آنالیز رفتار دینامیکی لنج چوبی در امواج نامنظم

دکتر حمید زراعتگر[1]، دکتر مصباح سایبانی[2]

۱- استادیار دانشکده مهندسی کشتی سازی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
۲- استادیار دانشکده مهندسی کشتی سازی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

چکیده

لنج شناوری چوبی است که در آبهای خلیج فارس و دریای عمان از دیر باز مورد استفاده قرار میگرفته است. علی رغم غرق شدنهای متناوب این شناور کماکان باور عامیانه آنستکه این شناور در موج رفتاری آرام و راحت از خود بروز میدهد. در این مقاله با استفاده از نرم افزار دینامیک رفتار کشتی در موج به استخراج رفتار دینامیکی این شناور پرداخته شد. سپس بر اساس معیارهای موجود دینامیک رفتار شناور در موج حد تحمل لنج در امواج دریا استخراج گردید. پس از آن علت تصور عمومی مبنی بر رهوار بودن شناور بحث گردیده است. نتیجه نهایی آنکه آین شناور قابلیت دریانوردی در امواجی با ارتفاع موثر حد اکثر یک متر را خواهد داشت.

کلمات کلیدی: امواج دریا، ارتفاع مشخصه موج، دینامیک کشتی در موج، حرکات کشتی

ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOR OF DHOW IN IRREGULAR SEAS

ABSTRACT

Dhow (LanJ) is a wooden vessel which is traditionally operating in Persian Gulf and Oman Sea. In contrast of its frequent lost, ordinary people believe that it has very good behavior at waves. In this study, by means of seakeeping computer software, authors have calculated its dynamic behavior in waves. Comparison between dhow performances in waves against seakeeping criteria has been made. Then, its operable sea waves is concluded. Then the reason behind people believe has been discussed, thoroughly. The end result is that the typical wooden dhow may withstand in waves of significant wave height of not more than 1 meter.

Keywords: Sea Waves, Significant Wave Height, Seakeeping, Ship Motions

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.5.5]

مقدمه

بطور کلی هر کشتی بصورت یک جسم صلب در آب دارای ۶ درجه آزادی می‌باشد. وقتی یک کشتی با یک موج مواجه میگردد، مرکز ثقل کشتی دارای ۶ حرکت می‌گردد. ۳ حرکت خطی با عناوین سرج (Surge) ، اسوی (Sway) و هیو (Heave) و ۳ حرکت زاویه ای با عناوین رل (Roll) ، پیچ (Pitch) و یاو (Yaw). حرکات ششگانه کشتی همواه در جهت ایجاد مشکلات جهت عملیات حمل و نقل در کشتی می‌باشند.

بطور کلی شرایط اصلی محیطی مفروض جهت طراحی کشتی شرایط آب آرام میباشد. در حالیکه اکثر زمان عملیات کشتی دریا دارای موج میباشد. خطوط بدنه کشتی بر اساس حداقل مقاومت، حداکثر راندمان پروانه، بهترین فضا برای حمل بار و سادگی ساخت در شرایط آب آرام طراحی میگردد. محاسبات هیدرواستاتیک و تعادل، محاسبات و طراحی پروانه، محاسبات سازه ای کشتی و غیره همگی در شرایط آب آرام انجام می‌شود. این در حالیستکه کلیه موارد مذکور بشدت از حضور امواج در محیط تاثیر جدی می‌پذیرند. البته عمدتا با اعمال برخی ضرائب سعی در اصلاح (Quasi-Static) در محاسبات صورت می‌پذیرد.

علاوه بر لحاظ نمودن رفتار شناور در موج بهنگام طراحی، بهنگام استفاده از شناور، ناخدا با تمهیداتی مانع بسیاری از اتفاقات خواهد شد. هر کشتی تحمل هر نوع موجی را نخواهد داشت. بطور ذاتی و طبیعی کشتی های کوچک تحمل امواج با ارتفاع بلند را ندارند. برای مثال یک شناور بطول ۲۰ متر احتمالا نتواند از موجی با ارتفاع موثر (Significant WaveHeight) ۳ متر و بیشتر عبور کند و حتما غرق خواهد شد. در حالیکه یک کشتی بطول ۲۵۰ متر مشکل چندانی جهت عبور از یک موج با ارتفاع موثر ۵ متر نخواهد داشت. از طرف دیگر در صورت مواجهه با یک موج قوی ناخدا میتواند با تغییر زاویه برخورد کشتی با موج و کاهش سرعت کشتی بخش قابل توجهی از پدیده های ناشی از موج را تحت کنترل خود در آورد.

در میان لنجداران این عقیده وجود دارد که لنج شناوری است که در مقابله با امواج دریا بسیار نرم است و همچون گهواره عمل میکند. بعبارت دیگر رفتار لنج در موج رفتاری آرام است که بسادگی میتواند امواج را تحمل نماید و حرکات دینامیکی آن کم است. این نوع نگاه دو مشکل اساسی ایجاد نموده است.

این موضوع باعث شده است تا با هر نوع اصلاح و مدرن سازی شناور لنج (عمدتا اصلاح فرم بدنه) مخالفت گردد. بر اساس آمار غیر رسمی سالانه حدود ۵۰ فروند شناور از میان حدود ۵۰۰۰ فروند لنج ایرانی فعال در منطقه خلیج فارس خسارت جزئی تا خسارت کلی میبینند. نتیجتا مایملک و جان تعداد زیادی از هموطنان به دلیل استفاده از لنج با ریسک زیادی همواره در معرض خطر است.

این مقاله با دیدی کاملا علمی بر اساس آخرین روشهای مورد استفاده در تحلیل دینامیک رفتار شناور در موج، به تحلیل رفتار دینامیکی لنج می‌پردازد. سپس نشان خواهیم داد که اولا آیا لنج شناوری است که در موج رفتار نرم خواهد داشت؟ ثانیا منشا این برداشت عامیانه از چیست؟ ثالثا حداکثر وضعیت موج که احتمالا لنج میتواند بدون صدمه دیدگی از آن عبور نماید کدامست.

مشخصات لنج

انواع لنجها

لنجها انواع گوناگون دارند. اسامی شناورهای چوبی که امروزه بیشتر مورد استفاده و یا ساخته می شوند در جدول شماره ۱ ارائه شده است .

جدول شماره ۱ : شناورهای چوبی که بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد.

ردیف	نام فارسی	نام انگلیسی
۱	بوم	Boom
۲	(جالبوت) سمبوک	Sambook
۳	پاکستانی	Pakistani

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.5.5]

بوم (Boom)

این نوع لنج چوبی دارای سینه ای بلند و کشیده با دیواره بلند و تقریبا" شکم دار است که گنجایش حمل بار تا تقریبا" ۸۰۰ تن را دارا می باشد. این نوع لنج ها در بنادر لافت، خمیر، کنگ ساخته می شود. بوم پیشرفته ترین، جادار ترین و گران ترین و محکم ترین لنج دست ساخت ساکنین مناطق مختلف خلیج فارس است. هر بوم معمولا" دارای ۲ نفر ناخدا است که کلیه خدمه لنج زیر فرمان آنها می باشند. بدنه بوم شبیه تخم مرغ است، قسمت جلو و عقب بوم ها خوابیده تر از سایر شناورها ساخته می شود و به عنوان مثال طول یک لنج از نوع بوم با ظرفیت ۷۰۰ تن ۳۲ متر می باشد.

سمبوک (Sambook)

سمبوک دارای دیواره کوتاه و سینه آن در قدیم کمی منحنی شکل بوده ولی سمبوک های ماهیگیری امروزی دارای سینه ای به شکل زوایه منفرجه است و پاشنه و سینه سمبوک ها به صورت خوابیده است. از سمبوک که ظرفیت آن حداکثر در حدود ۱۶۰ تن است در ماهیگیری استفاده می‌شود. این نوع شناور در بنادر درگهان و لافت، کنگ، لنگه و خمیر ساخته می‌شود. به عنوان مثال طول یک لنج از نوع سمبوک با ظرفیت ۱۴۰ تن ۲۲ متر می باشد.

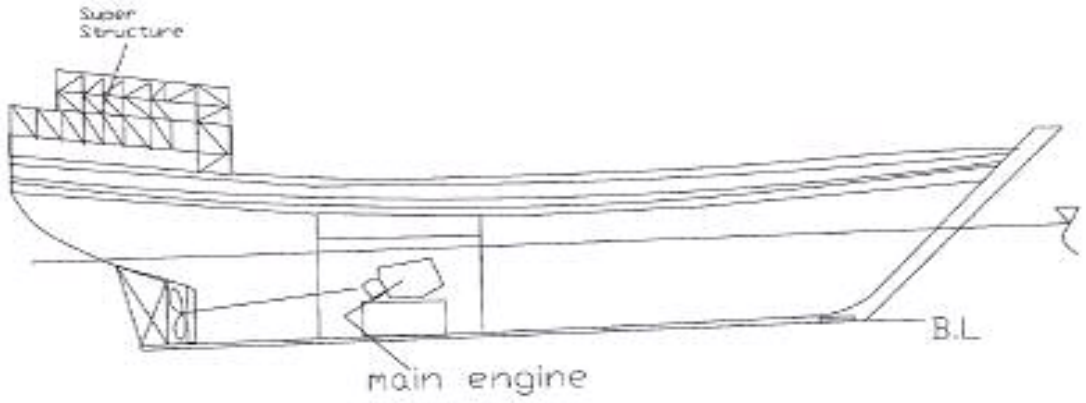
پاکستانی (Pakistani)

ظرفیت این لنج ها تا حدود ۶۰۰ تن می باشد. این نوع لنج ها دارای سینه ای کوتاه و کشیده و پاشنه پهن می باشند و در ظرفیت های بارگیری ۳۰۰ تن به بالا پاشنه آنها را گرد یا تخم مرغی درست می کنند. اندازه های کوچکتر آن (ظرفیت ۴۰ تن به پایین) را برای استفاده صیادی نیز بکار می برند.

متداولترین نوع لنج برای حمل بار در سواح جنوبی ایران نوع پاکستانی میباشد بنابراین در این مقاله به این لنج می‌پردازیم.

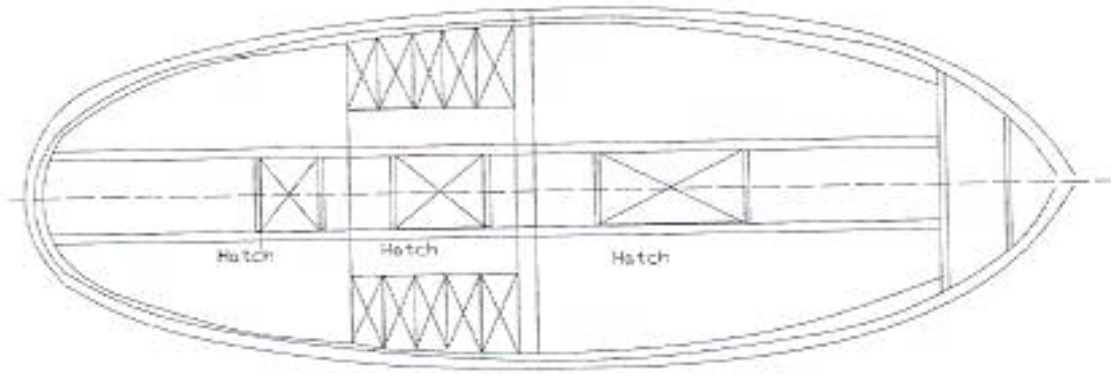
مشخصات بدنه و وزن یک نمونه لنج نوع پاکستانی

شکل ۱ و شکل ۲ جانمایی عمومی یک لنج پاکستانی را نشان میدهد{۲}. شکل ۳ خطوط بدنه یک لنج پاکستانی را نشان میدهد{۲}. مشخصات وزنی لنج مذکور در جدول شماره ۳ ارائه شده است {۲}.

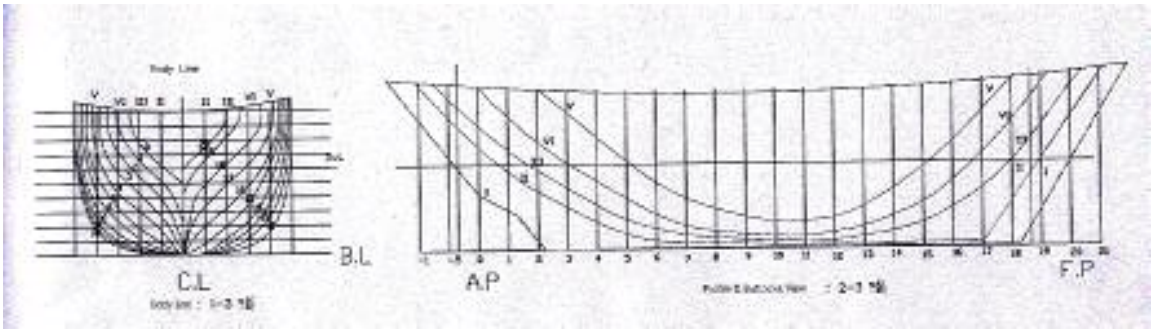


شکل شماره ۱- جانمایی شماتیک یک لنج پاکستانی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.5.5]



شکل شماره ۲- جانمایی عرشه یک لنج پاکستانی



شکل شماره ۳- خطوط بدنه یک لنج پاکستانی

رفتار دینامیکی لنج در موج

هدف

تحلیل کلی رفتار یک شناور در موج و داوری و قضاوت کلی مبنی بر اینکه آیا این شناور، در موج شناوری سرکش است و یا شناوری آرام و رهوار است نیازمند تحلیل دینامیکی رفتار شناور در موج نا منظم می‌باشد. اصولا در بررسی رفتار یک شناور به پدیده های ناشی از حرکت دینامیکی شامل Deck Wetness, Slamming, Accelerations, Propeller Emergence and etc. پرداخته می‌شود. به نظر نگارنده برای قضاوت عمومی در مورد میزان سرکش بودن و یا رهوار بودن شناور در موج بهتر است بجای پرداختن به پدیده ها به خود حرکت و مقدار مطلق انرژی حرکت در موج نامنظم پرداخت. این پارامتر همان RMS (Root Mean Square) در تحلیل طیفی است. تعریف پارامتر RMS جذر مقدار انرژی حرکت دینامیکی یک شناور مشخص ناشی از یک موج نامنظم مشخص می‌باشد. در صورتیکه سطح انرژی چنین شناوری کمتر از سطح انرژی مجاز (seakeeping criteria) باشد، آنگاه این شناور امکان عملیات کشتیرانی در چنین موجی را خواهد داشت. در غیر اینصورت در چنین موجی، شناور مورد بحث نباید بکار گرفته شود. با سعی و خطا میتوان حد اکثر ارتفاع موثر موج نامنظمی که شناور می‌تواند از آن بدون خسارت عبور نماید را استخراج نمود.

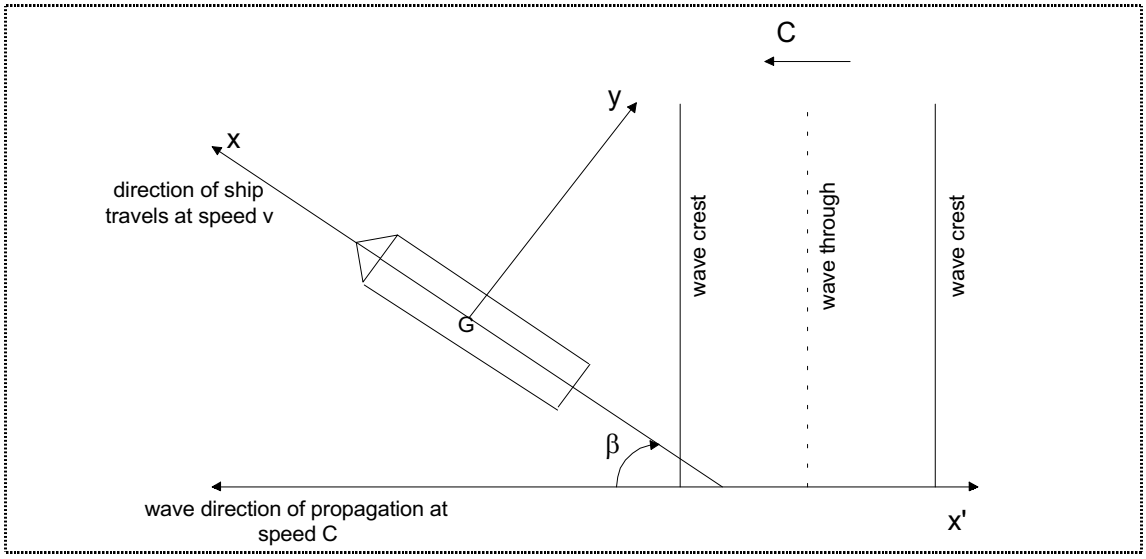
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.5.5]

مدل ریاضی

حرکات کشتی در موج منظم

فرض میشود که حرکات نوسانی کشتی در موج بصورت خطی می‌باشد. سیستم مختصات متحرک (x, y, z) بر روی وسط طولی کشتی و بر روی خط آب طراحی قرار گرفته است و همراه با کشتی با سرعت پیشروی کشتی V ، حرکت می‌کند.

در این سیستم مختصات x مثبت در راستای طول کشتی و بسمت سینه کشتی است. y مثبت در جهت عرض کشتی و بسمت راست بوده و نتیجتا z مثبت در جهت ارتفاع کشتی و بسمت پایین می‌باشد. این سیستم مختصات یک سیستم مختصات راستگرد می‌باشد. شکل شماره ۴ این سیستم مختصات را نسبت به‌یک‌سیستم‌موج‌نشان‌می‌دهد.



شکل شماره ٤- سیستم مختصات متحرک

دستگاه معادلات دیفرانسیلی حرکات کشتی را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\sum_{k=1}^{6}[(M_{jk}+A_{jk})\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k] = F_j e^{i\omega_e t} \qquad j = 1..6 \quad (۱)$$

$$M_{jk} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & MZ_c & 0 \\ 0 & M & 0 & -MZ_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -MZ_c & 0 & I_4 & 0 & -I_{46} \\ MZ_c & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{45} & 0 & I_6 \end{bmatrix}$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.5.5]

$$A_{jk}=\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$$

که:

M_{jk} : اعضای ماتریس جرم

A_{jk} : اعضای ماتریس جرم اضافی

B_{jk} : اعضای ماتریس دمپینگ (مشابه ماتریس A_{jk})

C_{jk} : ضرایب هیدرواستاتیکی که در ماتریس ۶ در ۶ مربوطه فقط المانهای روبرو غیر صفر هستند. C_{33}, C_{44}, C_{55} و $C_{35}=C_{53}$

F_j : دامنه نیروها و ممانها

$F_j e^{i\omega_e t}$: دامنه حقیقی نیروها و ممانها

$\eta_k, \dot{\eta}, \ddot{\eta}_k$: بترتیب مقدار حرکت، سرعت حرکت و شتاب حرکت را بیان میکند. که k برابر ۱ حرکت سرج، ۲ حرکت اسوی، ۳ حرکت هیو، ۴ حرکت رل، ۵ حرکت پیچ و ۶ حرکت یاو را نشان می‌دهد.

با توجه به صفحه تقارن طولی کشتی ماتریس جرم و ماتریس جرم اضافی بشرح ذیل نوشته می‌شود:

$$M_{jk}=\begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & MZ_c & 0 \\ 0 & M & 0 & -MZ_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -MZ_c & 0 & I_4 & 0 & -I_{46} \\ MZ_c & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{45} & 0 & I_6 \end{bmatrix}$$

$$A_{jk}=\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$$

که:

M : جرم کشتی

I_j : ممان اینرسی جرمی

I_{jk} : ممان اینرسی جرمی دو محوری

Zc : موقعیت عمودی مرکز جرم کشتی نسبت به سیستم مختصات متحرک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.5.5]

که در آن A_{jk} مقدار جرم اضافی حرکت j ام ناشی از حرکت k ام میباشد. از طرف دیگر برای ماتریس ضرایب نیروهای هیدرواستاتیکی C_{jk} میتوان گفت که تنها ضرایب C35=C35, C33, C44, C55 غیر صفر میباشند. پس از جایگذاری ماتریس ضرایب دستگاه معادلات دیفرانسیلی شش معادله ای به دو دستگاه معادلات سه معادله ای تبدیل میشود. به دلیل کوچک بودن مقادیر حرکت سرج و حذف اثرات آن میتوان نوشت:

$$\begin{cases} (M+A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_3 e^{i\omega_e t} \\ A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 + (I_{55}+A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 = F_5 e^{i\omega_e t} \end{cases} \quad (۲)$$

(۳)

$$\begin{cases} (M+A_{22})\ddot{\eta}_2 + B_{22}\dot{\eta}_2 + (A_{24}-MZ_c)\ddot{\eta}_4 + B_{24}\dot{\eta}_4 + A_{26}\ddot{\eta}_6 + B_{26}\dot{\eta}_6 = F_2 e^{i\omega_e t} \\ (A_{42}-MZ_c)\ddot{\eta}_2 + B_{42}\dot{\eta}_2 + (A_{44}+I_{44})\ddot{\eta}_4 + B_{44}\dot{\eta}_4 + C_{44}\eta_4 + (A_{46}-I_{46})\ddot{\eta}_6 + B_{46}\dot{\eta}_6 = F_4 e^{i\omega_e t} \\ A_{62}\ddot{\eta}_2 + B_{62}\dot{\eta}_2 + (-I_{46}+A_{64})\ddot{\eta}_4 + B_{64}\dot{\eta}_4 + (A_{66}+I_{66})\ddot{\eta}_6 + B_{66}\dot{\eta}_6 = F_6 e^{i\omega_e t} \end{cases}$$

برای حل این دستگاه معادلات لازم است ابتدا ماتریس ضرایب محاسبه گردد. برای محاسبه ماتریس ضرایب از تئوری نواری استفاده شده است. بر اساس تئوری نواری میتوان یک کشتی سه بعدی را به نوارهای دو بعدی تقسیم نمود بطوریکه ضرایب هیدرودینامیکی یک کشتی برابر با حاصل جمع اثرات نوارهای دو بعدی تشکیل دهنده آن کشتی می‌باشد. محاسبه ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی نوارهای دو بعدی از روابط ساده تر تجربی امکان پذیر است.

حرکات کشتی در موج نامنظم

یک موج نامنظم را می‌توان بصورت طیفی در بازه فرکانس تعریف نمود. طیفهای استانداردی برای شرایط محیطی متفاوت تعریف شده است که امواج نامنظم را با تقریب خوبی تعریف می‌کند. برای نمونه طیف ITTC Two-Parameter بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$S(\omega_e) = \frac{A}{\omega_e^{\,5}} EXP\left(\frac{-B}{\omega_e^{\,4}}\right) \quad (۴)$$

$$A = 173\frac{H_{1/3}^{\,2}}{(\overline{T})^4} \qquad B = \frac{691}{(\overline{T})^4}$$

حرکت یک کشتی در یک موج نامنظم، حرکت نامنظمی است که طیف انرژی این حرکت را می‌توان از حاصلضرب طیف انرژی موج نامنظم در RAO آن حرکت بصورت زیر نوشت:

$$S_\eta(\omega_e) = 2\int_0^\infty \left(\frac{\eta}{\varsigma}\right)^2 S(\omega_e)\,d\omega_e \quad (۵)$$

که:

$(\eta/\varsigma)^2$: RAO حرکت مد نظر

$S_\eta(\omega_e)$: انرژی طیف حرکت

ω_e: فرکانس برخورد

حال می‌توان با تحلیل طیفی، رفتار هر شناور در موج نامنظم را استخراج نمود. بدین منظور از نرم افزار STATEK {۴} استفاده شده است.

برای براورد رفتار یک لنج در موج لازم است موارد زیر تهیه شود:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.5.5]

نرم افزار کامپیوتری مناسب جهت محاسبه دینامیک رفتار شناور در موج، داده های مربوط به لنج شامل مشخصات ابعادی و فرم بدنه و مشخصات وزن و مراکز وزن و نهایتا شرایط محیطی (موج) که لنج در آن کار می‌کند.

از نرم افزار کامپیوتری Statek {۴}برای محاسبه دینامیک رفتار لنج در موج استفاده شده است.

همانطوریکه در بخش ۲ این مقاله آمده است، لنجها انواع و ابعاد گوناگون دارند. متداول ترین نوع لنج باربری در ایران لنج پاکستانی است. در این میان لنجهایی با وزن مرده ۲۰۰ تن بیشترین تعداد لنجهای موجود را تشکیل میدهند. بنابراین برای این تحقیق لنج پاکستانی با وزن مرده ۲۰۰ تنی با دیگر مشخصات ارائه شده در بخش ۲ مورد استفاده قرار گرفته است.

خلیج فارس از نقطه نظر ارتفاع موج نسبت به دریاها و آقیانوسهای کره زمین دریایی نسبتا آرام است. بر اساس مرجع {۳} بالاترین ارتفاع موج موثر ثبت شده ۵/۵ متر و با احتمال وقوع ۰/۰۰۲ می‌باشد. بنابراین امکان مواجهه لنج با امواجی با ارتفاع موثر ۰ تا ۵/۵ متر وجود خواهد داشت. از طرف دیگر زاویه برخورد شناور با موج تاثیر جدی بر رفتار شناور خواهد داشت. اصولا بدلیل حفظ تعادل و پایداری، شناور بصورت موج از سینه (HeadSea) هدایت می‌شود. از هدایت شناور در حالتهای موج از پشت (FollowingSea) و موج از کنار (BeamSea) عموما احتراز می‌گردد. بر این اساس محاسبات برای حالت موج از سینه انجام گردیده است.

از حرکات ششگانه شناور در موج، بدلیل نوع و ماهیت حرکت و اثرات آنها، ضرورتی به بررسی حرکات سرج، اسوی و یاو نیست. بنابراین فقط به سه حرکت هیو، پیچ و رول که تاثیر اصلی بر دینامیک رفتار شناور در حوزه مورد بررسی دارند می‌پردازیم.

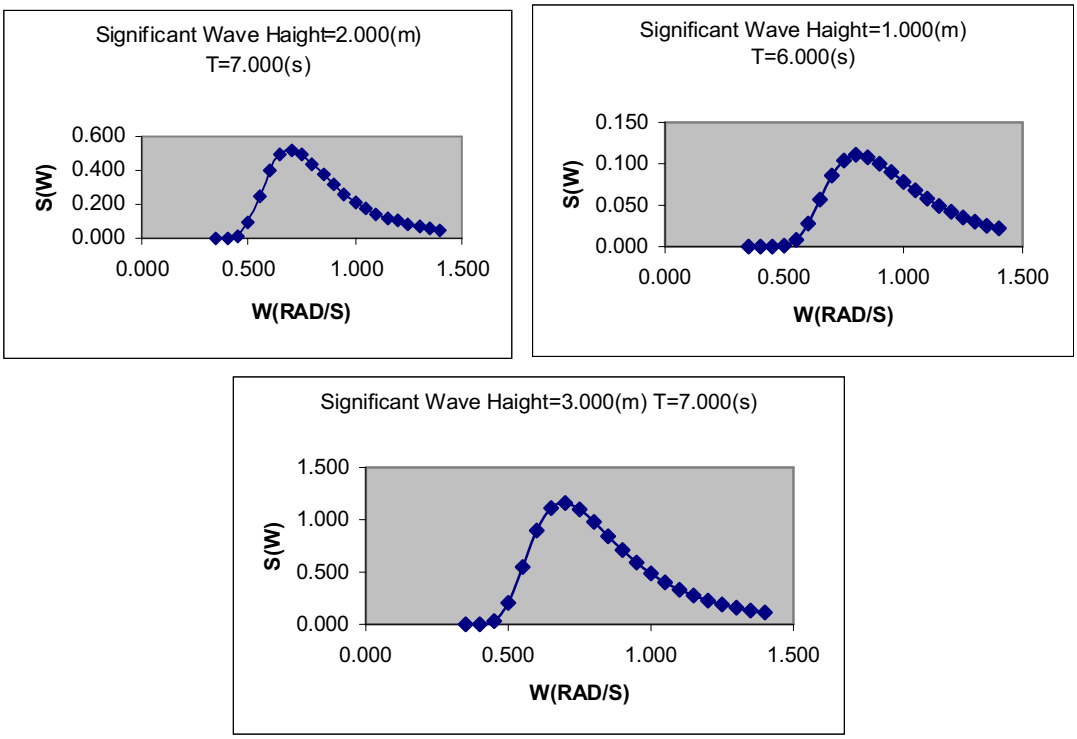
بنابراین برای امواج نامنظم از نوع طیف ITTCTwo-Parameter در سه حالت ارتفاع موثر ۱ متر و پریود ۶ ثانیه، ارتفاع موثر ۲ متر و پریود ۷ ثانیه و ارتفاع موثر ۳ متر و پریود ۷ ثانیه درزاویه برخورد۱۵۰ و ۱۸۰ درجه (موج از سینه) برای سه حرکت هیو، پیچ و رل محاسبات انجام شده است. از کاهش سرعت شناور در موج ناشی از مقاومت اضافی (Added Resistance) صرفنظر شده است.

نتایج محاسبات

نمونه منحنی های طیف انرژی موج و حرکات در شکلهای شماره۵ تا شماره۸ ترسیم شده است. مقادیر m0 حرکات در حالتهای مختلف دریا در جدول شماره۲ ارائه شده است.

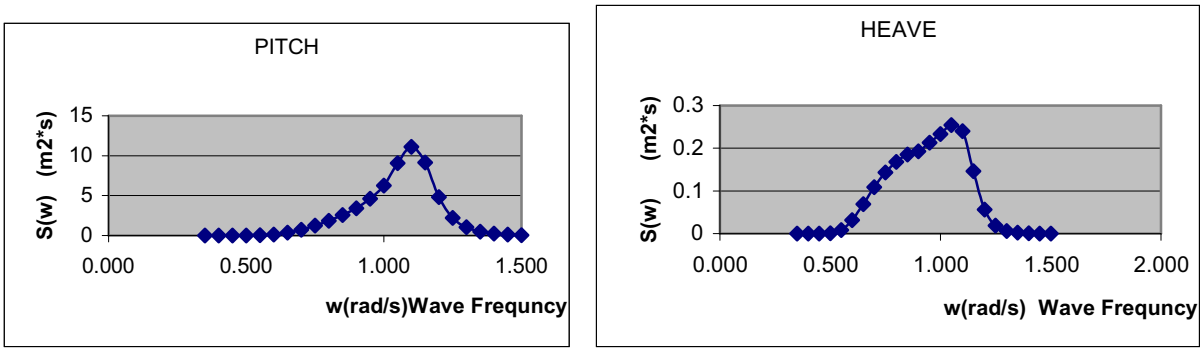
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.5.5]



شکل شماره۵- طیفهای موج نامنظم بر اساس **ITTC Two-Parameter**

SPEED = 7.0000 (m/s) WAVE ANGLE =180.00 DEG.
SIG. WAVE HT. = 1.00(m), MEAN PERIOD = 6.00(s)



.Roll , Sway and yaw are zero

شکل شماره ۶ - طیف حرکات لنج

SPEED = 7.0000 (m/s) WAVE ANGLE =180.00 DEG.
SIG. WAVE HT. = 2.00(m), MEAN PERIOD =7.00(s)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.1.5.5]