

بررسی اثر طول موج و زاویه برخورد بر مقاومت اضافی کشتی در موج منظم

شهرزاد نیکبخت، احمد حاجیوند*، مصطفی جعفرزاده خطیبانی

دانشکده مهندسی دریا دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر؛

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۳۰

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2017.88599.2015](https://doi.org/10.22113/jmst.2017.88599.2015)

چکیده

توان مورد نیاز برای حرکت کشتی در شرایط طبیعی دریا به دلیل مقاومت اضافی ناشی از موج به شدت افزایش پیدا می‌کند. دامنه بزرگی این مقاومت اضافی بین ۱۵ تا ۳۰ درصد مقاومت کل کشتی در آب آرام می باشد که کاهش آن نه تنها سبب صرفه جویی در مصرف سوخت و حصول سرعت ایمن شناور می‌گردد بلکه تاثیر بسزایی در کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای خواهد داشت. روش‌های عددی ویسکوز و غیرویسکوز متعددی مانند تئوری نواری، روش پانل و روش متوسط زمانی ناویر استوکس برای تخمین مقاومت اضافی کشتی وجود دارد. با توجه به دقت و هزینه محاسبات، روش سه بعدی پانل بهترین گزینه برای بررسی رفتار شناور در موج است. در این تحقیق با استفاده از روش سه بعدی پانل تابع گرین حوزه فرکانس مقاومت اضافی شناور کانتینربر اس-۱۷۵ با دو دیدگاه میدان دور و میدان نزدیک محاسبه شده است. برای بررسی اثر جهت برخورد و طول موج بر مقاومت اضافی، محاسبات در زوایای مختلف برخورد و طول موج‌های مختلف انجام شده است. همچنین با استفاده از یک روش دقیق، سریع و معتبر شده تجربی که به‌تازگی ارائه شده است نیز مقاومت اضافی در حالت برخورد موج از روبرو برای طول موج‌های مختلف در سرعت‌های متفاوت پیشروی محاسبه شده است. در دو حالت، نتایج روش میدان دور و میدان نزدیک با دقت بسیار خوبی تطابق دارند. نتایج روش عددی و تجربی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است که دقت بالای روش ارائه شده در این تحقیق با داده های تجربی را بیان می‌دارد، همچنین مشاهده گردید که خطای روش تجربی با افزایش سرعت پیشروی بیشتر می‌شود.

واژگان کلیدی: مقاومت اضافی، روش پانل، روش میدان دور، روش میدان نزدیک، روش تجربی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: hajivand@kmsu.ac.ir

۱. مقدمه

با الزامی شدن فصل چهارم از ضمیمه ششم کنوانسیون مارپل^۱ و انطباق کشتی های نوساز با الزامات شاخص طراحی بهره‌وری انرژی^۲، تخمین و پیش بینی مقاومت اضافی ناشی از باد و موج در شرایط دریایی برای طراحان کشتی اهمیت بسزایی یافته است. برای در نظر گرفتن اثر موج بر مقاومت کشتی معمولاً یک درصد حاشیه به مقاومت آب آرام اضافه می‌شود، در حالیکه محاسبه دقیق این پدیده دقت محاسبات را افزایش می‌دهد. مقاومت اضافی دریا به نوع شناور و شرایط محیطی مانند جهت برخورد موج و طول موج بستگی دارد. مطالعه رفتار شناور در شرایط دریایی مختلف می‌تواند پیش‌بینی دقیقی از میزان توان مورد نیاز برای جلوگیری از کاهش سرعت در شرایط مختلف را ارائه کند.

در دهه‌های گذشته، مساله مقاومت اضافی با دیدگاههای آزمایشگاهی و عددی متعددی مطالعه شده است.

(Havelock, 1942) اولین تلاش‌ها را برای به دست آوردن مقاومت اضافی یک شناور به صورت تحلیلی برای هندسه‌های بیضیگون و کروی انجام داد. (Maruo, 1961) محقق دیگری بود که محاسبات مربوط به مقاومت اضافی را توسعه داد. او مؤلفه‌های عرضی و طولی نیروی موج مرتبه دوم متوسط افقی برای یک کشتی در امواج منظم را محاسبه کرد. ماریو از قانون بقای مومنوم و انرژی و تئوری جریان پتانسیل برای این امر استفاده کرد.

(Goodman, 1965) با استفاده از روش انتگرال‌گیری مستقیم فشار روی بدنه، نیروی عمودی متوسط مرتبه دوم را روی یک استوانه مغروق محاسبه کرد. این استوانه در امواج منظم از روبرو و پهلو برای

طول موج‌های برابر با قطر استوانه، مورد بررسی قرار گرفت. در این باره مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده، انجام نشد. (Newman, 1967) با استفاده از تئوری مومنوم و روابط ارائه شده توسط ماریو، علاوه بر نیروی افقی مرتبه دوم، ممان عمودی مرتبه دوم را نیز برای یک جسم دلخواه و مخصوصاً یک کشتی لاغر در امواج منظم محاسبه کرد.

(Gerritsma and Beukelman, 1971) مقاومت اضافی را روی مدل‌های سری ۶۰ محاسبه کردند. (Faltinsen, 1980) با استفاده از تئوری پتانسیل و روش انتگرال‌گیری مستقیم فشار، مقاومت اضافی را برای یک کشتی محاسبه کردند. او یک فرمول ساده شده نیز برای محاسبه مقاومت اضافی در طول موج‌های کوتاه ارائه داد که تداخل بین امواج منعکس شده و جریان یکنواخت اطراف کشتی را بسیار خوب مدل می‌کرد. (Pinkster, 1979) نیروها و ممان‌های مرتبه دوم را با استفاده از روش انتگرال‌گیری مستقیم فشار در فرکانس‌های مختلف محاسبه کردند. به طور کلی دو دیدگاه عددی برای بررسی مساله مقاومت اضافی وجود دارد: روش‌های میدان دور و میدان نزدیک. در روش‌های میدان دور بر مبنای اصل بقای مومنوم، تغییرات در مومنوم سیال برابر با نیروی متوسط وارد بر شناور در نظر گرفته می‌شود. در روش‌های میدان نزدیک با انتگرال‌گیری مستقیم فشار، با استفاده از تئوری پتانسیل و روش آشفتگی، پتانسیل سرعت مرتبه اول و فشار مرتبه دوم محاسبه و در نتیجه مقاومت اضافی به دست می‌آید. هر دو دیدگاه بر مبنای تئوری جریان غیر ویسکوز است که با توجه به ماهیت فشاری نیروی ناشی از موج و تاثیر بسیار کم ویسکوزیته دیدگاه مناسبی برای این مساله است. مقاومت اضافی، نیروی متوسط رانشی موج است که با توان دوم دامنه موج ارتباط دارد و برای محاسبه آن با استفاده از دو روش میدان دور و نزدیک نیاز است که ابتدا مساله مرتبه اول و خطی برخورد موج به کشتی

¹ MARPOL, Annex VI, Chapter 4: Regulations on energy efficiency for ships

² Energy Efficiency Design Index (EEDI)

نیروهای پایای رانشی^۱ هستند، با توان دوم دامنه موج برخوردی متناسب هستند. این نیروها ماهیت غیرخطی و غیر نوسانی داشته و باعث جابجایی شناور و مقاومت اضافی در موج می‌شوند. برای محاسبه اثرات غیرخطی موج بر شناور ابتدا باید اثرات خطی آن تعیین شود. روش‌های غیرویسکوز متعددی برای حل مساله خطی دریامانی وجود دارد که در حالت کلی به دو دسته تئوری نواری و روش پانل تقسیم می‌شوند.

روش‌های تئوری نواری برای بدنه‌های سیلندری در سرعت‌های پیشروی پایین در معرض برخورد امواج فرکانس بالا کاربرد دارد و ایده آن انتگرال‌گیری حل مقاطع دوبعدی در طول شناور است. روش‌های سه-بعدی پانل متداول‌ترین ابزار برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی وسایل دریایی در موج است. این روش-ها بر مبنای تئوری جریان پتانسیل هستند و سطح جسم را به المان‌های چندضلعی تقسیم کرده و با توزیع جریان‌های ساده پتانسیل مانند چشمه، گردابه و دوقطبی توزیع پتانسیل سرعت و فشار روی بدنه را محاسبه می‌کنند.

مساله خطی حرکت کشتی در موج یک مساله مقدار مرزی است که شامل معادله حاکم و مجموعه‌ای از شرایط مرزی است. معادله حاکم بر جریان ایدآل معادله لاپلاس است که در تمام محدوده محاسباتی معتبر است.

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial Z^2} = 0 \quad (1)$$

شرط مرزی خطی شده سطح آزاد برای حالت بدون سرعت پیشروی به صورت (۲) بیان می‌شود.

$$-\omega^2\varphi + g\frac{\partial\varphi}{\partial Z} = 0 \text{ on } Z = 0 \quad (2)$$

حل شود. دو روش کلی تئوری نواری دوبعدی و تئوری پانل سه‌بعدی برای این منظور وجود دارد. البته با توسعه توان سخت‌افزاری کامپیوترها، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در حل مسائل دریامانی افزایش پیدا کرده است که زمان محاسباتی برای این روش بسیار زیاد است و در طراحی بهینه مراحل مقدماتی کاربرد ندارد.

در مطالعه حاضر، مقاومت اضافی موج برای شناور کانتینربر اس-۱۷۵ با استفاده از روش سه بعدی پانل تابع گرین در محیط نرم‌افزار آکوا با دو روش میدان دور و میدان نزدیک محاسبه شده است. مقاومت اضافی تابعی از مشخصات موج برخوردی شامل طول موج و زاویه برخورد است. برای بررسی اثر این مشخصات شبیه‌سازی‌ها در زوایای مختلف برخورد و طول موج‌های مختلف انجام شده است. همچنین تمام محاسبات در دو حالت سکون و متحرک انجام شده است. در دو حالت نتایج روش میدان دور و میدان نزدیک با دقت بسیار خوبی تطابق دارند. این نتایج همچنین با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است که دقت بالای نتایج به-دست آمده را نشان می‌دهد.

علاوه‌براین با کمک یک روش تجربی دقیق مقاومت اضافی در حالت برخورد موج از روبرو در سرعت‌های پیشروی مختلف در طول موج‌های گوناگون محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

مساله مقدار مرزی

نیروهای هیدرودینامیکی وارد به یک شناور دریایی در موج به دو دسته نیروهای خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. نیروهای خطی، نوسانی و ناپایا هستند و متناسب با دامنه موج برخوردی بوده اما نیروهای غیرخطی که شامل نیروهای مرتبه بالا نوسانی و

¹ Drift

معتبر برای در نظر گرفتن اثر سرعت پیشروی استفاده شده است. در این تصحیح که برای اعداد فرود کمتر از 0.3 قابل استفاده است شرط مرزی سطح آزاد به صورت (۶) باز تعریف می‌شود.

$$-\omega_e^2 \varphi + g \frac{\partial \varphi}{\partial Z} = 0 \quad (6)$$

که در این رابطه ω_e فرکانس برخوردی موج است که به صورت رابطه (۷) با فرکانس موج ارتباط دارد.

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 U}{g} \cos \beta \quad (7)$$

پس از حل مساله خطی موج و محاسبه پتانسیل سرعت مرتبه اول موج با کمک روش‌های میدان دور و میدان نزدیک پتانسیل سرعت غیرخطی مرتبه دوم محاسبه و با استفاده از آن مقاومت اضافی موج در شرایط مختلف قابل محاسبه است. در روش میدان نزدیک با انتگرال‌گیری مستقیم فشار سیال مرتبه دوم وارد بر بدنه شناور از رابطه (۸) مقاومت اضافی شناور به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} R_{AW} = & - \int_{WL}^1 \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^{(1)2} \cdot \bar{n} \cdot dl + \bar{\alpha}^{(1)} \\ & \times (M \cdot \bar{X}_g^{(1)}) \\ & - \iint_{S_0} \left\{ -\frac{1}{2} \rho |\bar{\nabla} \varphi^{(1)}|^2 - \rho \varphi_t^{(2)} \right. \\ & \left. - \rho (\bar{X}^{(1)} \cdot \bar{\nabla} \varphi_t^{(1)}) \right\} \bar{n} \cdot ds \\ & - \iint_{S_0} -\rho g X_3^{(2)} \cdot \bar{n} \cdot ds + \bar{\alpha}^{(2)} \\ & \times (0, 0, \rho g V) \end{aligned} \quad (8)$$

که در این روش سطح خیس شناور در هر لحظه است به دو بخش تقسیم می‌شود: یک قسمت ثابت S_0 شامل سطح زیر آب تا خط آب استاتیکی و قسمت نوسانی s بین خط آب استاتیکی روی بدنه و پروفایل موج روی بدنه و \bar{n} بردار نرمال لحظه ای وارد بر المان ds است. ترم اول انتگرال روی خط آب است.

و شرط مرزی روی جسم برای پتانسیل تشعشی و پراکندگی به صورت رابطه (۳)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega n_j & \text{پتانسیل تشعشی} \\ -\frac{\partial \varphi}{\partial n} & \text{پتانسیل پراکندگی} \end{cases} \quad (3)$$

و شرط مرزی کف دریا به صورت رابطه (۴)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial Z} = 0 \text{ on } Z = -d \quad (4)$$

و در نهایت شرط مرزی بی‌نهایت که بیان کننده میرایی اغتشاشات در دور دست است، با رابطه (۵) بیان می‌گردد.

$$\sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty \quad (5)$$

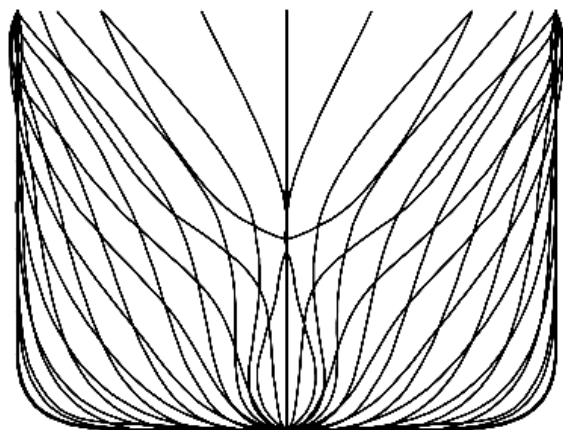
برای حل این مساله مقدار مرزی از دیدگاه انتگرال مرزی در حوزه فرکانس استفاده می‌شود. برای برقراری شرایط مرزی سطح آزاد، کف دریا و دور دست و عدم توزیع چشمه روی این مرزها از تابع گرین ضربان‌دار^۱ استفاده شده است [۸]. برای حل معادله المان مرزی به دست آمده از روش پانل ثابت هس-اسمیت^۲ استفاده شده است. در این روش سطح خیس متوسط بدنه شناور به المان‌های چهار ضلعی و یا مثلثی تقسیم می‌شود و در هر المان یک چشمه با قدرت ثابت اختصاص داده می‌شود. در نتیجه معادله انتگرال مرزی گرین به صورت یک دستگاه معادلات جبری بیان می‌شود که با روش‌های متداول حل دستگاه حل شده و پتانسیل سرعت در هر المان به دست می‌آید.

در بسیاری از روش‌های دوبعدی و سه‌بعدی حل مساله خطی دریامانی اثر سرعت پیشروی در نظر گرفته نمی‌شود. در روش المان مرزی نرم‌افزار آکوا از یک تصحیح

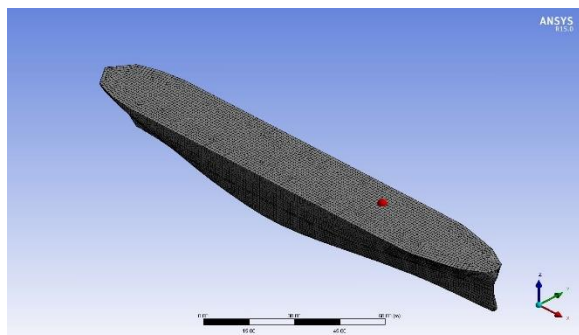
¹ Pulsating Green's function

² Hess-Smith

آبخور	۹,۵	متر
جابجایی	۲۴۷۳۹	مترمکعب
ضریب ظرافت	۰,۵۷۲	[-]



شکل ۱ خطوط بدنه شناور کانتینر بر اس-۱۷۵



شکل ۲ شبکه چندضلعی تولیدشده روی بدنه شناور کانتینر بر اس-۱۷۵

ابتدا محاسبات هیدرواستاتیک شناور انجام شده است که در جدول ۲ مشخصات به دست آمده برای هیدرواستاتیک شناور ارائه شده است.

۳. نتایج شبیه سازی با روش سه بعدی پانل

شبیه سازی ها در زوایای برخورد مختلف انجام شده است. برای افزایش دقت محاسبات و بررسی دقیق اثر زاویه

در روش میدان دور با تکیه بر این نکته که در یک سیستم با حرکت پریودیک تغییر خالص مومنوم صفر است. نتیجه گرفته می شود که نیرویی که از تغییرات مومنوم در یک دوره تناوب روی حجم کنترل متحرک اطراف کشتی به دست می آید برابر با مقاومت اضافی است (که یک نیروی غیر پریودیک است). در نتیجه با متوسط گیری از رابطه تغییرات مومنوم روی یک دوره تناوب نوسان و در نظر گرفتن این نکته که مقدار متوسط زمانی dm/dt صفر است، نیروی مقاومت اضافی به صورت (۹) به دست می آید.

$$R_{AW} = \int_{S_{\infty}} [p \cos(n, x) + \rho V_x V_n] ds \quad (9)$$

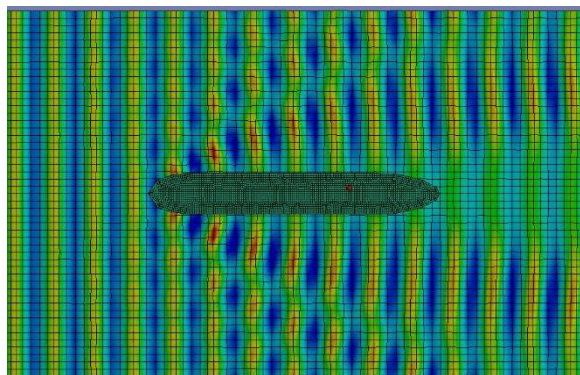
۱-۲ معرفی مدل

مقاومت اضافی برای شناور کانتینر بر اس-۱۷۵ با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ و هندسه شکل ۱ در دو حالت سکون و در حرکت با دو روش میدان دور و میدان نزدیک در طول موج های مختلف و زوایای برخورد متفاوت محاسبه شده است.

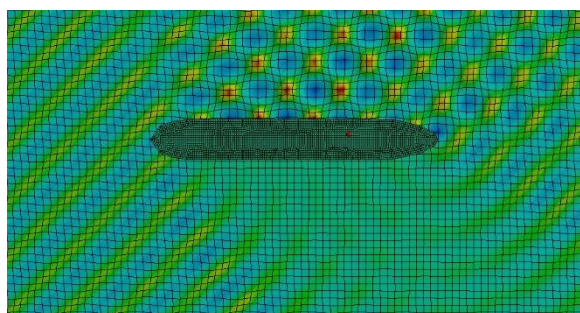
همانطور که قبلا بیان شد در روش المان مرزی انتگرال گرین بدنه شناور به المان های کوچکی تقسیم بندی می شود و با توزیع سینگلاریتی های مناسب در مرکز این المان ها و حل دستگاه معادلات جبری به دست آمده توزیع پتانسیل سرعت محاسبه می شود. در شکل ۲ تصویر بدنه شبکه بندی شده کشتی کانتینر بر اس-۱۷۵ در نرم افزار آکوا مشاهده می شود. تعداد المان های مثلثی بدنه برابر ۱۶۴۸۴ است.

جدول (۱) مشخصات هندسی بدنه شناور کانتینر

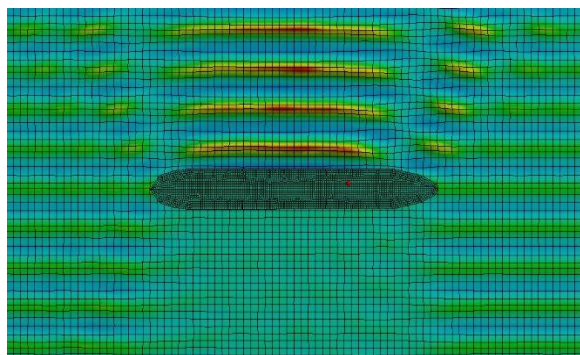
بر اس-۱۷۵		
طول	۱۷۵	متر
عرض	۲۵,۴	متر



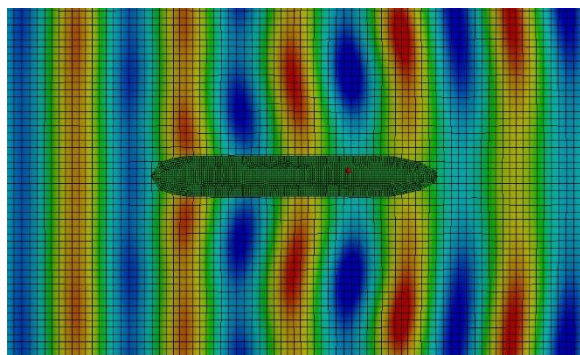
شکل ۳ زاویه برخورد صفر درجه، طول موج 0.2L



شکل ۴ زاویه برخورد -۴۵ درجه، طول موج 0.2L



شکل ۵ زاویه برخورد -۹۰ درجه، طول موج 0.2L



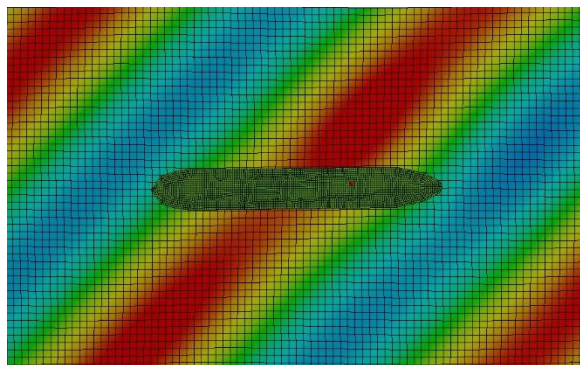
برخورد بر میزان مقاومت اضافی شبیه‌سازی‌ها بافاصله ۵ درجه از صفر تا ۱۸۰ درجه انجام شده است.

جدول (۲) مشخصات هیدرو استاتیک شناور کانتینر بر

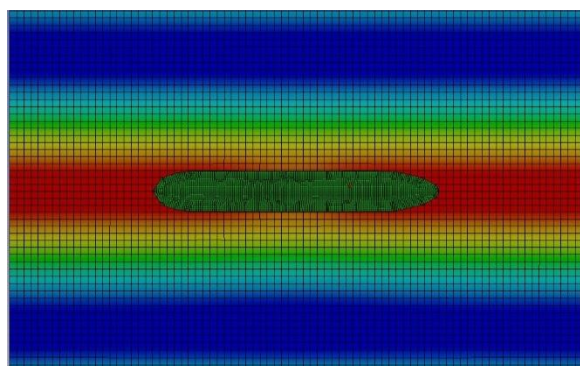
اس-۱۷۵

مرکز جرم	X: -90.181m	Y: 0m	Z: -3 m
حجم جابجایی واقعی	23929.766m ³		
حجم جابجایی معادل	23802.277m ³		
مرکز بویانسی	X: -90.112 m	Y: 0 m	Z: -4.269 m
مساحت صفحه آبخور	3153.7227 m ²		
مرکز شناوری	X: -94.5 m	Y: 0 m	
ممان دوم سطح	X: 127520.434 m ⁴	Y: 4987542.5 m ⁴	
ارتفاع متاسنتر عرضی	4.064 m		
ارتفاع متاسنتر طولی	207.1592 m		

در شکل‌های ۳ تا ۱۱ توزیع سطح آزاد موج منتشر شده با طول موج‌های مختلف برای زوایای برخورد مختلف در اطراف بدنه شناور ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در زوایای برخورد عرضی (۴۵- و ۹۰-) وجود کشتی باعث خنثی شدن اثر موج بعد از بدنه می‌شود و در زوایای برخورد موج از روبرو یا پاشنه امواج مشابه امواج کلون در آب آرام پراکنده می‌گردند.



شکل ۱۰ زاویه برخورد ۴۵- درجه، طول موج L

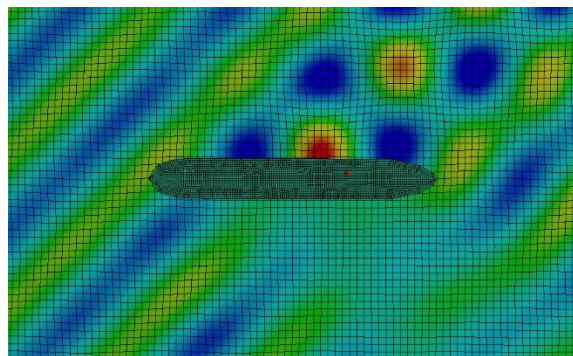


شکل ۱۱ زاویه برخورد ۹۰- درجه، طول موج L

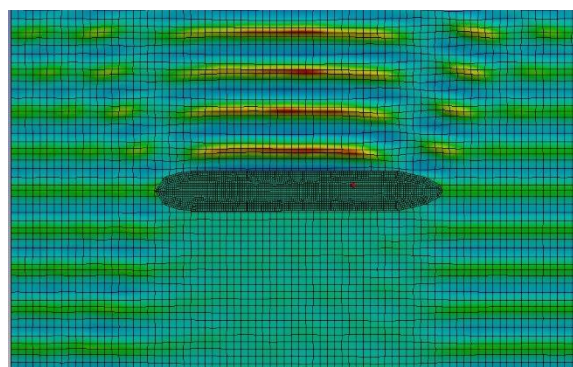
زاویه برخورد موج با کشتی در دریا مشخص نیست به همین منظور نیاز است که اثر موج بر کشتی در زوایای برخوردی مختلف بررسی شود و مقاومت اضافی در این شرایط محاسبه شود و بیشترین مقدار مقاومت و زاویه وقوع آن مشخص شود. در ادامه نتایج برای مقاومت اضافی بر حسب زاویه برخورد با دو روش میدان دور و نزدیک برای کشتی کانتینربر اس-۱۷۵ ارائه شده است. از آنجا که اعتبار نتایج روش‌های المان مرزی در شرایط سکون و سرعت پایین است ($Fn < 0.3$)، شبیه‌سازی‌ها در دو حالت سکون و سرعت پایین ($Fn = 0.15$) انجام شده است. ابتدا نتایج مربوط به حالت سکون ارائه گردیده است.

نتایج ارائه شده برای موج منظم با دامنه واحد است. با توجه به رابطه خطی نیروهای مرتبه اول شامل فرود کریلوف و پراکندگی در صورتی که موج برخوردی با دامنه دلخواه با شناور برخورد کند دامنه نیروی خطی

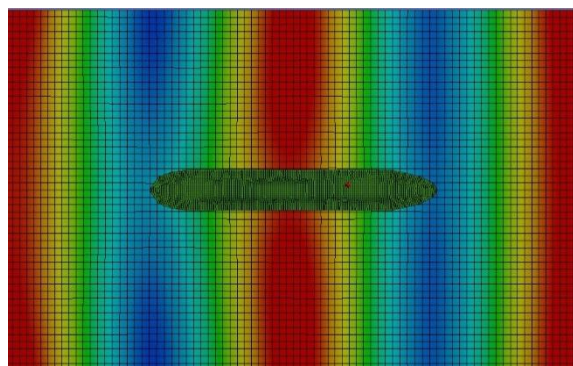
شکل ۶ زاویه برخورد صفر درجه، طول موج 0.5L



شکل ۷ زاویه برخورد ۴۵- درجه، طول موج 0.5L



شکل ۸ زاویه برخورد ۹۰- درجه، طول موج 0.5L



شکل ۹ زاویه برخورد صفر درجه، طول موج L

سمت صفر میل می‌کند. همچنین در زوایای برخورد موج از پاشنه مقدار نیروی مقاومت اضافی به‌گونه‌ای است که حتی به رانش شناور هم کمک می‌کند. البته لازم به یادآوری است که این شرایط یعنی برخورد موج از پاشنه از منظر دریامانی می‌تواند حالت بسیار خطرناکی باشد و باعث رخ دادن پدیده‌های نامطلوبی مانند خروج پروانه از آب و بروچینگ^۱ شود. در جدول ۳ مقایسه عددی میدان دور و نزدیک ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف بین خروجی‌های دو روش به طور متوسط ۲۴ درصد است. این اختلاف ناشی از محدودیت‌های روش میدان دور و نزدیک در حل مساله مقدار مرزی در زوایای مختلف تابش موج است.

جدول (۳) مقایسه مقاومت اضافی دو روش میدان دور و نزدیک در حالت سکون

درصد خطا	$R_{x, Far}$	$R_{x, Near}$	زاویه برخورد
۲۰	۴۴۱۸	۵۵۰۶	۰
۱۸	۳۶۲۴	۴۴۱۳	۲۰
۱۴	۱۸۰۵	۲۱۰۷	۴۰
۲۹	۸۲۶	۱۱۶۴	۶۰
۱۵	۶۴۱	۷۵۸	۸۰
۳۶	-۶۳۷	-۴۶۹	۱۰۰
۴۲	-۲۵۴۵	-۱۷۹۴	۱۴۰
۲۰	-۴۶۷۲	-۳۹۰۱	۱۶۰
۲۴	-۵۹۲۵	-۴۷۶۳	۱۸۰

۴-۲- محاسبه مقاومت اضافی در حالت سکون

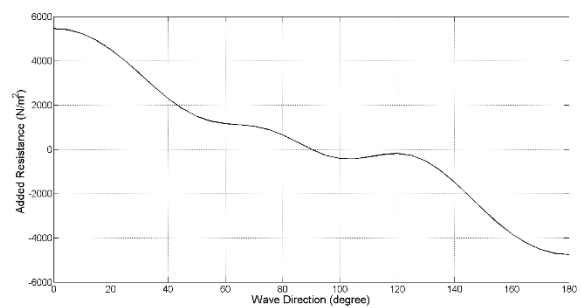
برحسب طول موج

در این بخش شناور در معرض موج منظم با طول موج‌های مختلف قرار گرفته است. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمودار نیروی مقاومت اضافی با دو روش میدان نزدیک و میدان دور برحسب طول موج نشان داده شده

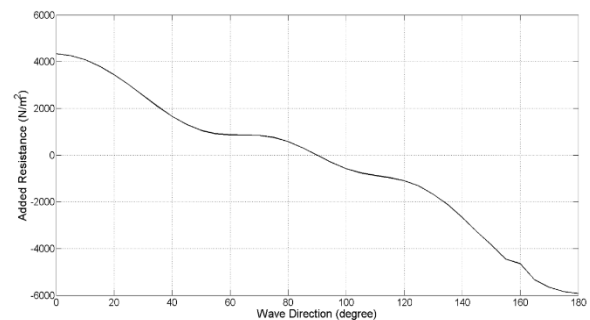
در دامنه موج ضرب می‌شود و با توجه به رابطه مرتبه دوم نیروی مقاومت اضافی با دامنه موج برخوردی برای محاسبه نیروی مقاومت اضافی ناشی از موج با دامنه دلخواه باید مقدار نیرو را در توان دوم موج ضرب کرد.

۴-۱- تعیین محاسبه مقاومت اضافی در حالت سکون برحسب زاویه برخورد

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ توزیع نیروی مقاومت اضافی برحسب زاویه برخورد با دو روش میدان نزدیک و میدان دور ارائه شده است. مشاهده می‌شود نتایج مربوط به دو روش بسیار نزدیک است. دلیل این موضوع دقت بالای دو روش در حالت سکون است.



شکل ۱۲ توزیع نیروی اضافی بر حسب زاویه برخورد به روش میدان نزدیک

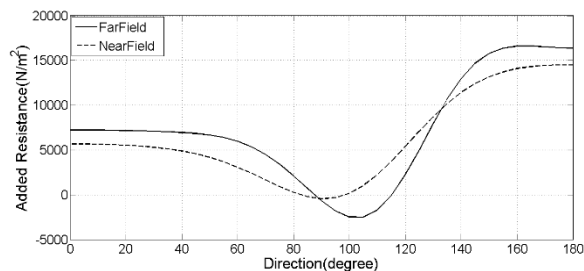


شکل ۱۳ توزیع نیروی اضافی بر حسب زاویه برخورد به روش میدان دور

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌گردد که در زوایای برخورد موج از روبرو مقدار نیروی مقاومت اضافی دارای مقادیر حداکثری است و با نزدیک شدن زاویه برخورد به حالت موج از عرض (Beam Sea) مقدار این نیرو به

¹ Broaching

برخورد موج است و از رابطه ۷ به دست می آید. در شکل ۱۶ نمودار مقاومت اضافی وارد به کشتی در حالت با سرعت پیشروی ۶,۲۱۲ متر بر ثانیه بر حسب زاویه ارائه شده است. مشاهده می شود که زوایای نزدیک به ۹۰ درجه که حالت (Beam Sea) مقدار مقاومت اضافی به سمت صفر میل می کند و با افزایش زاویه برخورد به سمت حالت موج از روبرو مقدار این مقاومت به سمت حالت حداکثر میل می کند.



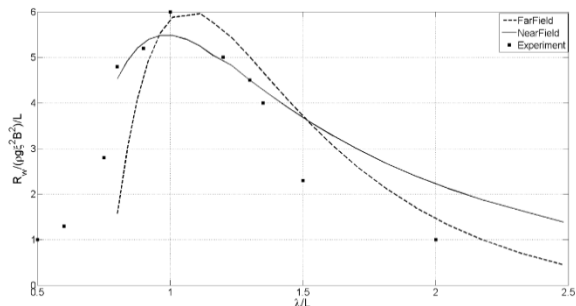
شکل ۱۶ توزیع نیروی مقاومت اضافی بر حسب زاویه برخورد به روش میدان نزدیک و دور

۱-۴- محاسبه مقاومت اضافی در حالت حرکت

بر حسب طول موج

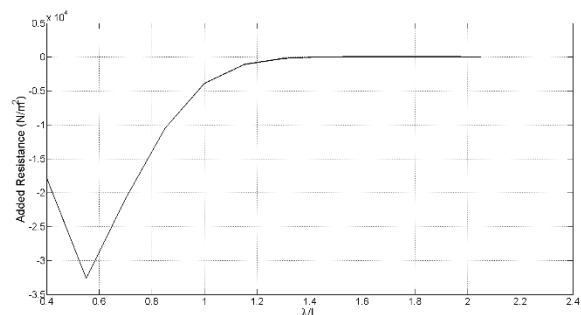
در شکل ۱۷ نمودار ضریب مقاومت اضافی با دو روش میدان دور و میدان نزدیک در حالت کشتی با سرعت پیشروی بر حسب طول موج ارائه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. ضریب مقاومت اضافه به صورت ۱۰ تعریف می شود.

$$Cx = R_w / (\rho g B^2 \xi^2) / L \quad (10)$$

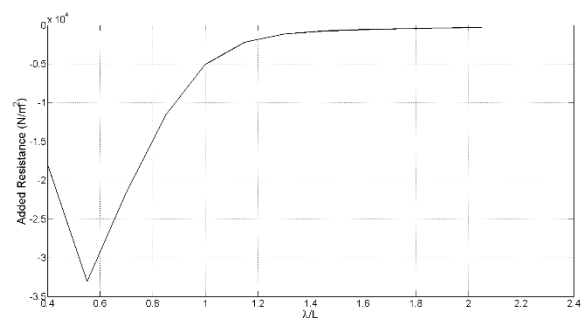


شکل ۱۷ توزیع نیروی اضافی بر حسب طول موج به روش میدان نزدیک و دور

است. مشاهده می شود که در محدوده طول موج های بالاتر از ۱,۲ برابر طول کشتی مقدار مقاومت اضافی به سمت صفر میل می کند. دلیل این امر این است در این حالت شناور یا در قله موج قرار دارد یا در قعر موج و نیروی نوسانی کمتری به بدنه وارد می شود. همچنین در طول موج های کم (کمتر از نصف طول کشتی) نیز به دلیل خنثی شدن اثر امواج، مقدار نیروهای موج کاهش پیدا می کند و تنها در محدوده میانی مقادیر این نیروها قابل ملاحظه است.



شکل ۱۴ توزیع نیروی اضافی بر حسب طول موج به روش میدان نزدیک



شکل ۱۵ توزیع نیروی اضافی بر حسب طول موج به روش میدان دور

۱-۳- محاسبه مقاومت اضافی در حالت حرکت بر

حسب زاویه برخورد

برای شبیه سازی شناور در حال حرکت در موج، فرکانس برخورد تابعی از سرعت پیشروی و زاویه

$$R_{AWM} = 4 \rho g B \zeta_a^2 B^2 / L_{pp} \bar{\omega}^{b_1} \exp \left[\frac{b_1}{d_1} (1 - \bar{\omega}^{d_1}) \right] a_1 a_2$$

$$E = \text{atan}(B/2 L_E)$$

$$\alpha_T = \frac{\pi^2 I_1^2 (K_e T)}{\pi^2 I_1^2 (K_e T) + K_1^2 (K_e T)}$$

$$a_1 = 60.3 C_B^{1.34} \left(\frac{0.87}{C_B} \right)^{1+Fn}$$

$$a_2 = \begin{cases} 0.0072 + 0.1676 Fn & \text{for } Fn < 0.12 \\ Fn^{1.5} \exp(-3.5 Fn) & \text{for } Fn \geq 0.12 \end{cases}$$

$$\bar{\omega} = \begin{cases} \frac{\sqrt{L_{pp}/g}^3 \sqrt{\frac{k_{yy}}{L_{pp}}} 0.05^{0.143}}{1.17} \omega & \text{for } Fn < 0.12 \\ \frac{\sqrt{L_{pp}/g}^3 \sqrt{\frac{k_{yy}}{L_{pp}}} Fn^{0.143}}{1.17} \omega & \text{for } Fn \geq 0.12 \end{cases}$$

For $C_B \leq 0.75$

$$b_1 = \begin{cases} 11.0 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -8.5 & \text{elsewhrer} \end{cases}$$

$$d_1 = \begin{cases} 14.0 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -566 \left(\frac{L_{pp}}{B} \right)^{-2.66} \times 6 & \text{elsewhrer} \end{cases}$$

For $C_B > 0.75$

$$b_1 = \begin{cases} 11.0 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -8.5 & \text{elsewhrer} \end{cases}$$

$$d_1 = \begin{cases} 566 \left(\frac{L_{pp}}{B} \right)^{-2.66} & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -566 \left(\frac{L_{pp}}{B} \right)^{-2.66} \times 6 & \text{elsewhrer} \end{cases}$$

مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار مقاومت در محدوده موج با طول موج برابر با طول کشتی رخ می‌دهد. با افزایش و کاهش طول موج مقدار این ضریب کاهش پیدا می‌کند.

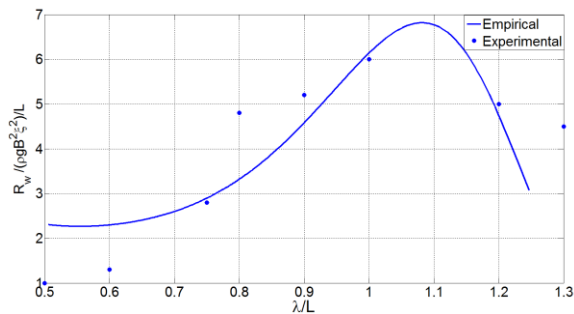
۵- محاسبه مقاومت اضافی با روش تجربی

علاوه بر روش‌های عددی و آزمایشگاهی، روابط تجربی و نیمه تجربی متعددی برای تخمین مقاومت اضافی کشتی ارائه شده است. یکی از این روش‌ها توسط (Liu et al., 2016) ارائه شد که در آن مقاومت اضافی کشتی در حالت برخورد موج از روبرو و در طول موج‌های مختلف محاسبه می‌شود. این روش همانند دیگر روابط تجربی تنها مقدار کمی مقاومت اضافی را تعیین می‌کند و تحلیلی در مورد دیگر مولفه‌های نیروی مرتبه اول، غیرخطی، توزیع فشار و حرکات کشتی ارائه نمی‌کند. اما در مراحل طراحی مقدماتی که شکل بدنه نهایی نشده است و یا بین بدنه‌های متعددی باید حالت بهینه انتخاب شود استفاده از این روش توجیه بیشتری نسبت به روش آزمایشگاهی تست مدل و یا روش‌های عددی دارد. در روش پیشنهادی که بر مبنای نتایج آزمایشگاهی شناورهای مختلف است اثر مشخصات هندسی فرم بدنه کشتی بر مقاومت اضافی موج در نظر گرفته شده است. رابطه ارائه شده برای محاسبه مقاومت اضافی (R_{AW}) در موج منظم و در حالت برخورد از روبرو در اعداد فرود $Fn=0-0.3$ به صورت ۱۱ است.

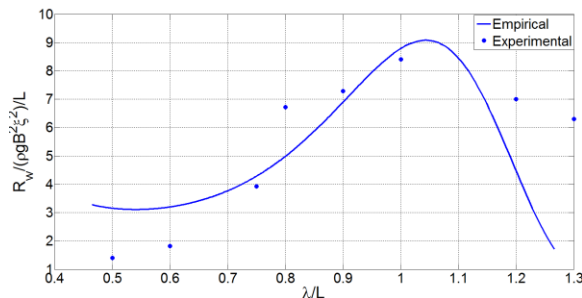
$$R_{AW} = R_{AWR} + R_{AWM}$$

$$R_{AWR} = \frac{2.25}{2} \rho g B \zeta_a^2 \alpha_T \sin^2 E \left(1 + 5 \sqrt{\frac{L_{pp}}{\lambda} Fn} \right) \left(\frac{0.87}{C_B} \right)^{1+4\sqrt{Fn}} \quad (11)$$

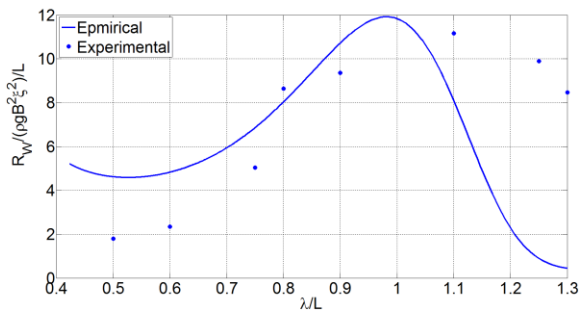
در شکل‌های ۱۹-۲۱ نتایج به دست آمده از رابطه تجربی برای مقاومت اضافی شناور کانتینر بر اس-۱۷۵ در حالت برخورد موج از روبرو در سه سرعت پیشروی متفاوت ارائه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. خطای روش تجربی با افزایش سرعت پیشروی بیشتر می‌شود و این نکته در تمامی روش‌های عددی بر مبنای جریان پتانسیل نیز وجود دارد.



شکل ۱۹ توزیع نیروی اضافی بر حسب طول موج به روش تجربی برای $Fn=0.15$

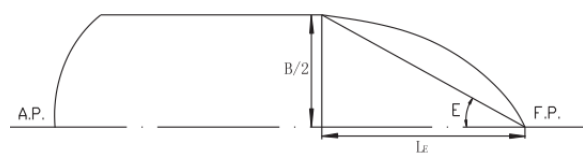


شکل ۲۰ توزیع نیروی اضافی بر حسب طول موج به روش تجربی برای $Fn=0.2$



جدول (۴) متغیرهای رابطه تجربی محاسبه مقاومت اضافی

L_{pp}	طول بین دو عمود کشتی
B	عرض کشتی
T	آبخور کشتی
CB	ضریب بدنه
E	زاویه ورودی خط آب
L_E	طول ورودی
F_n	عدد فرود
k_{yy}	شعاع ژیراسیون طولی
\square_T	ضریب تصحیح آبخور
\square	طول موج
\square	فرکانس زاویه‌ای موج
$\square \square$	ارتفاع موج برخوردی
k_e	عدد موج برخوردی
\square	چگالی آب
$\square \square$	تابع بسط اطلاق شده نوع اول مرتبه ۱
$\square \square$	تابع بسط اطلاق شده نوع دوم مرتبه ۱



شکل ۱۸ تعریف طول ورودی و زاویه ورودی خط آب

رابطه ارائه شده تابعی از مشخصات سیال، مشخصات هندسه کشتی و مشخصات موج برخورد است. در جدول ۴ متغیرهای موثر در رابطه معرفی شده‌اند. رابطه مورد نظر مقاومت اضافی را به دو بخش ناشی از حرکات کشتی (R_{AWM}) و ناشی از انعکاس موج برخوردی (R_{AWR}) تقسیم می‌کند. در شکل ۱۸ تعریف طول ورودی و زاویه ورودی خط آب مشاهده می‌شود.

اضافی بسیار کمتر است. روش میدان دور و میدان نزدیک در حالت ساکن و متحرک نتایج بسیار نزدیک به هم تولید می‌کنند.

منابع

- Havelock, T.H. 1942. The drifting force on a ship among waves. *Philosophical Magazine*. 33: 467-475.
- Maruo, H. 1961. The excess resistance of a ship in rough. *International Shipbuilding Progress*. 8
- Goodman, T.R. 1965. Forces on a hovering slender body of revolution submerged under a free surface. *Developments in Mechanics*, Pergamon Press.
- Newman, J.N. 1967. The drift force and moment on ships. *Journal of Ship Research*. 11.
- Gerritsma, J. and Beukelman, W. 1971. Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship. *Laboratorium voor Scheepsbouwkunde*. 334.
- Faltinsen, O.M. 1980. Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway. *Proceedings of the 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo*. 505-529.
- Pinkster, J.A., 1979. Mean and low frequency wave drifting forces on floating structures. *Ocean Engineering*. 6(6):593-615.
- ANSYS AQWA Theory Manual
- Liu, Sh., Papanikolaou, A. 2016. Fast approach to the estimation of the added resistance of ships in head waves, *Ocean Engineering*. 112:211-225.

شکل ۲۱ توزیع نیروی اضافی بر حسب طول موج به روش تجربی برای $F_n=0.275$

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه مقاومت اضافی یک شناور کانتینربر مورد مطالعه قرار گرفت. برای محاسبه ابتدا با کمک دیدگاه المان مرزی و روش سه‌بعدی پانل در حوزه فرکانس مقاومت شناور در دو حالت ساکن و متحرک محاسبه شد. شبیه‌سازی‌ها برای زوایای مختلف برخورد موج و طول موج‌های گوناگون انجام شد تا عملکرد شناور در شرایط گوناگون دریایی پیش‌بینی شود. سپس با کمک یک رابطه تجربی دقیق که جدیداً ارائه شده است مقاومت اضافی در موج منظم در حالت برخورد موج از روبرو در طول موج‌های مختلف محاسبه شد. تمام محاسبات با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و دقت قابل قبول نتایج مشاهده شد.

مقدار مقاومت اضافی در زوایای برخورد از روبرو مقدار قابل‌ملاحظه‌ای است که باید در محاسبات توان شناور حتماً لحاظ شود. همچنین مقدار مقاومت اضافی در زوایای برخورد عرضی نزدیک به صفر است و موج تنها اثر رانشی عرضی دارد. برخورد موج با طول موج‌های بیش از نصف طول کشتی و کمتر از ۱٫۲ طول کشتی مقدار مقاومت اضافی زیادی ایجاد می‌کند و برای طول موج‌های خارج از این ناحیه معمولاً مقدار مقاومت

Assessment effect of wave length and incident angle on ship added resistance in regular wave

Shahrzad Nikbakht*, Ahmad Hajivand, Mostafa Jafarzadeh Khatibani

Khorramshahr University of Marine Science and Technology

(DOI): [10.22113/jmst.2017.88599.2015](https://doi.org/10.22113/jmst.2017.88599.2015)

Abstract

Power requirements increase severely in rough weather because of added resistance induced by water wave. Amplitude of this additional resistance is between 15 to 30 percent of the ship calm water total resistance. Nowadays, one of the important issue in naval architect is to design a ship hull with minimum added resistance that produce less greenhouse gas. There are several numerical viscous and non-viscous method like strip theory, panel method and RANS method. With respect to accuracy and cost calculations, 3-D panel method is the best choice for analysis ship behavior in wave. By using frequency domain Green's function 3-D panel method added resistance of S-175 containership is computed by far filed and near field approaches. To investigate the effect of wave incident and wavelength, calculations are performed in different incident angle and wavelength. Also by using an accurate and fast empirical validated method that have recently been proposed, added resistance in head sea are calculated for different wavelength and ship speed. Far field and near field results are consistent with good accuracy. Numerical and empirical results are compared with experimental that shows high accuracy results.

Keywords: Added Resistance, Panel Method, Far Field method, Near Field Method, Empirical Method

*Corresponding author, E-mail: hajivand@kmsu.ac.ir