

بررسی روش‌های تصحیح سرعت اندازه‌گیری شده کشتی‌ها در آزمایشات دریانوردی

محبوبه گل‌آقاپور کامی، مصطفی جعفرزاده خطیبانی*، اعتمادالدین رباعی غلامی

گروه مهندسی کشتی سازی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۴/۸

چکیده

عملکرد کلیه کشتی‌ها پس از اتمام مراحل ساخت باید در آزمایشات دریانوردی مورد سنجش قرار گیرد. یکی از بخش‌های مهم این آزمایشات، اندازه‌گیری سرعت شناور و انطباق آن با خواسته‌های مالک طبق قرارداد می‌باشد. لازم است این تست در شرایط آب عمیق، آرام، بدون باد و تحت بارگذاری از پیش تعیین شده صورت پذیرد، نظر به اینکه در عمل به ندرت امکان تست شناور در شرایط فوق الذکر میسر می‌باشد لذا لازم است سرعت بدست آمده کشتی در آزمایشات دریانوردی تصحیح گردد که در پاره‌ای موارد ممکن است اختلاف بدست آمده مقدار بزرگ و قابل توجهی باشد. پارامترهای متعددی نظیر مقاومت هوا، اثر عمق کم، اثر جریان‌های دریایی و مقاومت افزوده در اثر انکسار امواج نامنظم در تصحیح سرعت موثر می‌باشند. تاکنون روش‌های تجربی متعددی برای تصحیح سرعت اندازه‌گیری شده شناورها در اثر پارامترهای مذکور ارائه شده است. در این مقاله با توجه به اهمیت پارامتر مقاومت افزوده در اثر انکسار امواج نامنظم، برای داده‌های سه کشتی هدف این پارامتر بوسیله روش‌های تجربی محاسبه شده و با روش شرکت سازنده این شناورها (شرکت کشتی سازی هیوندای) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تصحیح سرعت و علت اختلافات مابین این روش‌ها تبیین گردیده است. نتایج اختلاف قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد که مقدار تصحیح سرعت نهایی انجام شده در آزمایشات دریانوردی توسط شرکت هیوندای نیاز به بازنگری در محاسبه مقاومت افزوده و در نتیجه روش تصحیح سرعت دارد.

کلید واژه: آزمایشات دریانوردی، مقاومت افزوده، انکسار، تصحیح سرعت

*نویسنده مسوول، پست الکترونیک: m.jafarzadeh@kmsu.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از پارامترهای اساسی مندرج در قرارداد ساخت کشتی فیما بین کارخانه سازنده و مالک کشتی، سرعت کشتی در محدوده توان و آبخور شناور می‌باشد. و در صورتیکه سرعت نهایی کشتی کمتر از مقدار قرارداد باشد شرکت کشتی سازی ملزم به پرداخت غرامت به مالک کشتی می‌باشد که به عنوان مثال در برخی از راهنماهای ثبت قراردادها (Reinertsen, 2011) به ازای ۰/۳ نات کاهش سرعت حدود ۱۰۰ هزار دلار جریمه و به ازای هر ۰/۱ کاهش بیشتر، مقدار ۱۰۰ هزار دلار اضافه‌تر تعیین گردیده است و در صورتی که کاهش سرعت به میزان ۰/۸ نات از مقدار قرارداد کمتر باشد مالک کشتی حق فسق قرارداد را خواهد داشت. همچنین تصحیح سرعت، با لازم‌الاجرا شدن کاهش مقدار شاخص بهره‌وری انرژی^۱ طبق فصل چهارم از ضمیمه ششم کنوانسیون مارپل که بر اساس نتایج حاصل از تست دریانوردی محاسبه می‌گردد بیش از پیش حائز اهمیت می‌باشد، زیرا پارامتر سرعت تاثیر بسزایی در رابطه مذکور داشته و عامل مهمی در افزایش یا کاهش این شاخص می‌باشد و در صورتیکه شاخص مذکور از حد مجاز بیشتر باشد شناور مجاز به اخذ گواهینامه پیشگیری از آلودگی هوا^۲ نخواهد بود و لذا مجاز به تردد نمی‌باشد. مقدار سرعت شناور، در آزمایشات دریانوردی اندازه‌گیری می‌شود که این آزمایشات در حالت ایده‌آل باید در آب آرام، بدون باد، بدون جریانات دریایی و در آب‌های عمیق انجام شود، اما در عمل امکان حصول شرایط فوق‌الذکر برای انجام تست دریانوردی امکانپذیر نیست و شرایط محیطی از قبیل باد و امواج بر نتایج اندازه‌گیری‌ها تاثیرگذار خواهند بود. لذا لازم است به طریقی اثر عوامل محیطی بر مقدار پارامترهای اندازه‌گیری شده تعیین گردد و مقدار سرعت اندازه‌گیری شده تصحیح گردد.

تاکنون روش‌ها و راهنماهای متعددی برای نحوه انجام تست دریانوردی، نحوه ثبت و اندازه‌گیری پارامترها در زمان تست و همچنین روابطی برای تصحیح نتایج ارائه گردیده است. همچنین برخی شرکت‌های بزرگ کشتی‌سازی نیز روش‌های مختص به خود را برای این منظور ارائه کرده‌اند. اما تاکنون رابطه دقیقی برای اندازه‌گیری و تصحیح همه پارامترهای ذکر شده ارائه نشده است. شبیه سازی انجام شده در خصوص عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت و توان بدلیل عدم تطابق شرایط واقعی دریا با شرایط استاندارد تست، بیانگر میزان خطای نسبتاً بالا بخصوص در سرعت‌های پایین کشتی می‌باشد (M.Insel, 2008).

بررسی تاثیر موج مورب بر کاهش سرعت کشتی و روش‌های اندازه‌گیری مقدار خطای آن بیانگر لزوم تصحیح سرعت شناور پس از انجام آزمون‌های دریانوردی در صورت مواجهه با موج مورب می‌باشد (Zhenju Chuang et al., 2013). از جمله راهنماهایی که به ارزیابی عملکرد سرعت و توان کشتی بر اساس آنالیز داده‌های حاصل از تست دریا می‌پردازد استاندارد ایزو ۱۵۰۱۶ و استاندارد ایزو ۱۹۰۱۹ می‌باشد. سایر محققان (Bose, 2005) و (Henk, 2006) راهنماهای قابل استنادی در این زمینه ارائه کرده‌اند. برخی از شرکت‌های بزرگ کشتی سازی نیز راهنماهایی برای تصحیح سرعت ارائه کرده‌اند که از جمله آنها می‌توان از شرکت کشتی‌سازی هیوندای نام برد. طبق روش‌های (Bose, 2005) و (Henk, 2006) اصلی‌ترین عوامل موثر در مقاومت شناور، باد و امواج می‌باشند و سایر پارامترها نظیر اثر عمق کم، اختلاف جابجایی شناور و مقدار شوری آب در قیاس با دو عامل باد و موج تاثیر چندانی بر مقاومت شناور ندارند. در روش شرکت هیوندای تمامی پارامترها بغیر از موج و باد نادیده گرفته می‌شوند. همچنین در این روش الزامی به انجام تست دریانوردی در جهت عمود بر امواج وجود ندارد در حالیکه طبق نظرات (Bose, 2005) و (Henk, 2006) تاکید بسزایی در انجام تست در شرایط مذکور

^۱ Energy Efficiency Design Index (EEDI)^۲ International Air Pollution Prevention Certificate (IAPP)

وجود دارد. همچنین (Perdon, 2002) تاکید دارد در صورتیکه امواج بطور مستقیم به سینه یا پاشنه کشتی برخورد نکنند و تست در شرایط برخورد مورب امواج انجام پذیرد روش‌های تصحیح سرعت قابل اعتماد نخواهند بود. یکی دیگر از فرضیات روش هیوندای این است که راستای امواج نسبت به خط مرکزی کشتی معادل با زاویه باد می‌باشد که این فرضیه در تناقض با سایر استانداردهاست. برای نشان دادن اختلاف سرعت ناشی از عوامل محیطی در تست دریای کشتی‌ها، سه شناور هدف با مشخصات معرفی شده انتخاب گردیده و روش تصحیح سرعت ناشی از انکسار امواج غیر منظم، به دلیل تاثیر بیشتر این پدیده بر اختلاف سرعت، انتخاب شده است و در نهایت معیار صحت‌سنجی فرمول تجربی ارائه شده با نتایج بدست آمده از سه شناور هدف مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش مقایسه روش‌های مختلف ارائه شده در استانداردهای موجود برای تصحیح سرعت بدست آمده از آزمون‌های دریایی می‌باشد. همچنین برخی از کارخانجات بزرگ کشتی‌سازی نظیر شرکت کشتی‌سازی هیوندای نیز روابطی را برای این منظور بکار می‌برند که در این پژوهش با توجه به داده‌های اولیه برای سه شناور ساخته شده توسط این شرکت، نتایج تصحیح تست سرعت روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

$$\Delta P_W = \frac{(\Delta P_{Wr} + \Delta P_{Wd}) \cdot U}{\eta_s \cdot QPC} \quad (1)$$

توان افزوده در اثر انتشار^۲ امواج (وات)

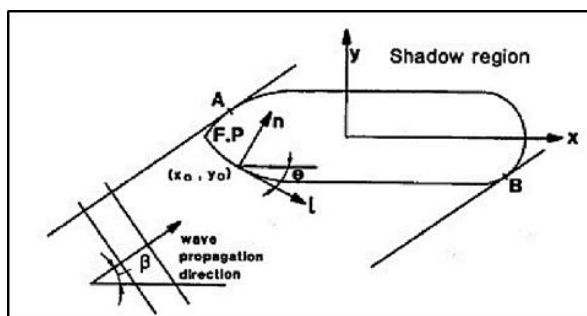
توان افزوده در اثر انکسار امواج (وات)

راندمان شافت η_s

سرعت کشتی (متر بر ثانیه) U

راندمان هیدرودینامیکی^۳ QPC

می‌باشد که عبارتند از مقاومت افزوده در اثر انکسار که منتج از برخورد امواج به بدنه کشتی و تغییر جهت موج می‌باشد، و مقاومت افزوده در اثر انتشار که ناشی از حرکت نسبی بین شناور و سطح دریا می‌باشد. زمانی که طول موج‌ها کوتاه باشد ($\lambda/L < 0.5$) مقاومت در اثر انکسار، غالب بوده و طول موج‌های در این محدوده حرکات عمودی چندانی ایجاد نمی‌نمایند مگر در زمانی که پریود امواج با پریود طبیعی^۴ شناور برابر باشند که پدیده تشدید اتفاق می‌افتد (Henk, 2006). بمنظور بررسی اینکه آیا در طول تست دریا انکسار یا انتشار، پدیده غالب است نسبت طول موج به طول کشتی در جدول ۲ محاسبه شده است.



شکل ۱- تعریف پارامترهای کشتی و موج (Faltinsen et al., 1980)

۱) مواد و روش‌ها

همانگونه که در مقدمه توضیح داده شد در روش شرکت کشتی‌سازی هیوندای از سایر مولفه‌های مقاومت شناور بجز مقاومت باد و امواج صرف‌نظر می‌شود. از آنجایی که مقاومت افزوده موج تاثیر بسزایی در سرعت اندازه‌گیری شده دارد اطلاعات سه شناور ذیل که توسط شرکت کشتی‌سازی هیوندای ساخته شده‌اند برای انجام محاسبات مقاومت افزوده در اثر انکسار مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات سه تانکر از کلاس S با نامهای S155،

^۱ Kristian Gerhard Jebsen Skipsrederi

^۲ Radiation

^۳ Quasi Propulsive Coefficient

^۴ Eigenperiod

جدول ۱ - مشخصات شناورهای مورد مطالعه. Hyundai specification (2006)

| شماره کشتی | S1374 | S1405 | S155 | - |
|---|--------|--------|--------|----------------------------------|
| تاریخ تست دریانوردی | ۲۰۰۲ | ۲۰۰۲ | ۲۰۰۳ | - |
| طول بین دو عمود سینه و پاشنه | ۲۶۴ | ۲۶۴ | ۲۶۴ | $L_{PP}(m)$ |
| طول خط آبخور طراحی | ۲۷۲ | ۲۷۲ | ۲۷۲ | $L_{WL}(m)$ |
| عرض کشتی | ۴۸ | ۴۸ | ۴۸ | $B(m)$ |
| آبخور طراحی | ۱۶/۰۲ | ۱۶/۰۲ | ۱۶/۰۲ | $d(m)$ |
| ارتفاع موج مشخصه | ۲/۰۰ | ۱/۸۰ | ۱/۵۲ | $H_{\frac{1}{3}}(m)$ |
| پریود | ۲/۸۰ | ۴/۵۰ | ۲/۵۰ | $T(m)$ |
| زاویه بین انتشار موج و محور X (شکل ۱) | ۶۰ | -۶۰ | ۰ | $\beta(deg)$ |
| سرعت کشتی نسبت به زمین | ۱۵/۵۲ | ۱۶/۲۹ | ۱۵/۶۱ | $U(knots)$ |
| عدد بوفورت | ۷/۰۰ | ۵/۷۰ | ۳/۹۰ | $B_N(-)$ |
| سرعت نسبی باد | ۳۴/۹۹ | ۲۵/۲۷ | ۲۹/۱۶ | $U_{r\omega}(m/s)$ |
| زاویه نسبی باد | ۶۰ | ۶۰ | ۰ | $\psi_{r\omega}(deg)$ |
| سرعت حقیقی باد | ۳۰/۳۳ | ۲۲/۱۴ | ۱۲/۴۶ | $U_{a\omega}(m/s)$ |
| زاویه حقیقی باد | ۲۹۳ | ۱۱۹ | ۱۸۰ | $\psi_{a\omega}(deg)$ |
| ضریب مقاومت نسبی باد | ۰/۴۸ | ۰/۴۸ | -۰/۹۵ | $C_{r\omega}(\psi_{r\omega})(-)$ |
| ضریب ظرافت بدنه | ۰/۸۱۶۸ | ۰/۸۱۶۸ | ۰/۸۱۶۸ | $C_B(-)$ |
| قدرت اندازه‌گیری شده | ۲۳۳۹۸ | ۲۳۱۳۶ | ۲۳۳۱۶ | $P_M(hp)$ |
| مقدار توان نهایی اضافه در اثر امواج (رابطه ۱) | ۱۸۹/۷۳ | ۲۹۴/۷۰ | ۳۳۸/۷۰ | $\Delta P_W(hp)$ |

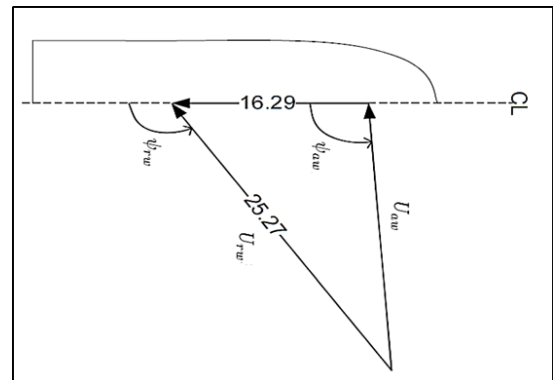
از آنجاییکه مقادیر $\lambda/L_{WL} \ll 0.5$ لذا می‌توان از مولفه مقاومت افزوده در اثر انتشار صرفنظر نمود (Henk, 2006). به منظور محاسبه مقدار ΔP_{Wd} با توجه به اینکه در داده‌های شرکت هیوندای مقادیر راندمان شافت و راندمان هیدرودینامیکی ارائه نشده است، مقادیر $\eta_s = 0.97$ و $QPC = 0.7$ فرض شده اند که بر اساس شناورهای مشابه در نظر گرفته شده است. مقدار توان افزوده در اثر انتشار امواج قابل صرفنظر می‌باشد.

$$\Delta P_{Wr} = 0$$

با استفاده از رابطه ۲ مقدار توان افزوده در اثر انکسار را می‌توان به واحد نیوتن تبدیل نمود.

$$\overline{F_d^s} = \frac{\Delta P_{Wd} \cdot 750}{U} \quad (2)$$

نتایج در جدول ۳ محاسبه شده است. همچنین مقدار نیروی متناسب با قدرت اندازه‌گیری شده نیز در این جدول به نیوتن تبدیل شده است.



شکل ۲- ارتباط بین زاویه حقیقی و نسبی باد و سرعت کشتی برای شناور S1405

جدول ۲- نسبت طول موج به طول کشتی برای سه کشتی مورد مطالعه

| شماره کشتی | $\lambda(m)$ | $T_1(s)$ | λ/L_{WL} |
|------------|--------------|----------|------------------|
| S155 | ۳۱/۶۲ | ۴/۵ | ۰/۱۶ |
| S1405 | ۳۱/۶۲ | ۴/۵ | ۰/۱۶ |
| S1374 | ۱۲/۲۴ | ۲/۸ | ۰/۰۴۵ |

λ : طول موج، T_1 : پریود و λ/L_{WL} : نسبت طول موج به طول آبخور

کشتی

| | |
|--------------------------|----------------------------|
| dl (m) | المان طولی در امتداد خط آب |
| ρ kg/m ³ | چگالی آب دریا |
| g m/s ² | شتاب گرانش |
| F_n (-) | عدد فرود |
| U m/s | سرعت کشتی |

$\overline{F_d^S}$ مقدار متوسط مولفه توان موج در اثر انکسار برای امواج نامنظم، U سرعت شناور و 750 ضریب تبدیل می‌باشد.

جدول ۳ - مقادیر تبدیل شده توان افزوده در اثر انکسار امواج و نیروی متناسب با قدرت اندازه‌گیری شده

| شماره کشتی | S155 | S140.5 | S1374 |
|---------------------------------|---------|---------|---------|
| $\approx \overline{F_d^S} (kN)$ | 21/48 | 17/90.9 | 12/10.2 |
| $\approx F_M (kN)$ | 1478/70 | 1406/04 | 1492/51 |

چگالی آب دریا نیز در کلیه محاسبات $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ فرض شده است.

طیف انرژی موج $S(f)$ در رابطه T_1 لحاظ شده است. و نامنظم بودن موج در رابطه ۶ و ۷ تعریف می‌گردد. این رابطه در استاندارد ایزو ۱۵۰۱۶ پیشنهاد گردیده که عبارتست از:

$$S(f) = \frac{0.11 \cdot H_1^2 \cdot T_1}{(T_1 \cdot f \cdot 0)^5} \cdot \exp\left(-\frac{0.44}{(T_1 \cdot f \cdot 0)^4}\right) \quad (6)$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{\int_0^\infty S(f) df}{\int_0^\infty f \cdot S(f) df}} \quad (7)$$

با توجه به روابط ارائه شده و محدوده اعتبار آنها، رابطه ۳ به دلایل زیر برای شناور S155 مناسب است:

- تست دریا این شناور در شرایط برخورد موج از روبرو^۲ انجام شده است.
- عدد فرود برابر است با $F_n \approx 0.155$ که کاملاً در محدوده مناسب می‌باشد: $F_n < \approx 0.2$
- از آنجاییکه طول موج نسبت به طول کشتی بسیار کوچکتر است لذا صرفنظر کردن از انرژی موج منطقی می‌باشد. ($\frac{\lambda}{L} = 0.116 \ll 0.5$) داده های ورودی رابطه ۳ در جدول ۴ آمده است.

| | |
|--------------------------|-----------------|
| ρ kg/m ³ | ۱۰۲۵ |
| H_1 (m) | ۱/۵۲ |
| L_{WL} (m) | ۲۷۲ |
| T_1 (s) | ۴/۵ |
| F_n (-) | ≈ 0.155 |
| U (knots) | ۱۵/۶۱ |
| β (deg) | ۰ |

روش Faltinsen et al.(1980) برای امواجی که عمود بر سینه کشتی برخورد میکنند: در این روش برای محاسبه مقاومت افزوده در اثر انکسار در موج نامنظم و زاویه برخورد عمودی، رابطه ۳ ارائه شده است. این رابطه در اعداد فرود^۱ پایین ($F_n < \approx 0.2$) و برای کشتیهای با فرم سینه گرد معتبر است. همچنین از این رابطه در شرایطی که طول موج بزرگتر از نصف طول کشتی می‌باشد می‌توان استفاده نمود.

$$\overline{F_d^S} = \rho \cdot g \cdot \frac{H_1^2}{16} (1 + F_n \cdot \frac{4\pi}{T_1} \sqrt{\frac{L_{WL}}{g}}) \int_{L_1} \sin^2(\theta) \cdot n_1 dl \quad (3)$$

که عدد فرود عبارتست از:

$$F_n = \frac{U}{\sqrt{L_{WL} \cdot g}} \quad (4)$$

$$n_1 = \sin(\theta) \quad (5)$$

H_1 (m) ارتفاع موج مشخصه
 T_1 (s) پریود متوسط موج
 θ (rad) زاویه بین مماس خط آب و محور بدنه (شکل ۱)
 L_{WL} (m) طول خط آبخور کشتی در آبخور طراحی

^۱ Head sea

^۱ Froude

مقدار θ از رابطه ۸ بدست خواهد آمد.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{dy}{dx} \right) \quad (۸)$$

از جایگذاری مقادیر جدول ۴ در رابطه ۳ مقدار مقاومت افزوده برای شناور S۱۵۵ به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$\bar{F}_d^s \approx 8.07 \cdot 10^4 N$$

روش (Faltinsen et al. (1980) برای امواج مورب: در این روش برای محاسبه مقاومت افزوده برای امواج کوتاه و منظم که در راستاهای مختلف به کشتی برخورد می‌کند روابطی ارائه شده است. این روش برای اعداد فرود پایین ($F_n < 0.2$) و نسبت امواج ($\lambda/L < 0.5$) و با فرم سینه گرد معتبر است. این روش در روابط ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ بیان گردیده است.

$$\bar{F}_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot \zeta_A^2 \left\{ \left[\frac{k_1}{2k} - \frac{1}{2} \cdot \cos^2(\theta + \beta) \right] + \frac{k_2}{2k} \cdot \sin(\theta + \beta) \right\} \quad (۹)$$

$$\omega_e = \omega + \frac{\omega^2 \cdot U}{g} \quad (۱۳)$$

که ω فرکانس موج و U سرعت رو به جلو کشتی می‌باشد.

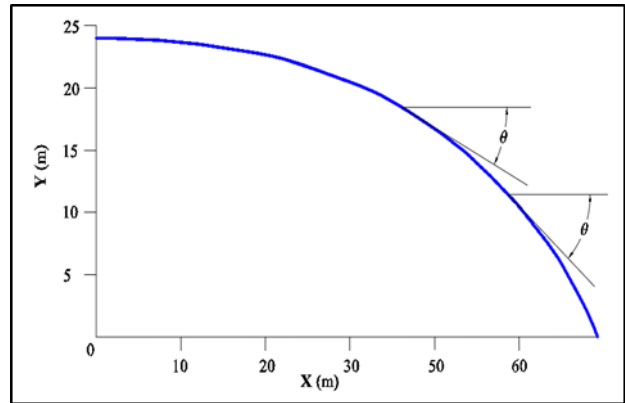
$$\omega^2 = kg \quad (۱۴)$$

برای حل عددی رابطه ۹ از برنامه فرتن Skejic 2013 با حل عددی رابطه ۱۵ برای هر مولفه موج در محدوده $0.05 < \lambda_j/L_{WL} < 0.5$ محاسبه شده است که تعداد مولفه های j در روش مذکور ۱۵۰ در نظر گرفته شده است.

$$\bar{F}_{d,dim}(\lambda_j/L_{WL}; \beta) = \frac{\bar{F}_d(\lambda_j/L_{WL}; \beta)}{\rho \cdot g \cdot \zeta_A^2 \cdot \frac{B^2}{L}} \quad (۱۵)$$

همانطور که ذکر شد رابطه ۹ مقاومت افزوده برای امواج منظم را محاسبه می‌نماید. به منظور محاسبه مقاومت افزوده در امواج نامنظم رابطه ۱۶ به حل عددی رابطه بالا اضافه می‌گردد. طیف انرژی مورد

زاویه θ در امتداد مقطع صفحه آبخور تغییر می‌کند و به شکل بدنه کشتی بستگی دارد. بمنظور محاسبه مقادیر θ برای کشتی‌های کلاس S از میانمایی خطوط بدنه به فاصله ۰/۱ متر استفاده شده است. نمایش گرافیکی خط آب از خطوط بدنه میانمایی شده در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳ - مختصات خط آب میانمایی شده در آبخور طراحی

$$k_1 = \frac{[\omega_e - V \cdot k \cdot \cos(\theta + \beta)]^2}{g} \quad (۱۰)$$

$$k_2 = \sqrt{k_1^2 - k^2 \cdot \cos^2(\theta + \beta)} \quad (۱۱)$$

فرکانس موج برخورد (رابطه ۱۳) ω_e (rad/s)

عدد موج برخورد (رابطه ۱۴) k (1/m)

ارتفاع موج برخورد ζ_A (m)

زاویه بین مماس خط آب و محور بدنه θ (rad)

زاویه بین انتشار موج و محور X β (rad)

سرعت پایدار سیال V (m/s)

رابطه زیر برای تعیین سرعت پایدار سیال توسط فالتینسن و مینساس ارائه شده است.

$$V = U \cdot \cos(\theta) \quad (۱۲)$$

که U سرعت متوسط رو به جلو کشتی می‌باشد. رابطه ۱۳ برای محاسبه فرکانس موج برخورد عبارتست از:

نتایج حل عددی معادله ۱۶ برای شناور S155 برای زوایای مختلف برخورد در جدول ۵ آورده شده است. ($\beta = 180$) نشاندهنده برخورد موج از روبرو می‌باشد. همچنین مطابق با روش حل عددی بالا، برای دو شناور S1405 و S1374 نیز محاسبات انجام و نتایج محاسبه مقاومت افزوده برای سه شناور در جدول ۶ آورده شده است. رابطه ساده شده (Faltinsen (1980) برای امواج با هر نوع زاویه برخورد: در این روش رابطه ساده شده‌ای از رابطه ۹ ارائه شده است که برای سرعت‌های پایین و با همه زاویه‌های برخورد امواج معتبر است این رابطه در استاندارد ایزو ۱۵۰۱۶ نیز پیشنهاد شده است.

جدول ۶ - نتایج محاسبه مقاومت افزوده برای سه شناور

| مورد تحقیق | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|
| شماره کشتی | S1374 | S1405 | S155 |
| \bar{F}_d^s (kN) | ۱۰۷/۴ | ۱۰۸/۴ | ۷۷/۲۱ |

استفاده طبق استاندارد ایزو ۱۵۰۱۶ مطابق رابطه ۱۶ انتخاب شده است.

$$\bar{F}_d^s = 2 \int_0^\infty S(\omega) \left(\frac{\bar{F}_d(\omega; \beta)}{\zeta_A^2} \right) d\omega \quad (16)$$

در این رابطه $\bar{F}_d(\omega; \beta)$ متوسط مقاومت مولفه موج در موج منظم برخوردی با فرکانس ω و ζ_A ارتفاع موج می‌باشد.

جدول ۵ - مقادیر مقاومت افزوده در امواج نامنظم با زاویه های برخورد متفاوت

| β (deg) | \bar{F}_d^s (kN) |
|---------------|--------------------|
| ۱۸۰ | ۷۷/۲۱ |
| ۱۵۰ | ۷۸/۶۴ |
| ۱۲۰ | ۷۴/۵۸ |
| ۹۰ | ۴۵/۰۸ |
| ۶۰ | ۱۰/۹۵ |
| ۳۰ | ۱/۳۷۵ |
| . | ۴/۰۲۹ |

$$\bar{F}_d \approx \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot \zeta_A^2 \left\{ \sin^2(\theta + \beta) + \frac{2 \cdot \omega_0 \cdot U}{g} [1 - \cos(\theta) \cdot \cos(\theta + \beta)] \right\} \quad (17)$$

اختلاف نتایج ۱۰/۹۲٪ می‌باشد که نشاندهنده نامناسب بودن رابطه ۱۷ برای محاسبه مقاومت افزوده موج از سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایش دریانوردی این شناور می‌باشد. با افزایش سرعت اختلاف نتایج چشمگیر بوده که بعنوان مثال در سرعت ۳۰ نات اختلاف به مقدار ۲۹/۲۰٪ می‌رسد.

روش (Fuji et al., 1975): روشی برای محاسبه مقاومت افزوده در اثر امواج برای کشتیهای بزرگ در امواج با طول موج کوتاه ($\lambda/L < 0.5$) می‌باشد. در این روش مقاومت موج مسیر کشتی به دو مولفه مقاومت افزوده در اثر انکسار و مقاومت افزوده در اثر حرکت کشتی تقسیم می‌شود. این روش اولین بار در سال ۱۹۷۵ برای تانکرها و کشتی‌های کانتینربر بین

جدول ۷ - محاسبه مقاومت افزوده برای شناور S155 با استفاده از روابط ۹ و ۱۷

| اختلاف (%) | \bar{F}_d^s (N) (رابطه ۹) | \bar{F}_d^s (N) (رابطه ۱۷) | سرعت (نات) |
|------------|-----------------------------|------------------------------|------------|
| ۰/۰۰ | $2/25 \times 10^4$ | $2/25 \times 10^4$ | ۰/۰۰ |
| ۰/۲۹ | $3/49 \times 10^4$ | $3/50 \times 10^4$ | ۴/۰۰ |
| ۳/۴۲ | $4/82 \times 10^4$ | $4/66 \times 10^4$ | ۸/۰۰ |
| ۷/۱۷ | $6/28 \times 10^4$ | $5/86 \times 10^4$ | ۱۲/۰۰ |
| ۱۰/۹۲ | $7/72 \times 10^4$ | $6/96 \times 10^4$ | ۱۵/۶۱ |
| ۲۹/۲۰ | $1/46 \times 10^4$ | $1/13 \times 10^4$ | ۳۰/۰۰ |

جدول ۷ نشان می‌دهد که اختلاف نتایج بین دو رابطه ۹ و ۱۷ با افزایش مقدار سرعت به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. در سرعت ۱۵/۶۱ نات میزان

روش کرایتنر^۱: (Bose, 2005) روش بسیار ساده‌ای را برای محاسبه مقاومت افزوده در اثر انکسار ارائه نموده است و این رابطه توسط کرایتنر برای امواج ۱/۵ تا ۲ متر اصلاح شده است. این روش تنها برای زاویه برخورد $90^\circ < \beta < 270^\circ$ مناسب می‌باشد که در رابطه ۲۱ ارائه گردیده است.

(۲۱)

H ارتفاع موج، γ وزن ویژه آب و L طول کشتی، B عرض کشتی و C_B ضریب ظرافت بدنه می‌باشد.

$$\begin{aligned} \overline{F}_d^s \text{ (for S155)} &= \frac{0.64 \cdot 1.52^2 \cdot 48^2 \cdot 0.81 \cdot 10.1}{272} \\ &= 102.4 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{F}_d^s \text{ (for S1405)} &= \frac{0.64 \cdot 1.8^2 \cdot 48^2 \cdot 0.81 \cdot 10.1}{272} \\ &= 143.3 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{F}_d^s \text{ (for S1374)} &= \frac{0.64 \cdot 2.00^2 \cdot 48^2 \cdot 0.81 \cdot 10.1}{272} \\ &= 177.4 \text{ KN} \end{aligned}$$

مقادیر محاسبه شده برای سه شناور از رابطه ۲۱ در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸ - مقادیر محاسبه شده از رابطه ۲۱ برای سه شناور

| مورد مطالعه | | | شماره کشتی |
|-------------|-------|-------|-------------------------|
| S1۵۵ | S1۴۰۵ | S1۳۷۴ | |
| ۱۰۲ | ۱۴۳ | ۱۷۷ | \overline{F}_d^s (kN) |

روش شرکت کشتی‌سازی هیوندایی: شرکت هیوندای از رابطه ۱ برای تاثیر امواج بر مقاومت افزوده استفاده می‌نماید و برای تصحیح مولفه مقاومت افزوده

مدل و شناور واقعی انجام شد و نتایج مطلوبی بدست آمد. در استاندارد ایزو ۱۵۰۱۶ نیز این روش پیشنهاد گردیده است. فوجی و تاکاهاشی رابطه ۱۸ را برای محاسبه مقاومت افزوده در اثر انکسار ارائه نموده‌اند.

$$\overline{F}_d = \alpha_3(1 + \alpha_4) \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot \zeta_A^2 \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sin^2 \theta dy \quad (18)$$

$$\overline{F}_d^s \equiv \frac{0.64 \cdot H^2 \cdot k^2 (k C_B d) \gamma}{[\pi^2 \cdot I_1^2(k L d) + k_1^2 (k \cdot d)]} \quad (19)$$

$$\alpha_4 = 5 \sqrt{\frac{U}{g \cdot L_{WL}}} \quad (20)$$

| | |
|----------------------|---|
| \overline{F}_d (N) | مقاومت افزوده در اثر انکسار امواج منظم |
| α_3 (-) | ضریب تصحیح برای در نظر گرفتن اثر آبخور محدود |
| α_4 (-) | ضریب تصحیح برای در نظر گرفتن اثر سرعت رو به جلو |
| ζ_A (m) | ارتفاع موج برخورد |
| θ (rad) | زاویه بین مماس خط آب و محور بدنه (شکل ۱) |
| U (m/s) | سرعت کشتی |
| k (1/m) | عدد موج |
| $I_1(k \cdot d)$ (-) | تابع بسط اصلاح شده نوع اول |
| $k_1(k \cdot d)$ (-) | تابع بسط اصلاح شده نوع دوم |
| d (m) | آبخور کشتی (آبخور طراحی) |
| L_{WL} (m) | طول خط آبخور کشتی در آبخور طراحی |

از آنجاییکه این رابطه برای موج منظم می‌باشد با لحاظ کردن طیف انرژی موج پیشنهادی استاندارد ایزو ۱۵۰۱۶ طبق رابطه ۱۶ و با حل عددی رابطه ۱۸ مقدار مقاومت افزوده در اثر امواج نامنظم برای شناور S1۵۵ بصورت زیر محاسبه گردید:

$$\overline{F}_d \approx 7.2404 \cdot 10^4 \text{ N}$$

^۱ Kreitner

به سایر روش‌ها نشان می‌دهد. در جدول ۱۰ مقادیر مقاومت افزوده در اثر انکسار امواج نامنظم به روش فالتینسن (رابطه ۹) با روش هیوندای برای هر سه شناور ارائه شده است.

جدول ۹ - مقاومت افزوده در اثر انکسار امواج نامنظم به روش‌های شرح داده شده

| مقاومت افزوده در اثر انکسار امواج نامنظم (kN) | | | | |
|---|----------|---------|---------|-------------|
| رابطه ۲۱ | رابطه ۱۸ | رابطه ۹ | رابطه ۳ | روش هیوندای |
| ۱۰۲ | ۷۲/۴۰ | ۷۷/۲ | ۸۰/۷ | ۲۱/۴۸ |
| رابطه ۳: روش فالتینسن برای امواج عمود | | | | |
| رابطه ۹: روش فالتینسن برای امواج مورب | | | | |
| رابطه ۱۸: روش فوجی و تاکاهاشی | | | | |
| رابطه ۲۱: روش کرایتنر | | | | |

۳. بحث و نتیجه گیری

از محاسبات ارائه شده مشاهده می‌گردد روش هیوندای، اختلاف قابل ملاحظه‌ای را برای مقدار مقاومت افزوده در اثر انکسار امواج نامنظم برای هر سه شناور در قیاس با روش فالتینسن نشان می‌دهد. پیش بینی می‌گردد این اختلاف فاحش در نتایج ناشی از ساده‌انگاری‌های انجام شده در روش شرکت هیوندای باشد.

در اثر انتشار، از روابط جینکین و فردیناند (روابط ۲۲ و ۲۳) استفاده می‌نماید. رابطه ۲۲ برای امواج منظم و ۲۳ برای امواج نامنظم استفاده می‌شود. قابل ذکر است روش جینکین و فردیناند در هیچ استاندارد پییشنهاد نشده است.

نتایج محاسبات انجام شده توسط روش‌های بیان شده برای شناور S155 در جدول ۹ ارائه شده است.

$$\bar{F}_r = \frac{C_{\bar{F}_r} \cdot \rho \cdot g \cdot \zeta_A^2 \cdot B^2}{L} \quad (22)$$

$$\bar{F}_r^s = \frac{8 \cdot \rho \cdot g \cdot B^2}{L} \int_0^\infty S(\omega) \cdot \frac{\bar{F}_r}{\zeta_A^2} d\omega \quad (23)$$

| | |
|-------------------------------|-------------------------|
| $C_{\bar{F}_r}$ (-) | ضریب مقاومت افزوده |
| ζ_A (m) | ارتفاع موج برخوردی |
| B (m) | عرض کشتی |
| L (m) | طول کشتی |
| $S(\omega)$ m ² /s | طیف انرژی موج (رابطه ۶) |
| ω (rad/s) | فرکانس موج برخوردی |

همانگونه که در جدول ۹ مشاهده می‌گردد مقدار مقاومت افزوده در اثر انکسار امواج نامنظم به روش شرکت کشتی‌سازی هیوندای اختلاف زیادی را نسبت

جدول ۱۰ - مقایسه دو روش هیوندای و فالتینسن برای سه کشتی مورد مطالعه (F_M نیروی متناسب توان اندازه‌گیری شده در تست دریا)

| روش هیوندای | | روش فالتینسن برای امواج مورب | | شماره کشتی |
|--------------------|------------|------------------------------|------------|------------|
| \bar{F}_d^s (kN) | % of F_M | \bar{F}_d^s (kN) | % of F_M | |
| ۲۱/۴۸ | ۱/۴۵ | ۷۷/۲ | ۵/۲۲ | S155 |
| ۱۷/۹۱ | ۱/۲۷ | ۱۰۸/۴ | ۷/۷۱ | S1405 |
| ۱۲/۱۰ | ۰/۸۱ | ۱۰۷/۴ | ۷/۲۰ | S1374 |

محاسبه مقاومت افزوده و در نتیجه روش تصحیح سرعت دارد و استفاده از سایر روش‌های ذکر شده در استانداردها نتایج نزدیک و قابل قبولی را ارائه می‌دهند.

با توجه به اینکه روش‌های فالتینسن، فوجی- تاکاهاشی و کرایتنر در استانداردها پیشنهاد گردیده‌اند و نتایج نسبتاً نزدیکی حاصل شده است، مقدار تصحیح سرعت نهایی انجام شده در آزمایشات دریانوردی توسط شرکت هیوندای نیاز به بازنگری در

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی اجرا شده با شماره قرارداد ۹۶۱۳۵ مورخ ۹۶/۲/۱۶ از محل

اعتبارات ویژه پژوهشی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر می باشد.

منابع

Bose, N. 2005. ITTC Recommended Procedures and Guidelines.

Documentation, 2007. HISTAP Hyundai integrated speed trial analysis program. Hyundai Heavy Industries co.,Ltd.

Faltinsen, O.M., Minsaas, K.J., Liapis, N., Skjoldal, S.O., 1980. Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway. In: Proceedings of the 13th Symposium on Naval Hydrodynamics.

Fujii H., Takahashi,T., 1975. Experimental study on the resistance increase of a ship in regular oblique waves In Proceeding of the 14th ITTC.pp.351–360.

Henk B., Ivo van der Hout, M. F. 2006. Speed-power performance of ships during trials and service, MARIN (Maritime Research institute Netherland)

Hyundai Heavy Industries Co., L. 2002. Hyundai Standard Speed Trial Analysis

Method, Technical report, Hyundai Maritime Research Institute.

Hyundai specification, 2006. Specification for 120,000 dwt class product carrier. Hyundai samho heavy industries co., ltd.

Insel, M., 2008. Uncertainty in the analysis of speed and powering trials, Ocean Engineering.

ISO 15016, 2002. Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data.

ISO 19019, 2005. Instructions for planning, carrying out and reporting sea trials.

MARPOL, 2003. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 2013 consolidated edition.

Zhenju Chuang, Sverre Steen, 2013. Speed loss of a vessel sailing in oblique waves, Ocean engineering.

Analysis of correction methods for ships' measured speed during sea trials

Mahboobeh Golaghapoor Kami, Mostafa Jafarzadeh Khatibani*, Etemadaldin Rabei Gholami

Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Faculty of Marine Engineering.

Abstract

For all new ships sea trials should be carried out as a part of the delivery from the yard to the ship owner. An important part of the delivery sea trial is to determine the speed capability of the ship in the contractual condition, which is traditionally deep, calm water and no wind, at some specified loading condition. However, it is seldom possible to perform this particular test under such conditions, and when the test is done in other conditions, the result is corrected back to the contractual condition. The correction can be of a significant magnitude. The correction procedure can be influenced by different parameters such as wind resistance, shallow water effect, sea currents and added resistance due to diffraction. There are different experimental methods for correction of measured speed. Since the latter parameter is the most important between others, in this article added resistance due to diffraction has been calculated for three ships using existing methods and compared with the speed correction result of shipbuilder company (Hyundai Heavy Industries). The results show considerable deviation between HHI sea trial speed correction method and other methods. So HHI added resistance calculation method needs to be revised.

Keywords: Sea trial, Added resistance, Diffraction, Speed correction

Figure 1. Definition of ship and wave parameters (Faltinsen, 1990)

Figure 2. Correlation between relative and true wind angle and speed of ship S1405.

Figure 3. Interpolated waterline coordinates at the design draught.

Table 1. Ships' particulars under study.

Table 2. Wave to ship length ratio for the three under study vessels.

Table 3. Converted value of mean wave load and measured power due to diffraction.

Table 4. Input values for equation No.3.

Table 5. Calculated values of added resistance in irregular waves at different angles.

Table 6. Calculated values of Mean wave load for the three under study vessels.

Table 7. Calculated values of added resistance for S155 using equation No.9 and No.17.

Table 8. Calculated values of Mean wave load for the three under study ships using equation No.21.

Table 9. Comparison of added wave resistance in irregular waves using different described methods.

Table 10. Comparison of added wave resistance found according to Faltinsen's method for all oblique waves and Hyundai's results. (F_M is the force corresponding to the power measured at speed trial.)

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