بررسی اثر موج نامنظم بر دریامانی یک کشتی کانتنربر

زهرا بی غرض[۱] ، سجاد حاجی زاده[۲]*، حسن آبین[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه خلیج فارس، zbiqaraz@gmail.com
[۲] استادیار گروه مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، hajizadeh@pgu.ac.ir
[۳] استادیار گروه مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، abynhassan@pgu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

کلمات کلیدی:
مدلسازی عددی
شناور تجاری
امواج نامنظم

چکیده

در این مقاله هدف تحلیل و بررسی اندرکنش یک شناور تجاری کانتینربر با امواج سطحی نامنظم آب توسط دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین محاسبه پارامترهای دریامانی این سازه یعنی عملگر دامنه پاسخ (RAO)، طیف پاسخ حرکتی در حرکت سازه می‌باشد. ابزار تحلیل در این پژوهش نرم افزار STAR CCM+ بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی که یکی از قوی‌ترین نرم افزارهای حاضر در انجام شبیه‌سازی و تحلیل عددی برای مساله فوق می‌باشد. در این مقاله، پس از بررسی و تحلیل اعتبارسنجی مدل عددی و ابزار تحلیل، به بررسی پارامترهای مختلف دریامانی و دینامیکی برای یک شناور تجاری کانتینربر در حالت سطحی در جهت‌های مختلف برخورد موج نامنظم به شناور پرداخته شده است.

Investigation the effect of irregular wave on the seakeeping of a container ship

Zahra Biqharaz[1], Sajad Hajizadeh[2*], Hassan Abyn[3]

[1] M.A student, Persian Gulf University; zbiqaraz@gmail.com
[2] Assistant Professor, Persian Gulf University; hajizadeh@pgu.ac.ir
[3] Assistant Professor, Persian Gulf University; abynhassan@pgu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 22 May. 2022
Accepted: 31 Aug. 2022

Keywords:
Numerical modelling
Displacement ship
Irregular wave

ABSTRACT

In this paper, the aim is to analyze the interaction of a commercial container vessel with irregular surface water waves by computational fluid dynamics and also to calculate the marine parameters of this structure, namely the response amplitude (RAO) operator, the kinetic response spectrum in the motion of the structure. Analysis tool in this research is STAR CCM + software based on computational fluid dynamics, which is one of the most powerful software in performing simulation and numerical analysis for the above problem. In this paper, after reviewing and analyzing the validation of the numerical model and analysis tools, the various marine and dynamic parameters for a commercial container vessel in the superficial state in different directions of irregular wave collision to the vessel are investigated.

۱ - مقدمه

شـــرایط محیطی دریا شـــامل موج و باد بر بســـیاری از پارامترها و مشـخصـــه‌های عملکردی شـــناور مانند ســـرعت، ایمنی دریانوردی، نیروهای دینامیکی وارد بر ســـازه و غیره تاثیرگذار اســـت. از این رو بررسی حرکات در موج شدید، جهت افزایش قابلیت عملیات‌پذیری و ایمنی شـــناور و خدمه، از مســـائل مهمی می‌باشـــد که لازم اســـت مورد توجه طراحان قرار گیرد. حرکت یک شناور تجاری در دریا با توجه به مســـائلی مانند: بررســـی ســـرعت حداکثر شـــناور در امواج، بررســـی کاهش ســـرعت ارادی به واســـطه افزایش نیروهای وارد بر شـــناور و کاهش ســـرعت غیر ارادی به خاطر مقاومت افزوده، بهینه‌ســـازی مســـیر به منظور کاهش زمان حمل و نقل، مصـــرف سوخت و هزینه کلی شناور بر ا ساس معیارهای موجود (محا سبه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]

شـــتاب‌ها، محاســـبه نیروهای وارد بر ســـازه از طرف دریا، وقوع اسـلمینگ، وضـعیت افراد، بارها و تجهیزات و دیگر نقاط شـناور و غیره)، از اهمیت بالایی برخوردار است.

به طور کلی دینامیک شناورها به دو دسته تقسیم می‌شود، دسته اول حرکات نا شی از مانور شناور در آب ساکن ا ست که حرکات این دسته به حرکات مانورینگ معروف است که شامل حرکت های رول ، سوی ، یاو و سرج هستند[۱] دسته دوم حرکت شناور را در امواج بررسـی می‌کنند که این دسـته به حرکات در حوزه دریامانی معروف ه ستند. این حرکات شامل دو حرکت هیو و پیچ ا ست. با توجه به اهمیت دریامانی شناور در این مقاله تحلیل‌ها و محاسباتی که انجام شـده همگی در حوزه دریامانی شـناور یا همان محاسـبه حرکات هیو و پیچ هستند.

در دهه ۱۹۸۰ طراحان کشـــتی به دلیل کاهش هزینه‌ها شـــبیه سـازی‌های کامپیوتری را با تسـت شـناورها ترجیح می‌داده‌اند. که این مسئله نقش بزرگی در پیشرفت شبیه سازی‌های عددی داشته است. مقالات متعددی در این زمینه منتشر شده است که می‌توان به نتایج دوئرفر[۱] ۱۹۸۰ ، میلر[۲] ۱۹۸۴و بیانکاردی[۳] ۱۹۸۸ اشـــاره نمود. در تمامی این شـبیه سـازی‌ها بانک اطلاعاتی در خصـوص ضـرایب هیدرودینامیکی مانور و آثار محیطی از تسـت های مدل مقید، خودرانش و تست‌های میدانی شناورهای واقعی بدست آمده اســـت. در این دوره علاوه بر حل معادلات معمول مانور، برخی از محققین نیز تلاش های در خصـــوص ارتقای معادلات دینامیکی داشـــته‌اند که می‌توان به کارهای هیرانو[۴] ۱۹۸۱ ، اینوئه[۵] ۱۹۸۱ ، نوموتو۱۹۸۱، پورزنجانی ۱۹۹۰ و نیشیموتو[۶] ۱۹۹۵ اشاره کرد[۳]. ونتور[۷] در ســـال ۲۰۰۱ با اســـتفاده از مدل‌های با طول مختلف و چیدمان کانال در حوضـچه‌های متفاوت تسـت‌های مختلفی انجام داد. مانور شناورها در مجاورت اسکله، دیواره ساحل، موج شکن‌ها و ســـایر شـــناورهای در حال تردد در بنادر و یا دیگر آب راهه‌های محدود ممکن ا ست منجر به شرایط خطرناک و بحرانی گردد، لذا لازم اســـت که اثرات اندرکنش شـــناورها با یکدیگر و یا مرزها در مسـئله شـبیه سـازی مانور گنجانده شـود. نیروی سـوی و ممان یاوینگ که توسـط سـکان شـناور ایجاد می‌گردد باید بتواند کاملاً حرکت شناور را در کنترل بگیرد. این امر در بسیاری از موارد و به خصوص در سرعت های پایین محقق نمی‌گردد و در برخی از موارد خاص ایجاد این کنترل دشوار است. زیرا شناور زمانی که به اسکله نزدیک می‌شـــود و یا از مجاورت شـــناور دیگر عبور می‌کند یک نیروی جاذبه ایجاد می‌گردد که سبب می شود سینه کشتی غیر مقید به سمت شناور دیگر و یا دیواره کشیده شود[۳]. این عامل سـبب ناپایداری عملیات کشـتی‌ها در آب‌های محدود می‌شـود. و ممکن است به شرایطی منجر گردد که در آن دریانوردی ایمن غیر ممکن با شد. تا به حال تحقیقات بسیاری بر مورد خاص اندرکنش کشـــتی‌ها با یکدیگر صـــورت گرفته اســـت که کار ونتور یکی از کاملترین‌ها است.

چفین[۸] در سال ۲۰۰۷ در قالب یک پژوهش کامل تز دکتری خود را به شـناسـایی ضـرایب هیدرودینامیکی موثر در آنالیز دریامانی شـناورهای چند بدنه اختصـاص داد. در این پژوهش از روش‌های عددی مبتنی بر المان مرزی اسـتفاده شـده اسـت و سـعی شـده روشـی جدید ارائه شـود تا دقت کار بیشـتر گردد. از نتایج این پژوهش یافتن ضـرایب مهم تاثیر گذار در حرکات شـناور های تک بدنه و چند بدنه اســـت که میزان نقش هر کدام را در مدل‌های مختلف فرم بدنه‌ها معرفی می‌کند[۴].

اوتاما[۹] و همکاران در سـال ۲۰۱۱ در دپارتمان معماری کشـتی در اندونزی پژوهش هایی در مورد مشـخصـات مقاومت، قدرت و دریامانی کاتاماران ها و تریماران ها انجان دادند و این پژوهش با هدف کاهش مصـرف سـوخت، کاهش هزینه تعمیر و نگه داری و افزایش طول عمر و بهره وری این شـناورها انجام گرفت. بیشـتر تمرکز بر روی کاهش مقاومت و افزایش قدرت و همچنین بهبود ویژگی‌های دریامانی این شـناورها بود[۵]. در این پژوهش هم از روش‌های عددی و هم از روش آزمایشگاهی ا ستفاده شده ا ست. برای مدلسـازی کاتاماران و تریماران از نرم‌افزار مکسـرف اسـتفاده شـده اسـت. از نتایج این آزمایش می‌توان به مقاومت کمتر شـناور های کاتاماران و تریماران در مقابل شناور های تک بدنه در وضعیت جابجایی یکســـان نام برد. از دیگر نتایج این پژوهش این بود که دریامانی تک بدنه و دو بدنه وسـه بدنه در شـرایط دریایی ۳ تقریبا با هم برابر اســـت و از لحاظ راحت بودن خدمه می‌توان گفت تریماران مقام اول کاتاماران مقام دوم و تک بدنه مقان ســـوم را کسب می‌کند.

گاسپاروتی[۱۰] و همکاران در دانشگاه گالاتی رومانی در سال ۲۰۱۳ آنالیز عددی دریامانی شـناورهای را در امواج نامنظم مورد بررسـی قرار داد ند. در این پژوهش از مدل های متعددی از جمله یک کشتی کانتینر بر با طول ۱۳۹,۹۶ استفاده شده است. این پژوهش شـامل آناالیز دریامانی خطی بر هم کنش حرکات هیو و پیچ بدون در نظر داشتن حرکات رول در امواج نامنظم است.

از کد برنامه نویســـی DYN-OSC که بر اســـاس دریامانی خطی است استفاده شده است. از نتایج این پژوهش اتفاق افتادن حداکثر دامنه هیو در A=90 درجه و برای رول در A=70 درجه ثبت شده است و احتمال این اتفاق در سرعت ۱۵ نات از بقیه سرعت ها بیشتر است [۶].

ایکیزو[۱۱] و همکاران در سال ۲۰۱۳ پژوهشی مبتنی بر آزمایش در مورد عملکرد دریامانی شـناور کاتاماران با نیم بدنه‌های نامتقارن را در دانشگاه هیروشیمای ژاپن انجام دادند. در این پروژه از مدلی به طول ۲,۰۳۶ اســـتفاده شـــده اســـت. برای فراگیر بودن از چندین

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]

نسبت W/B (W فاصله نقاط بیرونی– B فاصله نقاط درونی) استفاده شده است. این نسبت از بین اعداد ۲,۵۵ تا ۳,۲۵ تغیر داده شده است. از نتایج این پروژه می‌توان به دامنه حرکات هیو و پیچ اشاره کرد که با افزایش این نسبت کاهش می‌یابد.

قاسمی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به تحلیل عددی اثر تغییرات ابعادی بر رفتار دریامانی سه نمونه از فرم بدنه‌ها پرداختند. با بررسی عددی حرکات جابجایی قائم و غلتش طولی سه بدنه ویگلی، سری ۶۰ و شناور DDG-51 در شرایط موج منظم و معتبر سازی نتایج عددی بصورت مقایسه با نتایج تجربی، به پیش بینی دریامانی شناور ناوشکن در اثر تغییر نسبت ابعادی در نرم‌افزار مکسرف پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد شناورهای ویگلی و سری ۶۰ افزایش برخورد مقدار ماکزیموم نمودار رائو را کاهش می‌دهد که اثر بسیار مطلوبی است[۷]. در شناور ناوشکنDDG-51 کاهش عرض به آبخور سبب کاهش مقادیر رائوی جابجایی قائم و پیچ گردیده که این اثر در رفتار دریامانی حرکت پیچ بیشتر است. با کاهش نسبت طول به عرض، رائوی جابجایی قائم به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. اما با افزایش نسبت طول به عرض شناور، حرکات جابجایی قائم شدت بیشتری پیدا می‌کند و در نمودار ماکزیموم مقدار رائو افزایش پیدا می‌کند. ولی حرکت پیچ عملکرد مناسب‌تری در اثر افزایش این نسبت از خود نشان می‌دهد. این تغییرات را در بیهنه‌سازی فرم بدنه شناور از جهت بهبود رفتار دریامانی می‌توان مد نظر قرار داد.

روش حوزه حل مجازی در دهه اخیر به صورت گسترده توسط محققین در زمینه حرکت جسم جامد در محیط سیال مورد استفاده قرار گرفته است. گلوینسکی و همکارانش از جمله نخستین کسانی بودند که این روش را برای مدلسازی حرکت جسم جامد در محیط سیال مورد استفاده قرار دادند[۸].

گریوس، اندرکنش موج و سیلندر مستغرق را با استفاده از تکنیک شبکه درختی مورد بررسی و مطالعه قرار داد[۴]. کاشیواگی و هایاشی مطالعات آزمایشگاهی خود را جهت تعیین مشخصات امواج برگشتی و انتشار یافته ناشی از وجود یک سازه شناور در مسیر یک موج منظم خطی انجام دادند[۹]. تنگ و گو پدیده تفرق ناشی از قرار گرفتن جسم شناور در یک سیال دو لایه را مورد بررسی قرار داد. وانگ و وو، اندرکنش امواج منظم با تعدادی جسم شناور سیلندری که در چند ردیف قرار داشتند را مطالعه نمودند[۱۰].

سزن و همکاران در سال ۲۰۱۸ مطالعه‌ای عددی بر روی حرکت خودرانشی[۱۲] شناور DARPA SUBOFF با استفاده از نرم افزار STAR CCM+ در اعماق آب و در سرعت های مختلف انجام داده‌اند. در این پژوهش عملکرد خودرانشی در سرعت‌های مختلف و توسط روش نیروی حاصل بر بدنه شناور بررسی شده و عملکرد هیدرودینامیکی شناور نیز مورد مطالعه قرار گرفته است[۱۱].

در این مقاله با توجه به اهمیت دریامانی شناور و این نکته که تحلیل دریامانی این شناورها از اصول اولیه طراحی محسوب می شود، به بررسی دریامانی شناور کانتینربر KCS پرداخته شده است. نوآوری و تفاوت این پژوهش با دیگر پژوهش ها بررسی تخصصی دریامانی شناور تجاری در امواج نامنظم است. که در این پژوهش تلاش بر مدلسازی و تحلیل دریامانی شناورهای تجاری می‌باشد تا دریامانی این شناور به صورت تخصصی با امواج غیرمنظم تشریح شود و روند طراحی این شناورها را سریع‌تر کند. بدین منظور، مراحل مدل‌سازی برای حل مسئله و بررسی رفتار دینامیکی شناور تجاری در حرکات هیو و پیچ ارائه خواهد شد و نتایج با اطلاعات حاصل از تست‌های تجربی مقایسه و اعتبارسنجی می‌شوند.

۲- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادلات پیوستگی (بقای جرم) و تعادل دینامیکی (بقای اندازه حرکت) است که معادلات ناویر- استوکس نیز نامیده می شود. در روش حاضر، این معادلات برای سیال نیوتنی و تراکم ناپذیر مورد بررسی قرار گرفته است [۵].

۲-۱- معادله پیوستگی (بقای جرم)

معادله بقای جرم در حالت کلی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\mathrm{D}\rho}{\mathrm{D}t}+\rho\nabla\cdot\mathbf{u}=0 \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱)، ρ چگالی سیال است. چنانچه چگالی سیال در طول حرکت ثابت باشد، معادله فوق به فرم ساده شده رابطه ۲ تبدیل خواهد شد

$$\nabla\cdot\mathbf{u}=0 \qquad (۲)$$

و در این حالت، سیال موردنظر تراکم ناپذیر نامیده می‌شود. در ادامه نشان داده خواهد شد که به علت پایه‌های خاصی که برای حل در نظر گرفته می شود، شرط تراکم ناپذیری به سادگی ارضاء می‌شود.

۲-۲- معادله تعادل دینامیکی (بقای اندازه حرکت)

معادله بقای اندازه حرکت در حالت کلی به‌صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود:

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]

$$\rho\frac{\mathrm{D}\mathbf{u}}{\mathrm{D}t}=-\nabla p+\mu\nabla^2\mathbf{u}+\frac{\mu}{3}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u})+\rho\mathbf{g} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) برای حالت دوبعدی $\boldsymbol{u}=\begin{Bmatrix}u\\v\end{Bmatrix}$ سرعت سیال، $\boldsymbol{g}=\begin{Bmatrix}0\\-g\end{Bmatrix}$ شتاب ثقل، pفشار و μ لزجت دینامیکی سیال است. برای سیال تراکم ناپذیر با توجه به رابطه $\nabla\cdot\mathbf{u}=0$ می‌توان نوشت

$$\rho\frac{\mathrm{D}\mathbf{u}}{\mathrm{D}t}=-\nabla p+\mu\nabla^2\mathbf{u}+\rho\mathbf{g} \qquad (۴)$$

۲-۳- روابط حاکم برتحلیل عددی شناورها

به منظور تحلیل و بررسی اندرکنش شناورها با امواج آب از روابط Reynolds-average Navier-Stokes (RANS) استفاده می‌شود که بصورت رابطه (۵) ورابطه (۶) بیان می‌گردند:

$$Continuity:\ \frac{\partial}{\partial x}\left(uA_x\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(vA_y\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(wA_z\right)=0 \qquad (۵)$$

$$Momentum:\ \frac{\partial U_i}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(U_jA_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right)=\frac{1}{\rho}\frac{\partial P'}{\partial x_i}+g_i+f_i \qquad (۶)$$

۲-۴- مدل آشفتگی

از روابط ناویر-استوکس برای محاسبه نیروی مقاومتی و میدان جریان سیال در اطراف سازه‌ی شناور استفاده می‌شود. در این راستا روابط تکمیلی دیگری نیز برای مدل‌سازی ترم‌های تنشی رینولدز در هنگام استفاده از روابط RANS نیاز است که روابط آشفتگی دو-معادله‌ای (Shear-Stress Transport (SST $k-\varepsilon$ (k انرژی کینتیک وε نرخ پراکندگی) می‌باشند.

مدل‌های آشفتگی در واقع بین مقادیر مجهول تنش‌های رینولدز و مقادیر معلوم جریان مانند سرعت ارتباط برقرار کرده و باعث کاهش تعداد مجهولات معادلات ناویر-استوکس در مدل جریان آشفتگی می‌شود. در این پژوهش نیز مدل آشفتگی براساس روش فوق مدنظر می‌باشد که ضرایب تجربی مدل $k-\varepsilon$ بصورت ضمنی در این روش حاصل می‌گردند.

بنابراین در پژوهش حاضر و با توجه به آنکه هدف تحلیل شرایط دریامانی برای یک شناور سطحی می‌باشد، به تعریف سه حرکت مستقل Roll، Pitch و Heave پرداخته می‌شود.

۲-۵- حرکت Heave

اگر نیروی خارجی به صورت عمودی بر صفحه آبخور بر شناور وارد شود، به واسته این نیروی وارده، شناور را در داخل آب فرو برد، در نتیجه به دلیل افزایش نیروی بویانسی به دلیل افزایش آخور، نیروی بویانسی از وزن شناور بیشتر شده در نتیجه شناور رو به بالا حرکت می‌کند. در حین حرکت رو به بالا از حالت تعادل اولیه عبور می‌کند چراکه شناور دارای ممنتوم زیادی در حین حرکت رو به بالا است. این حالت باعث می‌شود که این دفعه، بویانسی از وزن کمتر شود لذا حرکت رو به بالا متوقف شده و کشتی دوباره رو به پایین حرکت می‌کند. اگر نیروی خارجی به صورت هارمونیک ساده ادامه یابد، آن را حرکت Heave گویند.

۲-۶- حرکت Roll و Pitch

همان‌طور که بیان شد، اگر یک نیروی تحریک خارجی کشتی را از حالت تعادل خارج کند و سپس آن را رها کند یا با یک سرعت اولیه از حالت تعادل خارج شود، کشتی حول محور x یا y می‌تواند حرکت هارمونیک ساده داشته باشد. نوسان حول محور y همان حرکت Pitch است و نوسان حول محور x همان حرکت Roll می باشد[۱۴].

۲-۷- متدلوژی روش حل در پژوهش حاضر

در بحث هیدرودینامیک شناور تجاری، در نزدیکی سطح آزاد آب، سه عامل مقاومت[۱۳]، دینامیک در سطح آزاد آب[۱۴] و دینامیک زیر موج‌های سطحی[۱۵] بسیار مورد توجه می‌باشد. به منظور تحلیل عددی شناورهای تجاری، فرمولاسیون پتانسیل فشار[۱۶] برای سیال لزج مدنظر می‌باشد. در این راستا، برای مدل سازی و تحلیل سه بعدی این سازه و محاسبه ضرایب و پارامترهای هیدرودینامیکی آن، روش های عددی مختلفی با بکارگیری معادلات دینامیک سیالات محاسباتی نظیر روش حجم محدود وجود دارند. تعدادی از نرم افزارهای موجود در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی که بخوبی توانایی تحلیل عددی شناورهای تجاری و اندرکنش آنها با امواج سطحی آب را دارند عبارتاند از: FLOW3D، Open FOAM، Ansys Fluent، Ansys CFX و STAR CCM+ که انتخاب و استفاده از هریک از آنها بسته به نوع پژوهش و نیاز محقق متفاوت است. اکثر این نرم افزارها از روش حجم محدود و معادلات ناویر استوکس بمنظور شبیه‌سازی عددی بهره می‌گیرند.

در پژوهش حاضر از نرم افزار قدرتمند و کاربردی STAR CCM+ استفاده شده است. برای این منظور، دامنه حل با استفاده از مختصات کارتزین به شبکه‌ای از سلول‌های شش وجهی[۱۷] تقسیم‌بندی می‌شود. در ادامه مقدار متوسط پارامترهای جریان (سرعت و فشار) برای هر سلول در هر گام زمانی توسط شبکه‌بندی اِ ستَگرد[۱۸] محا سبه می‌گردند. سطح آزاد سیال نیز تو سط روش حجم سیال[۱۹] تحلیل می‌گردد. این نرم افزار یک پرو سه مهند سی کامل برای حل مسائل مربوط به سیالات و جامدات، انتقال گرمایی و فشار است. همچنین این نرم افزار در رابطه با حل مسائل پیچیده

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]

فیزیکی و هندسی توانمند است و در زمینه تولید خروجی با کیفیت با حداقل کد و تلاش شهرت اثبات شده‌ای دارد. مروری بر نرم افزار +STAR-CCM به شرح زیر می‌باشد:

این نرم افزار یک پلتفورم چند فیزیکه است که از آن برای حل سیستمی از معادلات کاربردی و قوانین موجود در علم فیزیک و مهندسی استفاده می‌شود. در شاخه دینامیک سیالات محاسباتی توانایی مدل‌سازی و تحلیل جریان سیال و انرژی در سیالات گوناگون را دارد. مشخصات سیال در این نرم افزار می تواند: ۱. سیال غیرلزج، لایه ای یا آشفته ۲. سیال با لزجت نیوتنی و غیرنیوتنی ۳. سیال تراکم‌پذیر ویا تراکم ناپذیر ۴. سیال چندفازی ۵. سیال با مقاومت مواد متخلل ۶.سیال دارای شتاب گرانشی باشد، که تمامی این مشخصات در دو حالت پایا و گذرا قابل تعریف می‌باشند[۱۵].

۳- تحلیل نتایج و اعتبار سنجی

از آنجایی که یکی از اهداف این پژوهش بررسی شرایط دریامانی یک شناور تجاری در دو حالت حرکت در سطح آزاد آب برای موج نامنظم در جهات مختلف توسط نرم افزار +STAR CCM می باشد، بنابراین در گام اول باید نرم افزار فوق اعتبارسنجی گردد. هدف از این اعتبارسنجی آن است که از صحت عملکرد و توانایی نرم افزار فوق در تحلیل مساله حاضر اطمینان حاصل کرده و بتوان با دقت خوب و معقولی به بررسی این مساله و شرایط آن پرداخت. برای انجام این اعتبارسنجی به سراغ کشتی‌های مشابه رفته و به بررسی یک نمونه کشتی با شرایطی مشابه با این پژوهش پرداخته شده است. در این راستا، نتایج حاصل از اعتبارسنجی کشتی RoRo SSPA2733 برای سه جهت حرکت موج (۹۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه) در نرم افزار +STAR CCM بمنظور مقایسه و بررسی شرایط دریامانی آورده شده است. داده‌های این اعتبارسنجی از پژوهش آوگارد[۱۶] در سال ۲۰۰۹ که توسط یک روش عددی به بررسی پارامترهای رولینگ در امواج دریا پرداخته است و همچنین پژوهش کاسکینن [۱۷] در سال ۲۰۱۲ در ادامه پژوهش آوگارد و توسط همان روش عددی به تحلیل پارامترهای دریامانی کشتی RoRo SSPA2733 در امواج و شرایط مختلف مانورگیری پرداخته است[۱۶] و [۱۷].

ابتدا مدل کشتی مورد نظر با ابعاد تعریف شده آن در پژوهش‌های فوق، از نرم افزار Paramarine با عنوان کشتی SSPA2733 در اسکیل واقعی (1:1) استخراج شده و سپس در نرم افزار SOLIDWORK به 1:35 (با توجه به متن پژوهش اعتبارسنجی) اسکیل شده است.

سپس سایر اطلاعات مورد نیاز نظیر مشخصات موج و شرایط دریایی از محتوای این دو پژوهش استخراج شده است و در جداول ۱ و ۲ گردآوری شده‌اند. لازم به ذکر است، که هم روش عددی مطرح شده در پژوهشات فوق ساده می باشد و هم شرایط مدل عددی نیز ساده سازی شده است. در ادامه، شرایط مربوط به اطلاعات ورودی برای تحلیل سازه کشتی فوق در نرم افزار +STAR CCM و سایر مشخصات آن جدول ۱ و همچنین شرایط موج نیز در جدول ۲ با توجه به اطلاعات هر دو پژوهش اعتبارسنجی گرد آوری شده‌اند.

جدول ۱ - مشخصات و پارامترهای مربوط به سازه کشتی با توجه به اطلاعات منابع [۱۷]

مشخصه / پارامتر	بدون اسکیل (۱ : ۱)	ضریب اسکیل (۱ : λ)	پس از اسکیل (۱ : ۳۵)
طول سازه	۱۳۵ m	$\frac{P}{\lambda^1}$	۳.۸۵۷ m
وزن سازه	۱۱۲۷۶ ton	$\frac{\Delta}{\lambda^3}$	۲۶۲.۹۹ kg
ممان اینرسی رول، (I_{xx})	۷.۳۴×۱۰^{۸} kg-m^2	$\frac{I_{xx}}{\lambda^5}$	۱۳.۹۸۱ kg-m^2
ممان اینرسی پیچ، (I_{yy})	۱۵.۴۳×۱۰^{۹} kg-m^2	$\frac{I_{yy}}{\lambda^5}$	۲۹۳.۹۱۲ kg-m^2
ممان اینرسی یاو، (I_{zz})	۱۵.۴۳×۱۰^{۹} kg-m^2	$\frac{I_{zz}}{\lambda^5}$	۲۹۳.۹۱۲ kg-m^2
سرعت حرکت سازه	۱۰ $knots$ (۵.۱۴۴ m/s)	$\frac{U}{\lambda^{0.5}}$	۰.۲۸۵ $knots$ (۰.۸۶۸۸ m/s)
ابعاد حوضچه تحلیل	۷۰۰×۷۰۰×۱۷۵ m^3	$\frac{L \times W \times H}{\lambda^1}$	۲۰×۲۰×۵ m^3

جدول ۲ - مشخصات و پارامترهای مربوط به موج و شرایط دریایی با توجه به اطلاعات منابع [۱۷]

مشخصه / پارامتر	بدون اسکیل (۱ : ۱)	ضریب اسکیل (۱ : λ)	پس از اسکیل (۱ : ۳۵)
نوع موج،	Regular (Stokes)	No Scaling	Regular (Stokes)
دامنه موج	متغیر	$\frac{H}{\lambda^1}$	متغیر
پریود موج	۱۱.۴۱۸ sec	$\frac{T}{\lambda^{0.5}}$	۱.۹۳ sec
غلظت آب دریا	۱۰۲۵ kg/m^3	No Scaling	۱۰۲۵ kg/m^3

پس از ورود داده‌ها و اطلاعات مربوط به کشتی SSPA2733 نظیر وزن، ممان اینرسی و سرعت حرکت آن (مطابق جدول ۱) به همراه داده‌های مربوط به شرایط دریایی نظیر نوع موج، دامنه و پریود آن

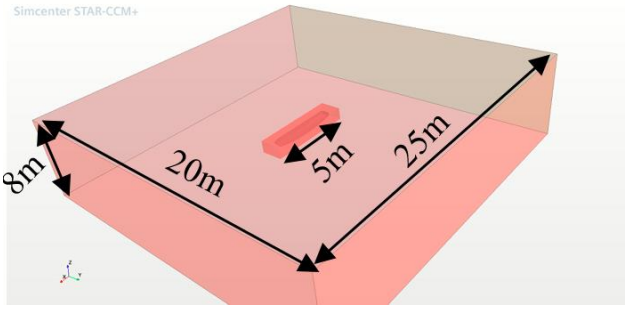
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]

(مطابق جدول ۲) حاصل از اطلاعات موجود در پژوهش اعتبارسنجی[۱۷] در نرم افزار STAR CCM+، شروع به اجرای تحلیل عددی کرده و اجازه می‌دهیم روند حل ادامه یابد تا زمانی که شناور سطحی به انتهای حوضچه تحلیل برسد.

۴- اعتبار سنجی

ابتدا لازم است که شرایط شبیه سازی اعم از ابعاد دامنه، شرایط مرزی و فیزیک مسیله مورد نیاز در این تحلیل مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس شکل ۱، ابعاد دامنه حل تعریف شده است.



شکل ۱- ابعاد دامنه حل مسیله

همچنین شرایط مرزی مورد استفاده در این تحلیل بر اساس شکل ۲ انتخاب شده است.



شکل ۲- شرایط مرزی استفاده شده در حل مسیله

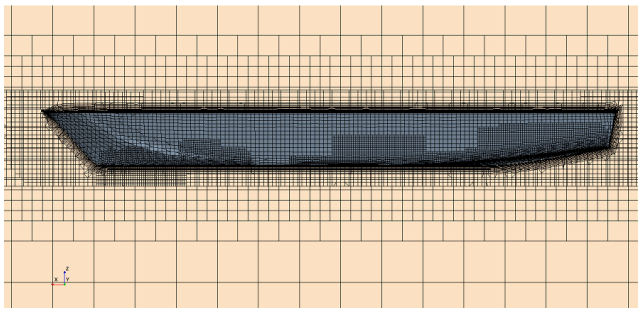
برای شبیه سازی درجات آزادی شناور در این تحقیق، از مدل ۶ درجه آزادی DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction) استفاده شده است.

در این تحقیق همچنین، نوع موج استفاده شده، استوکس مرتبه پنجم است.

در این تحقیق همچنین، از ساختار مش سازمان یافته Trimmer استفاده شده که نتایج برای مش بندی های مختلف در یک حالت موج منظم به شرح جدول ۳ است.

جدول ۳- مقایسه نتایج مش بندی های مختلف در زاویه برخورد ۱۸۰ درجه و پریود ۱,۹۳ ثانیه

	Pitch	Roll	Heave
Coarse	4.025	17.156	1.852
Medium	4.231	17.954	1.893
Fine	4.510	18.256	1.968



شکل ۳- نمایی از شبکه بندی Fine در اطراف شناور

یکی دیگر از موارد تاثیرگذار بر نتایج عددی، انتخاب Time Step مناسب جهت حل مسیله است. نتایج بدست آمده در سه Time Step در جدول ۴ ارایه شده است.

جدول ۴- مقایسه نتایج Time Step مختلف در زاویه برخورد ۱۸۰ درجه و پریود ۱,۹۳ ثانیه

	Pitch	Roll	Heave
۰/۰۰۱۵	۴/۴۰۱	۱۸/۰۰۱	۱/۹۴۸
۰/۰۰۱۰	۴/۴۵۰	۱۸/۱۰۵	۱/۹۵۴
۰/۰۰۰۵	4.510	18.256	1.968

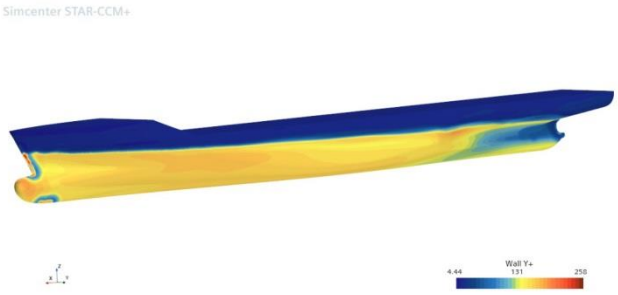
در پژوهش کاسکینن [۱۸] جدولی برای مقایسه نتایج بیان شده است که برای هر جهت حرکت موج، ۳ عدد تست با شرایط موج مختلف (دامنه و فرکانس مختلف) انجام شده است[۱۸]. در پژوهش حاضر نیز برای سه جهت حرکت موج (یعنی ۹۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه) در نظر گرفته شده و اعتبارسنجی بر اساس داده‌های این تست‌ها صورت گرفته است. در اعتبارسنجی حاضر، به غیر از درجه آزادی Sway سایر درجات آزادی سازه نظیر Roll، Pitch، Heave، Yaw و Surge برای سه جهت برخورد موج به سازه کشتی تحلیل و بررسی شده اند.

جهت مدلسازی اطراف شناور، از تکنیک توابع دیواره استفاده شد. شبیه سازی جریان های نزدیک دیواره، بخش مهمی از مسیر شبیه سازی است و این امر به کمک پارامتر بی بعدی به نام y^+، صورت می گیرد. مولفه‌ی y^+، بیانگر فاصله‌ی نخستین گره تا سطح دیواره در نزدیکی بدنه کشتی است. مقدار این مولفه در مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ عددی بین ۳۰ تا ۳۰۰ است. توزیع وای پلاس بر روی سطح بدنه و بر روی کیل شناور به ترتیب در شکل های ۴ و ۵ نشان داده

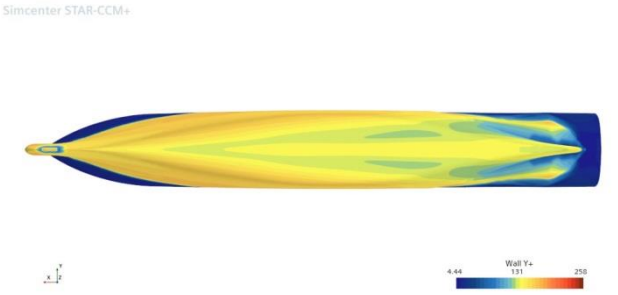
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]

شده است.

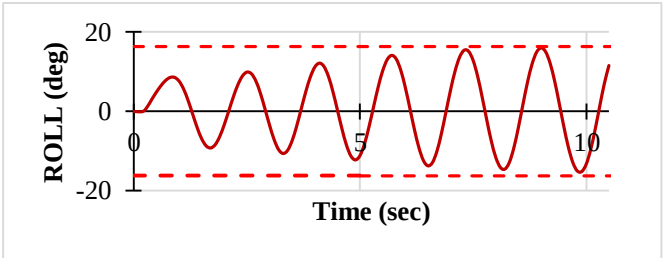


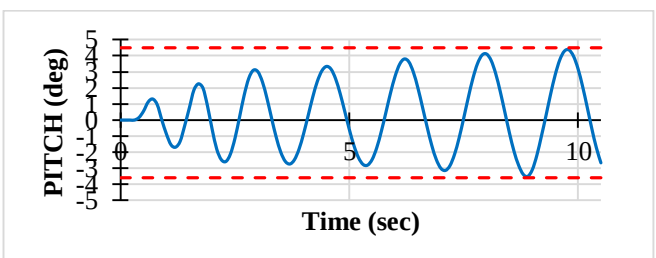
شکل ۴- توزیع وای پلاس بر روی سطح بدنه شناور

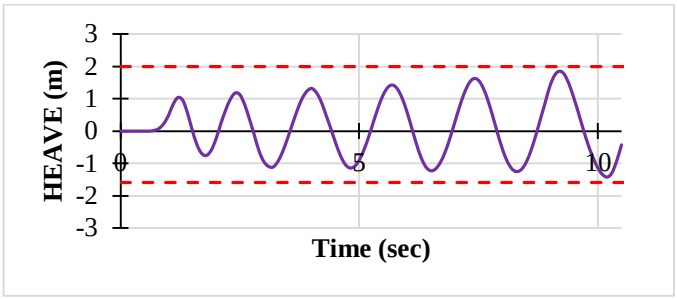


شکل ۵- توزیع وای پلاس بر روی کیل شناور

مقایسه نتایج حاصل از پژوهش مورد استفاده برای اعتبارسنجی [۱۸] با نتایج حاصل از تحلیل توسط نرم افزار STAR CCM+ (پژوهش حاضر) برای پارامترهای Roll، Pitch و Heave در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. نتایجی که بصورت خط چین ارایه شده اند، نتایج آزمایشگاهی و خطوط بدون خط چین، نتایج حاصل از شبیه سازی است.





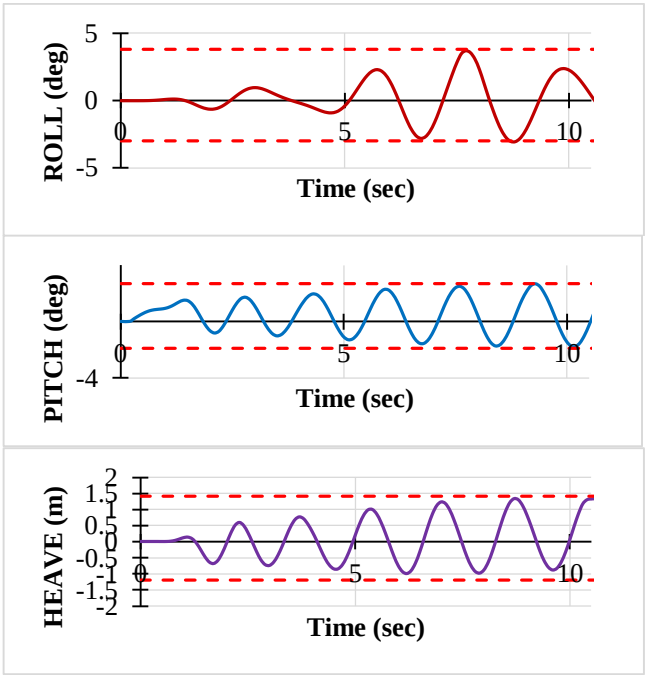


شکل ۶- نتایج دریامانی برای اعتبارسنجی با پژوهش [۱۸] برای موج در جهت ۱۸۰ درجه

با بررسی نتایج Roll در شکل ۶، اختلافی صفر درصد بین ماکزیمم مقدار بیان شده در منبع اعتبارسنجی با مقدار بدست آمده از پژوهش حاضر حاصل شده است. همچنین اختلافی در حدود ۳ تا ۴ درصد بین مینیمم مقادیر این پارامتر حاصل شده است.

با بررسی نتایج Pitch در شکل ۶، اختلافی در حدود ۰ تا ۰,۵ درصد بین ماکزیمم مقدار بیان شده در منبع اعتبارسنجی با مقدار بدست آمده از پژوهش حاضر حاصل شده است. همچنین اختلافی در حدود ۲,۵ تا ۳ درصد بین مینیمم مقادیر این پارامتر از دو پژوهش فوق حاصل شده است. با بررسی نتایج Heave در شکل ۶، اختلافی در حدود ۷ تا ۸ درصد بین ماکزیمم مقدار بیان شده در منبع اعتبارسنجی با مقدار بدست آمده از پژوهش حاضر حاصل شده است.

نتایج دریامانی برای اعتبار سنجی برای موج در جهت ۱۵۰ درجه در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایجی که بصورت خط چین ارایه شده اند، نتایج آزمایشگاهی و خطوط بدون خط چین، نتایج حاصل از شبیه سازی است.



شکل ۷- نتایج دریامانی برای اعتبارسنجی با پژوهش [۱۸] برای موج در جهت ۱۵۰ درجه

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]

با بررسی نتایج Roll در شکل ۷، اختلافی صفر درصد بین ماکزیمم و مینیمم مقادیر بیان شده در منبع اعتبارسنجی با مقادیر بدست آمده از پژوهش حاضر حاصل شده است و با بررسی نتایج Pitch در شکل ۷، اختلافی صفر درصد بین ماکزیمم مقدار بیان شده در منبع اعتبارسنجی با مقدار بدست آمده از پژوهش حاضر حاصل شده است. همچنین اختلافی در حدود ۱ تا ۱,۵ درصد بین مینیمم مقادیر این پارامتر از دو پژوهش فوق حاصل شده است. با بررسی نتایج Heave در شکل ۷، اختلافی بین ۳ تا ۴ درصد بین ماکزیمم مقدار بیان شده در منبع اعتبارسنجی با مقدار بدست آمده از پژوهش حاضر حاصل شده است. همچنین اختلافی بین ۹,۵ تا ۱۰,۵ درصد بین مینیمم مقادیر این پارامتر از دو پژوهش فوق حاصل شده است.

با بررسی نتایج تحلیل بر روی کشتی حاصل از نرم افزار (پژوهش حاضر) و مقایسه آن با نتایج موجود درپژوهش اعتبارسنجی، این مهم بیان می‌شود که پارامترهای Roll و Pitch برای برخورد موج در هر سه جهت (۹۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه) با دقت خوبی محاسبه شده و نتایج قابل قبولی نسبت به پژوهش اعتبارسنجی حاصل شده است، اگرچه اختلاف اندکی بین این دو تحلیل برای این دو پارامتر دیده می‌شود.

از طرفی، برای پارامتر Heave ملاحظه می‌شود که بین هر دو تحلیل، اختلافی در محدوده‌ی ۱۰ تا ۱۰,۶ درصد وجود دارد که بیشترین آن مربوط به حرکت موج در راستای ۹۰ درجه (بحرانی-ترین جهت برخورد) با اختلافی معادل ۱۰,۶ درصد می‌باشد.

۵-تحلیل نتایج

۵-۱- بررسی پارامتر RAO و طیف پاسخ دریامانی

در این قسمت، به تحلیل نتایج عددی شناور برای محاسبه و مقایسه پارامترهای دریامانی به هنگام حرکت شناور در سطح آزاد آب با سرعت ۱/۳۵ متربرثانیه و همچنین تحت تاثیر موج در جهت ۱۸۰ درجه برخورد پرداخته شده است. از رابطه زیر برای محاسبه طیف برخورد موج نامنظم استفاده می‌شود:

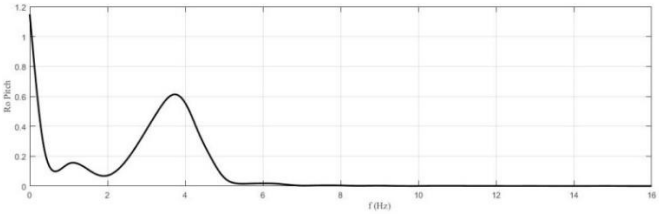
$$\begin{bmatrix} \omega_e = \omega_w - \dfrac{\omega_w^2 V}{g}\cos\mu \\ S_\zeta(\omega_w) = \dfrac{A}{\omega_w^5} e^{-B/\omega_w^4} \end{bmatrix} \rightarrow S_\zeta(\omega_e) = \frac{S_\zeta(\omega_w)}{[1-(4\omega_e V/g)\cos\mu]^{0.5}} \quad (۷)$$

که در این رابطه، μ زاویه جهت برخورد موج به شناور زیرسطحی، V سرعت حرکت شناور و $S_\zeta(\omega_w)$ طیف فرکانس دایره‌ای است که در آن، $A = 8.1 * 10^{-3} g$ ،$B = 3.11/H^2$ و H ارتفاع موج برحسب متر می‌باشد.

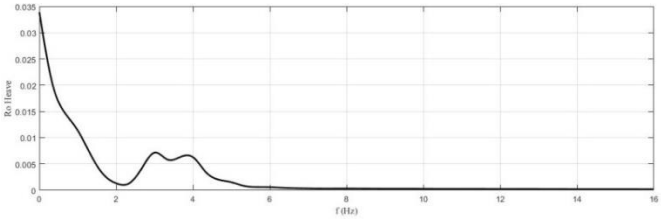
در گام پنجم به محاسبه پارامتر RAO پرداخته و سپس نتایج آن در قالب دیاگرام‌های مختلف در حوزه فرکانس برخورد ارائه شده است. در نهایت به محاسبه طیف پاسخ حرکتی شناور فوق برای هر زاویه حرکتی برخورد موج توسط رابطه زیر پرداخته و نتایج در قالب دیاگرام در حوزه فرکانس برخورد نیز ارائه شده است.

$$S_\phi(\omega_e) = S_\zeta(\omega_e) \cdot |H(\omega_e)|^2 \quad (۸)$$

در نهایت، تشریح نتایج فوق در ادامه این پژوهش بیان شده است. در شکل ۸ و شکل ۹ نمودارهای رائو برای دو پارامتر پیچ و هیو ارائه خواهد شد:



شکل ۸- نتایج RAO برای پارامتر Pitch در فرکانس برخورد موج با زوایای مختلف برخورد برای شناور در سرعت حرکت ۱۲ گره در حالت سطحی



شکل ۹- نتایجRAO برای پارامتر Heave در فرکانس برخورد موج با زوایای مختلف برخورد برای شناور در سرعت حرکت ۱۲ گره در حالت سطحی

در شکل ۸ و شکل ۹ نمودارهای رائو حرکات پیچ و هیو نمایش داده شده‌اند. این نمودارها در حقیقت میزان پاسخ شناور به هر موج در فرکانس های مختلف را نمایش می دهند. این بدین معنی است که در فرکانسهای پایین پاسخ شناور بیشتر بوده ولی هرچه فرکانس موج بالاتر برود پاسخ شناور به موج برخوردی کاهش می‌یابد.

۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر هدف تحلیل و بررسی اندرکنش یک شناور تجاری با امواج سطحی نامنظم آب توسط دینامیک سیالات محاسباتی بود که در نهایت به محاسبه و تحلیل پارامترهای دریامانی این شناور یعنی عملگر دامنه پا سخ (RAO) برای حالت

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]

حرکتی شناور که موج از پشت به شناور برخورد می کند، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. ابزار تحلیل در این گزارش نرم افزار STAR CCM+ بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی، یکی از قوی‌ترین نرم افزارهای حاضر در انجام شبیه‌سازی و تحلیل عددی برای مسائل در زمینه فوق بوده است.

در این مقاله ابتدا به بررسی یک مدل عددی برای اعتبارسنجی نرم افزار STAR CCM+ پرداخته شد.. با بررسی نتایج تحلیل اعتبارسنجی، این مهم بیان شد که پارامترهای Roll و Pitch برای برخورد موج در هر سه جهت (۹۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه) با دقت خوبی محاسبه شده و نتایج قابل قبولی نسبت به تحقیق اعتبار سنجی حاصل شده است، اگرچه اختلاف اندکی بین این دو تحلیل برای این دو پارامتر دیده می‌شود. از طرفی، برای پارامتر Heave ملاحظه شد که بین هر دو تحلیل، اختلافی در حد ۵ تا ۴۵ درصد وجود دارد که بیشترین آن مربوط به حرکت موج در راستای ۹۰ درجه با اختلافی ۴۵ درصدی می‌باشد. اثبات شد که این اختلاف ناشی از تفاوت بین روش عددی مورد استفاده در تحقیق اعتبار سنجی نسبت به روش حل توسط نرم افزار می‌باشد که این مهم بیشتر مربوط به نادیده گرفتن اثر لزجت در سیال مورد بررسی در تحقیق اعتبارسنجی بوده است. باید در نظر داشت که نرم افزار فوق تمامی پارامترها و فرمول‌های مربوط به دینامیک سیالات محاسباتی را در خود دارد و با دقت خیلی بالایی آنها را محاسبه و تحلیل را می‌کند. همچنین تمامی پارامترهای مربوط به یک سیال لزج نیز در این نرم افزار در نظر گرفته می شود، درحالی که روش عددی موجود در تحقیق اعتبارسنجی اکثر این موارد را نادیده گرفته است (با توجه به توضیحات موجود در متن تحقیق اعتبارسنجی فوق). این مهم باعث گردیده که در روند تحلیل در روش تحقیق مربوط به اعتبارسنجی فوق اثر نیروهای مومنتم و اثرات مربوط به آشفتگی سیال تا حدودی نادیده گرفته شود و به همین دلیل اختلافاتی بین روش حل توسط نرم افزار با روش تحقیق فوق (بیشتر در مورد Heave) حاصل گردد. در یک نتیجه‌گیری کلی برای این قسمت از تحقیق می‌توان اینگونه بیان داشت که نتایج اعتبارسنجی حاصل از نرم افزار با دقت نسبتا خوبی مورد تایید بوده و به ادامه روند تحلیل شناور که هدف اصلی تحقیق حاضر نیز است، پرداخته شد. در ادامه تحقیق حاضر به تشریح نتایج حاصل برای پارامتر RAO شناور به هنگام حرکت تحت تاثیر برخورد موج نامنظم با زاویه ۱۸۰ درجه و بیفورت ۵ پرداخته شد. نمودارها رائو پیچ و هیو در حقیقت میزان پاسخ شناور به هر موج در فرکانس‌های مختلف را نمایش می‌دهند. این بدین معنی است که در فرکانس‌های پایین پاسخ شناور بیشتر بوده ولی هرچه فرکانس موج بالاتر برود پا سخ شناور به موج برخوردی کاهش می‌یابد.

در کل در این مقاله سعی شد که راه و روشی دقیق و قابل اطمینان برای محاسبه دریامانی و رسم نمودارهای رائو شناورهای تجاری ارائه گردد که همانطور که مشاهده شد و ارائه گردید، روش دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین نرم‌افزار STAR CCM+ برای این منظور، بسیار بوده و توانایی حل مشکلات را به راحتی دارد.

کلیدواژگان

1- Doerffer
2- Miller
3- Biancardi
4- Hirano
5- Inoue
6- Nishimoto
7- Venture
8- Chephine
9- Otama
10- Gasparri
11- Ikizio
12- Self-propulsion
13- Resistance
14- Dynamic in still water
15- Dynamic under surface waves(Sea keeping)
16- Potential Flow
17- Hexahedral
18- Staggered
19- Volume of fluid (VOF)

۷ – مراجع

1- Mohammed Moonesun, *"Handbook of naval architecture engineering"*, first edition, 2012, pp. 130: 135. (In Persian)

2- Mohammad Saeed Seif, Amin Najafi, *"Dynamic of Marine Vehicle"*, Sharif university Press, 2013. (In Persian)

3- Bhattacharyya, R., "*DYNAMICS OF MARINE VEHICLES*". Ocean Engineering,Wiley Series, 1978.

4- Lloyd., A. R. J. M. "*Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*". A.R.J.M. Lloyd, 1998.

5- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., "*An Introduction to Computational Fluid Dynamics*", Second Edition, PEARSON, 2007.

6- Gasparotti. C, Rusu. E, (2013), "*Seakeeping Numerical Analysis in Irregular Waves of a Containership*", University of Galati.

7- Ghasemi Hassan, Majdafar Sohrab, Gil Valiullah and Toheidi Hadi, 2014, *"Numerical analysis of the effect of dimensional changes on the seakeeping behavior of DDG 51"*, Iranian Journal of Marine Science And Technology. (In Persian)

8- Stansberg, C.T., Baarholm, R. et al, "*Extreme Wave Amplification and Impact Loads on Offshore Structures*", Offshore Technology Conference, Houston, TX, U.S.A, May 2005.

9- Chephine. M, Ribbel. M, (2007), "*Hydrodynamic Coefficient of Multihull Ship*", PHD Thesis, University of Sao Paulo.

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]

10- Jiao, J., Sun, S., Li, J., Adika Adenya, C., Ren, H., Chen, C., Wang, D. "*A comprehensive study on the seakeeping performance of high speed hybrid ships by 2.5D theoretical calculation and different scaled model experiments*". Ocean Engineering,Vol. 160, pp. 197–223, 2018.
11- Shariati, S. K., Mousavizadegan, S. H., "*The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface*". Applied Ocean Engineering,Vol. 64, pp. 31–43, 2017.
12- Gertler, M., Hagen, G.R., "*Standard Equations of Motion for Submarine Simulation*". Naval Ship Research and Development Center, USA, 1967.
13- Sezen, S., Dogrul, A., Delen, C., Bal, S., "*Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method*". Ocean Engineering,Vol. 150, pp. 258–271, 2018.
14- Venture. S, (2001),"*Expremental seakeeping test of vessel in Deep Water*"15-STAR-CCM+: User guide, tutorials, knowledge base, *Simcenter, Siemens, 2020.*
15- Ovegard, E., "*Numerical simulation of parametric rolling in waves*". Master thesis, KTH Centre for Naval Architecture, February 2009.
16- Koskinen, K., "*Numerical simulation of ship motion due to waves and manoeuvring*". Degree project in Naval Architecture, Second cycle, Stockholm, Sweden 2012
17- Koskinen, K., "*Numerical simulation of ship motion due to waves and manoeuvring*". Degree project in Naval Architecture, Second cycle, Stockholm, Sweden 2012.

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.12.3]