

## تحلیل بارگذاری موج بر روی سازه عرضی شناور تریماران

ابوالفتح عسکریان خوب<sup>۱</sup>، محمد جواد کتابداری<sup>۲</sup>

A.Askariankhoob@aut.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

تریماران یک نوع شناور چند بدنه است که از یک بدنه مرکزی لاغر و بلند و دو بدنه کناری تشکیل شده است. بدنه‌های کناری توسط عرشه عرضی به بدنه اصلی متصل می‌گردند. بدنه‌های جانبی تاثیر قابل توجهی بر روی تعادل، رفتار دینامیکی، ماندگاری در دریا و بارهای موج وارد بر سازه شناور دارند. تریماران به علت داشتن قابلیت‌های عالی دریانوردی مورد توجه طراحان کشتی خصوصا با کاربری‌های نظامی و تجاری قرار گرفته است. این شناور در مقایسه با شناورهای تک بدنه در معرض بارهای سازه‌ای متفاوتی قرار گرفته و به علت داشتن عرشه عرضی، علاوه بر بارهای طولی تحت اثر بارهای عرضی موج نیز قرار می‌گیرد. این بارها شامل گشتاور خمشی عرضی، گشتاور پیچشی عرضی و نیروی برشی عرضی هستند که از اثر متقابل بدنه کناری و بدنه اصلی ناشی می‌شوند. نیروی سیالی که به بدنه کناری شناور اعمال می‌شود توسط عرشه عرضی به بدنه اصلی منتقل می‌گردد. در نتیجه یکی از مهمترین بخشهای سازه این شناور، سازه عرضی است که طراحی آن نیاز به محاسبه نیروهای موج وارد بر آن دارد. در این مقاله با استفاده از روش پانل سه بعدی بر پایه تئوری پتانسیل به کمک نرم افزار ماسترو نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر عرشه عرضی شناور تریماران در حوزه فرکانس محاسبه گردیده است. نتایج تحقیق نشان داد که در وضعیت برخورد موج با زاویه ۹۰ درجه مقادیر نیروها و گشتاورهای وارد بر عرشه عرضی مستقل از سرعت بوده و فقط به فرکانس موج بستگی دارند. همچنین مقادیر حداکثر نیروها و گشتاورها در سرعت ۲۵ گره و در زاویه برخورد ۱۳۵ درجه اتفاق می‌افتد.

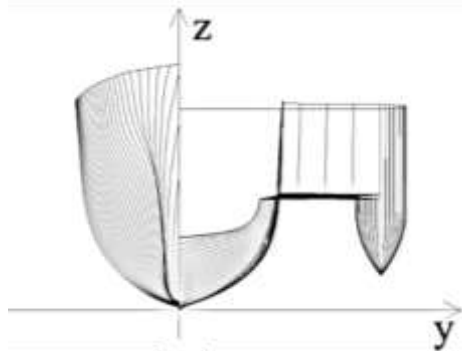
واژگان کلیدی: تریماران، عرشه عرضی، نیروهای موج، آنالیز حوزه فرکانس.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۴/۱۰/۰۲

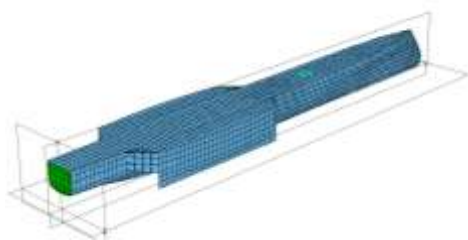
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۵/۰۲/۱۱

## ۱- مقدمه

تریماران دارای پایداری بسیار بالایی نسبت به تک بدنه است. در این شناور با تغییر ابعاد و موقعیت بدنه‌های کناری می‌توان به مقدار GM موردنیاز دست پیدا کرد. این شناور در هنگام تصادم و آسیب از قابلیت بقای ذاتی و تعادل آسیب دیده خوبی برخوردار است. از دیگر مزایای این فرم بدنه در مقایسه با تک بدنه‌ها با جابجایی یکسان، عملکرد افزایش سریع سرعت به علت داشتن بدنه اصلی و بدنه‌های کناری ظریف است. اشکال ۱ و ۲ بدنه‌های کناری و پرسپکتیو این شناور را نشان می‌دهند.



شکل (۱) خطوط هندسه بدنه اصلی و بدنه‌های جانبی تریماران.



شکل (۲) پرسپکتیو تریماران طراحی شده.

بیشتر مطالعات انجام شده در خصوص شناور تریماران مربوط به مسائل هیدرودینامیکی بوده و از نظر سازه‌ای، خصوصاً سازه عرضی مطالعات محدودی انجام شده است. در سال ۲۰۰۴، رادز<sup>۱</sup> به روش تحلیلی به بررسی بارهای موج وارد بر سازه عرضی در موقعیت‌های مختلف بدنه کناری پرداخت. وی هر سه بدنه تریماران را بصورت پانتون در نظر گرفته و تحلیل را در سخت‌ترین شرایط دریایی احتمالی انجام داده و برای معتبرسازی روش خود از نرم افزار ماسترو<sup>۳</sup> کمک گرفت [۳].

ابعاد، فرم هندسی و موقعیت طولی و عرضی بدنه‌های کناری بر روی تعادل شناور، رفتار هیدرودینامیکی، قابلیت ماندگاری

فرم بدنه تریماران ترکیبی از شناورهای تک بدنه و شناور کاتاماران است که از یک بدنه اصلی در وسط و دو بدنه جانبی در طرفین تشکیل شده است. معمولاً بدنه کناری حداکثر تا ۳۲ درصد طول بدنه اصلی امتداد دارد.

بدنه شناور تریماران به علت داشتن مزیت‌های متعدد در مقایسه با فرم‌های دیگر بدنه شناورها، امروزه بهترین انتخاب و جایگزین برای شناورهای بزرگ سرعت بالا با کاربری‌های مختلف است. بطوریکه این فرم بدنه در ساخت شناورهای تندرو نظامی و تجاری با طول‌های بیش از ۱۰۰ متر بکار رفته است [۱].

تریماران با داشتن بدنه اصلی باریک و بلند می‌تواند افزایش مقاومت موج‌سازی و مقاومت فرم بدنه در سرعت‌های بالا را در محدوده منطقی و قابل قبول نگه دارد. این شناور با دارا بودن سه بدنه، انعطاف‌پذیری خوبی جهت جا دادن دستگاه‌ها و نیروی محرکه دارد. بدنه میانی با عرض پیوسته بزرگتر اجازه می‌دهد نیروی محرکه بزرگتر در مقایسه با کاتاماران بر روی این شناور نصب شود. از گزینه‌های دیگر می‌توان به نصب واترجت و یا پیشران‌های دیگر در انتهای بدنه‌های کناری اشاره نمود.

از ویژگی‌های مسلم یک تریماران داشتن فضای بزرگ در بالای کشتی و سطح عرشه وسیعتر است [۲]. در مقایسه با یک شناور تک بدنه با جابجایی یا حجم یکسان، شناور تریماران ۲۰ تا ۳۰ درصد طول بزرگتر داشته و بعلاوه داشتن عرشه عرضی که بین بدنه اصلی و بدنه‌های کناری قرار می‌گیرد از عرض بزرگتری برخوردار است. این فضای بزرگ بالایی شناور و سطح عرشه وسیع مزیت‌های زیادی خواهد داشت. بعنوان مثال براحتی اجازه می‌دهد سنسورها و آنتن‌ها در فواصل دورتر از یکدیگر قرار گیرند. نتیجه آن کاهش اثرات ناخواسته تداخل الکترومغناطیسی و سازگاری آن خواهد شد. بدلیل داشتن طول نسبتاً بزرگتر و وجود بدنه‌های کناری رفتار دینامیکی شناور بخصوص حرکات رول، هیو و پیچ آن به شدت بهبود پیدا می‌کند. بنابراین این شناور در امواج با طول موج‌های کوتاه در وضعیت‌های دریایی<sup>۱</sup> و<sup>۴</sup> و حتی<sup>۵</sup> از قابلیت ماندگاری خوبی برخوردار بوده و سرعت خود را در این وضعیت‌ها بخوبی حفظ می‌کند.

<sup>3</sup> Maestro

<sup>1</sup> Sea Force

<sup>2</sup> Rhoads

نشان داد که این روش می‌تواند بصورت کیفی اثرات بارگذاری موج را در حالت موج از سینه نشان دهد [۸]. در سال ۲۰۱۵، فانتس<sup>۶</sup> و همکاران با استفاده از روش المان محدود، چگونگی بهینه‌سازی وزن سازه یک مدل تریماران از جنس آلومینیم را بررسی کردند. در این تحلیل بخش‌هایی از سازه که داری مقادیر بالای تنش بودند شناسایی شده و با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی این محل‌ها از نظر ابعاد و ضخامت بهینه شدند. این مطالعه نشان داد بدون عبور از تنشهای مجاز ارائه شده از طرف موسسات رده‌بندی وزن سازه ۱۷ تا ۲۵ درصد قابلیت کاهش دارد [۹]. اگر چه مطالعاتی به روشهای عددی و آزمایشگاهی بر روی مدل‌های خاصی از تریماران انجام شده است اما این تحقیقات هنوز کافی نیست و نمی‌توان نتایج آنها را به تمام شناورهای تریماران با هر فرم بدنه خاص تعمیم داد. در این مقاله یک شناور فریگیت تریماران با قابلیت حمل بالگرد بر اساس قوانین (ABS)<sup>۷</sup> طراحی شده و سازه عرضی آن مورد تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

از آنجایی که شناور تریماران از نظر سازه‌ای تفاوت‌های زیادی با شناورهای معمول دارد، بنابراین در طراحی این نوع خاص از شناورها باید ملزومات بیشتری نسبت به شناورهای معمول در نظر گرفته شود. به علت عدم وجود تجربه کافی در طراحی و ساخت این نوع از شناورها، نمی‌توان به آیین‌نامه‌های ارائه شده توسط مؤسسات رده‌بندی اتکا کرد. در بررسی استحکام عمومی سازه شناورهای معمول، روش شبه استاتیکی ساده‌ای برای به دست آوردن بارهای وارده بر شناور وجود دارد و معمولاً از این روش برای تحلیل سازه این نوع از شناورها استفاده می‌شود. اما در مورد تریماران که شناوری از نوع غیر معمول است، این روش از دیدگاه مؤسسات رده‌بندی روشی کاملاً صحیح محسوب نمی‌شود و برای به دست آوردن بارهای وارد بر شناور باید از روش‌های دقیق‌تری استفاده کرد. بدین منظور باید پارامترهایی از جمله سرعت کشتی، زاویه و خصوصیات موج برخوردی در نظر گرفته شده و سپس نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر کشتی محاسبه شوند.

در دریا و بارگذاری موج روی سازه، تاثیر زیادی دارد. فانگ و چن<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش توزیع چشمه سه بعدی مقادیر نیروهای موج شامل نیروهای برشی، گشتاورهای خمشی و گشتاورهای پیچشی را در موقعیت‌های طولی و عرضی متفاوت برای عرشه عرضی محاسبه کرده و بر اساس نتایج حاصله موقعیت مناسب بدنه‌های کناری را تعیین نمودند [۴]. براساس تحلیل آنها بهترین موقعیت از نقطه نظر سازه ای برای بدنه های کناری موقعیتی است که فاصله بین محور طولی بدنه اصلی و بدنه کناری ۸ درصد طول کلی شناور باشد و فاصله بین خط میانی بدنه اصلی و بدنه کناری ۲۱ درصد طول کلی شناور باشد. در این تحلیل فاصله عرضی و فاصله طولی در نظر گرفته شده است. در سال ۲۰۱۰، مین و ژانگ<sup>۲</sup> بر اساس تئوری پتانسیل سه بعدی و توابع گرین، اثرات تغییر طول و موقعیت بدنه‌های کناری را بر روی بارگذاری موج بدست آوردند. در مطالعه آنها مقادیر مهم نیروهای موج از قبیل نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی قائم در نقاط مختلف بدنه اصلی و گشتاور خمشی عرضی در محل اتصال سازه عرضی به بدنه اصلی محاسبه شده و نهایتاً موقعیت بهینه بدنه‌های کناری بدست آمد [۵]. لیانگ<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ به کمک تست مدل به ارزیابی روابط ارائه شده توسط موسسه لویدز مربوط به نیروهای موج عرشه عرضی شناور تریماران پرداختند. در این آزمایش مقادیر گشتاور خمشی و نیروهای برش در زوایای مختلف برخورد موج در محل عرشه عرضی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد مقادیر گشتاور خمشی قائم تا حدودی با روابط لویدز مطابقت دارد اما گشتاور پیچشی عرضی بیش از مقدار بدست آمده از فرمول لویدز بود [۶].

در سال ۲۰۱۲، رن<sup>۴</sup> و همکاران مدل المان محدود شناور تریماران را بر اساس قوانین لویدز ساخته و تاثیر افزایش ابعاد محل اتصال عرشه عرضی به بدنه اصلی و افزایش ضخامت بالکهد را بر روی کاهش تمرکز تنش مطالعه کردند [۷]. در سال ۲۰۱۴، دوباشی<sup>۵</sup> و همکاران برای بررسی اثرات موقعیت بدنه‌های کناری بر روی بارگذاری موج روی سازه عرضی روشی بر اساس تئوری نواری توسعه دادند. آنها برای معتبرسازی روش خود از آزمایش مدل استفاده کردند. نتایج

<sup>5</sup> Dobashi

<sup>6</sup> Fuentes

<sup>7</sup> American Bureau of Shipping rules

<sup>1</sup> Fang & Chen

<sup>2</sup> Min & Zhang

<sup>3</sup> Liang

<sup>4</sup> neR

$\phi_v$  پتانسیل غیردائم موج است که بیان ریاضی آن بصورت زیر است:

$$\phi_v = [\phi_I(x, y, z) + \phi_D(x, y, z) + \phi_R(x, y, z)]e^{-i\omega t} \quad (3)$$

$\phi_D$  پتانسیل تفرق موج،  $\phi_R$  پتانسیل تابشی موج و  $\phi_I$  پتانسیل موج پیش رونده است که در معادله (۴) تعریف گردیده است.

$$\phi_I e^{-i\omega t} = [-i \frac{g\zeta_a}{\omega_0} e^{ky} + e^{i(kx \cos\beta + kz \sin\beta)}] e^{-i\omega t} \quad (4)$$

$\zeta_a$  دامنه موج پیش رونده،  $k = \omega_0^2/g$  عدد موج که  $\omega_0$  فرکانس موج پیش رونده،  $\omega$  فرکانس موج برخوردی و  $g$  شتاب ثقل است.

بنابراین برای یک شناور با سرعت به سمت جلو فرکانس موج برخوردی به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\omega = |\omega_0 - U_x \cos\beta| \quad (5)$$

$\omega$  فرکانس موج برخوردی در موقعیت  $(x, y, z)$  در زمان مشخص  $t$  است.

پتانسیل تفرق موج که با  $\phi_D$  بیان می‌گردد مولفه‌ای از موج پیش رونده است. پتانسیل تابش موج  $\phi_R$  با نوسان شناور در هر یک از ۶ درجه آزادی تولید می‌شود.  $\phi_D$  و  $\phi_R$  هریک در سه مرحله محاسبه می‌گردند.

۱- برای بدست آوردن پتانسیل سرعت، شرایط سطح آزاد و شرایط مرزی برای ارضای فرضیات تئوری پتانسیل باید خطی‌سازی شوند. پتانسیل اغتشاش همانند پتانسیل تفرق و انعکاس در  $n$  امین یا  $z$  امین مود حرکت باید شرایط زیر را ارضا کنند.

الف) معادله لاپلاس در حوزه سیال:

$$\nabla^2 \phi_j = 0 \quad (6)$$

ب) شرایط سطح آزاد خطی شده:

$$g \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + \left(i\omega + \frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 \phi_j = 0 \text{ on } z = 0 \quad (7)$$

ج) شرایط مرزی سینماتیکی جسم (شرط عدم نفوذ):

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = i\omega n_j + U m_j \quad j = 1, 2, \dots, 7 \text{ on } s = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial n} \Big|_{z \rightarrow \infty} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \text{ on } S_0$$

د)- شرط مرزی سینماتیکی کف اقیانوس:

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, 7 \text{ at } z \rightarrow -\infty \quad (9)$$

پتانسیل سرعت و اغتشاش توسعه داده شده از معادلات فوق، با استفاده از روش تابع گرین با استفاده از تکنیک‌های توزیع

برای محاسبه بارهای موج اعمال شده بر روی این شناور از کد کامپیوتری که موج ماسترو<sup>۱</sup> نامیده می‌شود استفاده شده است. ماسترو یک نرم افزار مناسب طراحی برای آرشیوتکت‌های دریایی و نیازمندی‌های آنها جهت آنالیز المان محدود و ارزیابی حالات حدی است. ماسترو این وظیفه را بطور کامل بوسیله یک محیط گرافیکی تحت ویندوز انجام می‌دهد. این نرم افزار با دقت مناسبی مدل المان محدود کل کشتی را سریعتر و آسانتر از نرم افزارهای دیگر ایجاد می‌کند. این نرم افزار قابلیت پیدا کردن شرایط تعادل استاتیکی در آب آرام و امواج با دامنه، طول، فاز و زاویه برخوردی مختلف را داراست. یکی از بخش‌های مهم این نرم افزار ماژول موج ماسترو است که می‌تواند بارها هیدرودینامیکی ناشی از امواج وارد بر سازه و حرکات دینامیکی را در حوزه فرکانس تحلیل نماید. این برنامه بر پایه تئوری جریان پتانسیل خطی در حوزه فرکانس نوشته شده و مبتنی بر روش پانل سه بعدی است که در آن از انتگرال تابع گرین برای تعیین پتانسیل غیر دائم استفاده می‌کند. سپس نیروها و فشارهای هیدرودینامیکی وارد شده بر روی سطح خیس بدنه شناور با استفاده از معادله برنولی بر پایه فرضیات زیر محاسبه می‌شود [۳].

۱- سیال ایده ال فرض می‌گردد.

۲- بدنه شناور در موقعیت متوسط آب آرام باقی مانده و دامنه نوسان آن کوچک فرض می‌شود.

تئوری حاکم بر فرمولاسیون پانل متد در جریان پتانسیل که جهت محاسبه نیروهای امواج وارد بر سازه استفاده شده، به صورت زیر خلاصه شده است:

- فرض می‌شود جسم با سرعت ثابت حرکت می‌کند.  $U_x$  سرعت جریان یکنواخت است که در امواج هارمونیک زمانی دارای دامنه کوچک در زمان است.

- پتانسیل سرعت کل  $\phi_T$ ، دارای اجزای پتانسیل سرعت دائم و غیر دائم است که بصورت زیر می‌تواند بیان گردد:

$$\phi_T(x, y, z; t) = \phi_s(x, y, z) + \phi_v(x, y, z; t) \quad (1)$$

$\phi_s$  پتانسیل سرعت جریان حالت دائم است که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\phi_s(x, y, z) = -U_x + \phi_x(x, y, z) \quad (2)$$

که در آن  $\phi_x$  پتانسیل اغتشاش حالت دائم در موقعیت داده شده در میدان جریان است.

<sup>1</sup> Maestro-Wave

$$p = -\rho \left( \frac{\partial \Phi_v}{\partial t} + \nabla(-U_x + \Phi_x) \cdot \nabla \Phi_v \right) \quad (۱۶)$$

در این معادله  $\rho$  جرم حجمی سیال است. با جایگذاری معادله ۱۶ در معادله ۱۴ تمام مولفه‌های نیروهای هیدرودینامیکی بر روی شناور بدست می‌آید:

$$F_j = -\rho \iint n_j \left[ \frac{\partial \Phi_v}{\partial t} + \nabla(-U_x + \Phi_x) \cdot \nabla \Phi_v \right] ds \quad j=1,2,\dots,6 \quad (۱۷)$$

فشارهای هیدرودینامیکی در شرایط موج داده شده با استفاده از پتانسیل سرعت محلی بر روی سطح خیس بدنه و با جایگذاری در معادلات برنولی محاسبه می‌گردند. فشار هیدرودینامیکی کل اعمال شده با ضربه موج بر روی شناور بصورت زیر خواهد بود:

$$p_{ht} = \rho [i\omega(\phi_I + \phi_D) + \vec{W} \cdot \nabla(\phi_I + \phi_D)] \omega_e^2 \sum_{k=1}^6 \vec{x}_k \phi_k - i\omega \sum_{k=1}^6 \vec{x}_k (\vec{W} \cdot \nabla \phi_k) \quad (۱۸)$$

این معادله برای نیروها و گشتاورهای روی هر یک از پانل‌های خیس شده بکار می‌رود که جمع این پانل‌ها سطح خیس شده شناور را ایجاد می‌کند. سپس با انتگرال گیری، کل فشار روی سطح خیس بدنه بدست می‌آید.

دامنه مختلط فشار هیدرواستاتیکی بصورت زیر داده می‌شود:

$$\nabla p_{st} = -\rho g(\bar{x}_3 - x\bar{x}_5 + z\bar{x}_4) \quad (۱۹)$$

پس از تعیین نیروها بارهای هیدرودینامیکی بر روی هر پانل بر حسب جرم افزوده، ضرایب سختی و میرایی بدست می‌آیند. جمع این ضرایب با جرم‌های خارجی اعمال شده بر روی کل سطح خیس شناور، پاسخ کل نیروی هیدرودینامیکی همانند نیروهای تحریک را بدست می‌دهد. کل نیروی وارد شده بر یک بخش از شناور که در شرایط موج حرکت می‌کند شامل نیروهای موج برخوردی، تفرق، تابش، نیروهای هیدرواستاتیکی و جرم کشتی بعلت فشار هیدرودینامیکی و اینرسی حرکت کشتی است.

مولفه‌های نیروی موج بر روی پانل کشتی با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$F_j^W = \text{Re}[f_j^{WL} e^{-i\omega_e t}]$$

$$f_j^{WL} = I_j - \iint (p_{ht} + \Delta_{st}) N_j ds_x \quad (۲۰)$$

$$N_j = n_j \quad \text{for } j = 1,2,3,4$$

$$N_5 = -xn_3$$

$$N_6 = -xn_2$$

در این رابطه  $s_x$  سطح خیس متوسط مقطع و  $I$  مدول مقطع برای بدنه خیس متناظر با مولفه‌های موج است.

چشمه که بصورت زیر بیان می‌گردد محاسبه می‌شوند.

$$2\pi\phi_i(p) = \iint \sigma_i(q) \hat{G}(p; q) ds(q) \quad (۱۰)$$

که در آن  $\hat{G}(p; q)$  تابع گرین در یک نقطه از میدان (p) ناشی از دانسیته نامعین چشمه  $\sigma_i$ ، در نقطه (q) است. با اعمال شرایط مرزی جسم به معادلات بالا دانسیته چشمه با حل معادله انتگرالی زیر بدست می‌آید:

$$2\pi\sigma_i(p) + \iint \sigma_i(q) \frac{\partial \hat{G}(p; q)}{\partial n_p} ds(q) = \frac{\partial \phi_i}{\partial n} \quad (۱۱)$$

با تعیین دانسیته چشمه‌ها و با استفاده از تابع گرین پتانسیل سرعت در کل میدان محاسبه می‌گردد.

۲- برای رسیدن شناور به تعادل دینامیکی باید نیروی تحریک با جمع نیروهای اینرسی، نیروهای میرایی و نیروهای سختی به تعادل برسد. از آنجاییکه شناور صلب فرض می‌گردد معادلات حرکت خطی کوپل شده می‌تواند برای بیان کل مسائل هیدرودینامیکی بصورت زیر بیان گردد:

$$\sum_{k=1}^6 \{ (M_{jk} + A_{jk}) \ddot{x} + B_{jk} \dot{x} + C_{jk} x \} = F_{jk}^i \quad (۱۲)$$

که در آن  $M_{jk}$  ماتریس عمومی جرم  $A_{jk}$  ماتریس جرم افزوده  $B_{jk}$  ماتریس میرایی و  $C_{jk}$  ماتریس سختی است.  $\dot{x}$  و  $x$  به ترتیب شتاب، سرعت و جابجایی برای هر یک از مودها  $k$  یا  $j$  هستند.  $F_{jk}^i$  که کل نیروی اعمال شده بر روی جسم است بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$F_{jk}^i = f_j + f_j^s \quad (۱۳)$$

که در آن  $f_j$  مولفه‌های نیروی هیدرودینامیکی و  $f_j^s$  مولفه‌های نیروی هیدرواستاتیکی موج هستند.

جهت و مود نیروها، ممانها یا حرکت موج به ترتیب با  $z$  و  $k$  مشخص می‌گردند.

۳- نیروهای هیدرودینامیکی اعمال شده بر روی شناور با استفاده از معادله زیر تعیین می‌گردند.

$$F_j = \iint p n_j ds \quad (۱۴)$$

در این رابطه  $j=1,2,\dots,6$  که  $z$  شش درجه آزادی شامل سه حرکت خطی و سه حرکت دورانی حول  $x, y, z$  است.  $S$  متوسط سطح خیس بدنه و  $n_j$  بردار نرمال بدنه شناور است. همچنین  $n$  از معادله زیر بدست می‌آید:

$$n = \begin{cases} \vec{n} & \text{for } j = 1,2,3 \\ \vec{r} - \vec{r}_g & \text{for } j = 4,5,6 \end{cases} \quad (۱۵)$$

در این رابطه  $\vec{r}$  بردار موقعیت در یک نقطه از سطح خیس شناور و  $\vec{r}_g$  بردار موقعیت در نقطه داده شده از مرکز ثقل شناور است.

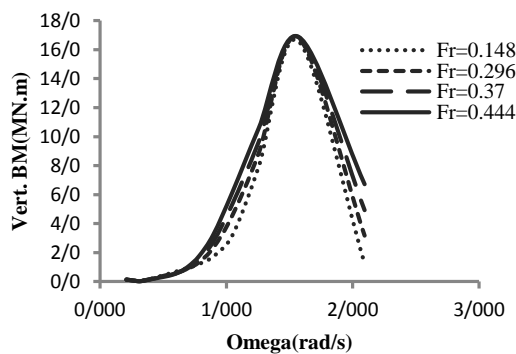
۴- فشار هیدرودینامیکی اعمال شده بر روی بدنه شناور که با  $p$  نشان داده می‌شود با معادله زیر بیان می‌گردد:

## ۳- بحث و نتایج

با افزایش فرکانس موج بصورت غیرخطی افزایش پیدا کرده و در فرکانس ۱/۵۷ رادیان بر ثانیه برای هر چهار عدد فرود به حداکثر مقدار خود یعنی ۱۶/۸۸ مگانیوتن بر متر رسیده است. بعد از این پیک، گشتاور به صورت نسبتاً خطی کاهش پیدا می‌کند. روند تغییر گشتاور با فرکانس برای هر چهار سرعت مشابه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در این جهت تغییرات گشتاور خمشی مستقل از سرعت شناور بوده و فقط بستگی به فرکانس موج دارد.

شکل (۴) وضعیت برخورد موج به صورت مورب به شناور را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها، ابتدا گشتاور خمشی بصورت خطی برای تمام مقادیر سرعت افزایش پیدا کرده و در محدوده فرکانسی بین ۰/۸ تا ۱ رادیان بر ثانیه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. بیشترین مقدار گشتاور ۳۰/۸۸ مگانیوتن بر متر است که در سرعت ۳۰ گره و در فرکانس ۱ رادیان بر ثانیه رخ می‌دهد. بعد از این فرکانس، نمودارها از یکدیگر جدا شده و به صورت غیرخطی کاهش پیدا کرده و دارای پیچ خوردگی<sup>۱</sup> در بعضی از فرکانس‌ها خواهند بود.

شکل (۵) رانوی مقادیر پاسخ سازه در حالت موج از سینه را نشان می‌دهد. روند تغییرات گشتاور خمشی در این حالت مشابه موج مورب است. با این تفاوت که حداکثر مقدار آن بیشتر از موج مورب بوده و در فرکانس ۰/۸ رادیان بر ثانیه در سرعت‌های ۲۰ و ۳۰ گره اتفاق می‌افتد. این پاسخ نیز پیچ خوردگی در فرکانس‌های بالای ۱ رادیان بر ثانیه نشان می‌دهد. علت پیچ خوردگی و افت در منحنی‌ها کوپل شدن حرکات دینامیکی و بارگذاری می‌باشد. با توجه به نمودارها در هر سه زاویه برخورد موج، بیشترین مقدار گشتاور خمشی در سرعت ۳۰ گره رخ می‌دهد.



شکل (۳) رانوی گشتاور خمشی قائم در زاویه برخورد موج ۹۰ درجه.

۱- مشخصات ابعادی تریماران طراحی شده در این تحقیق مطابق جدول (۱) انتخاب گردید. انتخاب جنس و بعد بندی اجزاء سازه ای، با بهره گیری از قوانین موسسه رده بندی ABS انجام شده است. در طراحی سازه شناور تریماران از فریم بندی طولی با فاصله فریم بندی یک متر استفاده شده است. طراحی سازه‌ای به گونه‌ای انجام شده تا مقطع میانی بتواند بارهای طراحی آیین نامه‌ای را تحمل کند. در اتصال عرشه‌های میانی به بدنه اصلی تمهیدات سازه‌ای ویژه‌ای در نظر گرفته شده تا حتی‌الامکان از تمرکز تنش در این نواحی، که مستعد بروز این پدیده است، پرهیز شود.

۲- نیروها و گشتاورهای وارد بر مرکز عرشه عرضی شناور با استفاده از ماژول موج ماسترو، محاسبه شده است. این تحلیل در سه زاویه برخورد ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه که به ترتیب موج کناری، موج مورب و موج سینه بودند انجام گردید. بازه فرکانسی امواج ۰/۲۱ تا ۲/۱ رادیان بر ثانیه بود. مقادیر سرعت‌ها ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ گره دریایی در نظر گرفته شده، که سرعت ۲۵ مربوط به سرعت طراحی و ۳۰ حداکثر سرعت شناور است.

جدول (۱) مشخصات ابعادی تریماران.

پارامتر	مقدار
طول کل بدنه اصلی (متر)	۱۲۴
طول خط آب بدنه اصلی (متر)	۱۲۳/۲
عرض کل (متر)	۲۱/۷۷۶
عرض خط آب (متر)	۹/۶
ارتفاع (متر)	۱۱/۷۷۶
آبخور (متر)	۴/۳۸۴
طول بدنه کناری (متر)	۳۶
عرض بدنه کناری (متر)	۲/۳۶
ارتفاع بدنه کناری (متر)	۸/۱۳۶
آبخور بدنه کناری (متر)	۷/۷۴۴
فاصله بین بدنه اصلی و بدنه کناری (متر)	۹/۷
فاصله بین مقطع میانی بدنه اصلی و بدنه کناری (متر)	۲۶
جابجایی (تن)	۲۲۴/۸۱

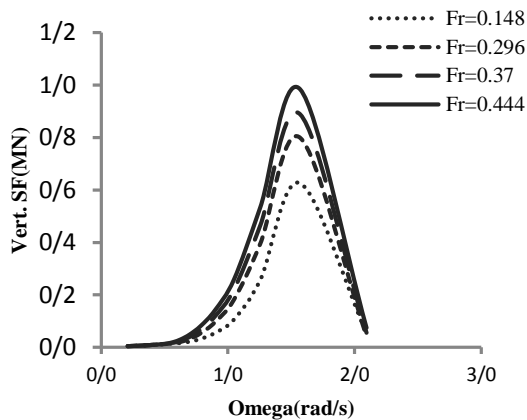
## ۳-۱- گشتاور خمشی قائم

شکل (۳) رانوی گشتاور خمشی قائم را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در حالت موج کناری گشتاور خمشی قائم

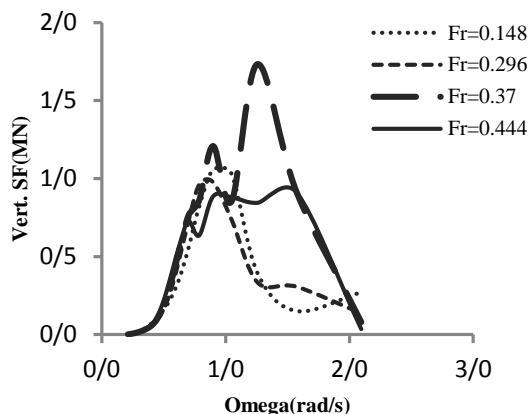
<sup>۱</sup> Kink

بود. بیشترین مقدار نیروی برشی مربوط به سرعت ۲۵ گره بوده و در فرکانس ۱/۲۶ رادیان بر ثانیه رخ می‌دهد. نیروی برشی قائم در محدوده فرکانسی ۰/۹ تا ۱/۵۷ رادیان بر ثانیه در سرعت ۳۰ گره تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

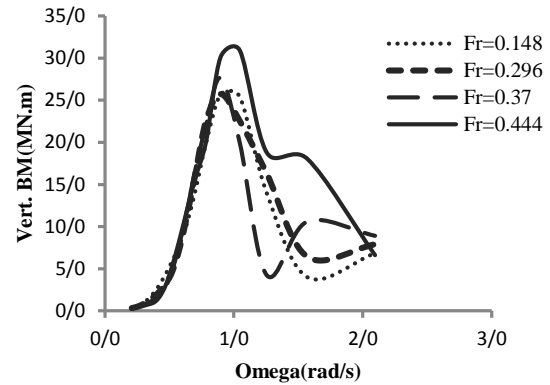
با توجه به شکل (۸) روند تغییرات نیروی برشی قائم در فرکانس کمتر از ۰/۶ رادیان بر ثانیه تقریباً بصورت خطی است. بعد از این فرکانس منحنی‌ها از یکدیگر جدا شده و دارای پیچ خوردگی در بعضی از فرکانس‌ها خواهند بود. همچنین ملاحظه می‌گردد که مقادیر حداکثر نیروی برشی در محدوده فرکانسی ۱ رادیان بر ثانیه رخ می‌دهد. برای سرعت‌های ۲۵، ۲۰ و ۳۰ مقادیر حداکثر یکسان است اما برای سرعت ۱۰ گره برابر ۱/۳ مگانیوتن است.



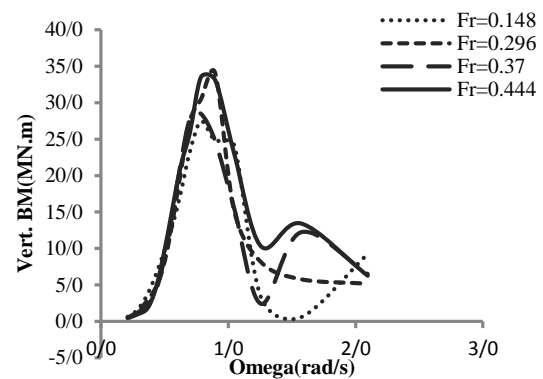
شکل (۶) رانوی نیروی برشی قائم در زاویه برخورد موج ۹۰ درجه.



شکل (۷) رانوی نیروی برشی قائم در زاویه برخورد موج ۱۳۵ درجه.



شکل (۴) رانوی گشتاور خمشی قائم در زاویه برخورد موج ۱۳۵ درجه.

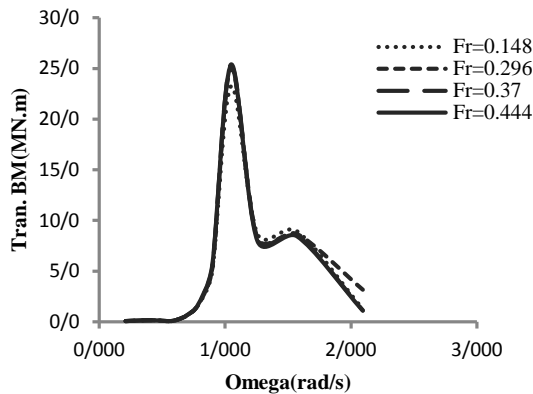


شکل (۵) رانوی گشتاور خمشی قائم در زاویه برخورد موج ۱۸۰ درجه.

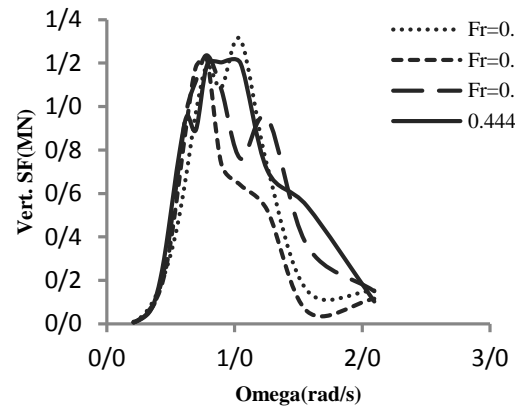
### ۳-۲- نیروی برشی قائم

شکل (۶) رانوی نیروی برشی قائم را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل نیروی برشی قائم با افزایش فرکانس بصورت غیرخطی برای تمام مقادیر سرعت افزایش پیدا کرده و در فرکانس ۱/۵۷ رادیان بر ثانیه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. بیشترین مقدار مربوط به سرعت ۳۰ گره و کمترین مقدار مربوط به سرعت ۱۰ گره است.

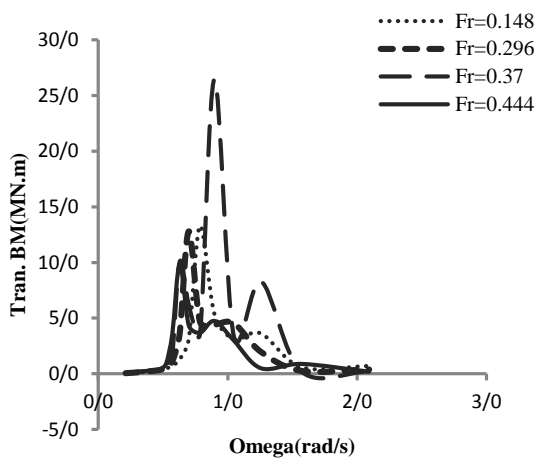
بعد از فرکانس ۱/۵۷ رادیان بر ثانیه مقادیر نیروی برشی قائم بصورت خطی کاهش پیدا کرده و در فرکانس ۲/۱ رادیان بر ثانیه دارای مقدار یکسان برای هر چهار سرعت خواهد بود. می‌توان نتیجه گرفت با افزایش سرعت، از مقدار ۱۰ گره تا ۳۰ گره ماکزیمم مقدار نیروی برشی قائم افزایش پیدا می‌کند. شکل (۷) وضعیت برخورد موج به صورت مورب به شناور را نشان می‌دهد. با توجه به شکل منحنی‌ها از مقادیر پایین فرکانس از یکدیگر جدا شده بصورت غیرخطی تغییر پیدا کرده و دارای پیچ خوردگی در بعضی از فرکانس‌ها خواهند



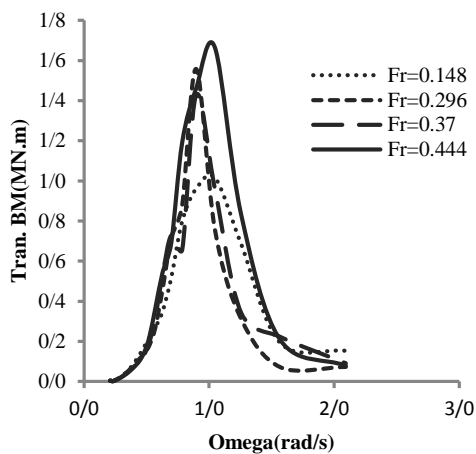
شکل (۹) رانوی گشتاور خمشی عرضی در زاویه برخورد موج ۹۰ درجه.



شکل (۸) رانوی نیروی برشی قائم در زاویه برخورد موج ۱۸۰ درجه.



شکل (۱۰) رانوی گشتاور خمشی عرضی در زاویه برخورد موج ۱۳۵ درجه.



شکل (۱۱) رانوی گشتاور خمشی عرضی در زاویه برخورد موج ۱۸۰ درجه.

حداکثر مقدار مربوط به سرعت ۳۰ گره و حداقل مقدار در سرعت ۱۰ گره رخ می‌دهد. مقادیر حداکثر در این وضعیت در مقایسه با دو وضعیت دیگر برخورد موج از مقادیر بسیار کمتر حدود ۱۰ درصد مقادیر برخوردار است.

### ۳-۳- گشتاور خمشی عرضی

گشتاور خمشی عرضی وقتی رخ می‌دهد که در اثر موج، بدنه‌های کناری به سمت بدنه اصلی و بیرون از آن حرکت می‌کنند. دو نوع گشتاور خمشی عرضی وجود دارد. در گشتاور خمشی هاگینگ بدنه‌های کناری بطور کامل از آب خارج می‌شوند و در گشتاور خمشی سگینگ بدنه‌های کناری عمیقاً در آب فرو می‌روند. در نظر گرفتن این بارها در تعیین ابعاد سازه عرشه عرضی اهمیت ویژه‌ای دارند.

شکل (۹) نمودار رانوی گشتاور خمشی عرضی را در حوزه فرکانس در مرکز عرشه عرضی شناور تریماران در وضعیت برخورد موج کناری به شناور نشان می‌دهد.

با توجه به شکل هر چهار منحنی بر هم منطبق بوده و مقادیر حداکثر گشتاور خمشی عرضی در سرعت‌های ۲۵ و ۲۰ و ۳۰ یکسان و برابر ۲۵/۲۷ مگانیوتن بر متر بوده و در فرکانس ۱ رادیان بر ثانیه رخ می‌دهد. این مقدار برای سرعت ۱۰ گره برابر ۲۳/۲۵ مگانیوتن بر متر است. شکل (۱۰) رانوی گشتاور خمشی عرضی در حالت موج مورب را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها رابطه گشتاور با فرکانس بصورت غیرخطی است که پیچ خوردگی در آن در بعضی از فرکانس‌ها اتفاق می‌افتد. حداکثر مقدار مربوط به سرعت ۲۵ گره دریایی بوده و برابر ۲۶/۵ است. در مقایسه با زاویه برخورد ۹۰ درجه مقادیر گشتاور در سرعت‌های ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ از مقادیر کمتری برخوردار است.

با توجه به شکل (۱۱) در این وضعیت از برخورد موج به سازه شناور، مقادیر گشتاور خمشی با افزایش فرکانس بصورت غیرخطی افزایش پیدا می‌کند و در محدوده فرکانسی ۱ به مقادیر ماکزیمم می‌رسد و بعد از آن کاهش می‌یابد.



## ۳-۴- گشتاور پیچشی عرضی

گشتاور پیچشی عرضی به همراه سایر بارهای عرضی برای استخراج ابعاد سازه عرشه عرضی به کار می‌روند.

شکل (۱۲) رانوی گشتاور پیچشی عرضی را در مرکز عرشه عرضی شناور تریماران در وضعیت برخورد موج کناری نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۲) هر چهار منحنی بر هم منطبق بوده و مقادیر حداکثر گشتاور در سرعت‌های ۲۵ و ۲۰ و ۳۰ یکسان و برابر ۲۹/۸ مگانیوتن بر متر بوده و در فرکانس ۱ رادیان بر ثانیه رخ می‌دهد. این مقدار برای سرعت ۱۰ گره برابر ۲۸/۳۴ مگانیوتن بر متر است. ملاحظه می‌گردد تغییرات گشتاور در این حالت تقریباً مستقل از سرعت بوده و وابسته به فرکانس موج است.

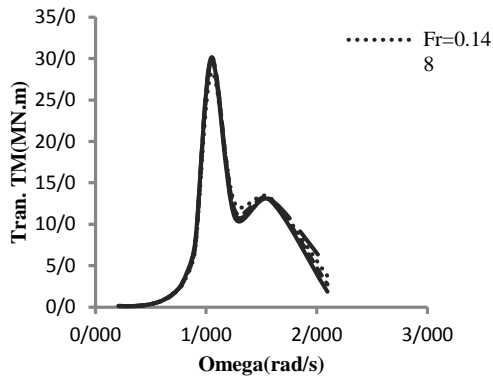
شکل (۱۳) رانوی گشتاور پیچشی عرضی در حالت موج مورب را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها رابطه گشتاورها با فرکانس بصورت غیرخطی است و منحنی دارای پیچ خوردگی در بعضی از فرکانس‌ها است. حداکثر مقدار مربوط به سرعت ۲۵ گره دریایی و برابر ۱۹/۱۴ مگانیوتن بر متر است که در فرکانس ۰/۹ رادیان بر ثانیه اتفاق می‌افتد. مقادیر گشتاور در سرعت‌های ۱۰ و ۲۰ و ۳۰، تقریباً نصف مقادیر در زاویه برخورد ۹۰ درجه است.

شکل (۱۴) پاسخ سازه عرشه عرضی به موج سینه را نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس مقادیر گشتاور پیچشی بصورت غیرخطی افزایش پیدا کرده و در محدوده فرکانسی ۱ رادیان بر ثانیه به حداکثر می‌رسد. بعد از نقاط ماکزیمم منحنی‌ها بصورت غیرخطی کاهش پیدا می‌کنند. حداکثر مقدار مربوط به سرعت ۳۰ گره و برابر ۹/۶۸ مگانیوتن بر متر بوده و کمترین مقدار مربوط به سرعت ۱۰ گره است.

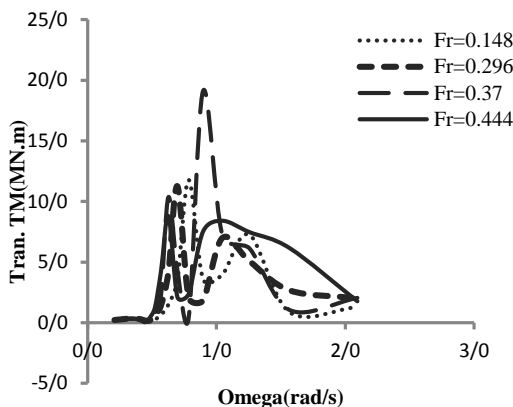
در این حالت از برخورد موج نیز منحنی‌ها از هم جدا شده و دارای پیچ خوردگی در بعضی از فرکانس‌ها خواهند بود. به طور کلی روند تغییرات گشتاور پیچشی عرضی در سه وضعیت برخورد موج دارای پاسخ مشابه‌ای با گشتاور خمشی عرضی است فقط مقادیر حداکثر گشتاور متفاوت است.

## ۳-۵- نیروی برشی عرضی

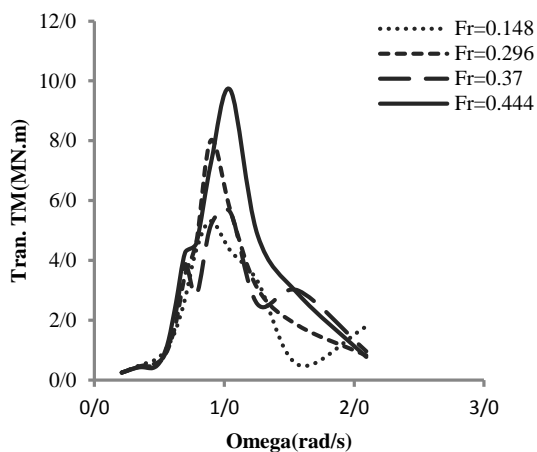
با توجه به شکل (۱۵) هر چهار منحنی نیروی برشی عرضی در زاویه برخورد ۹۰ درجه بر هم منطبق بوده و مقادیر حداکثر در سرعت‌های ۲۵ و ۲۰ و ۳۰ یکسان و برابر ۱/۵۴ مگانیوتن بوده و در فرکانس ۱ رخ می‌دهد.



شکل (۱۲) رانوی گشتاور پیچشی عرضی در زاویه برخورد موج ۹۰ درجه.



شکل (۱۳) رانوی گشتاور پیچشی عرضی در زاویه برخورد موج ۹۰ درجه.



شکل (۱۴) رانوی گشتاور پیچشی عرضی در زاویه برخورد موج ۱۸۰ درجه.

این مقدار برای سرعت ۱۰ گره برابر ۱/۴۳ مگانیوتن است. می‌توان گفت روند تغییرات نیروی برشی مستقل از سرعت است.

شکل (۱۶) رانوی نیروی برشی عرضی در حالت موج مورب را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها رابطه نیروها با فرکانس

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بارهای وارد بر عرشه عرضی شناور تریماران در حوزه فرکانس به کمک نرم افزار ماسترو تحلیل گردید. مهمترین نتایج این تحقیق بشرح ذیل است:

۱- در وضعیت برخورد موج با زاویه ۹۰ درجه به شناور مقادیر نیروها و گشتاورها مستقل از سرعت بوده و فقط به فرکانس موج بستگی دارند. در این وضعیت مقادیر حداکثر گشتاور خمشی و نیروی برشی قائم در فرکانس

۱/۵۷ رادیان بر ثانیه و گشتاور خمشی، پیچشی و نیروی برشی عرضی در فرکانس ۱ رادیان بر ثانیه رخ میدهد.

۲- مقادیر حداکثر گشتاور خمشی، پیچشی و نیروی برشی عرضی با تغییر جهت برخورد موج از ۹۰ به ۱۸۰ کاهش پیدا کرده و مقادیر گشتاور خمشی قائم افزایش می‌یابد.

۳- در وضعیت موج کناری روند تغییرات گشتاور خمشی، گشتاور پیچشی و نیروی برشی عرضی با فرکانس موج مشابه یکدیگر بوده و هر چهار منحنی مربوط به سرعت‌ها بر هم منطبق هستند و فقط مقادیر ماکزیمم متفاوت است. در نتیجه گشتاورها و نیروها در یک فرکانس، فرکانس ۱ رادیان بر ثانیه به حداکثر می‌رسند.

۴- در سرعت ۲۵ گره و در زاویه برخورد ۱۳۵ درجه مقادیر گشتاور خمشی، پیچشی و نیروی برشی عرضی ماکزیمم تقریباً دو برابر این مقادیر در سرعت‌های دیگر است.

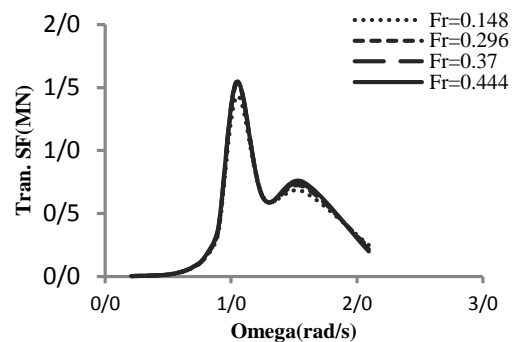
۵- وجود پیچ خوردگی در منحنی‌های پاسخ سازه به موج نتیجه کوپل شدن حرکات شناور با نیروها و گشتاورها است.

۶- در یک سرعت مشخص مقادیر ماکزیمم نیروها و گشتاورها در حالت برخورد موج کناری به شناور در فرکانس‌های بالاتر در مقایسه با دو وضعیت دیگر اتفاق می‌افتد.

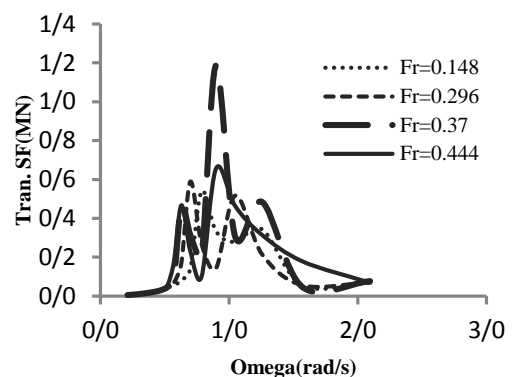
## ۵- مراجع

- [1] Akbari, K. "Investigation of Effective Global Loads Acting on a Multi Hull Ship and Residual Strength after Damage in Different Damage Scenarios". Doctoral Dissertation, Department of Naval Engineering, University of Amirkabir, Iran, 2014.
- [2] Cheng, F., Mayoss, C., and Blanchard, T., "The Development of Trimaran Rules", Lloyd's Register Technical Papers, 2006.
- [3] Rhoads, J. L. "Structural Loading of Cross Deck Connections for Trimaran Vessels," MSc. Naval Engineering Dissertation, The Department of Ocean Engineering, University of California, Berkeley, 2004.

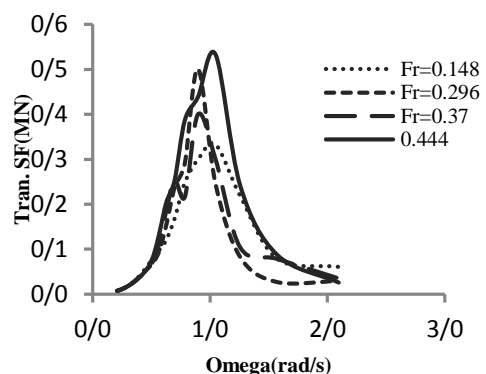
بصورت غیرخطی و دارای پیچ خوردگی در بعضی از فرکانس‌ها است. حداکثر مقدار مربوط به سرعت ۲۵ گره دریایی و برابر ۱/۱۸ مگانیوتن است که در فرکانس ۰/۹ اتفاق می‌افتد. شکل (۱۷) پاسخ سازه عرضی به موج سینه را نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس موج مقادیر نیروی برشی بصورت غیرخطی افزایش می‌یابد. در محدوده فرکانسی ۱ به حداکثر می‌رسد. حداکثر مقدار در سرعت ۳۰ گره و برابر ۰/۵۳ مگا نیوتن بوده و کمترین مقدار در سرعت ۱۰ گره ۰/۳۳ است.



شکل (۱۵) رانوی نیروی برشی عرضی در زاویه برخورد موج ۹۰ درجه.



شکل (۱۶) رانوی نیروی برشی عرضی در زاویه برخورد موج ۱۳۵ درجه.



شکل (۱۷) رانوی نیروی برشی عرضی در زاویه برخورد موج ۱۸۰ درجه.

- [4] Fang, M.C., and Chen, T.Y., "A Parametric Study of Wave Loads on Trimaran Ships Traveling in Waves", *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 749-762, 2008.
- [5] Xu, M. and Zhang, S. L., "A Numerical Study on Side Hull Optimization for Trimaran", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 23, No. 2, pp. 265-272, 2010.
- [6] Liang, WX., Jun, HJ., Kang, GX., Choo, GY., and Chun, XU., "Comparative Studies of the Transverse Structure Design Wave Load for a Trimaran by Model Test and Rule Calculations", *Jornal of Ship Mechanics*, Vol. 15, No. 3, pp. 269-274, 2011.
- [7] Ren, H., Zhen, C., Li, C. and Feng, G., "Study on Structural Form Design of Trimaran Cross-Deck", *ASME Conference Proceedings*, Vol. 2, No. 12, pp. 631-636, 2012.
- [8] Dobashi, J., "Influence of Side Hull Arrangement for Wave Loads Acting on Cross Deck of Trimaran", *Journal of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol. 20, pp. 69-75, 2014.
- [9] Fuentes, D., Salas, M., Tampier, G., and Troncoso, C., "Structural Design and Optimisation of an Aluminium Trimaran", *Jornal of Analysis and Design of Marine Structures*, Vol. 62, pp. 545-553, 2015.
- [10] Mastro. "Maestro User Manual", Version, 10.0.0, Roteus Engineering, Maryland, USA, (2012).
- [11] Bashir, M. B., Tao, L., Atlar, M. and Dow, R. S. "Hydrodynamic Performance of a Deep-vee Hull Form Catamaran in Regular Waves", *ASME Conference Proceedings*, Vol. 6, No. 11, pp. 45-54, 2011.
- [12] Matsubara, S., "Ship Motions and Wave-induced Loadson High-Speed Catamarans", *Doctoral Dissertation*, The University of Tasmania, Australia, 2011.