

بررسی تأثیر اینترسپتور بر ضرایب هیدرودینامیکی معادلات حرکت طولی شناورهای کاتاماران پروازی

امین نجفی^{۱*}، محمد سعید سیف^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، najafi.sharif@yahoo.com

^۲ استاد، دانشگاه صنعتی شریف، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، seif@sharif.edu

(تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۱۲)

چکیده

شناخت دینامیک شناورهای تندرو در آب آرام و امواج، حائز اهمیت فراوان است. با تعیین ضرایب معادلات حرکت، می‌توان دینامیک شناور و عوامل مؤثر بر ناپایداری آن را شناخت و در جهت کنترل این ناپایداری‌ها اقدام کرد. هدف اصلی در این پژوهش تعیین ضرایب هیدرودینامیکی حرکت طولی شناورهای تندرو کاتاماران با استفاده از CFD و همچنین پاسخ به این سؤال که المان کنترلی اینترسپتور چه تأثیری بر ضرایب هیدرودینامیکی شناور کاتاماران تندرو دارد؛ است. تعیین ضرایب هیدرودینامیکی به روش تجربی هزینه‌بر بوده و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی دقیق دارد، بنابراین استخراج این ضرایب به روش عددی و ایجاد آزمایشگاه مجازی می‌تواند مفید باشد. در این تحقیق به استخراج ضرایب هیدرودینامیکی یک کاتاماران بدون و با اینترسپتور پرداخته شده است. نتایج، نشان‌دهنده مستقل بودن اکثریت ضرایب از فرکانس، به‌خصوص در فرکانس‌های بالا است. همچنین تأثیر اینترسپتور بر ضرایب نیز در فرکانس‌های مختلف به‌جز موارد اندکی قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

کلمات کلیدی:

ضرایب هیدرودینامیکی، کاتاماران، اینترسپتور، دینامیک سیالات محاسباتی

Assessment of Interceptor Effect on Hydrodynamic Coefficients of Longitudinal Equations of Motion of Planing Catamarans

Amin Najafi^{*1}, Mohammad Saeed Seif²

¹ Ph.D. student, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles, Sharif University of Technology; Najafi.sharif@yahoo.com

² Professor, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles, Sharif University of Technology; seif@sharif.edu

(Submitted: 2016/Jul/17; Accepted: 2016/Aug/2)

Abstract:

Understanding the dynamics and behavior of high speed crafts, in calm water and waves is of vital importance. Determination of coefficients of equations of motion helps recognition of dynamics of high speed crafts and the factors affecting their instabilities which can be useful in controlling these instabilities. The main purposes of this research are determining the coefficients of longitudinal motions of planing catamarans using CFD and evaluating the Interceptor effect on hydrodynamic coefficients of a planing catamaran. Determination of hydrodynamic coefficients using experimental approaches is remarkably expensive, and requires precise laboratory equipment; therefore, using numerical method for hydrodynamic coefficients determination and development of a visual laboratory seems highly efficient. In this research the interceptor effect on hydrodynamic coefficients of a planing catamaran is evaluated. Results indicate most of the coefficients are frequency independence especially for high frequencies. Also, interceptor effect on hydrodynamic coefficients in different frequencies is negligible except for a few cases.

Keywords

Hydrodynamic Coefficients catamaran, Interceptor, Computational Fluid Dynamics

شناورهای پروازی به شناورهای گفته می‌شود که دارای عدد فرود عرضی بزرگ‌تر از ۱ می‌باشند. درحالی‌که پیشرفت‌های زیادی در زمینه بررسی دریامانی شناورهای جابجایی صورت گرفته است، در مورد شناورهای تندرو، پیشرفت چندانی صورت نگرفته است که این امر، ناشی از عملکرد هیدرودینامیکی پیچیده شناورهای تندرو است. بررسی‌های صورت گرفته در راستای عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای تندرو به بررسی دینامیک این شناورها منتهی شده است. در این راستا تعیین ضرایب هیدرودینامیکی معادلات دینامیک حرکت شناورهای تندرو از ضرورت‌های بررسی عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای تندرو است. متأسفانه این ضرایب برخلاف شناورهای معمولی، به صورت غیرخطی تابعی از حرکات شناور به علاوه سرعت آن می‌باشند.

دینامیک شناورهای تندرو به وسیله محققین اندکی مورد بررسی قرار گرفته است و همین بررسی، نشان‌دهنده تفاوت زیاد روش‌های مختلف به کاررفته در حل مسئله است. در سال ۱۹۶۷ اچسو روش تئوری نواری را برای بررسی حرکت حالت پایا و نیمه پایای سطح‌های پروازی سه بعدی فرموله کرده است [۱]. آلتمن در سال ۱۹۶۸ بر روی یک شناور منشوری، آزمایش‌های نوسانات اجباری را انجام داده است [۲]. فریدزما از سال ۱۹۶۹ تا سال ۱۹۷۱ آزمایش‌های گسترده‌ای را بر روی یک سری از شناورها با زاویه ددرايز ثابت در امواج منظم و نامنظم انجام داد [۳، ۴]. اگیلوی و شن در سال ۱۹۷۳ پایداری دینامیکی یک صفحه پروازی دوبعدی را بررسی کردند. این محققین مسئله را به صورت دوبعدی در نظر گرفتند که در آن تغییرات سطح خیس شده به صورت یک درجه آزادی عمل می‌کرد [۵]. دی ژان تست-های نوسانات اجباری را بر روی یک شناور پروازی در سرعت‌های مختلف در سال ۱۹۷۳ انجام داد [۶]. مارتین در سال ۱۹۷۸ به گسترش روابط ریاضی جهت بررسی پایداری پروپوزینگ و حرکات خطی کوپل شده هیو و پیچ و سرج در امواج به کمک تئوری نواری پرداخت [۷، ۸]. تئوری مارتین برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی بر پایه تقریب جسم لاغر مانک (۱۹۲۴) [۹] و آنالیز تأثیر نیروی ثقل صفر واگنر (۱۹۳۱) [۱۰] می‌باشد. در سال ۱۹۸۸ وایت و ساویتسکی نتایج تجربی مقاومت و ویژگی‌های دریامانی دو

شناور تندرو را با نتایج حاصل از یک برنامه کامپیوتری که برای شناورهای جابجایی استفاده می‌شود، مقایسه کردند [۱۱]. پین در سال ۱۹۹۰ با استفاده از تجربه بالای خود در زمینه شناورهای تندرو، نرم افزار شبیه ساز حرکات یک شناور پروازی را در امواج تصادفی از روبرو و پشت نوشت. ضرایب هیدرودینامیکی بر پایه تئوری نواری دوبعدی تعیین شدند [۱۲].

امروزه بررسی عملکرد دریامانی این شناورهای تندرو، ترکیبی از روش‌های تجربی و تحلیلی می‌باشد. آزمایش‌ها شامل تست‌های جرم افزوده و میرایی یا بررسی حرکات در امواج تصادفی و منظم می‌باشد. روش‌های تحلیلی می‌تواند شامل دینامیک غیرخطی که در آن ضرایب هیدرودینامیکی بر پایه تئوری نواری نیروی ثقل صفر یا استفاده از تئوری خطی شناورهای معمولی تعیین می‌شوند. دلیل استفاده از تئوری‌های خطی شناورهای پروازی، در دسترس بودن برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده بر اساس این روش‌ها است. ساویتسکی و وایت در سال ۱۹۸۸ نشان دادند که این برنامه برای سرعت‌های پایین زیر حالت پروازی قابل استفاده‌اند. ولی با افزایش سرعت شناور میزان خطای این برنامه‌ها نیز افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۲ آرمین تروش، ضرایب هیدرودینامیکی را به صورت تجربی تعیین کرد. تروش نشان داد که سطح خیس شده شناور پروازی وابسته به زمان و ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به فرکانس می‌باشند [۱۳]. در سال ۱۹۹۴ گریگوروپولوس و فلوریوس و لوکاکیس با استفاده از نتایج به دست آمده از ثبت حرکات شناور در حوضچه کشش به بررسی تجربی و عددی تأثیر امواج گذرا و منظم بر حرکات شناور تفریحی و مقایسه‌ی بین نتایج دو موج پرداختند [۱۴]. در سال ۱۹۹۷ جورنی با استفاده از نتایج به دست آمده از حوضچه کشش به بررسی تأثیر امواج سطحی بر حرکات شناور و مقاومت اضافه مدل شناور کانتینربر پرداخت [۱۵]. کلاکا و مک کوک و پاتریک کوسر در سال ۱۹۹۹ به بررسی حرکات هیو و پیچ شناور در امواج منظم پرداخته‌اند [۱۶]. تحقیقات اخیر برای پیش‌بینی حرکات شناور، بر پایه روش‌هایی قرار داده شده است که ویسکوزیته جریان را در نظر می‌گیرند. روش‌های عددی بر

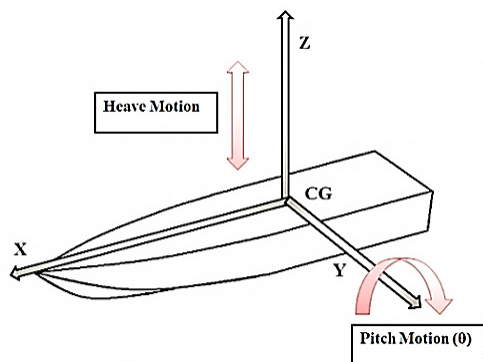
پایه معادلات ^۱ RANS جزء مؤثرترین و بهترین روش‌ها برای پیش‌بینی حرکات شناور است. در این روش معادلات ناویر-استوکس در یک شبکه محاسباتی به همراه یک مدل توربولانسی حل می‌شوند. حجم زیادی از این شبیه‌سازی‌ها بر پایه معادلات RANS مربوط به آنالیز حرکت رول، به علت تأثیر زیاد ویسکوزیته بر این حرکت و نتایج ضعیف تئوری نواری است. مثال‌های سه‌بعدی شبیه‌سازی حرکت رول در چن و همکاران (۲۰۰۱) [۱۷] برای یک شناور در حال رول و نیز در میلر و همکاران (۲۰۰۲) [۱۸] داده شده‌است. به هر حال نباید هدف شبیه‌سازی حرکات شش درجه آزادی شناور در جریان ویسکوز را فراموش کرد. انجام تحقیقات کامل بر روی مدل‌سازی صفحه عمودی حرکات شناور در جریان ویسکوز، مرحله اول خواهد بود. کارهای قبلی بر روی شبیه‌سازی سه‌بعدی حرکات صفحات عمودی شامل ساتو و همکاران (۱۹۹۹) [۱۹] که نتایج شبیه‌سازی را برای شناور نوع ویگلی و بدنه‌های سری ۶۰ ارائه دادند و کوراهاچام و همکاران (۲۰۰۲) [۲۰] که نتایج شبیه‌سازی برای بدنه‌های سری ۶۰ و شناور کانتینربر ارائه دادند؛ اما هیچ‌کدام از این دو نه تنها آنالیز کاملی را ارائه ندادند، بلکه فاقد اعتبارسنجی و مطالعه بر روی پارامترهای فیزیکی مؤثر بودند. در سال ۲۰۰۳ پاترسون و همکارانش نرم‌افزار CFDShip-IOWA را که بر پایه معادلات RANS می‌باشد [۲۱] و نسخه تکامل‌یافته تحقیقات و پژوهش‌های محققین قبلی نظیر ویلسون، استرن و راهی (۱۹۹۸-۲۰۰۲) می‌باشد، ارائه دادند [۲۵]-[۲۲]. در سال ۲۰۰۵ در آمریکا آقای ویموث و همکارانش حرکات هیو و پیچ شناور ویگلی در امواج را با استفاده از معادلات RANS شبیه‌سازی کرده که با نتایج تجربی توافق خوبی داشت [۲۶]. در سال ۲۰۰۷ آقای کاریک از همان روش یکسان جهت بررسی حرکات یک شناور آموزشی در امواج بهره برد [۲۷]. در سال ۲۰۱۰ آقای لارسن و همکارانش حرکات شناور کانتیربر KCS و تانکر KVLCC2 را در شرایط امواج از روبرو با استفاده از معادلات RANS مدل‌سازی کردند [۲۸]. در سال ۲۰۰۹ روش RANS جهت تحلیل حرکت رول و پارامترهای مؤثر در آن در چند شناور خاص توسط آقای سادات‌حسینی مورد استفاده قرار گرفت [۲۹]. در سال ۲۰۱۰ بلکناپ نتایج شبیه‌سازی تست‌های حرکات هیو واداشته را با استفاده

معادلات RANS و جریان پتانسیل غیرخطی را با نتایج به‌دست‌آمده از روش پتانسیل بدنه-دقیق با شرایط سطح آزاد خطی مقایسه کرد [۳۰]. توکلی و همکاران با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش ساویتسکی به بهینه‌سازی مقاومت و حرکات شناور تندرو پرداختند [۳۱]. قدیمی و همکاران (۲۰۱۳) روش زارنیک را برای حرکات شش درجه آزادی شناور تندرو گسترش دادند. [۳۲].

با توجه به مقدمه بیان‌شده در بالا در ادامه با استفاده از روش‌های عددی بر پایه معادلات RANS به استخراج ضرایب هیدرودینامیکی شناورهای تندرو پرداخته می‌شود. روش استفاده‌شده جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیکی بر اساس روش تروش (۱۹۹۲) و جونی (۱۹۹۲) [۱۵، ۱۳] است. جهت انجام اعتبارسنجی، روش ارائه‌شده در این تحقیق، به مدل‌سازی شناور تندرو تک بدنه استفاده‌شده توسط تروش (۱۹۹۲) پرداخته و پس از محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی این شناور با استفاده از روش حاضر و مقایسه آن با نتایج تجربی تروش (۱۹۹۲) توافق خوبی بین نتایج تحقیق حاضر با نتایج آقای تروش مشاهده می‌شود. سپس از این روش یکسان جهت بررسی ضرایب هیدرودینامیکی یک کاتاماران مجهز به اینترسپتور و تأثیر تغییرات فرکانس و سرعت بر این ضرایب استفاده می‌شود. استفاده از اینترسپتورها بر روی بال هواپیماها، موشک‌ها برای تولید نیروی لیفت و کنترل ارتفاع موفقیت‌آمیز است. ایده اولیه استفاده از اینترسپتورها در شناورهای تندرو از همین موفقیت ناشی شده‌است. در شناورهایی که از سیستم رانش واتر جت^۲ استفاده می‌کنند و یا شناورهای پلنینگ، ممکن است به علت کمبود سطح آب‌خور دچار عدم پایداری گردند. این عدم پایداری به‌وسیله‌ی نصب سیستم‌های کنترل غیرفعال و یا فعال جبران می‌شود. ولی به علت نیروی درگ و همچنین عدم وجود فضای لازم برای سیستم‌های رایج، طراحان رو به استفاده از اینترسپتورها آوردند (شکل ۱). کارافیس و فیشر نشان دادند که استفاده از ملحقاتی مشابه اینترسپتور می‌تواند ۰/۴ الی ۲ درجه از تریم در حال حرکت بکاهد و ۲٪ از مصرف سوخت در سرعت طراحی نیز کم کند [۳۳]. نتایج حاصله از آزمایش‌ها در مقیاس واقعی کاهش مقاومت را نشان می‌دهد. کاهش مقاومت نیز منجر

^۲ Water jet

^۱ Reynolds Averaged Navier Stokes



شکل ۲- Z حرکت هیو و θ حرکت پیچ

$$F = \rho V \ddot{Z} \quad (1)$$

$$M = I_{yy} \ddot{\theta} \quad (2)$$

در روابط بالا F مجموع نیروهای وارد بر شناور در راستای محور Z و M مجموع ممان‌های وارد بر شناور حول محور Y می‌باشد. باید توجه شود که معادلات ۱ و ۲ نشان‌دهنده رابطه خطی در نیروهای سیال وارد بر شناور نیستند. درواقع تغییرات زیاد در مساحت سطح آب‌خور شناورهای تندرو باعث بروز روابط غیرخطی برای نیروها و ممان‌ها می‌شود. مدل‌سازی دینامیک شناورهای تندرو باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که این اثرات غیرخطی به‌وضوح دیده شوند. درنتیجه طرف چپ معادلات ۱ و ۲ باید به‌صورت توابع صریحی از متغیرهای مستقل مانند جابجایی، سرعت و شتاب شناور تندرو نوشته شوند. در این راستا معادلات کوپل هیو و پیچ برای شناورهای تندرو به‌صورت زیر ارائه می‌شوند:

$$(\rho V + A_{33}) \cdot \ddot{Z} + B_{33} \cdot \dot{Z} + C_{33} \cdot Z + A_{35} \cdot \ddot{\theta} + B_{35} \cdot \dot{\theta} + C_{53} \cdot \theta = X_{w3} \quad (3)$$

$$(I_{yy} + A_{55}) \cdot \ddot{\theta} + B_{55} \cdot \dot{\theta} + C_{55} \cdot \theta + A_{53} \cdot \ddot{Z} + B_{53} \cdot \dot{Z} + C_{53} \cdot Z = X_{w5} \quad (4)$$

در معادلات بالا Z حرکت هیو و θ حرکت پیچ می‌باشند که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. تعیین ضرایب هیدرودینامیکی A_{ij} (ضریب هیدرودینامیکی جرم افزوده) و B_{ij} (ضریب هیدرودینامیکی دمپینگ) معمولاً با استفاده از مدل تست انجام می‌گیرد (جورنی (۱۹۹۲) و تروش (۱۹۹۲)) [۱۳، ۱۵]. در این تست‌ها شناور به انجام حرکت هیو و پیچ خالص، در سرعت ثابت واداشته می‌شود، سپس نیروها، ممان‌ها و اختلاف فاز بین حرکات و تحر یک

به کاهش مصرف سوخت، کاهش تشعشعات و افزایش سرعت و برد می‌گردد.

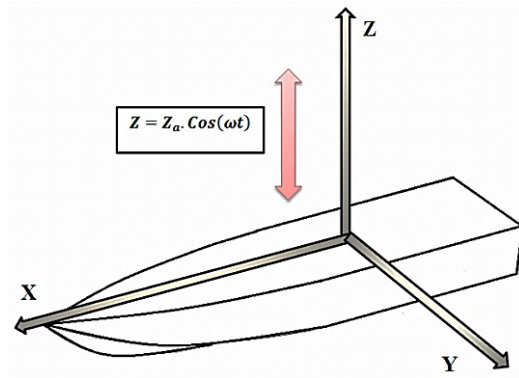
تی‌سای و هوآنگ نشان دادند که اینترسپتور می‌تواند به‌طور مؤثر تریم در حال حرکت و مقاومت شناورهای پروازی را کاهش دهد [۳۴]. آخرین کارهای آزمایشگاهی انجام‌شده در این زمینه به ترکیب و استفاده هم‌زمان اینترسپتور و تریم تب می‌پردازد. در مقاله سال ۲۰۰۳ تی‌سای و هوآنگ نمودارهای از این مقاله بیان شده‌است [۳۴]. در این مقاله سعی شده زاویه ایده‌آل تریم تب، طول ایده‌آل اینترسپتور در استفاده هم‌زمان مشخص شود. یکی از آخرین تحقیقات انجام‌شده بر روی تأثیر اینترسپتور بر روی رفتار شناورهای تندرو توسط استین در سال ۲۰۰۹ انجام شده‌است [۳۵]. ایده اصلی مقاله استین با توجه به تز دانشجویی هانسویک مطرح شده‌است که در آن تأثیر استپ بر روی فرم بدنه شناورهای تندرو موردبررسی قرار گرفته است. بخشی از این تست‌ها به‌منظور مطالعه تأثیر نصب اینترسپتور در محل استپ صورت گرفته است. او دریافت که در شرایطی نصب اینترسپتور و حذف استپ می‌تواند نتایج بهتری را ایجاد نماید.



شکل ۱- اینترسپتور در پاشنه شناور

۲- تعریف مسئله

یک شناور تندرو را به همراه یک سیستم مختصات راست‌گرد مانند شکل ۲ در نظر بگیرید. حرکات هیو (جابجایی عمودی مرکز ثقل) و پیچ (چرخش حول محور Y) در این شکل نشان داده شده‌اند. با استفاده از قانون دوم نیوتن معادلات حرکت برای دو درجه آزادی هیو و پیچ حول مرکز ثقل به‌صورت زیر می‌باشد:



شکل ۴ - یک شناور تحت انجام حرکت هیو واداشته

معادله (۵) بیانگر حرکت هیو اجباری شناور است که دامنه‌ی حرکت هیو و فرکانس آن معلوم می‌باشد، برای به‌دست آمدن ضرایب، Z را از معادله (۵) در معادلات (۶) و (۷) قرار داده و همچنین قسمت سمت راست معادلات (۶) و (۷) را بسط داده می‌شوند:

$$\begin{aligned} & (M_{33} + A_{33}) \cdot Z_a \omega^2 \cos(\omega t) \\ & + B_{33} \cdot \omega \sin(\omega t) + C_{33} \cdot \cos(\omega t) \\ & = -X_{03a} \cdot \cos(\omega t) \cos(\varepsilon_{X_{03Z}}) \\ & + \sin(\omega t) \sin(\varepsilon_{X_{03Z}}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & (A_{53}) \cdot Z_a \omega^2 \cos(\omega t) \\ & + B_{53} \cdot \omega \sin(\omega t) + C_{53} \cdot \cos(\omega t) \\ & = -X_{05a} \cdot \cos(\omega t) \cos(\varepsilon_{X_{05Z}}) \\ & + \sin(\omega t) \sin(\varepsilon_{X_{05Z}}) \end{aligned} \quad (9)$$

با برابر قرار دادن ضرایب $\cos(\omega t)$ و $\sin(\omega t)$ در طرفین دو معادله بالا ضرایب هیدرودینامیکی به‌صورت زیر به‌دست خواهند آمد:

$$A_{33} = -\frac{X_{03a} \cdot \cos(\varepsilon_{X_{03Z}})}{Z_a \cdot \omega^2} + \frac{C_{33}}{\omega^2} - M_{33} \quad (10)$$

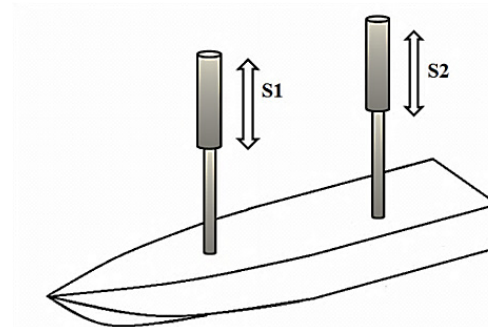
$$B_{33} = +\frac{X_{03a} \sin(\varepsilon_{X_{03Z}})}{Z_a \cdot \omega} \quad (11)$$

$$A_{53} = -\frac{X_{05a} \cdot \cos(\varepsilon_{X_{05Z}})}{Z_a \cdot \omega^2} + \frac{C_{53}}{\omega^2} \quad (12)$$

$$B_{53} = +\frac{X_{05a} \sin(\varepsilon_{X_{05Z}})}{Z_a \cdot \omega} \quad (13)$$

$$C_{33} = +2\rho g \int_0^L y_w \cdot dx_b \quad (14)$$

اندازه‌گیری و تعیین می‌شوند و با استفاده از روابطی ضرایب به‌دست می‌آیند. در تست‌های تجربی نیروها و ممان‌های وارد بر شناور بوسیله موتورهای الکتریکی یا مکانیکی تأمین می‌شوند و مدل با سرعت ثابت در آب ساکن کشیده می‌شود. شکل (۳) شکل ساده‌ای از آزمایش فوق را نشان می‌دهد. اگر میله‌های عمودی تحت حرکت قائم نوسانی هماهنگ ($S1=S2$) قرار گیرند، مدل تحت حرکت هیو اجباری نوسان خواهد کرد و به‌همین ترتیب برای انجام حرکت پیچ اجباری دو میله تحت حرکت قائم نوسانی در جهت مخالف یکدیگر قرار می‌گیرند.



شکل ۳ - شناور تندرو در حال انجام حرکات پیچ و هیو واداشته هارمونیک

در ادامه به نحوه تعیین ضرایب هیدرودینامیکی A_{ij} و B_{ij} با استفاده از انجام حرکات هیو و پیچ واداشته پرداخته می‌شود.

۲-۱ حرکت هیو واداشته هارمونیک

زمانی که شناور تحت حرکت هیو واداشته هارمونیک قرار می‌گیرد، معادلات حرکت به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$Z = Z_a \cdot \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & (M_{33} + A_{33}) \cdot \ddot{Z} + B_{33} \cdot \dot{Z} + C_{33} \cdot Z \\ & = X_{03a} \cdot \cos(\omega t + \varepsilon_{X_{03Z}}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & A_{53} \cdot \ddot{Z} + B_{53} \cdot \dot{Z} + C_{53} \cdot Z \\ & = X_{05a} \cdot \cos(\omega t + \varepsilon_{X_{05Z}}) \end{aligned} \quad (7)$$

شکل (۴) یک شناور را تحت انجام حرکت هیو واداشته نشان می‌دهد. Z_a دامنه‌ی حرکت و ω فرکانس آن است.

$$C_{55} = +2\rho g \int_0^L y_w \cdot x_b \cdot x_b \cdot dx_b \quad (23)$$

$$C_{35} = -2\rho g \int_0^L y_w \cdot x_b \cdot dx_b \quad (24)$$

تعیین ضرایب هیدرودینامیکی به تعیین دامنه نیرو و ممان هارمونیک وارد بر شناور و همچنین اختلاف فاز این نیرو و ممان هارمونیک با حرکت هارمونیک شناور وابسته خواهد بود. آقای تروش (۱۹۹۲) و همچنین جورنی (۱۹۹۲) جهت تعیین نیروها و ممان‌های وارد بر شناور و نیز اختلاف فاز آن‌ها با حرکات واداشته هارمونیک از تست مدل شناور و بهره‌گیری از امکانات آزمایشگاهی استفاده کردند. به‌طور مثال آقای تروش از یک صفحه مجهز به مکانیزم حرکات عمودی^۳ که در سال ۱۹۸۹ در دانشگاه می‌شیگان نصب و کالیبره شد و نیز مجهز به حس‌گرهای جداگانه جهت ثبت نیرو، ممان و حرکات هارمونیک بوده است، برای انجام این تست‌ها استفاده کرد. استفاده از تست مدل جهت انجام حرکات هیو و پیچ واداشته هارمونیک برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی، بسیار هزینه‌بر خواهد بود. علاوه بر هزینه‌های ساخت مدل و تأمین امکانات اولیه آزمایشگاه، این تست‌ها نیازمند مکانیزم دقیق و پیچیده جهت انجام حرکات هیو و پیچ واداشته و کشیدن هم‌زمان مدل در سرعت موردنظر و نیز حس‌گرهای دقیق برای ثبت حرکات و نیروها و ممان‌های وارد بر شناور در طی این حرکات می‌باشد. از سوی دیگر ساخت مدل موردنظر و کالیبره کردن مکانیزم‌های موردنیاز در این تست‌ها بحث زمان‌بر بودن این تست‌ها را نیز به میان می‌آورد؛ بنابراین به نظر می‌رسد استخراج این ضرایب به روش عددی و ایجاد آزمایشگاه مجازی می‌تواند در شناخت هیدرودینامیک شناور تندر و مفید باشد. در این آزمایشگاه مجازی می‌توان حرکات هیو و پیچ واداشته را بر شناور اعمال کرد و با دقتی بسیار خوب به ثبت نیروها و ممان‌های وارد بر شناور و اختلاف فاز آن‌ها با حرکات هارمونیک و در نتیجه تعیین ضرایب هیدرودینامیکی پرداخت. در این روش معادلات RANS به همراه معادلات پیوستگی حل می‌شوند. در ادامه ابتدا به اعتبارسنجی و بررسی دقت روش عددی با مدل‌سازی شناور ارائه‌شده توسط آقای تروش (۱۹۹۲) پرداخته می‌شود، پس از اعتبار سنجی روش عددی

$$C_{53} = -2\rho g \int_0^L y_w \cdot x_b \cdot dx_b \quad (15)$$

۲-۲- حرکت پیچ واداشته هارمونیک

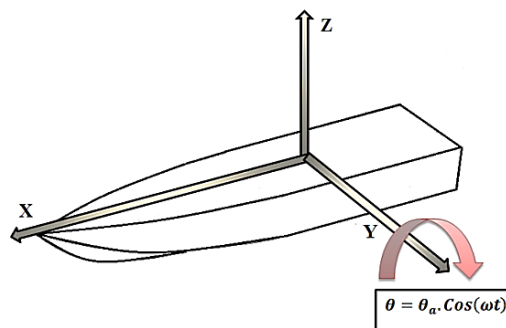
زمانی که شناور تحت حرکت پیچ واداشته هارمونیک قرار می‌گیرد، معادلات حرکت به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\theta = \theta_a \cdot \cos(\omega t) \quad (16)$$

$$(M_{55} + A_{55}) \cdot \ddot{\theta} + B_{55} \cdot \dot{\theta} + C_{55} \cdot \theta = X_{05a} \cdot \cos(\omega t + \varepsilon_{X_{05\theta}}) \quad (17)$$

$$A_{53} \cdot \ddot{\theta} + B_{53} \cdot \dot{\theta} + C_{53} \cdot \theta = X_{03a} \cdot \cos(\omega t + \varepsilon_{X_{03\theta}}) \quad (18)$$

شکل (۵) یک شناور را تحت انجام حرکت پیچ واداشته نشان می‌دهد. θ_a دامنه‌ی حرکت و ω فرکانس آن است.



شکل ۵ - یک شناور تحت انجام حرکت پیچ واداشته

مانند حرکت هیو هارمونیک با قرار دادن θ از معادله اول در معادلات بعدی و سپس برابر قرار دادن ضرایب $\cos(\omega t)$ و $\sin(\omega t)$ ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از تست حرکت پیچ واداشته به صورت زیر به دست خواهند آمد:

$$A_{55} = -\frac{X_{05a} \cdot \cos(\varepsilon_{X_{05z}})}{\theta_a \cdot \omega^2} + \frac{C_{55}}{\omega^2} - M_{55} \quad (19)$$

$$B_{55} = +\frac{X_{05a} \cdot \sin(\varepsilon_{X_{05z}})}{\theta_a \cdot \omega} \quad (20)$$

$$A_{35} = -\frac{X_{03a} \cdot \cos(\varepsilon_{X_{03z}})}{\theta_a \cdot \omega^2} + \frac{C_{35}}{\omega^2} \quad (21)$$

$$B_{35} = +\frac{X_{03a} \cdot \sin(\varepsilon_{X_{03z}})}{\theta_a \cdot \omega} \quad (22)$$

³Planar Vertical Motion Mechanism (VMM)

موردنظر به بررسی تأثیر اینترسپتور بر ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور کاتاماران انجام خواهد شد [۱۳].

۳-روش حل مسئله

۳-۱- معادلات حاکم

در این تحقیق از نرم‌افزار تجاری ANSYS CFX 14.0 برای مدل‌سازی حرکات به روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای گسسته سازی میدان حل استفاده می‌شود. معادله بقای جرم برای سیال غیرقابل تراکم در هر سه جهت اصلی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)، ρ چگالی سیال و u_i مؤلفه سرعت هر یک از سه جهت اصلی x ، y و z است. در این مسئله به دلیل وجود سطح آزاد، اثرات بویانسی و نیروی گرانش مطرح است. معادله دیگر، معادله بقای مومنتوم است که در هر یک از سه جهت اصلی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، F_i نیروی حجمی، g_i شتاب گرانش و τ_{ij} تانسور تنش‌های رینولدز است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (27)$$

در رابطه (۳)، δ_{ij} تابع دلتای کروکر^۴ است که برای $i = j$ برابر با یک و در غیر این صورت صفر است. با توجه به معادلات (۲۶) و (۲۷)، معادله (۲۸) به صورت زیر حاصل می‌شود که شامل جملات تنش‌های رینولدز است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \\ + \frac{\partial(\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \rho g_i \end{aligned} \quad (28)$$

همچنین در کد تجاری مورد استفاده از روش VOF^۵ برای مدل سطح آزاد استاندارد^۶ استفاده می‌شود. معادله حاکم بر انتقال نسبت حجمی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j c) = 0 \quad (29)$$

$$c = \frac{V_{air}}{V_{total}} \quad (30)$$

نسبت حجمی c به صورت کسر حجمی هوا در هر سلول تعیین می‌شود و چگالی و ویسکوزیته سیال به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\rho = \rho_{air}c + \rho_{water}(1 - c) \quad (31)$$

$$\mu = \mu_{air}c + \mu_{water}(1 - c) \quad (32)$$

روش VOF برای تمامی فازهای موجود در یک حجم، کنترل فشار و سرعت یکسانی را در نظر می‌گیرد و نسبت فازها را کنترل می‌کند؛ بنابراین معادلات حاکم، در یک سیال تک فاز برای یک سیال معادل حل می‌شوند که ویژگی‌های فیزیکی این سیال تابعی از ویژگی‌های سیال انتخاب شده و نسبت حجمی در هر حجم کنترل است.

در معادله (۲۸) جمله $\frac{\partial(\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}$ مربوط به آشفتگی می‌باشد که برای مدل‌سازی آن نیاز به استفاده از یک مدل آشفتگی است. برای این امر از مدل ترکیبی دو معادله‌ای انتقال تنش برشی رینولدز^۷ (SST) که بر پایه مدل $k - \omega$ بنا نهاده شده، استفاده شده است. این مدل از رفتار تابع دیواره اتوماتیک^۸ بهره می‌گیرد. مدل SST ترکیبی از مدل‌های $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ است، بنابراین از مزایای هر دو مدل یعنی قدرت بالای همگرایی مدل رینولدز بالای $k - \varepsilon$ و رفتار اتوماتیک دیواره مدل رینولدز پایین $k - \omega$

^۷ Shear Stress Transport

^۸ Automatic wall function

^۴ Kronecker delta

^۵ Volume of Fluid

^۶ Standard free-surface model

معمولاً فشار جریان خروجی را تعیین می‌کند. سرعت در این مرز با استفاده از برون‌یابی از سلول‌های داخلی تعیین می‌شود. شرایط مرزی سیمتری^{۱۵} نیز برای کاهش تعداد سلول‌های مورد استفاده در مدل سازی استفاده می‌شود. تمامی گرادینان‌ها در محل شرط مرزی سیمتری برابر با صفر می‌باشند. فشار و سرعت بر این مرز نیز با استفاده از برون‌یابی تعیین می‌شود. بر دیواره بدنه مورد بررسی نیز شرط مرزی دیواره که شامل دو شرط نفوذناپذیری و عدم لغزش می‌باشد، اعمال می‌شود. در نتیجه سرعت روی سلول‌های متصل به بدنه، برابر با سرعت حرکت بدنه خواهد بود. فشار در این سلول‌ها نیز با استفاده از برون‌یابی تعیین می‌شود. برای شرط مرزی اطراف دامنه محاسباتی نیز دیواره با شرط قابل لغزش انتخاب شده‌است. برای مرزهای جانبی، مرز کف و مرز بالا، شرایط مرزی دیوار بدون لغزش انتخاب شده‌است. طبیعی است محل این مرزها باید به قدر کافی از خود جسم دور انتخاب شود تا انتخاب شرط مرزی دیواره برای آن‌ها، جواب‌های مسئله را از واقعیت فیزیکی دور نکند.

در مسائل CFD، اگر حل گذرا^{۱۶} باشد (و نه پایدار^{۱۷})، نیاز به مشخص نمودن شرایط اولیه برای دامنه محاسباتی است. در حالت حل پایدار، فقط یک حدس اولیه نیاز است و این حدس اولیه در همگرایی کیفیت و سرعت همگرایی تأثیر دارد؛ اما برای مسائل گذرا شرایط اولیه حتماً باید از لحاظ فیزیکی هم با واقعیت مسئله کاملاً مطابق باشد؛ چرا که حکم شرایط اولیه مسئله واقعی را دارد. در این تحقیق برای هر دوی شناور تندرو و کاتاماران مدل‌شده، ابتدا مسئله به صورت پایدار و مستقل از زمان شبیه‌سازی شده و پس از همگرایی شرایط اولیه تعیین‌شده و حل مسئله به صورت حالت گذرا (تابع زمان) ادامه پیدا کرده است.

۴- مدل‌سازی حرکت شناور تک‌بدنه در آب آرام

در این بخش مدل‌سازی حرکات هارمونیک یک شناور تک‌بدنه در آب آرام به کمک روش عددی بر پایه معادلات RANS مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت پس از اتمام و استخراج ضرایب هیدرودینامیکی به اعتبارسنجی نتایج این

را توأماً برخورددار است. تغییر تدریجی از مدل $k - \omega$ به مدل $k - \varepsilon$ به ترتیب از نواحی نزدیک به دیواره تا نواحی دور از دیواره توسط یک تابع ترکیب^۹ انجام می‌شود. این مدل دو معادله‌ای، مناسب‌ترین مدل برای تخمین شروع و میزان جدایی جریان سیال است (منتر ۲۰۰۳) [۳۶].

در کد تجاری ANSYS CFX، معادلات به‌وسیله حل‌گر کوپل^{۱۰} حل می‌شوند. در حل‌گر کوپل بر خلاف حل‌گرهای تفکیکی^{۱۱} هر سه معادله مومنتوم، یک معادله پیوستگی برای چهار مجهول (P, w, v, u) در یک ماتریس با هم حل می‌شوند. حل‌گر کوپل برای هر تکرار^{۱۲} زمان و حجم حافظه بیشتری نسبت به حل‌گر تفکیکی نیاز دارد اما به نسبت حل‌گر تفکیکی از همگرایی سریع‌تری برخوردار است. مسئله مهم دیگر این است که عملکرد الگوریتم و صحت جواب‌ها به شدت به گام زمانی وابسته است (فرزینگر ۱۹۹۹) [۳۷]. برای تعیین گام زمانی از عدد CFL که به صورت زیر تعریف می‌شود، استفاده شده‌است.

$$CFL = \frac{Udt}{\Delta} \quad (33)$$

در این رابطه Δ اندازه مش می‌باشد. به منظور پایداری حل عددی، عدد CFL باید در کل کمتر از یک باشد. همچنین انتخاب مقدار مناسب برای گام زمانی برای رسیدن به جواب‌های درست بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در نتیجه و با ارزیابی فیزیک مسئله و با توجه به رابطه (۳۳) و با انجام محاسبات، گام زمانی در تمام تحلیل‌های پیش رو ۰/۰۱ ثانیه قرار داده می‌شود.

۳-۲- شرایط مرزی و شرایط اولیه

شرایط مرزی یک ناحیه حل، میزان ورود و خروج جریان به ناحیه را کنترل می‌کند. در واقع در یک کد CFD، این شرایط مرزی است که جواب را به دامنه محاسباتی القاء می‌کند. در این قسمت شرایط مرزی استفاده شده در این تحقیق ارائه شده‌است.

شرایط مرزی ورودی^{۱۳} سرعت ورود جریان به ناحیه حل را مشخص می‌کند. فشار در مرز ورودی با برون‌یابی از سلول‌های همسایه به دست می‌آید. شرایط مرزی خروجی^{۱۴}

¹⁴ Outlet B. C.

¹⁵ Symmetry B. C.

¹⁶ Transient

¹⁷ Steady

⁹ Blending function

¹⁰ Coupled solver

¹¹ Segregated solver

¹² Iteration

¹³ Inlet B. C.

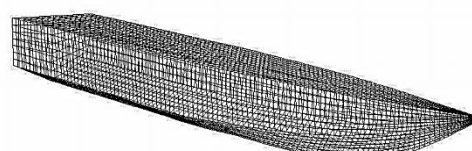
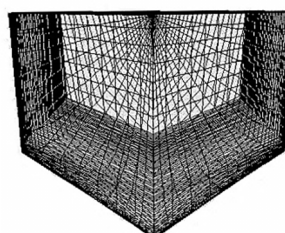
شبیه‌سازی به کمک نتایج آزمایش‌های تروش (۱۹۹۲) پرداخته خواهد شد.

۴-۱- مشخصات هندسی و شبکه‌بندی میدان حل

شرایط مرزی حل عبارتند از: فشار نسبی که در خروجی فشار استاتیکی و در نواحی دور صفر در نظر گرفته شد. سرعت هوا و آب در ورودی ۲/۵۶ متر بر ثانیه معادل با عدد فرود عرضی ۱/۵ می‌باشد و شناور دارای تریم اولیه ۴ درجه است (تروش ۱۹۹۲). در بالای مدل نیز شرایط ورود و خروج هوا در نظر گرفته شده است. کف دامنه شرط عدم لغزش و در مرز موجود در انتهای محور Y دیواری قرار دارد که سیال می‌تواند بر روی آن حرکت کند. شکل ۶ نیز توزیع شبکه اطراف شناور تندر را نشان می‌دهد.

جدول ۱ - مشخصات هندسی شناور واقعی جهت مدل‌سازی

عدد		
مشخصات شناور تندر	مقدار	واحد
طول	۲/۰۹۶	متر
عرض	۰/۳۱۸	متر
مرکز ثقل عمودی	۰/۱۹۵	متر
مرکز ثقل	۰/۴۷۰	متر
نسبت طول خیس شده به عرض	۳/۰	[-]



شکل ۶ - فرم بدنه و مش سطح شناور تندر

برای شبکه‌بندی مدل‌سازی از یک مش با سازمان برای دامنه حل با ابعاد ۱۳×۳×۶ متر برای شناوری که مشخصات هندسی آن در جدول ۱ بیان شده، استفاده شده است. هندسه این شناور نیز در شکل ۶ نشان داده شده است (تروش ۱۹۹۲). این ابعاد دامنه نسبت به طول شناور انتخاب شده‌اند؛ به گونه‌ای که جریان در پشت و کنار شناور زمان کافی برای نشان دادن خود داشته باشند. با استفاده از تقارن شناور نسبت به محور طولی از نصف دامنه سیالاتی برای حل مسئله استفاده شده که منجر به کاهش

حجم محاسباتی می‌گردد. میدان سیال دارای مشی است که قابلیت تغییر شکل داشته و با جابجایی جسم صلب شکل و حجم سلول‌ها تغییر می‌کند، در این مدل‌سازی از ۵۰۰،۰۰۰ سلول استفاده شده است. فاصله اولین گره از بدنه شناور بر اساس y^+ موردنظر تعیین می‌شود. در تحقیق حاضر مقدار میانگین y^+ حدود ۳۰۰ با وجود حداقل ۱۰ گره درون لایه مرزی آشفتگی بوده است. برای تخمین پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره از تابع دیواره اتوماتیک مدل آشفتگی انتقال تنش برشی استفاده می‌شود. رابطه فاصله بی‌بعد y^+ بر اساس اولین گره مجاور دیواره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y^+ = \frac{u_\tau \mu}{\rho} \Delta y \quad (34)$$

در رابطه (۳۴) μ ویسکوزیته دینامیکی، ρ چگالی سیال، u_τ سرعت اصطکاکی و Δy فاصله اولین گره مجاور دیواره از دیواره است. سرعت اصطکاکی u_τ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

که τ_w تنش برشی دیواره است. همچنین رابطه زیر که بر اساس جریان روی صفحه تخت به دست آمده است برای محاسبه فاصله اولین گره از دیواره بر اساس y^+ پیشنهاد می‌شود (ANSYS 2005)

$$\Delta y = L \cdot y^+ \cdot \sqrt{74} \cdot (Re)^{-\frac{13}{14}} \quad (36)$$

در رابطه فوق L طول مشخصه جسم و Re رینولدز جریان می‌باشد.

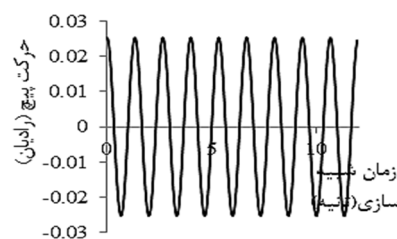
۴-۲- نتایج مدل‌سازی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، هدف استفاده از روش عددی تعیین دامنه نیرو و ممان وارد بر شناور و نیز تعیین اختلاف فاز آن‌ها با حرکت هارمونیک شناور جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیکی می‌باشد. برای این منظور شناور تندر را باید تحت اثر حرکت هارمونیک هیو و پیچ قرار داد. دقت شود که فرکانس و دامنه حرکات از تروش (۱۹۹۲) استخراج شده‌اند. این حرکت به مرکز ثقل شناور وارد خواهد شد. نتایج حرکات هیو و پیچ واداشته شناور در شکل ۷ خلاصه شده‌اند. نتایج شامل نیروی هارمونیک و ممان وارد بر شناور بر اثر انجام حرکت هیو هارمونیک واداشته با دامنه‌ی ۲ سانتی‌متر و فرکانس ۴/۷۲، نیروی هارمونیک و ممان وارد بر شناور بر اثر انجام حرکت پیچ

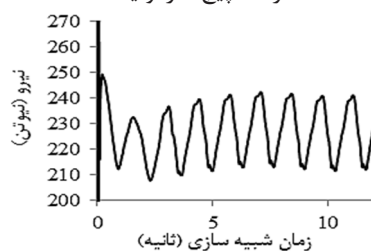
هارمونیک واداشسته با دامنه‌ی ۰/۰۲۶ رادیان و فرکانس ۴/۷۲ را نشان می‌دهد.

حرکت پیچ واداشته هارمونیک:

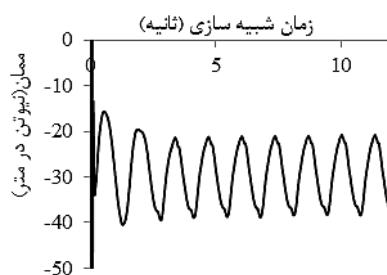
$$\theta = 0.026 \cdot \cos(4.72t)$$



حرکت پیچ هارمونیک



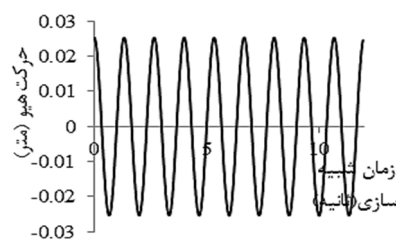
تغییرات نیروی هارمونیک وارد بر شناور در حرکت پیچ هارمونیک



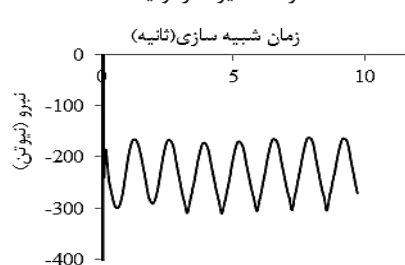
تغییرات ممان هارمونیک وارد بر شناور در حرکت پیچ هارمونیک

حرکت هیو واداشته هارمونیک:

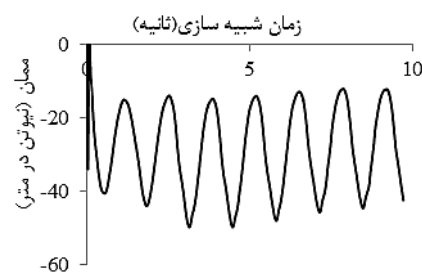
$$Z = 0.02544 \cdot \cos(4.72t)$$



حرکت هیو هارمونیک



تغییرات نیروی هارمونیک وارد بر شناور در حرکت هیو هارمونیک



تغییرات ممان هارمونیک وارد بر شناور در حرکت هیو هارمونیک

شکل ۷ - نتایج عددی حرکات هیو و پیچ واداشته شناور تک بدنه

۴-۳- محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و

اعتبارسنجی نتایج

به هندسه بدنه وابسته می‌باشند که برای شناور تندرو انتخاب شده این ضرایب در جدول ۲ ارائه شده‌است. این ضرایب با استفاده از روش سیمسون تعیین شده‌اند.

جدول ۲ - ضرایب استاتیکی C برای شناور تندرو

مقدار	ضریب هیدرواستاتیکی
2975	C ₃₃ (Nm)
353	C ₅₃ (N)
353	C ₃₅ (N)
42	C ₅₅ (Nm)

جهت محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور از معادلات استخراج شده توسط جورنی استفاده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، برای صحت‌سنجی نتایج از نتایج تست تروش (۱۹۹۲) استفاده می‌شود. تروش از مدل آزمایشگاهی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی استفاده کرد. در این آزمایش‌ها ضرایب موردنیاز تحت نوسانات اجباری اندازه‌گیری می‌شوند. مدل‌سازی طبق تروش در عدد فرود عری ۱/۵ انجام شد. دقت شود که ضرایب C

۵- مشخصات هندسی کاتاماران و شبکه بندی میدان حل

برای شبکه بندی مدل سازی نیز از یک مش بی سازمان برای دامنه حل با ابعاد $20 \times 60 \times 25$ متر برای کاتامارانی که مشخصات هندسی آن در جدول ۴ بیان شده، استفاده شده است. هندسه این کاتاماران نیز در شکل ۹ به نمایش گذاشته شده است. این ابعاد دامنه نسبت به طول شناور انتخاب شده اند؛ به گونه ای که جریان در پشت و کنار شناور زمان کافی برای نشان دادن خود داشته باشند.

جدول ۴ - مشخصات هندسی کاتاماران جهت مدل سازی

مشخصات کاتاماران	مقدار	واحد
طول	۱۲	متر
عرض	۴/۶	متر
آبخور	۰/۹۵	متر
جرم	۱۷۸۵۰	کیلوگرم

با استفاده از تقارن شناور نسبت به محور طولی از نصف دامنه سیالاتی برای حل مسئله استفاده شده که منجر به کاهش حجم محاسباتی می گردد. در این مدل سازی از $700,000$ سلول استفاده شده است.

شرایط مرزی حل مسئله عبارت است از: سرعت هوا و آب در ورودی $8/15$ متر بر ثانیه معادل با عدد فرود عرضی $1/2$ می باشد. در بالای مدل نیز شرایط ورود و خروج هوا در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه کاتاماران برای انجام شبیه سازی، پس از قرار دادن کاتاماران در شرایط هیدرواستاتیکی به دست آمد. آبخور کاتاماران حدود $0/6$ متر و تریم آن نیز حدود 1 درجه به دست آمد. توزیع شبکه اطراف کاتاماران در شکل ۹ نشان داده شده است.

مکان اولین مش بر روی کاتاماران بر اساس y^+ تعیین می شود. با ثابت نگاه داشتن مقدار y^+ در 300 ، ضخامت لایه اول 1mm به دست می آید. مش شامل حدود $700,000$ المان با 10 لایه باریک اطراف کاتاماران برای دیده شدن اثرات لایه مرزی است.

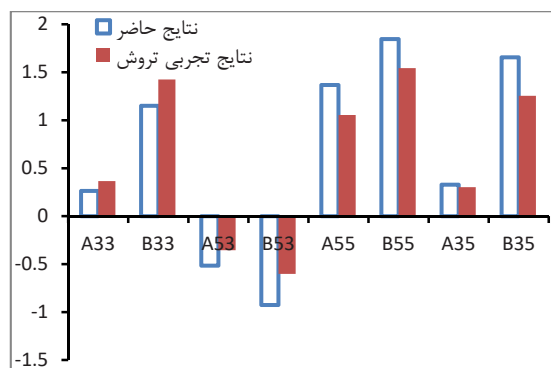
در نهایت ضرایب هیدرودینامیکی به دست آمده از این تحقیق و آزمایش های تروش برای شناور تندرو در شکل ۸ مقایسه شده است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می شود که توافق خوبی بین نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایش ها آقای تروش وجود دارد.

اختلافی که وجود دارد، می تواند ناشی از اختلافی باشد که بین شناور تحقیق حاضر با شناور تروش وجود دارد. هرچند سعی شده است که هندسه شناور تحقیق حاضر به شناور آقای تروش نزدیک شود، ولی باز هم اختلافاتی بین این دو وجود خواهد داشت.

لازم به ذکر است که ضرایب هیدرودینامیکی بی بعد در جدول ۳ نمایش داده شده اند:

جدول ۳ - ضرایب هیدرودینامیکی بی بعد

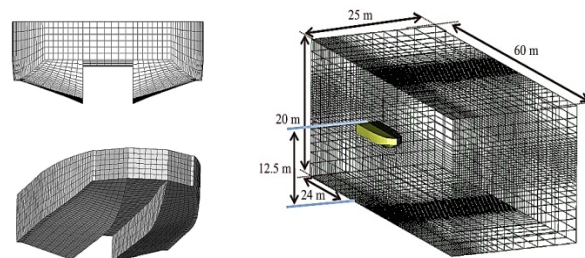
$B_{53}'' = \frac{B_{53}}{\rho B^4 \sqrt{\frac{g}{B}}}$	$A_{55}'' = \frac{A_{55}}{\rho B^5}$
$A_{33}'' = \frac{A_{33}}{\rho B^3}$	$B_{55}'' = \frac{B_{55}}{\rho B^5 \sqrt{\frac{g}{B}}}$
$B_{33}'' = \frac{B_{33}}{\rho B^3 \sqrt{\frac{g}{B}}}$	$A_{35}'' = \frac{A_{35}}{\rho B^4}$
$A_{53}'' = \frac{A_{53}}{\rho B^4}$	$B_{35}'' = \frac{B_{35}}{\rho B^4 \sqrt{\frac{g}{B}}}$



شکل ۸ - مقایسه نتایج تجربی تروش و نتایج عددی به دست آمده

در ادامه با توجه به تطابق خوب بین نتایج شبیه سازی عددی شناور تک بدنه با نتایج تجربی آقای تروش از همین روش یکسان به بررسی ضرایب هیدرودینامیکی شناور کاتاماران جهت پاسخ به سؤال تغییرات ضرایب نسبت به فرکانس حرکات شناور پرداخته شده است.

شکل ۱۰ نشان داده شده است. دقت شود که فرکانس و دامنه حرکات با توجه به شرایط موجود در خلیج فارس تعیین شده اند. در این مورد ω_e از ۳۹/۲۷ تا ۲/۵۹ تغییر داده می شود و در هر ω_e نیرو و ممان وارد بر کاتاماران به همراه اختلاف فاز آن ها با حرکت هارمونیک ثبت می شوند؛ همچنین دامنه ی حرکت هیو اجباری ۱۶ سانتی متر و دامنه ی حرکت پیچ ۰/۰۵۲ رادیان در نظر گرفته شده است. نتایج در فرکانس ۲/۵۹ رادیان بر ثانیه برای حرکات هیو و پیچ اجباری در شکل نشان داده شده است.



شکل ۹ - راست (دامنه ی محاسباتی و ابعاد آن برای شناور کاتاماران) چپ (فرم بدنه و مش سطح)

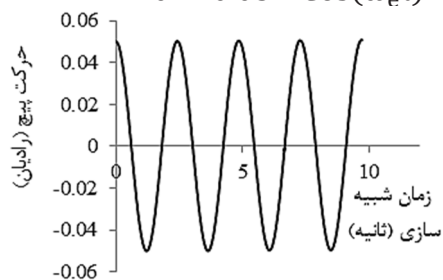
۵-۱- نتایج مدل سازی

نتایج مربوط به حرکت هارمونیک واداشته هیو در فرکانس ۳/۷ و واداشته پیچ در فرکانس ۲/۵۹ کاتاماران در حرکت هیو واداشته هارمونیک:

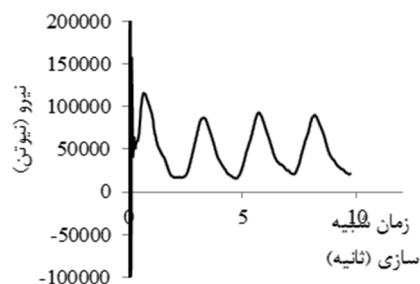
$$Z = 0.16 \cdot \cos(\omega_e t)$$

حرکت پیچ واداشته هارمونیک:

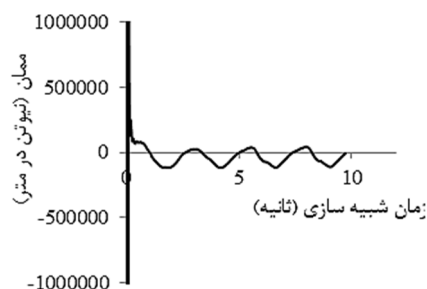
$$\theta = 0.052 \cdot \cos(\omega_e t)$$



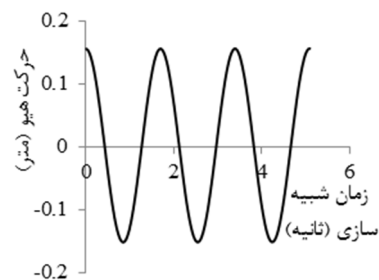
حرکت پیچ هارمونیک در فرکانس ۲/۵۹



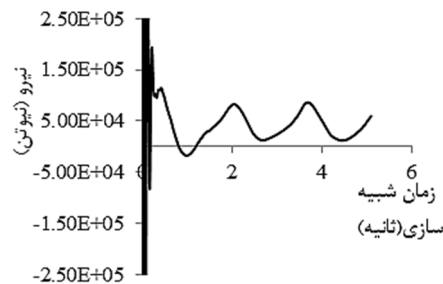
تغییرات نیروی هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۲/۵۹



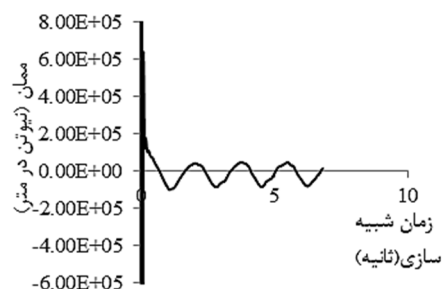
تغییرات ممان هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۲/۵۹



حرکت هیو هارمونیک در فرکانس ۳/۷



تغییرات نیروی هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۳/۷

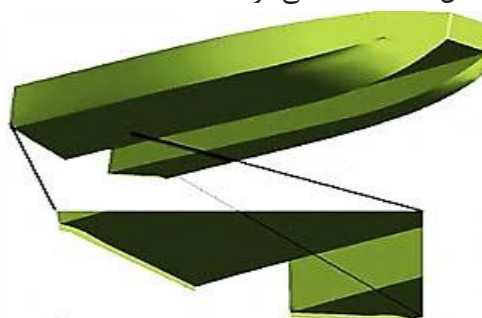


تغییرات ممان هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۳/۷

شکل ۱۰ - نیروها و ممان ها در حرکات هیو در فرکانس ۳/۷ و پیچ در فرکانس ۲/۵۹ واداشته کاتاماران

۶- اضافه کردن اینترسپتور به کاتاماران

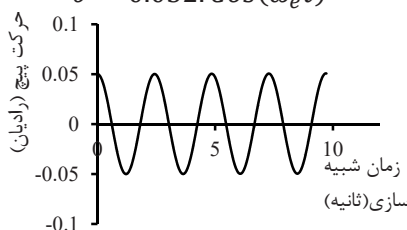
برای دیده شدن تأثیر اینترسپتور، کاتاماران بخش قبل به اینترسپتوری با ارتفاع ۳، ۵ و ۷ سانتی متر مجهز می شود. در ادامه به ارائه نتایج مدل سازی کاتاماران با اینترسپتور پرداخته می شود. نمایش اینترسپتور با ارتفاع ۷ سانتی متر در شکل ۱۱ مشاهده می شود.



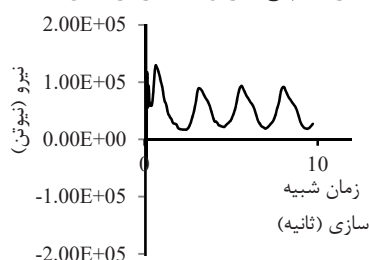
شکل ۱۱ - نمایش اینترسپتور

حرکت پیچ واداشته هارمونیک:

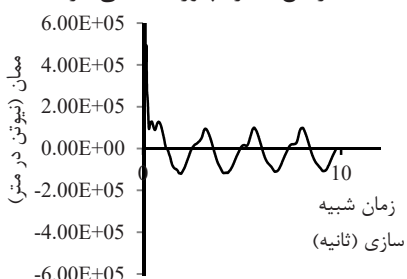
$$\theta = 0.052 \cdot \cos(\omega_e t)$$



حرکت پیچ هارمونیک در فرکانس ۲/۵۹



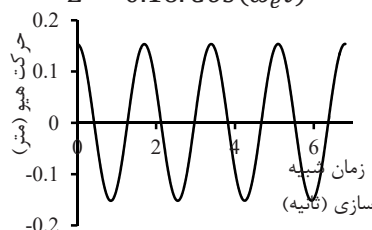
تغییرات نیروی هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۲/۵۹ با ارتفاع اینترسپتور ۷ سانتی متر



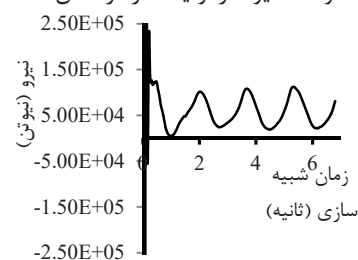
تغییرات ممان هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۲/۵۹ با ارتفاع اینترسپتور ۷ سانتی متر

حرکت هیو واداشته هارمونیک:

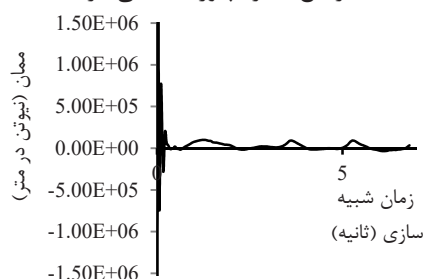
$$Z = 0.16 \cdot \cos(\omega_e t)$$



حرکت هیو هارمونیک در فرکانس ۳/۷



تغییرات نیروی هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۳/۷ با ارتفاع اینترسپتور ۷ سانتی متر



تغییرات ممان هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۳/۷ با ارتفاع اینترسپتور ۷ سانتی متر

شکل ۱۱ - نیروها و ممان ها در حرکات هیو در فرکانس ۳/۷ و پیچ در فرکانس ۲/۵۹ واداشته کاتاماران مجهز به اینترسپتور

۲-۶- محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی کاتاماران

بدون

اینترسپتور و با اینترسپتور

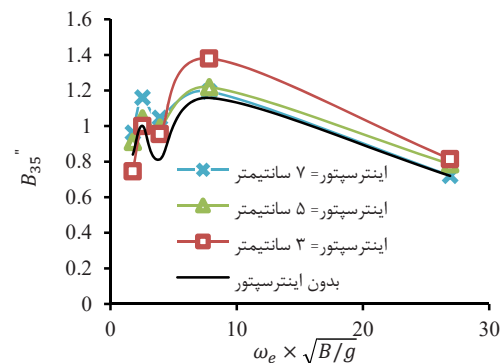
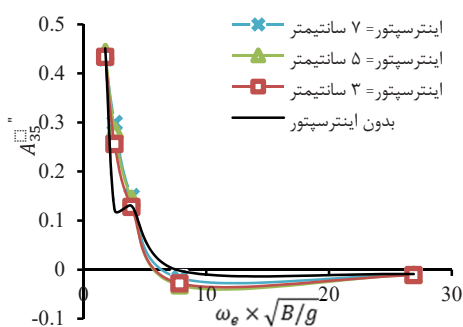
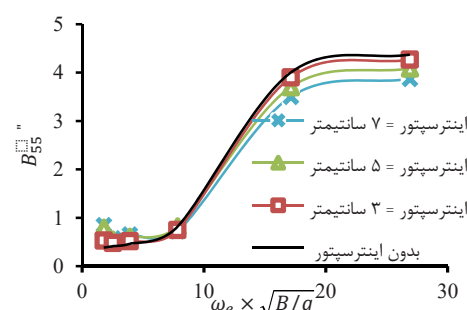
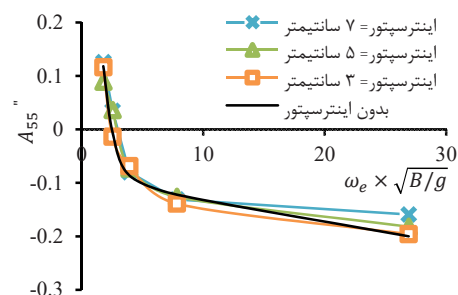
این قسمت نتایج مربوط به ضرایب هیدرودینامیکی کاتاماران بدون اینترسپتور و با اینترسپتور که از حل عددی به دست آمده‌اند را ارائه می‌دهد. برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی کاتاماران، ابتدا باید ضرایب استاتیکی C_{ij} تعیین شوند. این ضرایب وابسته به سطح آب‌خور کاتاماران هستند که با استفاده از روش سیمسون به صورت جدول ۵

محاسبه شده‌اند. ضرایب استاتیکی C با فرض دامنه کوچک می‌توانند ثابت فرض شوند.

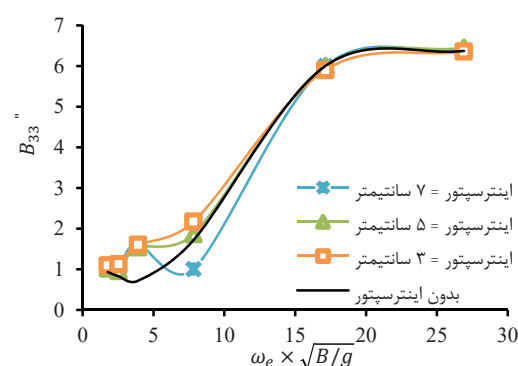
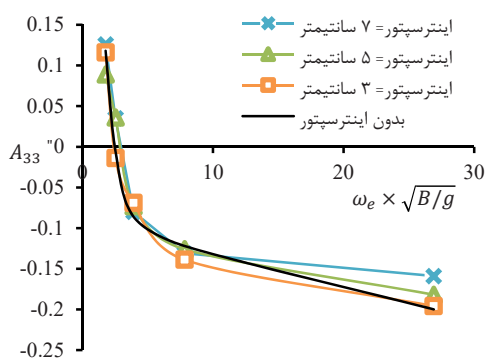
ضرایب جرم افزوده و میرایی به علت حرکات هیو و پیچ در شکل ۱۳ و ۱۴ برحسب فرکانس رسم شده‌اند.

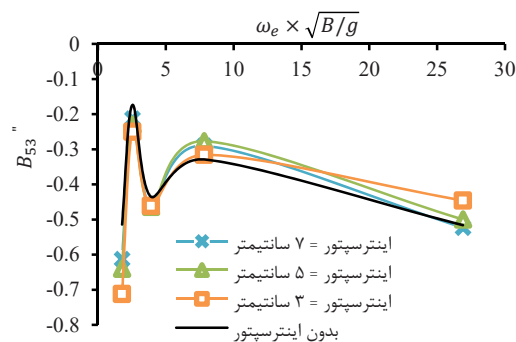
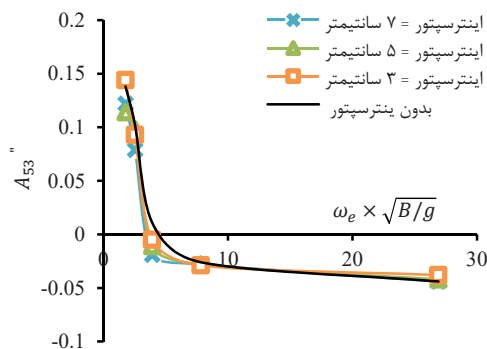
جدول ۵ ضرایب استاتیکی C برای کاتاماران

مقدار	ضریب هیدرواستاتیکی
305311.71	C_{33} (N/m)
915935.13	C_{53} (N)
915935.13	C_{35} (N)
2747805.4	C_{55} (Nm)



شکل ۱۲- ضرایب جرم افزوده و میرایی به علت حرکت پیچ برحسب فرکانس





شکل ۱۳ ضرایب جرم افزوده و میرایی به علت حرکت هیو بر حسب فرکانس

۷- نتیجه گیری

حرکت و شتاب‌های زیاد در شناورها بخصوص در شناورهای تندرو تأثیر منفی بر روی عملکرد شناور، خدمه، مسافری و تجهیزات دارد. بدین منظور برای کنترل این حرکات و شتاب‌ها از سیستم‌های کنترل حرکت استفاده می‌شود که سبب کاهش حرکات و شتاب‌های ناخوشایند خواهند شد. در این راستا در شناورهای تندرو المان کنترلی که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، اینترسپتور است که به صورت یک تیغه در پاشنه شناور نصب می‌شود و با تغییر ارتفاع حرکات شناور را کنترل می‌کند. یکی از سؤالاتی که در این حوزه مطرح می‌شود تأثیر اینترسپتور بر ضرایب معادلات حرکت این شناورها است که تاکنون به این سؤال پاسخی داده نشده است. برای پاسخ به این سؤال دو رویکرد تجربی و عددی وجود دارد. در گذشته به علت کمبود امکانات سخت‌افزاری کامپیوتر، استفاده از روش‌های تجربی جهت بررسی هیدرودینامیک شناورها بسیار مورد توجه بوده است. روش‌های تجربی معمولاً بسیار هزینه‌بر بوده و امکان آماده‌سازی تجهیزات آزمایشگاهی برای هر تحقیق علمی وجود ندارد. با پیشرفت علم در زمینه سخت‌افزار کامپیوترها، امکان استفاده از کامپیوترها جهت بررسی هیدرودینامیک شناورها فراهم شده است. در این مقاله با گسترش یک آزمایشگاه مجازی که در آن معادلات RANS حل می‌شوند، به استخراج ضرایب هیدرودینامیکی شناورهای تندرو پرداخته می‌شود. نتایج زیر از این تحقیق قابل برداشت است:

۱. استفاده از روش عددی برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی شناورهای تندرو که در آن معادلات RANS به همراه پیوستگی حل می‌شوند، روش بسیار

مؤثر و دقیقی خواهد بود که با صرف کمترین زمان و هزینه، امکان بررسی پارامترهای مختلف بر ضرایب هیدرودینامیکی را نیز فراهم می‌آورد.

۲. ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده و میرایی مربوط به کاتاماران با اینترسپتور و بدون اینترسپتور در فرکانس‌های بالا مستقل از فرکانس می‌باشند.

۳. تأثیر اینترسپتور بر ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده، در تمامی فرکانس‌ها قابل صرف نظر است و برای ضرایب هیدرودینامیکی میرایی تأثیر اینترسپتور، در فرکانس‌های زیاد که معادل سرعت‌های بالاست، قابل چشم‌پوشی است.

۸- مراجع

- [1] Hsu, C, C. 1967 "On the Motions of High Speed Planing Craft", Hydro-nautics, Inc., Technical Report 603-1, Laurel, Md.
- [2] Altman, R. 1968 "The Steady-state and oscillatory hydrodynamics of a 20 degree deadrise planing surface", Hydronautics, Inc., Technical Report 603-2, laurel, Md.
- [3] Fridsma, G. 1969 "A systematic study of rough-water performance of planing boats", Davidson Laboratory, Report No. 1275, Stevens Institute of Technology, Hoboken, N.J
- [4] Fridsma, G. 1971 "A systematic study of rough-water performance of planing boats (irregular waves-parts 2)", Davidson Laboratory, Report No. DL-71-1495, Stevens Institute of Technology, Hoboken, N.J
- [5] Ogilive, T. F., Shen, Y-T. 1973 "Flutter-like oscillations of a planing

- 25 November 1999, London, UK, 1999.
- [17] CHEN, H. C., LIU, T., HUANG, E. T. 2001 "Time-domain simulation of large amplitude ship roll motions by a chimera RANS method", Proceedings, 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, June 17–22, Stavanger, Norway, vol. 3, 299–306.
- [18] MILLER, R., GORSKI, J., FRY, D. 2002 "Viscous roll prediction of a cylinder with bilge keels", Proceedings, 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, July, Fukuoka, Japan.
- [19] SATO, Y., MIYATA, H., AND SATO, T. 1999 "CFD simulation of 3-dimensional motion of a ship in waves: application to an advancing ship in regular head waves", Marine Science and Technology, 4, 108–116.
- [20] CURA HOCHBAUM, A., VOGT, M. 2002 "Towards the simulation of seakeeping and maneuvering based on the computation of free surface viscous ship flow", Proceedings, 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, July, Fukuoka, Japan
- [21] PATERSON, E. G., WILSON, R. V., and STERN, F. 2003 "General Purpose Parallel Unsteady RANS Ship Hydrodynamics Code": CFDSHIP-IOWA, IIHR Report 432, Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, Iowa City, IA, November.
- [22] RHEE, S., STERN, F. 2001 "Unsteady RANS method for surface ship boundary layer and wake and wave field", International Journal of Num. Meth. Fluids, 37, 445–478.
- [23] STERN, F., WILSON, R. V., COLEMAN, H., PATERSON, E. 2001 "Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations"—part 1: methodology and procedures, ASME Journal of Fluids Engineering, 123, 793–802.
- [24] TAHARA, Y., PATERSON, E., STERN, F., AND HIMENO, Y. 2000 "CFD-based optimization of naval surface combatant", Proceedings, 23rd ONR Symposium on Naval plate", Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Report No. 146, The University of Michigan, Ann Arbor.
- [6] De Zwaan, A.P. 1973 "Oscillation eproeven met even planerendo wig". Report No. 376.M, Baboratorium voor scheepsbouwkunde, Technische Hogeschool, Delf, The Netherland
- [7] Martin, M. 1978a "Theoretical determination of porpoising instability of high speed planing boats", Journal of Ship Research, 22, 1, March
- [8] Martin, M. 1978b "Theoretical prediction of motions of high speed planing boats in waves", Journal of Ship Research, 22, 3, Sept
- [9] Munk, M. 1924 "The aerodynamic forces on airship hulls", NACA Report No. 184, National Advisory Committee for Aeronautics.
- [10] Wagner, H. 1931 "A nonlinear mathematical model of motions of a planing boat in regular waves", DTNSRDC Report 78/032, David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, Md.
- [11] White, J. A, Savitsky, D. 1988 "Seakeeping predictions for USCG hard chine patrol boats", SNAME, New York Metropolitan Section, June
- [12] Payne, P. R. 1990 "Boat 3D- a time-domain computer program for planing craft", Payne Associates, Stenensville, Md
- [13] Troesch, A. W. "On the hydrodynamics of vertically oscillating planing hulls", Journal of Ship Research, Vol. 36, No.4, pp. 317-331,
- [14] G. J. Grigoropoulos, et al., "Transient waves for ship and floating structure testing," Elsevier Science, 1994.
- [15] J.M.J.Journee, "comparative Motion Calculations of FLOKSTRA container Ship Model," Delft University of Technology, Netherlands, Updated 2001, April 1997.
- [16] C. Stephen M. Cook, Kim Klaka,, "Investigation into Wave Loads and Catamarans," Hydrodynamics of High Speed Craft Conference (RINA), 24-

- Performance', Naval Engineers Journal, May, 1987
- [34] J.F. Tsai, J.L. Hwang, S.W. Chau, and S.K. Chou, 'Study of Hydrofoil Assistance Arrangement for Catamaran with Stern Flap and Interceptor', FAST 2001, Southampton, UK, Sep., 2001
- [35] Sverre Steen, Sverre Andres Alterskjar, Andress Velgaard, Ingebjorn Aasheim, "Performance of a planning craft with mid-mounted interceptor", Fast 2009, Greece, October 2009.
- [36] F. R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry, "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003
- [37] J. H. Ferziger and M. Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics": Springer, 1999
- Hydrodynamics, September, Val de Reuil, France.
- [25] WILSON, R., PATERSON, E., AND STERN, F. 2000 "Verification and validation for RANS simulation of a naval combatant", Proceedings, Gothenburg 2000: A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Chalmers University of Technology, September, Gothenburg, Sweden.
- [26] Weymouth, G. D, Wilson, R. V, Stern, F., "RANS Computational Fl +69uid Dynamics Predictions of Pitch and Heave Ship Motions in Head Seas", Journal of Ship Research, Vol. 49, No. 2, June 2005, pp. 80–97
- [27] P. M. Carrica, R. V. Wilson, R. W. Noack, and F. Stern, "Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids," Computers & fluids, vol. 36, pp. 1415-1433, 2007.
- [28] L. Larsson, F. Stern, and M. Visonneau, "Gothenburg 2010, A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics," 2010
- [29] S. H. S. Hosseini, "CFD prediction of ship capsizing: parametric rolling, broaching, surf-riding, and periodic motions," Ph.D., Mechanical Engineering, University of Iowa, 2009.
- [30] JOURNEE, J. M. J. 1992 "Experiments and Calculations on Four Wigley Hull forms", Delft University of Technology, Ship Hydrodynamic Laboratory, Report No. 909, February.
- [31] M. S. Seif, A. Vafaeseefat, M. Tavakoli Dakhrabadi, Hull form hydrodynamic optimization of high speed planing craft with variable deadrise angle by using genetic algorithm, Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 80-90, 2012. (In Persian)
- [32] P. Ghadimi, A. Dashtimanesh, Y. Faghfoor, "Initiating a mathematical Model for Prediction of DOF Motion of Planing Crafts in Regular Waves", Hindawi Publishing Corporation International Journal of Engineering Mathematics, Volume 2013, Article ID 853793, 15 pages
- [33] Karafiath, and S.C. Fisher, 'The effect of Stern Wedges on Ship Powering