

بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر یک نمونه شناور کاتاماران با تاکید بر تحلیل مودال، جرم و میرایی افزوده

محمد رضا نجفی^{۱*}، محمد جواد یارمحمدی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، drmrnajafi@ihu.ac.ir

^۲ دکتری، دانشگاه شهید بهشتی پردیس شهید عباسپور، mrjavad110@gmail.com

چکیده

تخمین نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از حرکت شناور بر روی موج و پاسخ ارتعاشی ناشی از آن دارای اهمیت بسیار بالایی در طراحی سازه شناور است. در این مقاله تحلیل مودال و تحلیل نیرویی بارهای وارد بر شناور کاتاماران در دامنه فرکانس و زمان و در جهت هیو و پیچ شناور و با در نظر گرفتن میرایی ذاتی بدنه صورت گرفته است. در این تحلیل ها نیروهای وارد بر شناور از قبیل فرود-کریلوف، تفرق، جرم و میرایی افزوده در فضای فرکانس و زمان مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه با استفاده از روش المان محدود و به کارگیری روش تعامل سازه-سیال، حرکت شناور بر روی امواج منظم مدل سازی می شود. با بررسی نتایج شبیه سازی و مقایسه آن با روش های عددی- تجربی گذشته، می توان دریافت که نتایج به دست آمده دارای تطابق مناسب و خطای کمتر از ۱۰ درصد است لذا می توان از روش ارائه شده به منظور تخمین نیروهای وارد بر شناور استفاده نمود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

کلمات کلیدی:

نیروهای هیدرودینامیکی

کاتاماران

جرم افزوده

میرایی افزوده

تعامل سازه-سیال

Investigation of hydrodynamic forces on a floating sample of catamaran with emphasis on modal analysis, added mass and added damping

Mohammad Reza Najafi^{1*}, Mohammad Javad Yarmohammadi²

¹ PhD Student, Imam Hossein University; drmrnajafi@ihu.ac.ir

² PhD, Shahid Beheshti University; mrjavad110@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 19 Sep. 2021

Accepted: 04 Dec. 2021

Keywords:

Hydrodynamic forces

Catamaran

Added mass

Added damping

Solid-Structure interaction

ABSTRACT

Estimation of the hydrodynamic forces due to the motion of the ship on wave and the resulting vibrational response is of great importance in the design procedure of ship structure. In this paper, modal analysis and force study of loads on the catamaran float in the frequency and time domain and in the direction of Heave and Pitch and taking into account the inherent damping of the hull has been done. In proposed analyzes, the forces acting on the vessel such as Frude-Krylov, diffraction, added mass and damping are investigated. Then, using the finite element method and using the structure-fluid interaction method, the ship motion is modeled on regular waves. By examining the simulation results and comparing it with the past numerical-experimental methods, it can be seen that the obtained results have a good accuracy and also an error of less than 10%, so the proposed method can be used to estimate the forces on the ship.

۱ - مقدمه

امروزه، با توجه به افزایش نیاز به حمل و نقل دریایی، به کارگیری کشتی‌ها با اندازه و سرعت‌های بالا، رشد بی‌سابقه‌ای دارد. این نوع شناورها هنگام حرکت بر روی سطح آب نیروهای متفاوتی را تجربه می‌کند. به رفتار دینامیکی شناور در برابر نیروهای وارده از طرف سیال هیدرودینامیک شناور گفته می‌شود [۱]. مسئله هیدرودینامیک در طراحی شناورها دارای اهمیتی فراوان است زیرا که در طراحی سازه شناور علاوه بر بارهای استاتیکی، بارهای دینامیکی گسترده‌ای بر شناور وارد می‌شود [۲]. این بارهای دینامیکی با توجه به ماهیت و فرکانس نوسانات آن رفتارهای متفاوتی بر روی بدنه شناور ایجاد می‌کنند [۳]. مهم‌ترین این رفتارها عبارت‌اند از فتریتⁱ و ارتعاشات ناشی از کوبش^{i i}. فتریت در سازه شناورها عبارت است از تحریک سازه شناور با فرکانسی برابر با فرکانس موج [۴] و کوبش نیز ارتعاش سازه شناور در نزدیکی فرکانس طبیعی است [۵].

هنگامی که یک شناور بر روی امواج حرکت می‌کند، نیروهای هیدرودینامیکی غیرخطی بسیار زیادی را تجربه می‌کند که برخی از این نیروها شامل نیروی جانبی^{i i}، میرایی افزوده^{i v}، جرم افزوده^v، نیروهای فرود-کریلوف^{vi}، نیروهای تفرق^{vi i} و ... هستند [۶]. شناخت این نیروها در طراحی سازه شناور اهمیت بسیاری دارند [۷] و تحقیقات گسترده‌ای به منظور شناخت این نیروها بر روی شناور صورت گرفته است [۸-۱۰]. در روش‌های تجربی به منظور به دست آوردن نیروهای وارده بر شناور از آزمون مدل‌هایی با مقیاس کوچکⁱⁱⁱ در حوضچه‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. این روش‌ها به دلیل نیاز به انواع حس‌گرها با دقت بالا دارای هزینه بسیاری هستند [۱۱]. در سال‌های اخیر نیز با توجه به افزایش قدرت رایانه‌های مهندسی، به کارگیری روش‌های عددی در هیدرودینامیک شناورها کاربرد گسترده‌تری یافته است. یکی از این روش‌ها استفاده از روش‌های دینامیک سیال محاسباتی^x به منظور تحلیل نیروهای وارده بر شناور است [۱۲]. یکی از نخستین مطالعات در مورد شبیه‌سازی عددی شناورهای تندرو مربوط به کاپونتو^x [۱۳] است که ایشان از حل گر^{xi} RANS برای تحلیل هیدرودینامیکی یک شناور تندرو استفاده کرد. کلمنت و بلونت^{xi i} [۱۴] تست‌های تجربی را برای یافتن نیروی مقاوم در برابر حرکت بدنه‌های مختلف با زاویه ددرایز متفاوت انجام دادند. اگرچه نتایج به دست آمده از مطالعه ایشان بسیار بارزش بود و داده‌های حاصل شده از آزمایش‌های تجربی، منبعی بارزش برای کارهای آینده شد اما این آزمایش‌ها بسیار پرهزینه و زمان‌بر بود. همچنین برای شرایط تعیین شده و محدودی معتبر بودند. از این رو با به کارگیری روش‌های CFD در کنار آزمون‌های تجربی می‌توان

تعداد مدل‌های ساخته شده برای آزمون‌های تجربی را به مقدار زیادی کاهش داد که این امر منجر به کاهش هزینه و زمان در رسیدن به نتیجه مناسب خواهد شد [۱۵]. از دیدگاه دیگر مطالعه هیدرودینامیک شناور را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود: ۱- روش‌های خطی ۲- روش‌های غیرخطی. در روش خطی فرض می‌شود که اختلال جریان ناشی از حضور کشتی در امواج نسبتاً کم است، از این رو نیروهای وارده بر شناور با فرکانس موج دارای رابطه‌ای خطی است. به عنوان مثال، کیم و همکاران [۱۶] مطالعه‌ای در مورد هیدرودینامیک کشتی با مقایسه روش‌های خطی سازی نیومان-کلون^{xi i} و روش خطی دودنه^{xi v} ارائه دادند. تحقیقات مشابهی راجع به مزایا و معایب این دو روش نیز توسط ژانگ و همکاران [۱۷-۱۹]، ارائه شد. در این روش‌ها علی‌رغم سادگی در تحلیل، از مسائلی مانند تأثیر متقابل سیال بر شناور و یا بارهای ضربه‌ای صرف نظر می‌شود [۲۰]. یکی دیگر از روش‌های عددی به دست آوردن نیروهای وارده بر شناور، روش‌های مبتنی بر المان محدود است. این روش‌ها امروزه در قالب نرم‌افزارهای محاسبات سیالاتی بر مبنای روش‌های CFD گسترش یافته است. برای مثال سنگ و همکاران [۲۱] یک روش عددی برای ارزیابی هیدرودینامیکی و هیدرواستیک شناور با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM [۲۲] ارائه دادند. در این پژوهش، بدنه شناور با استفاده از مدل تیر تیموشینکو مدل‌سازی شد و سپس به تحلیل عمر خستگی شناور با استفاده از روش VBM^{xv} پرداخته شد. تحقیقات متعددی با استفاده از روش المان محدود برای ارزیابی بارهای ضربه‌ای وارده از طرف سیال به شناور یا همان اسلیمینگ^{xvi} ارائه شده است. لی و همکاران [۲۳] و اوبراگمن [۲۴] روش‌هایی با استفاده از کوپل یک‌طرفه و دوطرفه بین روش‌های CFD و المان محدود ارائه دادند. در اکثر پژوهش‌های صورت گرفته، در راستای تخمین بارهای هیدرودینامیکی وارده بر شناور از سختی بدنه شناور در برابر بارهای وارده صرف نظر می‌شود [۲۵]. این فرض در صورت حرکت فتریت شناور بر روی موج‌های منظم صادق است. ولی در صورتی که بارهای وارده بر شناور به صورت ضربه‌ای و دارای فرکانس بالا وارد شوند سختی، میرایی و فرکانس طبیعی بدنه بر روی مقدار و اندازه بار وارده بر شناور تأثیر بسزایی می‌گذارد که در پژوهش نیتزل [۲۶] این امر به وضوح نشان داده شده است. لذا بررسی میرایی و تحلیل فرکانسی بدنه شناور در برابر این نوع بارها اهمیت بسزایی پیدا می‌کند. در سال‌های اخیر نیز شناورهای کاتاماران به دلیل دارا بودن سطح عرشه بزرگ، پایداری بالا، قابلیت بالای حفظ مسیر و مانور پذیری بالا مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۲۷-۲۸].

در این مقاله با استفاده از روش‌های المان محدود و همچنین با در نظر گرفتن تأثیر مودهای طبیعی صلب و غیرصلب شناور، به بررسی

$$\sum_{k=1}^6 \Delta_{jk} \eta_k(t) = F_j(t) = F_{Gj} + F_{Hj} \quad (3)$$

$j = 1, \dots, 6$

که در این معادله Δ_{jk} ماتریس تعمیم یافته اینرسی شناور و $F_j(t)$ کلیه نیروهای وارده بر شناور هستند. همچنین η_k جهات مختلف کارتزینی شناور است. این معادله را می توان به صورت معادلات اوپلری بازنویسی نمود که در آن F_{Gj} نیروی گرانشی وارده بر شناور است که با نیروهای شناوری خنثی می شود. همچنین F_{Hj} نیروهای ناشی از سیال بر روی بدنه (مجموع نیروهای هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی) است. نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر شناور نیز خود دارای اجزاء مختلفی هستند که عبارتند از [۳۰]:

- نیروهای فرود-کریلوف: در صورتی که فرض شود که از نوسان شناور توسط قیودی در دریای موج جلوگیری شود، در این صورت نیروهای وارده بر شناور همان نیروهای فرود-کریلوف هستند.
- نیروهای تفرق: نیروهای ناشی از موج های ایجاد شده در پشت شناور در حال حرکت، نیروهای تفرق نامیده می شوند.

از طرف دیگر نیروهایی مانند مقاومت سیال در برابر حرکت یا همان درگ نیز بر شناور وارده می شود که به دلیل کوچکی این نیروها در برابر نیروهای اشاره شده می توان در محاسبات عددی از این مقادیر صرف نظر نمود.

عامل دیگری که در معادله (۳) دارای تأثیر بالایی هست، ماتریس Δ_{jk} یا اینرسی تعمیم یافته شناور است. این مقدار برخلاف ماتریس جرمی تعمیم یافته در تئوری ارتعاشات دارای ترم های بیشتری است که به دلیل تأثیر حرکت شناور بر روی سطح سیال و اثر متقابل آن پدید می آیند. به این مقادیر در ماتریس جرمی، جرم و میرایی افزوده گفته می شود [۳۱]. در نهایت مجموع نیروهای وارده بر شناور را می توان به صورت معادله (۴) بازنویسی نمود:

$$F_T = F_{FK} + F_{diff} + F_{added_mass} + F_{added_damping} \quad (4)$$

۳- مدل سازی المان محدود کاتاماران

به منظور بررسی پاسخ های هیدرودینامیک شناور در موج، یک مدل از شناور دوبنده کاتاماران که دارای مقاطع عرضی، تیرهای طولی و پانل های متصل بدنه است (شکل ۲) در نرم افزار ANSYS-AQWA مدل سازی می شود. متغیرهای مهم بدنه شناور کاتاماران در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول VCG نشان دهنده مرکز جرم عرضی شناور، LCG مرکز جرم طولی شناور، K_{ZZ}

بارهای هیدرودینامیکی وارده بر شناور در جهات هيو و پیچ و با فرض حرکت بر روی موج های منظم پرداخته شده است. به دست آوردن این نیروها به وسیله تست تجربی نیازمند هزینه فراوان است که تحلیل عددی پژوهش حاضر با توجه به نوآوری ای که دارد، می تواند بسیاری از نیازهای صنعت را برطرف نماید. در این تحلیل ها میرایی بدنه در برابر بارهای وارده نیز مورد بررسی قرار می گیرد. به منظور بررسی بارهای هیدرودینامیکی، تحلیل های مودال و سیال-سازه ای بر روی شناور پیاده سازی شده و ارتباط بین این دو تحلیل بررسی می شود که هر یک از این تحلیل ها ذاتاً دیگری را مورد تأیید قرار می دهد. همچنین به منظور صحت سنجی نیروهای به دست آمده در تحلیل های سیالاتی، با استفاده از روش کوپل یک طرفه المان سیال-سازه، رفتار دینامیکی شناور بر روی امواج مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به دست آمده با مقالات گذشته بر روی مدل شناور کاتاماران مورد مقایسه و صحت سنجی قرار خواهد گرفت.

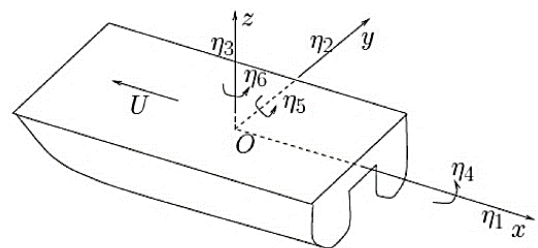
۲- معادلات حاکم

به منظور بررسی بارهای وارده بر شناور در ابتدا باید ماهیت بارهای هیدرودینامیکی و همچنین حرکات شناور در برخورد با سطح دریا و موج را شناخت. حرکات صلب شناور در دریا شامل سه حرکت انتقالی در جهات محورهای مختصات (شامل حرکت در جهت x^{xi} ، حرکت در جهت y^{vi} و حرکت در جهت محور z^{xi}) و سه حرکت حول محورهای مختصات (شامل حرکت حول محور xx ، حرکت حول محور yy^{xi} و حرکت حول محور z^{xi}) است (شکل ۱) که در معادلات (۱) و (۲) به صورت بردار حرکت جامع شناور، S نشان داده شده است.

$$s = \eta_1 i + \eta_2 j + \eta_3 k + \omega * r \quad (1)$$

$$\omega = \eta_4 i + \eta_5 j + \eta_6 k$$

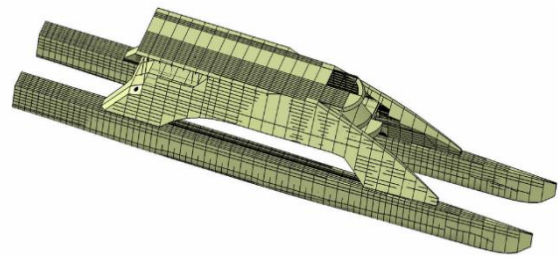
$$r = xi + yj + zk \quad (2)$$



شکل ۱- انواع حرکت شناور بر روی امواج [۱]

در بسیاری از پژوهش ها، به دلیل اختلاف شدید بین اندازه حرکت شناور در جهت هيو و پیچ، از سایر حرکات شناور صرف نظر می شود [۲۹]. با استفاده از قانون دوم نیوتن می توان معادله حرکت شناور بر روی موج را در تمامی جهات آزادی شناور به صورت زیر نوشت:

شعاع ژیراسیون شناور حول محور Z و شعاع ژیراسیون شناور حول محور Y است.

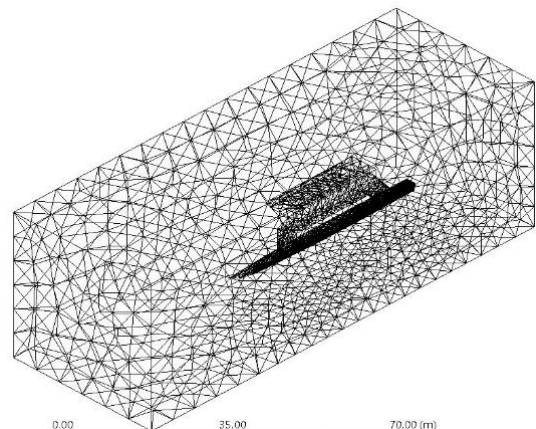


شکل ۲- نمایی از شناور کاتاماران

جدول ۱ مشخصات شناور کاتاماران

مقدار (واحد)	مشخصات
۲۴۰ m	طول کلی
۸ m	آبخور
۴۵۰۱۲ Ton	جابه جایی
۰/۰۰۰۴	ضریب میرایی
۱۰ m	VCG
۱۱۳ m	LCG
۱۱/۲ m	K_{zz}
۸۵ m	K_{yy}
۴۵ Knots	سرعت بیشینه

مدل المان محدود کاتاماران در حالت کلی دارای ۶۵۷۸۹۳ المان از نوع Solid برای سازه شناور و ۷۴۵۳۹۷ المان از نوع Fluid برای سیال اطراف شناور است (شکل ۳). این شبکه در فضایی معادل دو برابر ابعاد شناور و در نرم افزار ANSYS با استفاده از المان Quad با ۸ گره به صورت سازمان یافته تولید شده است. همان طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می شود در فضای نزدیک سطح شناور المان های ریزتر استفاده شده است تا نیروهای به دست آمده بر شناور با دقت بالاتری به دست آید.



شکل ۳ مدل مش بندی شده شناور کاتاماران در سیال

یکی از متغیرهای مهم در تحلیل المان محدود شناور شناخت خواص میرایی شناور است [۲۶]. میرایی سازه های در مودهای مختلف، با استفاده از تحلیل مودال شناور به دست می آید. که این روش در تخمین میرایی سازه، روش رایلی نامیده می شود [۳۲]. در روش رایلی ضریب میرایی کلی یک سازه از ضرایب میرایی α و β به دست می آید که α برای میرایی فرکانس پایین و β برای میرایی فرکانس بالا بکار گرفته می شود. به منظور به دست آوردن این ضرایب معادله (۵) و (۶) به صورت هم زمان حل می شود [۳۲].

$$\frac{\alpha}{4\pi f_{2n}} + \beta \pi f_{2n} = \xi_{2n} \quad (5)$$

$$\frac{\alpha}{4\pi f_{3n}} + \beta \pi f_{3n} = \xi_{3n} \quad (6)$$

که در این معادله ξ_{2n} و ξ_{3n} به ترتیب ضرایب میرایی دو گره ای و سه گره ای، f_{2n} و f_{3n} فرکانس های طبیعی دونقطه ای و سه نقطه ای شناور می باشند.

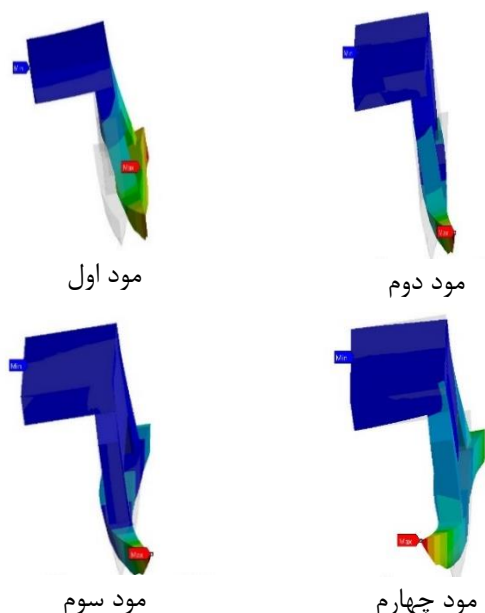
همان طور که اشاره شد، برای بررسی بارهای دینامیکی وارده بر شناور نیاز به تحلیل مودال بدنه شناور است. تحلیل های مودال در این مقاله، با استفاده از روش Lanczos و در نرم افزار ANSYS Mechanical صورت می گیرد. پس از به دست آوردن نتایج و با استفاده از حل دستگاه معادلات (۵) و (۶) می توان مقادیر α و β را برای بدنه شناور به دست آورد. سپس با استفاده از تحلیل های هیدرودینامیکی مقادیر بارهای وارده بر شناور را با استفاده از روش های CFD تخمین زد. در ادامه به بررسی نتایج به دست آمده از شبیه سازی ها پرداخته خواهد شد.

۴- نتایج و بحث

در این قسمت به منظور به دست آوردن نیروهای وارده بر شناور کاتاماران، شبیه سازی های مورد نیاز انجام می شود و سپس دقت و صحت پاسخ های به دست آمده مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. در ابتدای شبیه سازی به منظور بررسی رفتار فرکانسی شناور تحلیل های مودال بر روی شناور صورت می گیرد. سپس با استفاده از پاسخ تحلیل های مودال خواص میرایی شناور بدست می آید که این خواص در تخمین بارهای هیدرودینامیکی وارده بر شناور مورد و تحلیل های سیالاتی سازه شناور مورد بررسی قرار می گیرد. بارهای وارده بر شناور در دو حوزه فرکانس و زمان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- تحلیل مودال شناور

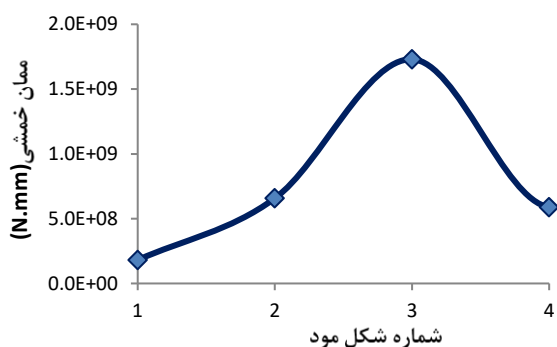
در قسمت اول تحلیل ها، آنالیز مودال بر روی بدنه شناور کاتاماران انجام خواهد شد. برای بررسی تأثیر سازه المان در نتایج به دست آمده، تمامی تحلیل ها برای سه سازه های ۲/۳ (۶۵۷۸۹۳ المان solid)، ۲/۶ (۵۸۲۲۱۱ المان solid) و ۲/۹ متر



شکل ۲ چهار مود غیر صلب اول شناور

که با استفاده از شکل مودهای شناور می‌توان دریافت که در هنگام وارد شدن ضربه از طرف سیال به شناور تغییر شکل در بدنه شناور به چه صورت خواهد شد [۳۳]. آنجا که شکل مودهای دونقطه‌ای شناور نسبت به سایر شکل مودها غالب‌تر است (دارای فرکانس پایین‌تری است) در نوسانات شناور این شکل مودها به‌صورت نمایان‌تری بروز داده می‌شود.

یکی دیگر از مواردی که در تحلیل مودال مورد بررسی قرار می‌گیرد تأثیر شکل مودهای شناور بر تنش خمشی وارده بر شناور است. بدین منظور در شکل ۵ تنش خمشی وارده بر شناور برای شکل مودهای مختلف نشان داده شده است.



شکل ۳ ممان خمشی در میانه شناور در شکل مودهای مختلف

همان‌طور که از شکل ۵ می‌توان دریافت، مود سوم (متناظر با شکل مود خمشی دونقطه‌ای حول محور Z بدنه) دارای بیشترین تأثیر بر روی تنش خمشی وارده بر شناور است و تنش ایجادشده از شکل مود دو برابر تنش ایجادشده از شکل مودهای دوم و چهارم شناور خواهد بود. لذا در صورت تحریک این شکل مود بیشترین تنش به شناور وارد می‌شود.

(۴۹۳۴۷۸ المان solid) انجام خواهد شد. در تحلیل مودال شناور در سیال با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-Mechanical، ۶ مود صلب متناظر با ۶ درجه آزادی شناور پدید می‌آید که در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ مودهای متناظر با ۶ درجه آزادی شناور

میرایی	مود صلب
۰/۱۰۶	جهت X
۰/۱۴۰	جهت Y
۰/۱۴۷	جهت Z
۰/۱۷۴	حول X
۰/۲۱۲	حول Y
۰/۲۲۵	حول Z

مقادیر فرکانس‌های طبیعی و میرایی شناور در حالت تر (شناور به همراه سیال اطراف) برای سه سایز المان مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ فرکانس‌های طبیعی و میرایی برای سه سایز مش مختلف

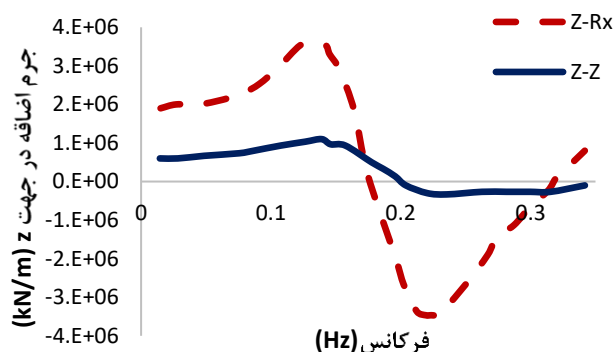
سایز مش ۲/۳		سایز مش ۲/۶		سایز مش ۲/۹	
فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی
۵/۰۸	۰/۱۲	۴/۵۳	۰/۱۲	۵/۱۷	۰/۱۳
۶/۰۲	۰/۱۴	۵/۶۲	۰/۱۳	۵/۷۸	۰/۱۳
۷/۶۰	۰/۱۶	۷/۵۵	۰/۱۶	۷/۶۰	۰/۱۶
۹/۴۳	۰/۱۳	۹/۲۹	۰/۱۴	۹/۱۲	۰/۱۳
۱۲/۷۵	۰/۱۷	۱۲/۵۵	۰/۱۸	۱۲/۱۵	۰/۱۸
۱۳/۸۹	۰/۱۵	۱۳/۶۵	۰/۱۴	۱۳/۶۰	۰/۱۵
۱۷/۵۸	۰/۱۶	۱۷/۳۹	۰/۱۶	۱۷/۷۷	۰/۱۵

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، تغییر در سایز مش بندی، تأثیر بیشتری در فرکانس‌های بالای شناور در مقایسه با فرکانس‌های پایین شناور دارد. برای مثال در فرکانس اول شناور با تغییر ۱۳ درصدی در سایز مش، فرکانس طبیعی ۱۳٪ تغییر پیدا می‌کند درحالی‌که در فرکانس طبیعی هفتم این تغییر برابر با ۱ درصد است. دلیل این موضوع این است که در مودهای بالاتر تأثیر جرم افزوده نسبت به جرم خود سیال بیشتر می‌شود (جرم تعمیم‌یافته شناور = جرم شناور + جرم متناظر افزوده در شناور).

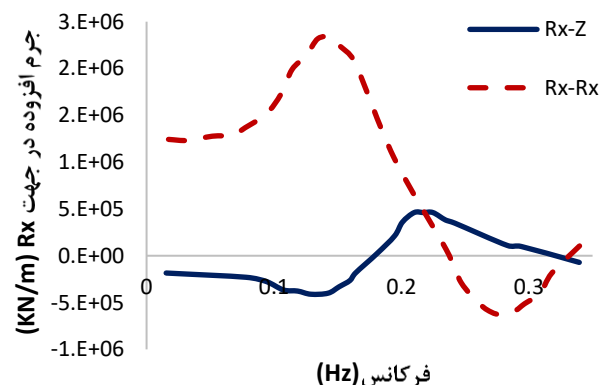
در شکل ۴ نیز شکل مودهای اول تا چهارم غیر صلب شناور نشان داده شده است.

۴-۲-۲- تحلیل جرم افزوده

همان طور که بیان شد جرم افزوده در شناور ناشی از اختلاف شتاب بین بدنه شناور و سطح سیال هست که این اختلاف شتاب منجر به شتاب نسبی در مرکز جرم شناور می شود. نیروی جرم افزوده ناشی از اختلاف شتاب بین شناور و سطح سیال را می توان در شکل های ۷ و ۸ مشاهده نمود. مقادیر جرم افزوده سیال دارای 6×6 جز است که متناظر با تمامی درجات آزادی شناور هستند. در اینجا فقط جزءهای در جهت محور Z (N_3) و حول محور X (N_2) شناور مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل ۷ مقدار اجزاء نیروی جرم افزوده برای جهت هیو و در شکل ۷ مقدار اجزاء نیروی جرم افزوده در پیچ شناور نشان داده شده است.



شکل ۵ جرم افزوده در جهت محور Z



شکل ۶ جرم افزوده در جهت Rx

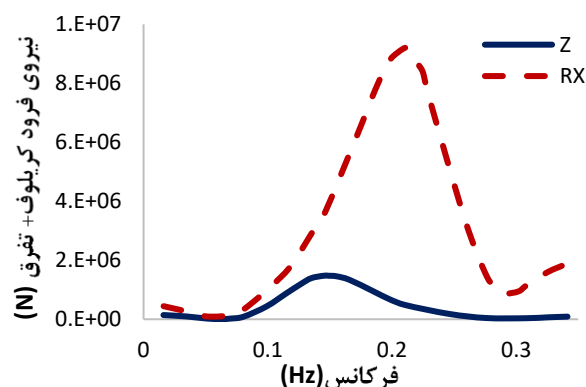
واحد جرم افزوده بر حسب کیلوگرم است که با ضرب این مقدار در شتاب شناور نیروی مقاوم معادل جرم افزوده به دست می آید. با توجه با این نمودارهای می توان دریافت در بعضی از فرکانس ها جرم افزوده دارای مقادیر منفی است، دلیل این امر نیز اختلاف جهت بین حرکت موج و شناور است که این اختلاف جهت منجر به منفی شدن جرم افزوده در شناور می شود. در این نمودارها زمانی که فرکانس موج به مقدار فرکانس صلب تر شناور می رسد جرم افزوده به اکستریم (بیشینه مقدار یا کمینه مقدار) خود میل می نماید. لذا در فرکانس موج متناظر با فرکانس صلب تر شناور، بیشینه شتاب به

۴-۲- تحلیل نیروهای وارده بر شناور

پس از تحلیل مودال شناور و بررسی رفتار فرکانسی بدنه، می توان مقادیر ضرایب میرایی ریلی α و β را با استفاده از جدول ۳ به دست آورد. سپس با استفاده از این ضرایب و مدل المان محدود شکل ۲ در نرم افزار ANSYS-AQWA نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور از طرف سیال به دست آورده می شود. همان طور که در معادله (۴) بیان شد، نیروهای وارد بر شناور از طرف سیال را می توان به نیروهای فرود-کریلوف، تفرق و همچنین نیروهای جرم و میرایی افزوده تقسیم نمود. از طرفی نیروهای وارده در جهت هیو و پیچ شناور دارای مقدار و اهمیت بالاتری نسبت به سایر نیروهای و ممان ها هستند. لذا در ادامه به بررسی رفتار نیروهای وارده بر شناور به ازای فرکانس های مختلف موج پرداخته می شود.

۴-۲-۱- تحلیل نیروهای فرود-کریلوف و تفرق

در شکل ۶ نیز مقدار مجموع نیروهای فرود-کریلوف و نیروی های تفرق در جهت هیو و پیچ شناور بر اساس فرکانس موج نشان داده شده است.



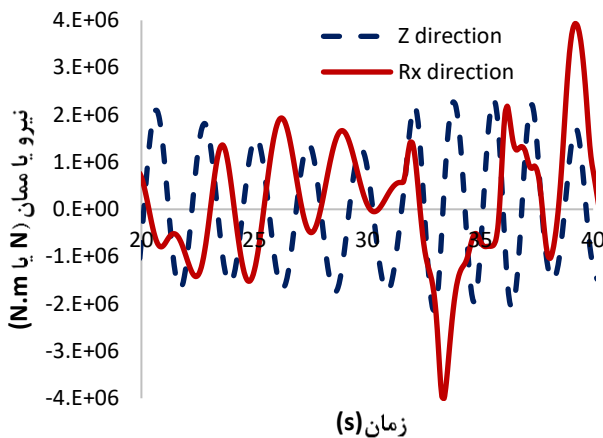
شکل ۴ نیرو فرود تفرق وارده بر شناور

می توان دریافت که با افزایش فرکانس تحریک موج مقدار نیروهای وابسته به موج شناور به صورت نمایی رشد می کند تا به مقدار اوج خود در یک فرکانس مشخص برسد. فرکانس اوج در 0.147 هرتز در جهت هیو و 0.21 هرتز در جهت پیچ شناور فعال قرار دارد که این مقادیر همان مقادیر فرکانس صلب شناور هستند که در تحلیل مودال تر شناور به دست آمده است (جدول ۲). لذا با استفاده از شکل ۶ می توان جدول ۲ در تحلیل مودال را به صورت کامل صحت سنجی نمود. هنگامی که فرکانس موج به مقدار فرکانس طبیعی صلب متناظر خود می رسد مقدار نیروهای تحریک نیز به بیشینه مقدار خود متمایل می شود که این مقدار اوج برای جهت پیچ شناور برابر 10^7 نیوتن و برای جهت هیو شناور 2×10^6 نیوتن است.

میل می‌نماید که این امر در عمل باعث می‌شود که دامنه حرکتی شناور در این فرکانس به صورت محدود باقی بماند.

۵- تعامل سیال و سازه

در تحلیل‌های حوزه فرکانسی که در قسمت قبل صورت گرفت، می‌توان تأثیر فرکانس موج بر نیروهای وارده بر شناور را مشاهده نمود با این حال روند زمانی نیروهای وارده بر شناور نیز دارای اهمیت بالایی است، لذا به منظور بررسی زمانی نیروهای وارده، در گام بعدی، تحلیل در حوزه زمان بر روی شناور صورت می‌گیرد. در این تحلیل فرض می‌شود که شناور بر روی موج با ارتفاع یک متر با فرکانس 0.15 هرتز و با سرعت 15 نات حرکت نماید. در تحلیل‌های صورت گرفته از تئوری موج دریای عمیق^{xxiii} استفاده شده است. در تحلیل زمانی حرکت شناور بر روی موج از ضربه‌های موج وارده بر شناور (بارهای اسلمینگ) صرف نظر شده است. نیروها و ممان‌های وارده بر شناور در جهات هیو و پیچ در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



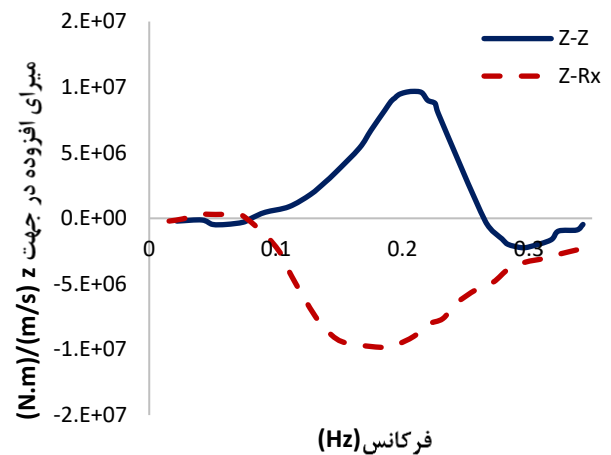
شکل ۸ نیرو و ممان‌های وارده بر شناور در زمان ۲۰-۴۰ ثانیه

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود نیروهای وارده بر شناور نیز در هر دو جهت Rx و Z دارای فرکانسی برابر با فرکانس موج است. نیروی بیشینه در جهت هیو شناور بین 10^6 تا 2×10^6 نیوتن و ممان در جهت پیچ شناور 4×10^6 نیوتن-متر است. در این صورت نیروی وارده بر شناور در جهت هیو برابر با 10^6 تا 2×10^6 خواهد بود. این مقدار نیرو را نیز می‌توان با استفاده از تجمیع نیروهای فرود-کریلوف، میرایی اضافه، جرم اضافه و نیروی تفرق به دست آورد که در این صورت با مقایسه دو روش فرکانسی و حوزه زمان می‌توان مشاهده نمود که این دو روش دارای تطابق مناسبی هستند (خطای کمتر از ۵٪). با اعمال نیروهای وارده از طرف سیال به مرکز جرم شناور با استفاده از روش کوپل یک‌طرفه می‌توان حرکت شناور در جهت هیو و پیچ شناور را در نرم‌افزار ANSYS-AQWA به دست آورد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

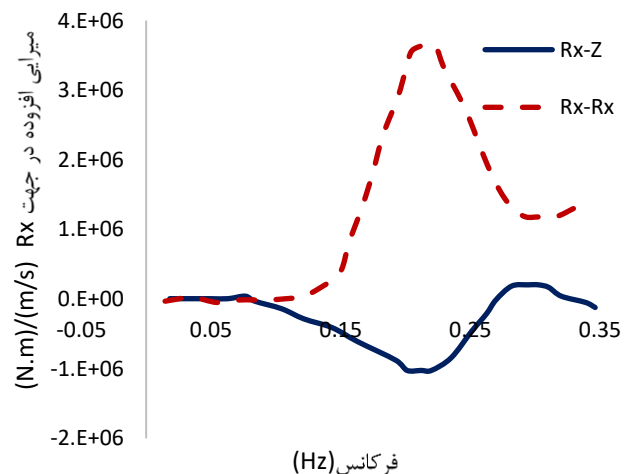
شناور و اجزاء آن وارد می‌شود. نکته دیگری که در این بین دارای اهمیت است، مقادیر اوج جرم افزوده است. برای مثال هنگامی که شناور بر روی موج با فرکانس 0.2 هرتز و ارتفاع 1 متر حرکت می‌کند نیرویی معادل 10 برابر وزن خود شناور به مرکز جرم آن وارد می‌شود.

۳-۲-۴- تحلیل میرایی افزوده

میرایی افزوده وارده بر شناور به دلیل وجود سیال در اطراف شناور نیز در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. این مقادیر دارای شش جزء در جهت سایر محورها است که در اینجا فقط در جهت محورهای Z و حول محور X نشان داده شده است و از سایر مقادیر به دلیل کوچک بودن صرف نظر شده است.



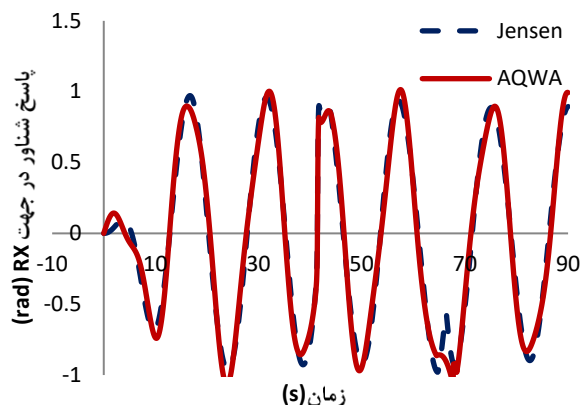
شکل ۶ میرایی افزوده در جهت Z



شکل ۷ میرایی افزوده در جهت Rx

نکته قابل توجهی که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز قابل مشاهده می‌باشد این است که در هنگامی که فرکانس موج به مقدار فرکانس صلب تر می‌رسد، مقدار میرایی افزوده وارده بر شناور نیز به مقدار اوج خود

شکل ۱۰ پاسخ زمانی شناور در جهت Z

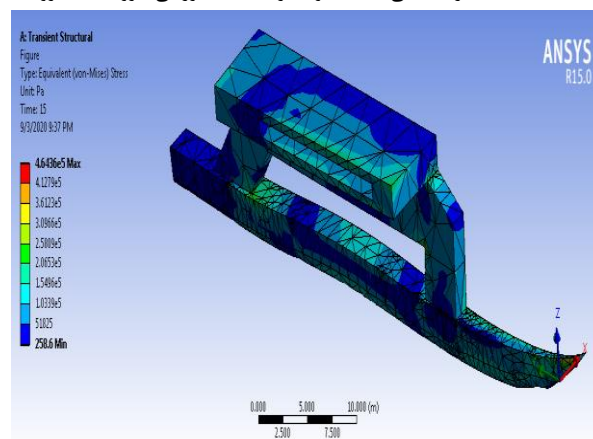


شکل ۱۱ پاسخ زمانی شناور در جهت Rx

مقدار جابه‌جایی شناور در جهت هیو با استفاده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری بین ± 1 متر با فرکانس موج در نوسان است در صورتی که در شبیه‌سازی با استفاده از روابط جنسن این مقدار بین ± 0.9 متر است که دارای خطایی معادل ۱۰٪ است. برای حرکت پیچ شناور نیز نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری بین ± 0.95 رادیان به دست می‌آید، در صورتی که پاسخ زمانی به‌دست‌آمده از روابط جنسن این مقدار بین $\pm 1/1$ رادیان است. مطابق بررسی زمانی انجام‌شده، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری و روش عددی ارائه‌شده در [۲۹] وجود دارد و خطای بین این دو روش کمتر از ۱۰٪ است که صحت شبیه‌سازی‌های ارائه‌شده را تصدیق می‌نماید.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله نیروهای هیدرودینامیکی وارده از طرف دریا با موج‌های منظم به شناور کاتاماران مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا تحلیل‌های مودال به‌صورت تر و با در نظر گرفتن سیال اطراف شناور انجام شد. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده در تحلیل مودال، میرایی ذاتی سازه با استفاده از روش ریلی به دست آمد. همچنین نشان داده شد که بیشترین ممان خمشی در شناور در مود سوم حرکتی رخ می‌دهد. سپس نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر شناور از قبیل نیروهای فرود-کریلوف در فضای فرکانسی موج مورد بررسی قرار گرفت. در این تحلیل‌ها نشان داده شد هنگامی که فرکانس موج به مقدار فرکانس صلب تر می‌رسد، مقدار جرم افزوده و میرایی افزوده وارده بر شناور نیز به مقدار اوج خود میل می‌نماید که این امر منجر به محدود شدن دامنه حرکتی شناور در واقعیت می‌شود. همچنین نشان داده شد که نتایج تحلیل‌های نیرویی با تحلیل‌های مودال دارای تطابق مناسبی هستند. سپس با استفاده از تحلیل نیروهای وارده بر شناور در حوزه زمان، مقادیر نیروهای کلی وارده بر سازه شناور مورد بررسی قرار گرفت که با مقایسه با تحلیل‌های انجام‌گرفته

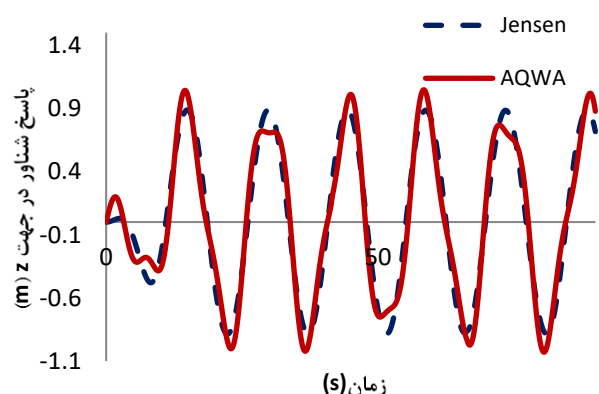


شکل ۹ تنش شناور در برخورد با موج ۱ متری

با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت که تغییر شکل ایجادشده در بدنه شناور به شکل مود چهارم شناور (شکل ۳) نزدیک است. دلیل این موضوع نیز این است که شکل پروفایل موج گذرنده از زیر شناور دقیقاً برابر است با شکل مود چهارم کاتاماران که به دلیل این تشابه در تحریک، شکل مود چهارم شناور به‌صورت غالب‌تر نسبت به سایر شکل‌مدها درآمده است.

۵-۱- پاسخ‌های زمانی حرکت شناور

در گام بعد به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده، جابه‌جایی متناظر شناور در جهات هیو و پیچ را با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری به دست آورده و سپس با نتایج به‌دست‌آمده از معادله تجربی ارائه‌شده در [۲۹] مقایسه می‌شود. در [۲۹] جنسن با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی روابطی برای حرکت شناور در جهت هیو و پیچ شناور را با توجه به فرم بدنه شناور به دست آورده است. به منظور بکارگیری روابط موجود در [۲۹] فرض بر این است که فرم بدنه بکارگرفته شده در شبیه‌سازی‌های عددی پژوهش حاضر با فرم بدنه موجود در [۲۹] یکسان است. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز نمودارهای زمانی حرکت شناور در جهت هیو و پیچ شناور با استفاده از هر دو روش ارائه‌شده در این مقاله و روش ارائه‌شده در [۲۹] نشان داده‌شده است.



mass coefficients of an underwater vehicle, Ocean Engineering, Vol. 215, 2020.

13- Caponnetto, M. *Practical CFD simulations for planning hulls*, *Proceedings of Second International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles*, Hamburg, pp.128-138, 2001.

14- Blount C., *Resistance tests of systematic series of planing hull, hull forms*. Trans.sname 71.491-579, 1963.

15- Lotfi P., Ashrafizaadeh, M. Esfahan, R. K. *Numerical investigation of a stepped planning hull in calm water*, Ocean Engineering, Vol. 94, pp.103-110, 2015 (in Persian).

16- Kim, K.H.; Kim, Y.H. *Comparative study on ship hydrodynamics based on Neumann-Kelvin and double-body linearization in time-domain analysis*, Int. J. O_shore Polar Eng., 265-274. 2010.

17- Zhang X.S. Bandyk, P.; Beck, R.F. *Seakeeping computations using double-body basis flows*. Appl. Ocean Res, 471-482. 2010.

18- Zhang, X.S. Beck, R.F. *Fully nonlinear computations of wave radiation forces and hydrodynamic coefficients for a ship with a forward speed*, In *Proceedings of the 30th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Bristol, UK, 12-15, 2015.

19- Zhang, W., Zou, Z.J. *Time domain simulations of radiation and diffraction by a Rankine panel method*. J. Hydrodyn., 27, 635-646, 2017.

20- Seo, M.G.; Kim, Y.H., *Numerical analysis on ship maneuvering coupled with ship motion in waves*. Ocean Eng. 38, 1934-1945, 2011.

21- Seng S, *Slamming and whipping analysis of ships*. Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, 2011.

22- OpenFOAM Foundation, OpenFOAM user guide version 7, 2019.

23- Ley J, Moctar O, Oberhagemann J, Schellin TE, *Assessment of loads and structural integrity of ships in extreme seas*, 30th Symposium on Naval Hydrodynamics, Hobart, Tasmania, Australia, 2014.

24- Oberhagemann J, *On prediction of wave induced loads and vibration of ship structures with finite volume fluid dynamic methods*. Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2016.

25- Drummen I., Holtman M., *Benchmark study of slamming and whipping*, Ocean Engineering, 86, 3-10, 2014.

26- Neitzel-Petersen, Jan Clemens, Stutz, Sophie Juliane, and Moustafa Abdel-Maksoud. *Steady and Unsteady Hydrodynamic Loads on the Azimuth Bearing of a POD during a Crash-Stop Maneuver*, J Ship Res, 65, 25-40 2021. doi: <https://doi.org/10.5957/JOSR.09180055>.

27- Rad M., Ebrahimi A., *Experimental study of catamaran vessel drag with non-parallel demi-hulls*, Ninth Marine Industry Conference, 2006 (In Persian).

در حوزه فرکانس، نتایج به دست آمده دارای خطایی کمتر از ۵٪ بودند.

در ادامه جهت اطمینان از نتایج تحلیل نیرویی، تحلیل یک طرفه سیال-سازه بر روی شناور صورت گرفت و نتایج حرکت دینامیکی شناور در جهات هيو و پیچ با نتایج تجربی-عددی به دست آمده در [۲۹] مقایسه شد و نشان داده شد که تحلیل های نرم افزاری دارای خطایی کمتر از ۱۰٪ نسبت به تحلیل های عددی-تجربی هستند و می توانند جایگزین خوبی بجای آزمون تجربی باشد.

۷- مراجع

1- Bertram V., *Practical Ship Hydrodynamics*, Elsevier Ltd, 2012.

2- Birk L., *Ship Hydrodynamics*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012.

3- Tang, Hao-yun, Wu, Xin, Tian, Bai-jun, and Wan Q., *Hydroelasticity Forecasting Method for Ship Motion and Load under Short-Crested Waves*, Paper presented at the The Fourteenth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Dalian, China, November 2020.

4- Tilander J., Patey M., Hirdaris S., *Springing Analysis of a Passenger Ship in Waves*, J. Mar. Sci. Eng. 2020, 8, 492; 2020.

5- Storhaug G., *Experimental investigation of wave induced vibrations and their effect on the fatigue loading of ships*, NTNU, 2007.

6- Doctors L. J., *Hydrodynamics of High speed Small Craft*, University of Michigan, No.292, Technical Report, 1985.

7- Zhang W., Moctar Q., Schellin T., *Numerical simulations of a ship obliquely advancing in calm water and in regular waves*, Applied Ocean Research, Volume 103, 2020.

8- Babu, Ravindra K., Nelli, Sri, Rayudu V., Bhattacharyya, Anirban, and Datta R., *Experimental and Numerical Investigation of Green Water Occurrence for KRISO Container Ship*. J Ship Res, 2020, doi: <https://doi.org/10.5957/JOSR.08200049>

9- Riesner M., Moctar Q., *Assessment of wave induced higher order resonant vibrations of ships at forward speed*, Journal of Fluids and Structures, Volume 103, 2021.

10- Zeraatgar H., Moghaddas A, Sadati K., *Analysis of surge added mass of planing hulls by model experiment*, Ships and Offshore Structures Volume 15, 2020, [doi.org /10.1080/17445302.2019.1615705](https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1615705)

11- Liu R. K. and Lin, T. *Analytical Solution for Froude-Krylov Force of Triangulated Geometry in Linear Waves*, ASME. J. Offshore Mech. Arct. Eng., 143(4), 2021, <https://doi.org/10.1115/1.4049247>.

12- Javanmard E., Mansoorzadeh S., Mehr J., *A new CFD method for determination of translational added*

- 32- Song Z., Su Ch., *Computation of Rayleigh Damping Coefficients for the Seismic Analysis of a Hydro-Powerhouse*, Shock and Vibration, 2017.
- 33- Monterrubio L., Krysl P., *Efficient Calculation of the Added Mass Matrix for Vibration Analysis of Submerged Structures*, the Eleventh International Conference on Computational Structures, DOI: [10.4203/ccp.99.212](https://doi.org/10.4203/ccp.99.212).
- 34- S. Rao, *Mechanical Vibrations*, Springer, second edition, 2012.

- 28- Saiehbani M., Zeraatgar H., Babaei L., Haji Mohammad shafie F., *Hydrostatic, hydrodynamic and structural study of a marine ambulance for the waters of Hormozgan province*, Ninth Marine Industry Conference, 2006 (In Persian).
- 29- Jensen J., Load and global response of ships, Amsterdam, Elsevier, 2001.
- 30- Kim H., Kim Y., Yuck R.-H., Lee O., *Comparison of slamming and whipping loads by fully coupled hydroelastic analysis and experimental measurement*, Journal of Fluids and Structures 52,145-152, 2015.
- 31- Masoodi E., Zeraatgar H., *Hydrodynamic analysis of vessel breakwater and the effect of boundary wall parameter*, Seventeenth Marine Industry Conference (In Persian).

- xiii - Neumann-Kelvin
- xiv - Double-body linearization
- xv - Vertical bending moment
- xvi - Slamming
- xvii - Surge
- xviii - Sway
- xix - Heave
- xx - Yaw
- xxi - Pitch
- xxii - Yaw
- xxiii - deep water wave theory

- i - Springing
- ii - Whipping
- iii - Drift
- iv - Added damping
- v - Added mass
- vi - Froude-Krylov
- vii - Diffraction
- viii - Scaled model
- ix - Computational fluid dynamics
- x - Caponnetto
- xi - Reynolds-averaged Navier-Stocks
- xii - Clement and Blount