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

محمدرضا نجفى (* ، محمدجواد يارمحمدى 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	چکیدہ
<i>تاریخچه مقاله:</i>	تخمین نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از حرکت شناور بر روی موج و پاسخ ارتعاشی ناشی از آن دارای
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱	اهمیت بسیار بالایی در طراحی سازه شناور است. در این مقاله تحلیل مودال و تحلیل نیرویی بارهای وارده
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳	بر شناور کاتاماران در دامنه فرکانس و زمان و در جهت هیو و پیچ شناور و با در نظر گرفتن میرایی ذاتی
<i>کلمات کلیدی:</i>	بدنه صورت گرفته است. در این تحلیلها نیروهای وارده بر شناور از قبیل فرود-کریلوف، تفرق، جرم و میرایی
نیروهای هیدرودینامیکی	افزوده در فضای فرکانس و زمان موردبررسی قرار میگیرد. در ادامه با استفاده از روش المان محدود و
کاتاماران	بهکارگیری روش تعامل سازه-سیال، حرکت شناور بر روی امواج منظم مدلسازی میشود. با بررسی نتایج
جرم افزوده	شبیهسازی و مقایسه آن با روشهای عددی- تجربی گذشته، میتوان دریافت که نتایج بهدستآمده دارای
میرایی افزوده	تطابق مناسب و خطای کمتر از ۱۰ درصد است لذا میتوان از روش ارائهشده بهمنظور تخمین نیروهای
ت ع امل سازه-سیال	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 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 حملونقل دریایی، به کارگیری کشتیها با اندازه و سرعتهای بالا، رشد بی سابقهای دارد. این نوع شناورها هنگام حرکت بر روی سطح آب نیروهای متفاوتی را تجربه می کند. به رفتار دینامیکی شناور در برابر نیروهای وارده از طرف سیال هیدرودینامیک شناور گفته می شود [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 می شود [۲]. این بارهای دینامیکی با توجه به ماهیت و فرکانس نوسانات آن رفتارهای مقاوتی بر روی بدنه شناور ایجاد می کنند [۳]. مهمترین این رفتارها عبارتاند از فنریت ^۱ و ارتعاشات ناشی از کوبش ^{۱۱}. 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].

هنگامی که یک شــناور بر روی امواج حرکت می کند، نیروهای هیدرودینامیکی غیرخطی بسیار زیادی را تجربه میکند که برخی از این نیروها شــامل نیروی جانبی ^{i i i}، میرایی افزوده^{v i}، 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 شــناور از آزمون مـدلهایی با مقیاس کوچک ^{viii} در حوضـچههای آزمایشـگاهی اسـتفاده میشـود. این روشها به دلیل نیاز به انواع حس گرها 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^{i x} بهمنظور تحلیل نیروهای وارده بر شــناور اســت[۱۲]. یکی از نخســتین مطالعات در مورد شبیهسازی عددی شناورهای تندرو مربوط به کاپوننتو^x [۱۳] است که ایشان از حل گرRANS^{xi} برای تحلیل هيدروديناميكي يك شيناور تندرو استفاده كرد. كلمنت و بلونت ^{xii} [۱۴] تســتهای تجربی را برای یافتن نیروی مقاوم در برابر حركت بدينه هاى مختلف با زاويه ددرايز متفاوت انجام داديد. اگرچه نتایج بهدست آمده از مطالعه ایشان بسیار باارزش بود و دادههای حاصل شده 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 شـناور را میتوان به دو دسـته تقسـیم نمود: ۱-روش های خطی ۲- روش های غیرخطی. در روش خطی فرض می شود که اختلال جریان ناشی از حضور کشتی در امواج نسبتاً کم است، ازاینرو نیروهای وارده بر شناور با فرکانس موج دارای رابطهای خطی است. به عنوان مثال، کیم و همکاران [۱۶] مطالعه ای 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 [۱۹-۱۷]، ارائه شد. در این روشها علی رغم سادگی در تحلیل، از مسائلی مانند تأثیر متقابل سیال بر شناور و یا بارهای ضربهای صـرفنظر میشـود[۲۰]. یکی دیگر از روشهای عددی به دسـت آوردن نیروهای وارده بر شیناور، 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 شــناور با اســتفاده از مدل تیر تیموشینکو مدلسازی شد و سپس به تحلیل عمر خستگی شناور با استفاده از روش^{VBMxv} 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 می شود [۲۵]. این فرض در صورت حرکت فنریت شناور بر روی موجهای منظم صادق است. ولی درصورتی که بارهای وارده بر شناور بهصورت ضربهای و دارای فرکانس بالا وارد شوند ســختی، میرایی و فرکانس طبیعی بدنه بر روی مقدار و لندازه بار وارده بر شناور تأثیر بسزایی می گذارد که در پژوهش نیتزل [۲۶] این امر بهوضوح نشان دادهشده است. لذا بررسی میرایی و تحلیل فرکانسی بدنه شیناور در برابر این نوع بارها اهمیت بسیزایی پیدا می کند. در سالهای اخیر نیز شیناورهای کلتاماران به دلیل دارا بودن سطح عرشه بزرگ، پایداری بالا، قابلیت بالای حفظ مسیر و مانور پذیری بالا موردتوجه 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

بارهای هیدرودینامیکی وارده بر شــناور در جهات هیو و پیچ و با فرض حرکت بر روی موجهای 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 نوآوریای که دارد، میتواند بسیاری از نیازهای صنعت را برطرف نماید. در این تحلیلها میرایی بدنه در برابر بارهای وارده نیز موردبررسی قرار میگیرد. به منظور بررسی بارهای هیدرودینامیکی، تحلیلهای 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 تحلیلها ذاتاً دیگری را مورد تائید قرار می دهد. همچنین به منظور صحت سنجی نیروهای به دست آمده سرال سیال سیالاتی، با استفاده از روش کوپل یک طرفه المان مراز گرفته و نتایج به دست آمده با مقالات گذشته بر روی مدل شناور قرار گرفته و نتایج به دست آمده با مقالات گذشته بر روی مدل شناور

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 مختصاتی (شامل حرکت در جهت xvi i X، حرکت در جهت y^{xi i i} y و حرکت در جهت محور x^{x ix}) و سه حرکت حول محورهای مختصاتی (شامل حرکت حول محور سه حرکت حول محورهای مختصاتی (شامل حرکت حول محور (شامل حرکت حول محور i^{xx} y و حرکت حول محور x^{i ix}) است (شکل ۱) که در معادلات (۱) و (۲) به صورت بردار حرکت جامع شناور، 8 نشان داده شده است.

$$s = \eta_1 i + \eta_2 j + \eta_3 k + \omega^* r \tag{1}$$

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

$$r = xi + yj + zk$$
(Y)



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

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

$$\sum_{k=1}^{6} \Delta_{jk} \eta_{k}(t) = F_{j}(t) = F_{Gj} + F_{Hj}$$

$$j = 1, \dots, 6$$
(Υ)

که در این معادله Δ_{JK} ماتریس تعمیمیافته اینرسی شیناور و $F_j(t)$ کلیه نیروهای وارده بر شناور هستند. همچنین η_k جهات مختلف کارتزینی شیناور است. این معادله را میتوان به صورت معادلات اویلری بازنویسی نمود که در آن F_{GJ} نیروی گرانشی وارده F_{Hj} نیروهای شناوری خنثی می شود. همچنین زوهای نیروهای ناشی از سیال بر روی بدنه (مجموع نیروهای هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی) است. نیروهای هیدرودینامکی وارده بر شیناور نیز خود دارای اجزاء مختلفی هستند که عبارتاند از [۳۰]:

- نیروهای فرود-کریلوف: در صورتی که فرض شود که از نوسان شاور توسط قیودی در دریای مواج جلوگیری شود، در این صوزت نیروهای وارده بر شاور همان نیروهای فرود-کریلوف هستند.
- نیروهای تفرق: نیروهای ناشی از موجهای ایجادشده 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 صرفنظر نمود.

عامل دیگری که در معادله (۳) دارای تأثیر بالایی هست، 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 میآیند. به این مقادیر در ماتریس جرمی، جرم و میرایی افزوده گفته می شود [۳1]. درنهایت مجموع نیروهای وارده بر شناور را میتوان به صورت معادله (۴) بازنویسی نمود:

$$F_{\rm T} = F_{\rm FK} + F_{\rm diff} + F_{\rm added_mass} + F_{\rm added_damping}$$
(°)

۳- مدلسازی المان محدود کاتاماران

به منظور بررسی پاسخهای هیدرودینامیک شناور در موج، یک مدل از شناور دوبدنه کاتاماران که دارای مقاطع عرضی، تیرهای طولی و پانلهای متصل بدنه است (شکل ۲) در نرمافزار -ANSYS پانلهای محل 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، Kzz

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



شکل ۲- نمایی از شناور کاتاماران

جدول ۱ مشخصات شناور کاتاماران				
مشخصات	مقدار (واحد)			
طول کلی	74· m			
آبخور	$\land m$			
جابەجايى	fant Ton			
ضریب میرایی	•/•••			
VCG	$\cdot m$			
LCG)) T m			
K _{zz}	11/T m			
K _{yy}	$\lambda \Delta m$			
سرعت بيشينه	40 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. همان طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می در فضای نزدیک سطح شناور از المانهای 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 سازهای در مودهای مختلف، با استفاده از تحلیل مودال شناور به دست میآید. که این روش در تخمین میرایی سازه، روش رایلی نامیده می شود [۳۲]. در روش رایلی ضریب میرایی کلی یک سازه از ضرایب میرایی $\alpha \in \beta$ به دست میآید 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].

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

$$\frac{\alpha}{4\pi f_{3n}} + \beta \pi f_{3n} = \xi_{3n} \tag{(5)}$$

که در این معادله ξ_{2n} و g_{3n} به ترتیب ضرایب میرایی دو گرهای و و سب گرهای، f_{3n} و f_{3n} فرکانس های طبیعی دونقطهای و سبه قطهای شناور میباشند.

همان طور که اشاره شد، برای بررسی بارهای دینامیکی وارده بر شناور نیاز به تحلیل مودال بدنه شناور است. تحلیلهای مودال در ANSYS - استفاده از روش Lanczos و در نرمافزار 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 شاور به دست آورد. سپس با استفاده از تحلیلهای هیدرودینامیکی مقادیر بارهای وارده بر شاور 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 پاسخهای به دستآمده 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.

۱-۴- 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

(solid 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				
مود صلب	میرایی			
جهت X	•/\•۶			
جهت y	•/14•			
جهت Z	•/14V			
حول x	•/144			
حول y	•/TIT			
حول Z	۰/۲۲۵			

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

جدول ۳ فرکانسهای طبیعی و میرایی برای سه سایز مش مختلف

نی ۲/۹	سایز مش ۲/۹		سایز مش ۲/۶		سايز مش
ميرايي	فر کانس	ميرايي	فر کانس	ميرايي	فر کانس
٠/١٣	$\Delta/\gamma V$	•/١٢	۴/۵۳	•/17	۵/۰۸
٠/١٣	Δ/YA	٠/١٣	۵/۶۲	٠/١۴	۶/۰۲
٠/١۶	٧/۶٠	۰/۱۶	۷/۵۵	٠/١۶	٧/۶٠
٠/١٣	٩/١٢	۰/۱۴	१/८१	•/1٣	٩/۴٣
٠/١٨	17/10	•/\٨	۱۲/۵۵	•/17	۱۲/۷۵
۰/۱۵	۱۳/۶۰	۰/۱۴	18/80	•/10	۱۳/۸۹
٠/١۵	14/44	•/18	۱۷/۳۹	•/18	۱۷/۵۸

همان طور 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 درحالی که 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 می شود (جرم تعمیمیافته شناور=جرم شناور+جرم متناظر افزوده در شناور). در شکل ۴ نیز شکل مودهای اول تا چهارم غیر صلب شناور نشان

در سکل ۲ نیز سکل مودهای اول تا چهارم غیر صلب ساور سان دادهشده است.



شکل ۲ چهار مود غیر صلب اول شناور

که با استفاده از شکل مودهای شناور می توان 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 غالب تر است (دارای فرکانس پایین تری است) در نوسانات شاور این شکل مودها به صورت نمایان تری بروز داده می شود.

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

همان طور که از شکل ۵ می توان دریافت، مود سوم (متناظر با شکل مود خمشی دونقطه ای 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 می شود.

۲-۴- تحلیل نیروهای وارده بر شناور

پس از تحلیل مودال شناور و بررسی رفتار فرکانسی بدنه، میتوان مقادیر ضـرلیب میرایی ریلی α و β را با اســـتفاده از جدول π به دسـت آورد. سـپس با اســتفاده از این ضـرایب و مدل المان محدود شکل ۲ در نرمافزار ANSYS-AQWA نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور از طرف سیال به دست آورده میشود.

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 ممانها هستند. لذا در ادامه به بررسی رفتار نیروهای وارده بر شناور به ازای فرکانسهای مختلف موج پرداخته می شود.

1-۲-۴- تحلیل نیروهای فرود-کریلوف و تفرق

در شــکل ۶ نیز مقدار مجموع نیروهای فرود-کریلوف و نیرویهای تفرق در جهت هیو و پیچ شــناور بر اسـاس فرکانس موج نشـان دادهشده 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 ۱۴۷ هرتز در جهت هیو و ۲۱/۰ 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 نمود. هنگامی که فرکانس موج به مقدار فرکانس طبیعی صلب متناظر خود می سد مقدار نیروهای تحریک نیز به بیشینه مقدار خود متمایل می شود که این مقدار اوج برای جهت پیچ شناور برابر ۱۰^۷ نیوتن و برای جهت هیو شناور × ۲۰۰ ۲ نیوتن است.

۲-۲-۴- تحليل 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 ۶×۶ جز است که متناظر با تمامی درجات آزادی شناور هستند. در اینجا فقط جزءهای در جهت محور Z (n3) و حول محور X (n2) شناور موردبررسی 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 ۶ جرم افزوده در جهت Rx

0.2

فركانس(Hz)

0.3

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 می شود. در این نمودارها زمانی که فرکانس موج به مقدار فرکانس صلبتر شناور می رسد جرم افزوده به اکسترمم (بیشینه مقدار یا کمینه مقدار) خود میل می نماید. لذا در فرکانس موج متناظر با فرکانس صلبتر شناور، بیشینه شتاب به

1.E+06

5.E+05

0.E+00

-5.E+05

-1.E+06

<u>م:</u> ا

KN/m) Rx

شــناور و اجزاء آن وارد میشـود. نکته دیگری که دراینبین دارای اهمیت اسـت، مقادیر اوج جرم افزوده اسـت. برای مثال هنگامی که شــناور بر روی موج با فرکانس ۰/۲ هرتز و ارتفاع ۱ متر حرکت می کند نیرویی معادل ۱۰ برابر وزن خود شــناور به مرکز جرم آن وارد می شود.

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 دادهشده است. این مقادیر داری شش جزء در جهت سایر محورها است که در اینجا فقط در جهت محورهای Z و حول محور X نشان دادهشده است و از سایر مقادیر به دلیل کوچک بودن صرفنظر شده است.



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

میل مینماید که این امر در عمل باعث میشــود که دامنه حرکتی شناور در این فرکانس بهصورت محدود باقی بماند.

۵- تعامل سيال و سازه

در تحلیلهای حوزه فرکانسی که در قسمت قبل صورت گرفت، می توان تأثیر فرکانس موج بر نیروهای وارده بر شناور را مشاهده نمود با اینحال روند زمانی نیروهای وارده بر شناور نیز دارای اهمیت بالایی است، لذا بهمنظور بررسی زمانی نیروهای وارده، در گام بعدی، تحلیل در حوزه زمان بر روی شناور صورت می گیرد. در این تحلیل فرض می شود که شناور بر روی موج با ارتفاع یک متر با فرکانس ۱۸/۵ هرتز و با سرعت ۱۵ نات حرکت نماید. در تحلیلهای صورت گرفته از تئوری موج دریای عمیق ^{i i i xx} استفاده شده است. بر شناور (بارهای اسلمینگ) صرفنظر شده است. نیروها و ممانهای وارده بر شناور در جهات هیو و پیچ در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



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

همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود نیروهای وارده بر شناور نیز در هر دو جهت z و Rx دارای فرکانسی برابر با فرکانس موج است. نیروی بیشینه در جهت هیو شناور بین ۲۰۴ ×۲/۲ نیوتن و ممان در جهت پیچ شیناور ۲۰۶ ×۴ نیوتن -متر اسیت. در این صورت نیروی وارده بر شیناور در جهت هیو برابر با ۲۰۴ ×۲/۳ خواهد بود. این مقدار نیرو را نیز می توان با اسیفاده از تجمیع خواهد بود. این مقدار نیرو را نیز می توان با اسیفاده از تجمیع نیروهای فرود-کریلوف، میرایی اضافه، جرم اضافه و نیروی تفرق به زمان می توان مشاهده نمود که این دو روش فرکانسی و حوزه زمان می توان مشاهده نمود که این دو روش دارای تطابق مناسبی هستند (خطای کمتر از ۵٪). با اعمال نیروهای وارده از طرف سیال به مرکز جرم شیناور با اسیفاده از روش کوپل یک طرفه می توان مرکت شناور در جهت هیو و پیچ شناور را در نرمافزار -ANSYS AQWA به دست آورد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. محمدرضا نجفی، محمدجواد یارمحمدی / بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر یک نمونه شناور کاتاماران با تاکید بر تحلیل مودال، جرم و میرایی افزوده



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 به صورت غالب تر نسبت به سایر شکل مودها درآمده است.

۱-۵- پاسخهای زمانی حرکت شناور

در گام بعد به منظور صحت سنجی نتایج به دست آمده، جابه جایی متناظر شناور در جهات هیو و پیچ را با استفاده از شبیه سازی نرم افزاری به دست آورده و سپس با نتایج به دست آمده از معادله تجربی ارائه شده در [۲۹] مقایسه می شود. 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 شبیه سازی های عددی پژوهش حاضر با فرم بدنه موجود در [۲۹] یکسان است. در شکل های ۱۳ و ۱۴ نیز نمودارهای زمانی حرکت شناور در جهت هیو و پیچ شناور با استفاده از هر دو روش ارائه شده در این مقاله و روش ارائه شده در [۲۹]







شکل ۱۱ پاسخ زمانی شناور در جهت **R**x

مقدار جابهجایی شناور در جهت هیو با استفاده از شبیهسازیهای نرمافزاری بین ± ۱ متر با فرکانس موج در نوسان است درصورتی که در شبیهسازی با استفاده از روابط جنسن این مقدار بین ± ۹/ ، متر است که دارای خطایی معادل ۱۰٪ است. برای حرکت پیچ شناور نیز نتایج بهدستآمده از شبیهسازیهای نرمافزاری بین ± ۹۵/ رادیان به دست میآید، درصورتی که 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 ارائه شده در [۲۹] وجود دارد و خطای بین این دو روش کمتر از ۱۰٪ است که صحت شبیهسازیهای ارائه شده 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 به صورت 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 هنگامی که فرکانس موج به مقدار فرکانس صلب تر میرسد، مقدار جرم افزوده و میرایی افزوده وارده بر شمناور نیز به مقدار اوج خود میل مینماید که این امر منجر به محدود شدن دامنه حرکتی شناور در واقعیت می شود. همچنین نشان داده شد که نتایج تحلیلهای نیرویی با تحلیلهای مودال دارای تطابق مناسبی هستند. سپس با استفاده از تحلیل نیروهای وارده بر شیناور در حوزه زمان، مقادیر نیروهای کلی وارده بر سازه شناور موردبررسی قرار گرفت که با مقایسه با تحلیلهای انجام گرفته

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 doublebody 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 بهدست آمده 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: <u>https://doi.org/10.5957/JOSR.08200049</u>

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, <u>doi.org/10.1080/17445302.2019.1615705</u>

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, <u>https://doi.org/10.1115/1.4049247</u>.

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.

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

- ^{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

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).

- 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