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

محمدرضا نجفی[۱*] ، محمدجواد یارمحمدی [۲]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، drmrnajafi@ihu.ac.ir
[۲] دکتری، دانشگاه شهید بهشتی پردیس شهیدعباسپور، mrjavad110@gmail.com

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

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 وارده 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 تحلیل‌ها نیروهای وارده بر شناور از قبیل فرود-کریلوف، تفرق، جرم و میرایی افزوده در فضای فرکانس و زمان موردبررسی قرار می‌گیرد. در ادامه با استفاده از روش المان محدود و به‌کارگیری روش تعامل سازه-سیال، حرکت شناور بر روی امواج منظم مدل‌سازی می‌شود. با بررسی نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با روش‌های عددی- تجربی گذشته، می‌توان دریافت که نتایج به‌دست‌آمده دارای تطابق مناسب و خطای کمتر از ۱۰ درصد است لذا می‌توان از روش ارائه‌شده به‌منظور تخمین نیروهای وارده بر شناور استفاده نمود.

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 Yarmohammadi[2]

[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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]

۱ - مقدمه

امروزه، با توجه به افزایش نیاز به حمل‌ونقل دریایی، به‌کارگیری 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 هیدوردینامیک 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 فنریت [i] و ارتعاشات ناشی از کوبش [ii]. فنریت 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].

هنگامی‌که یک شناور بر روی امواج حرکت می‌کند، نیروهای هیدرودینامیکی غیرخطی بسیار زیادی را تجربه می‌کند که برخی از این نیروها شامل نیروی جانبی [iii]، میرایی افزوده[iv]، جرم افزوده[v]، نیروهای فرود-کریلوف [vi]، نیروهای تفرق [vii] و ... هستند[۶]. شناخت این نیروها در طراحی سازه شناور اهمیت بسیاری دارند[۷] و تحقیقات گسترده‌ای به‌منظور شناخت این نیروها بر روی شناور صورت گرفته است [۸-۱۰]. در روش‌های تجربی به‌منظور به دست آوردن نیروهای وارده بر شناور از آزمون مدل‌هایی با مقیاس کوچک [viii] 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، به‌کارگیری روش‌های عددی در هیدرودینامیک شناورها کاربرد گسترده‌تری یافته است. یکی از این روش‌ها استفاده از روش‌های دینامیک سیال محاسباتی[ix] به‌منظور تحلیل نیروهای وارده بر شناور است[۱۲]. یکی از نخستین مطالعات در مورد شبیه‌سازی عددی شناورهای تندرو مربوط به کاپوننتو[x] [۱۳] است که ایشان از حل‌گر RANS[xi] برای تحلیل هیدرودینامیکی یک شناور تندرو استفاده کرد. کلمنت و بلونت [xii] [۱۴] تست‌های تجربی را برای یافتن نیروی مقاوم در برابر حرکت بدنه‌های مختلف با زاویه دراز متفاوت انجام دادند. اگرچه نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه ایشان بسیار باارزش بود و داده‌های حاصل‌شده از آزمایش‌های تجربی، منبعی باارزش برای کارهای آینده شد اما این آزمایش‌ها بسیار پرهزینه و زمان‌بر بود. همچنین برای شرایط تعیین‌شده و محدودی معتبر بودند. ازاین‌رو با به‌کارگیری روش‌های CFD در کنار آزمون‌های تجربی می‌توان تعداد مدل‌های ساخته‌شده 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، ازاین‌رو نیروهای وارده بر شناور با فرکانس موج دارای رابطه‌ای خطی است. به‌عنوان‌مثال، کیم و همکاران [۱۶] مطالعه‌ای در مورد هیدرودینامیک کشتی با مقایسه روش‌های خطی سازی نیومان-کلوین [xiii] و روش خطی دوبدنه[xiv] 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 صرف‌نظر 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 هیدروالاستیک 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 اسلمینگ [xvi] ارائه‌شده است. لی و همکاران [۲۳] و اوبرهاگمن [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 صرف‌نظر می‌شود [۲۵]. این فرض در صورت حرکت فنریت شناور بر روی موج‌های منظم صادق است. ولی درصورتی‌که بارهای وارده بر شناور به‌صورت 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 به‌وضوح نشان داده‌شده است. لذا بررسی میرایی و تحلیل فرکانسی بدنه شناور در برابر این نوع بارها اهمیت بسزایی پیدا می‌کند. در سال‌های اخیر نیز شناورهای کلتاماران به دلیل دارا بودن سطح عرشه بزرگ، پایداری بالا، قابلیت بالای حفظ مسیر و مانور پذیری بالا موردتوجه بسیاری از محققین قرارگرفته 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]

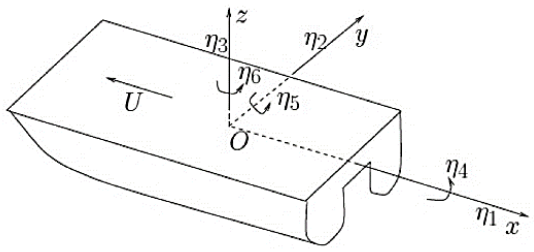
بارهای هیدرودینامیکی وارده بر شـــناور در جهات هیو و پیچ و با فرض حرکت بر روی موج‌های منظم پرداخته‌شده است. به دست آوردن این نیروها به‌وسیله تست تجربی نیازمند هزینه فراوان است که تحلیل عددی پژوهش حاضـــر با توجه به نوآوری‌ای که دارد، می‌تواند بسیاری از نیازهای صنعت را برطرف نماید. در این تحلیل‌ها میرایی بدنه در برابر بارهای وارده نیز موردبررســـی قرار می‌گیرد. به‌منظور بررسی بارهای هیدرودینامیکی، تحلیل‌های مودال و سیال-سازه‌ای بر روی شناور پیاده‌سازی شده و ارتباط بین این دو تحلیل بررسی می‌شود که هر یک از این تحلیل‌ها ذاتاً دیگری را مورد تائید قرار می‌دهد. همچنین به‌منظور صحت‌سنجی نیروهای به‌دست‌آمده در تحلیل‌های ســیالاتی، با اســتفاده از روش کوپل یک‌طرفه المان ســیال-ســازه، رفتار دینامیکی شــناور بر روی امواج موردبررســی قرارگرفته و نتایج به‌دست‌آمده با مقالات گذشته بر روی مدل شناور کاتاماران مورد مقایسه و صحت سنجی قرار خواهد گرفت.

۲- معادلات حاکم

به‌منظور 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 مختصـــاتی (شـــامل حرکت در جهت $x^{xvi\,i}$، حرکت در جهت $y^{xvi\,i\,i}$ و حرکت در جهت محور $z^{xi\,x}$) و سه حرکت حول محورهای مختصـاتی (شـامل حرکت حول محور x^{xx}، حرکت حول محور y^{xxi} و حرکت حول محور $z^{xxi\,i}$) اســت (شــکل ۱) که در معادلات (۱) و (۲) به‌صــورت بردار حرکت جامع شناور، s نشان داده‌شده است.

$$s = \eta_1 i + \eta_2 j + \eta_3 k + \omega * r \qquad (۱)$$

$$\omega = \eta_4 i + \eta_5 j + \eta_6 k$$
$$r = xi + yj + zk \qquad (۲)$$



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

در بسـیاری از پژوهش‌ها، به دلیل اختلاف شـدید بین اندازه حرکت شـــناور در جهت هیو و پیچ، از ســایر حرکات شـــناور صـــرف‌نظر می‌شود[۲۹]. با اسـتفاده از قانون دوم نیوتن می‌توان معادله حرکت شـــناور بر روی موج را در تمامی جهات آزادی شـــناور به‌صـورت زیر نوشت:

$$\sum_{k=1}^{6} \Delta_{jk}\, \ddot{\eta}_k(t) = F_j(t) = F_{Gj} + F_{Hj} \qquad (۳)$$
$$j = 1, \ldots, 6$$

که در این معادله Δ_{JK} ماتریس تعمیم‌یافته اینرســـی شـــناور و $F_j(t)$ کلیه نیروهای وارده بر شـناور هسـتند. همچنین η_k جهات مختلف کارتزینی شـــناور اســـت. این معادله را می‌توان به‌صـــورت معادلات اویلری بازنویسی نمود که در آن F_{Gj} نیروی گرانشی وارده بر شناور است که با نیروهای شناوری خنثی می‌شود. همچنین F_{Hj} نیروهـای نـاشـــی از ســـیـال بر روی بـدنـه (مجموع نیروهـای هیدرودینامیکی و هیدرواســتاتیکی) اســت. نیروهای هیدرودینامکی وارده بر شـــناور نیز خود دارای اجزاء مختلفی هســـتند که عبارت‌اند از [۳۰]:

- نیروهای فرود-کریلوف: در صـــورتی‌که فرض شـــود که از نوســـان شـــناور توســـط قیودی در دریای مواج جلوگیری شـــود، در این صـــورت نیروهای وارده بر شـــناور همان نیروهای فرود-کریلوف هستند.
- نیروهای تفرق: نیروهای ناشـی از موج‌های ایجادشـده در پشـــت شـــناور در حال حرکت، نیروهای تفرق نامیده می‌شوند.

از طرف دیگر نیروهایی مانند مقاومت سیال در برابر حرکت یا همان درگ نیز بر شـناور وارده می‌شـود که به دلیل کوچکی این نیروها در برابر نیروهای اشاره‌شده می‌توان در محاسبات عددی از این مقادیر صرف‌نظر نمود.

عامل دیگری که در معادله (۳) دارای تأثیر بالایی هســـت، ماتریس Δ_{jk} یا اینرسی تعمیم‌یافته شناور است. این مقدار برخلاف ماتریس جرمی تعمیم‌یافته در تئوری ارتعاشات دارای ترم‌های بیشتری است که به دلیل تأثیر حرکت شناور بر روی سطح سیال و اثر متقابل آن پدید می‌آینـد. بـه این مقـادیر در مـاتریس جرمی، جرم و میرایی افزوده گفته می‌شود [۳۱]. درنهایت مجموع نیروهای وارده بر شناور را می‌توان به‌صورت معادله (۴) بازنویسی نمود:

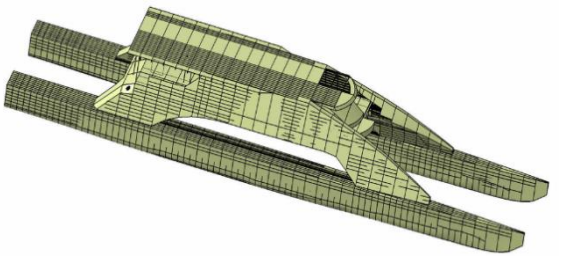
$$F_{\mathrm{T}} = \mathrm{F}_{\mathrm{FK}} + \mathrm{F}_{\mathrm{diff}} + \mathrm{F}_{\mathrm{added_mass}} + \mathrm{F}_{\mathrm{added_damping}} \qquad (۴)$$

۳- مدل‌سازی المان محدود کاتاماران

به‌منظور بررسی پاسخ‌های هیدرودینامیک شناور در موج، یک مدل از شـناور دوبدنه کاتاماران که دارای مقاطع عرضی، تیرهای طولی و پانل‌های متصـــل بدنه اســـت (شـــکل ۲) در نرم‌افزار ANSYS-AQWA مدل‌سازی می‌شود. متغیرهای مهم بدنه شناور کاتاماران در جدول ۱ نشان داده‌شده است. در این جدول VCG نشان‌دهنده مرکز جرم عرضـــی شـــناور، LCG مرکز جرم طولی شـــناور، K_{zz}

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]

شعاع ژیراسیون شناور حول محور z و K_{yy} شعاع ژیراسیون شناور حول محور y است.

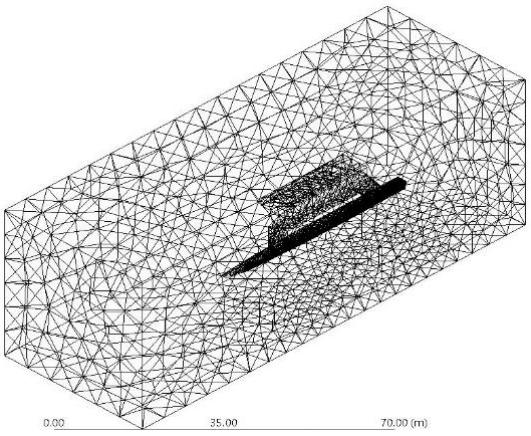


شکل ۲- نمایی از شناور کاتاماران

جدول ۱ مشخصات شناور کاتاماران

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

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 نرم‌افزار ANSYS با استفاده از المان Quad با ۸ گره به‌صورت سازمان‌یافته تولیدشده است. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود در فضای نزدیک سطح شناور از المان‌های ریزتر استفاده‌شده است تا نیروهای به‌دست‌آمده 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 سازه‌ای در مودهای مختلف، با استفاده از تحلیل مودال شناور به دست می‌آید. که این روش در تخمین میرایی سازه، روش رایلی نامیده می‌شود[۳۲]. در روش رایلی ضریب میرایی کلی یک سازه از ضرایب میرایی α و β به دست می‌آید که α برای میرایی فرکانس پایین و β برای میرایی فرکانس بالا بکار گرفته می‌شود. به‌منظور به دست آوردن این ضرایب معادله (۵) و (۶) به‌صورت هم‌زمان حل می‌شود[۳۲].

$$\frac{\alpha}{4\pi f_{2n}} + \beta\pi f_{2n} = \xi_{2n} \qquad (۵)$$

$$\frac{\alpha}{4\pi f_{3n}} + \beta\pi f_{3n} = \xi_{3n} \qquad (۶)$$

که در این معادله ξ_{2n} و ξ_{3n} به ترتیب ضرایب میرایی دو گره‌ای و سه گره‌ای، f_{2n} و f_{3n} فرکانس‌های طبیعی دونقطه‌ای و سه‌نقطه‌ای شناور می‌باشند.

همان‌طور که اشاره شد، برای بررسی بارهای دینامیکی وارده بر شناور نیاز به تحلیل مودال بدنه شناور است. تحلیل‌های مودال در این مقاله، با استفاده از روش Lanczos و در نرم‌افزار ANSYS-Mechanical صورت می‌گیرد. پس از به دست آوردن نتایج و با استفاده از حل دستگاه معادلات (۵) و (۶) می‌توان مقادیر α و β را برای بدنه شناور به دست آورد. سپس با استفاده از تحلیل‌های هیدرودینامیکی مقادیر بارهای وارده بر شناور را با استفاده از روش‌های CFD تخمین زد. در ادامه به بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها پرداخته خواهد شد.

۴- نتایج و بحث

در این قسمت به‌منظور به دست آوردن نیروهای وارده بر شناور کاتاماران، شبیه‌سازی‌های مورد نیاز انجام می‌شود و سپس دقت و صحت پاسخ‌های به‌دست‌آمده مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. در ابتدای شبیه‌سازی به منظور بررسی رفتار فرکانسی شناور تحلیل‌های مودال بر روی شناور صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از پاسخ تحلیل‌های مودال خواص میرایی شناور بدست می‌آید که این خواص در تخمین بارهای هیدرودینامیکی وارده بر شناور مورد و تحلیل‌های سیالاتی سازه شناور مورد بررسی قرار می‌گیرد. بارهای وارده بر شناور در دو حوزه فرکانس و زمان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- تحلیل مودال شناور

در قسمت اول تحلیل‌ها، آنالیز مودال بر روی بدنه شناور کاتاماران انجام خواهد شد. برای بررسی تأثیر سایز المان در نتایج به‌دست‌آمده، تمامی تحلیل‌ها برای سه سایز مش با اندازه‌های ۲/۳ (۶۵۷۸۹۳ المان solid)، ۲/۶ (۵۸۲۲۱۱ المان solid) و ۲/۹ متر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]

(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 داده‌شده 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

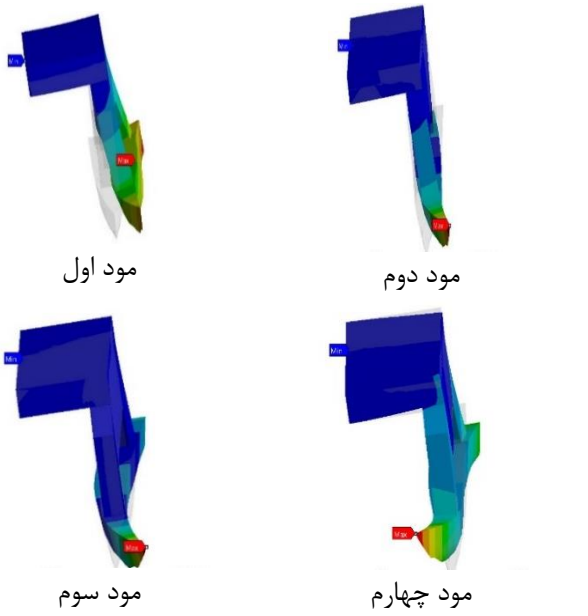
مقادیر فرکانس‌های طبیعی و میرایی شناور در حالت تر (شناور به همراه سیال اطراف) برای سه سایز المان مختلف در جدول ۳ نشان داده‌شده است.

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 داده‌شده 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).

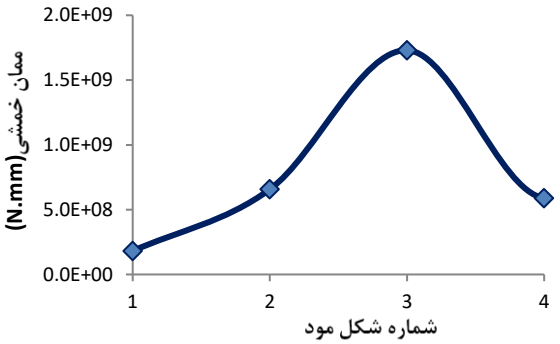
در شکل ۴ نیز شکل مودهای اول تا چهارم غیر صلب شناور نشان داده‌شده است.



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 موردبررسی 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 داده‌شده 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]

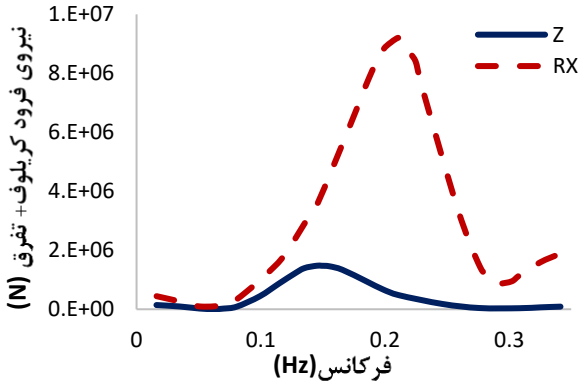
۴-۲- تحلیل نیروهای وارده بر شناور

پس از تحلیل مودال شناور و بررسی رفتار فرکانسی بدنه، می‌توان 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 نرم‌افزار ANSYS-AQWA نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور از طرف سیال به دست آورده می‌شود.

همان‌طور که در معادله (۴) بیان شد، نیروهای وارد بر شناور از طرف سیال را می‌توان 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 ممان‌ها هستند. لذا در ادامه به بررسی رفتار نیروهای وارده بر شناور به ازای فرکانس‌های مختلف موج پرداخته می‌شود.

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

در شکل ۶ نیز مقدار مجموع نیروهای فرود-کریلوف و نیروی‌های تفرق در جهت هیو و پیچ شناور بر اساس فرکانس موج نشان داده‌شده است.

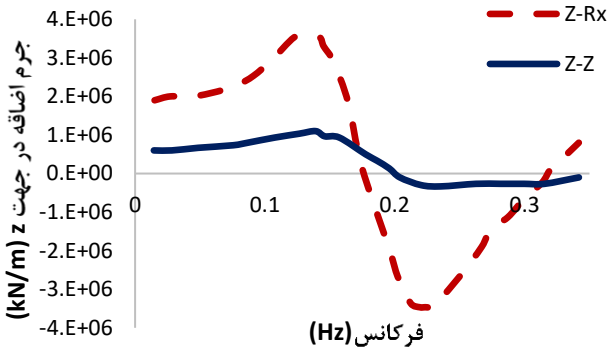


شکل ۴ نیرو فرود تفرق وارده بر شناور

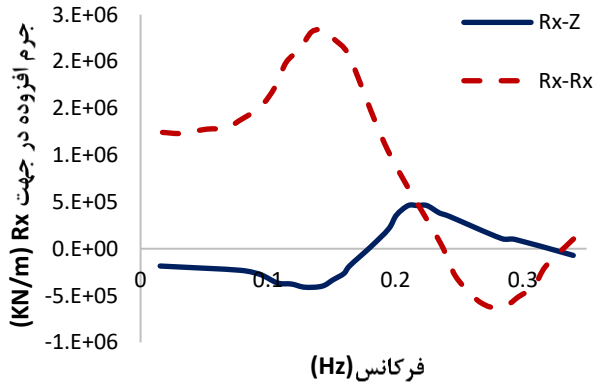
می‌توان دریافت که با افزایش فرکانس تحریک موج مقدار نیروهای وابسته به موج شناور به‌صورت نمایی رشد می‌کند تا به مقدار اوج خود در یک فرکانس مشخص برسد. فرکانس اوج در ۰/۱۴۷ هرتز در جهت هیو و ۰/۲۱ هرتز در جهت پیچ شناور فعال قرار دارد که این مقادیر همان مقادیر فرکانس صلب شناور هستند که در تحلیل مودال تر شناور به‌دست‌آمده است (جدول ۲). لذا با استفاده از شکل ۶ می‌توان جدول ۲ در تحلیل مودال را به‌صورت کامل صحت‌سنجی نمود. هنگامی‌که فرکانس موج به مقدار فرکانس طبیعی صلب متناظر خود می‌رسد مقدار نیروهای تحریک نیز به بیشینه مقدار خود متمایل می‌شود که این مقدار اوج برای جهت پیچ شناور برابر ۱۰۷ نیوتن و برای جهت هیو شناور×۱۰۶ ۲ نیوتن است.

۴-۲-۲- تحلیل جرم افزوده

همان‌طور 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 می‌شود. نیروی جرم افزوده ناشی از اختلاف شتاب بین شناور و سطح سیال را می‌توان در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده نمود. مقادیر جرم افزوده سیال دارای ۶×۶ 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 موردبررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۷ مقدار اجزاء نیروی جرم افزوده برای جهت هیو و در شکل ۷ مقدار اجزاء نیروی جرم افزوده در پیچ شناور نشان داده‌شده است.



شکل ۵ جرم افزوده در جهت محور z



شکل ۶ جرم افزوده در جهت Rx

واحد جرم افزوده برحسب کیلوگرم است که با ضرب این مقدار در شتاب شناور نیروی مقاوم معادل جرم افزوده به دست می‌آید. با توجه با این نمودارهای می‌توان دریافت در بعضی از فرکانس‌ها 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 می‌شود. در این نمودارها زمانی که فرکانس موج به مقدار فرکانس صلب‌تر شناور می‌رسد جرم افزوده به اکسترمم (بیشینه مقدار یا کمینه مقدار) خود میل می‌نماید. لذا در فرکانس موج متناظر با فرکانس صلب‌تر شناور، بیشینه شتاب به

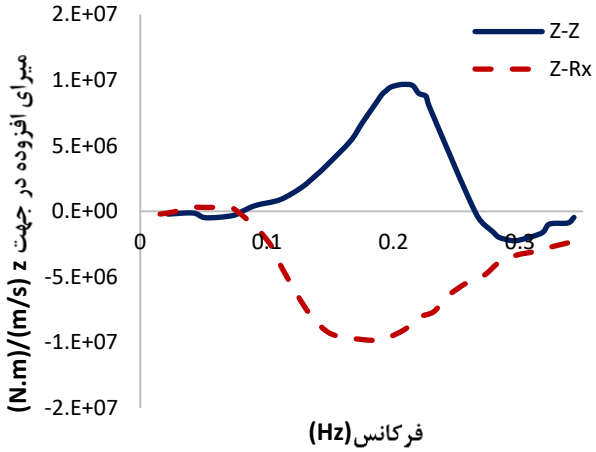
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]

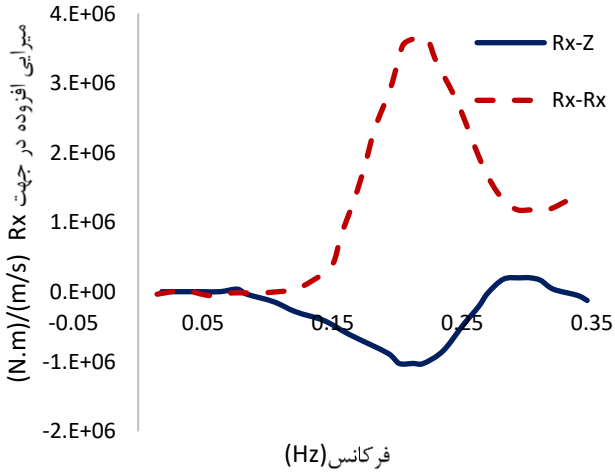
شـــناور و اجزاء آن وارد می‌شـــود. نکته دیگری که دراین‌بین دارای اهمیت اســـت، مقادیر اوج جرم افزوده اســـت. برای مثال هنگامی‌که شـــناور بر روی موج با فرکانس ۰/۲ هرتز و ارتفاع ۱ متر حرکت می‌کند نیرویی معادل ۱۰ برابر وزن خود شـــناور به مرکز جرم آن وارد می‌شود.

۳-۲-۴- تحلیل میرایی افزوده

میرایی افزوده وارده بر شـناور به دلیل وجود سـیال در اطراف شـناور نیز در شـکل‌های ۹ و ۱۰ نشـان داده‌شـده اسـت. این مقادیر داری شـش جزء در جهت سـایر محورها اسـت که در اینجا فقط در جهت محورهای Z و حول محور X نشـان داده‌شـده اسـت و از سـایر مقادیر به دلیل کوچک بودن صرف‌نظر شده است.



شکل ۶ میرایی افزوده در جهت z

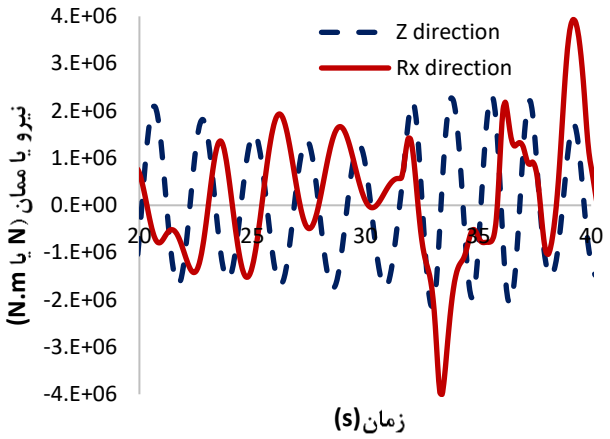


شکل ۷ میرایی افزوده در جهت Rx

نکته قابل‌توجهی که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز قابل مشاهده می‌باشد این است که در هنگامی‌که فرکانس موج به مقدار فرکانس صلب تر می‌رسـد، مقدار میرایی افزوده وارده بر شـناور نیز به مقدار اوج خود میل می‌نماید که این امر در عمل باعث می‌شـــود که دامنه حرکتی شناور در این فرکانس به‌صورت محدود باقی بماند.

۵- تعامل سیال و سازه

در تحلیل‌های حوزه فرکانسـی که در قسـمت قبل صـورت گرفت، می‌توان تأثیر فرکانس موج بر نیروهای وارده بر شـناور را مشـاهده نمود با این‌حال روند زمانی نیروهای وارده بر شـــناور نیز دارای اهمیت بالایی اسـت، لذا به‌منظور بررسـی زمانی نیروهای وارده، در گام بعدی، تحلیل در حوزه زمان بر روی شـناور صورت می‌گیرد. در این تحلیل فرض می‌شود که شناور بر روی موج با ارتفاع یک متر با فرکانس ۰/۱۵ هرتز و با سرعت ۱۵ نات حرکت نماید. در تحلیل‌های صورت گرفته از تئوری موج دریای عمیق [xxiii] استفاده شده است. در تحلیل زمانی حرکت شـناور بر روی موج از ضـربه‌های موج وارده بر شـــناور (بارهای اســـلمینگ) صـــرف‌نظر شـــده اســـت. نیروها و ممان‌های وارده بر شـناور در جهات هیو و پیچ در شـکل ۱۱ نشـان داده‌شده است.

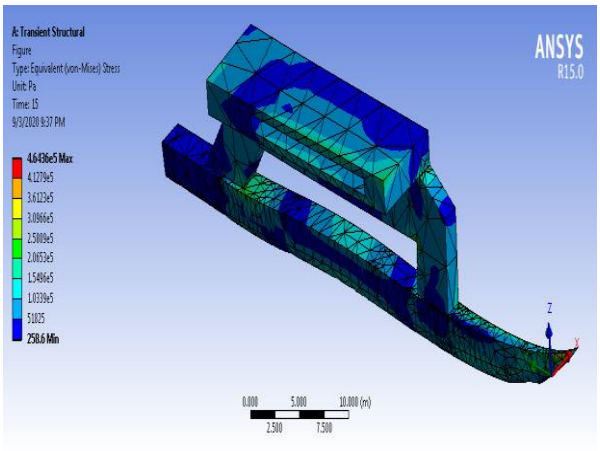


شکل ۸ نیرو و ممان های وارده بر شناور در زمان ۲۰-۴۰ ثانیه

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود نیروهای وارده بر شناور نیز در هر دو جهت z و Rx دارای فرکانســـی برابر با فرکانس موج اسـت. نیروی بیشـینه در جهت هیو شـناور بین ۱۰۶ ×۲/۲ نیوتن و ممان در جهت پیچ شـــناور ۱۰۶ ×۴ نیوتن –متر اســـت. در این صـــورت نیروی وارده بر شـــناور در جهت هیو برابر با ۱۰۶ ×۲/۳ خواهد بود. این مقدار نیرو را نیز می‌توان با اســـتفاده از تجمیع نیروهای فرود-کریلوف، میرایی اضـافه، جرم اضـافه و نیروی تفرق به دسـت آورد که در این صـورت با مقایسـه دو روش فرکانسـی و حوزه زمان می‌توان مشـاهده نمود که این دو روش دارای تطابق مناسـبی هسـتند (خطای کمتر از ۵٪). با اعمال نیروهای وارده از طرف سـیال به مرکز جرم شـــناور با اســـتفاده از روش کوپل یک‌طرفه می‌توان حرکت شـناور در جهت هیو و پیچ شـناور را در نرم‌افزار ANSYS-AQWA به دست آورد که در شکل ۱۲ نشان داده‌شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]

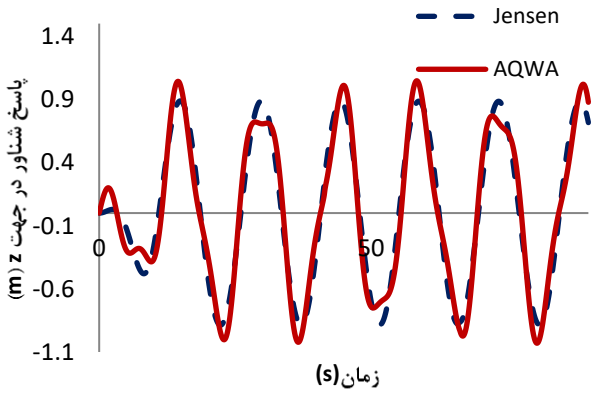


شکل ۹تنش شناور در برخورد با موج ۱ متری

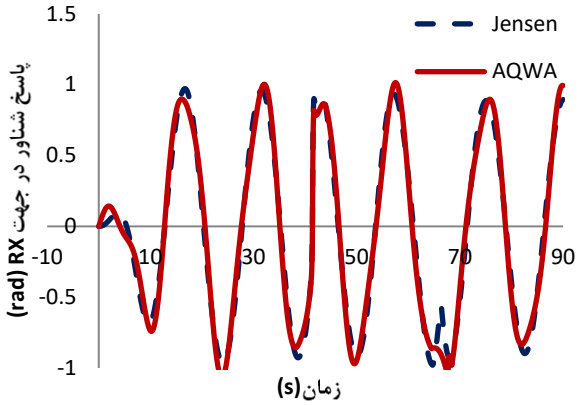
با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت که تغییر شکل ایجادشده در بدنه شناور به شکل مود چهارم شناور (شکل ۳) نزدیک است. دلیل این موضوع نیز این است که شکل پروفایل موج گذرنده از زیر شناور دقیقاً برابر است با شکل مود چهارم کاتاماران که به دلیل این تشابه در تحریک، شکل مود چهارم شناور به‌صورت غالب‌تر نسبت به سایر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

۱-۵- 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.



شکل ۱۰پاسخ 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±۱متر با فرکانس موج در نوسان است درصورتی‌که در شبیه‌سازی با استفاده از روابط جنسن این مقدار بین ±۰/۹ متر است که دارای خطایی معادل ۱۰٪ است. برای حرکت پیچ شناور نیز نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری بین±۰/۹۵رادیان به دست می‌آید، درصورتی‌که پاسخ زمانی به‌دست‌آمده از روابط جنسن این مقدار بین ±۱/۱ 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 موردبررسی 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 موردبررسی قرار گرفت. در این تحلیل‌ها نشان داده شد هنگامی‌که فرکانس موج به مقدار فرکانس صلب تر می‌رسد، مقدار جرم افزوده و میرایی افزوده وارده بر شناور نیز به مقدار اوج خود میل می‌نمایند 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 موردبررسی قرار گرفت که با مقایسه با تحلیل‌های انجام‌گرفته

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]

در حوزه فرکانس، نتایج به‌دست‌آمده دارای خطایی کمتر از ۵٪ بودند.

در ادامه جهت اطمینان از نتایج تحلیل نیرویی، تحلیل یک‌طرفه سیال-سازه بر روی شناور صورت گرفت و نتایج حرکت دینامیکی شناور در جهات هیو و پیچ با نتایج تجربی-عددی به‌دست‌آمده در [۲۹] مقایسه شد و نشان داده شد که تحلیل‌های نرم‌افزاری دارای خطایی کمتر از ۱۰٪ نسبت به تحلیل‌های عددی-تجربی هستند و می‌توانند 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 OffshoreStructures Volume 15, 2020, 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 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 sofsystematic 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).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]

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).
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.
34- S. Rao, *Mechanical Vibrations*, Springer, second edition, 2012.

[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
[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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.11.3]