر داشت که بسته به شرایط حرکتی شناور در امواج دریا بایستی از بین حرکات شش گانه به مطالعه دقیق حرکات موثر و به تبع معادلات مورد نظر در این جهات پرداخت.

مراجع

[1] LLOYD, A. R. J. M, "Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather", 1989.

[2] Edward V.Lewis, "Principles of Naval Architecture, Second Revision, Volume3", 1988.

[3] زراعتگر، حمید، دینامیک متحرکها، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[4] نسخه ۱۱ نرم افزار Seakeeper