مطالعه عددی رفتار ارتعاشی بدنه شناور سطحی ناشی از تحریک پروانه

مجید نوروزی کشتان^۱ ، مهدی راغبی^۲* ، مجید ملک جعفریان^۳

^۱ دانشجوی دکتری ، دانشگاه بیرجند ، majid.norouzi@birjand.ac.ir ۲ استادیار ، دانشگاه بیرجند، raghebi@birjand.ac.ir ۳ دانشیار ، دانشگاه بیرجند، mmjafarian@birjand.ac.ir

طلاعات مقاله	چکیدہ
ريخچه مقاله:	 یکی از دیدگاههای مهم در طراحی یک سازه شناور، ارتعاشات سازه و تأثیر آن بر آرامش خدمه و عمر تجهیزات است.
ِيخ دريافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳	مهمترین عامل در ارتباط با آرامش خدمه در یک شناور، دامنه ارتعاشات آزاد و اجباری تحت عوامل مختلف داخلی و خارجی
ِيخ پذيرش مقاله: ١٤٠٠/٠٩/١٣	در سازه شناور است. یکی از مهمترین عوامل تحریک ارتعاشات در بدنه شناور، پروانه شناور است. ارتعاشات زیاد و همچنین
مات کلیدی:	قرار گیری سازه در محدوده فرکانس تحریک پروانه باعث خستگی، فرسودگی قطعات و همچنین پدیده تشدید میشود. پدید
تعاشات بدنه کشتی	تشدید و ارتعاشات اجزا از چالشهای طراحی سازه است؛ بنابراین در این مقاله ارتعاشات ناشی از تحریک پروانه پنج پره
لعاشات اجباري	KP505 با استفاده از تحلیل عددی بر روی شناور کانتینربر (KCS) بررسی شدهاست. ابتدا به بررسی ارتعاشات آزاد بدنه
نامیک سیالات محاسباتی	شناور در حالت خیس پرداخته شدهاست. سپس جهت بررسی ارتعاشات اجباری ناشی از تحریک پروانه، توزیع فشار روی
ليز مودال	بدنه در حالت خودرانش از حل عددی جریان سیال بهوسیله دینامیک سیالات محاسباتی بهدست آمد. برای صحت سنجی
	نتایج، فرکانس های طبیعی بهدست آمده در ارتعاشات آزاد با فرمول های تجربی مقایسه شدهاست. با مقایسه مقادیر فرکانس
	اول، دوم و سوم خمشی با مقادیر تجربی، خطای تحلیل به ترتیب ۵.۵، ۲۶ و ۲۶.۶ بدستآمد که نشان از دقت و درستی
	تحلیلها دارد. از مقایسه نتایج حاصل از ارتعاشات اجباری با محدوده مجاز استاندارد، نشان داده شد که ارتعاشات در محدوده
	مجاز قرار گرفتهاست. همچنین سازه در محدود فرکانس تحریک پروانه قرار نگرفتهاست. در نتیجه پدیده تشدید به وجود
	نیامده است.

Numerical study of the vibrational behavior hull surface vessel caused by propeller excitation

Majid Norouzi Kehtana¹, Mehdi Raghebi^{2*}, Majid Malek Jafarian³

¹ PhD Candidate, University of Birjand; majid.norouzi@birjand.ac.ir
 ² Assistant Professor, University of Birjand; raghebi@birjand.ac.ir
 ³ Associated Professor, University of Birjand; mmjafarian@birjand.ac.ir

ARTICLE INFO ABSTRACT

Article History: Received: 25 Sep. 2021 Accepted: 04 Dec. 2021

Keywords: Ship hull vibrations forced vibrations computational fluid dynamics modal analysis One of the most important issues in the design of a vessel structure is the vibrations of the structure and its effect on the comfort of the crew and the life of the equipment. The most important factor about the comfort of the crew in a vessel is the range of free and forced vibrations under various internal and external factors in the structure of the vessel. One of the serious factors in stimulation of vibrations in the hull vessel is the propeller. Excessive vibrations as well as the being the structure in the frequency range of propeller excitation, cause fatigue, components exhaustion, and also the resonance phenomenon. Resonance and vibration of the components are the structural design challenges, so in this paper, vibrations caused by a five-bladed propeller KP505 excitation were investigated using numerical simulation on a container vessel (KCS). First, the free vibrations of the hull vessel in wet mode were investigated. Then, to investigate the forced vibrations caused by the propeller excitation, the pressure distribution on the hull in self-propulsion mode was obtained from the numerical solution of the fluid flow by computational fluid dynamics. To validate the results, the natural frequencies obtained in free vibrations were compared with empirical formulas. Comparing the values of the first, second and, third bending frequencies with the empirical values, showed that the analysis error was 5.5, 26, and 26.6, respectively, which explain the accuracy of the analysis. Comparing the results of forced vibrations with the standard allowable range, it was shown that the vibrations are within the allowable range. Also, the structure has not being within the range of the excitation frequency of the propeller. As a result, the resonance phenomenon has not occurred.

۱ – مقدمه

ایجاد پایین ترین سطح سروصدا و ار تعاشات برای آسایش بیشتر افراد یک شناور، یکی از مهم ترین مسائل طراحی شناورها است. کاهش ار تعاشات و نویز باعث آسایش خدمه و جلوگیری از خرابی قطعات می شود [۱]. وجود ار تعاشات در بدنه شناور باعث پدیده خستگی در اجزاء و درنتیجه کاهش استحکام اتصالات، ایجاد سروصدا و نهایتاً پایین آمدن راندمان شناور می شود. هنگام صحبت از مسائل ار تعاشاتی در شناورهای در حال کار، باید به موارد زیر توجه کرد:

کاهش راحتی و آسایش خدمه

- آسیبهای ناشی از خستگی به سازه و ماشین آلات

کارکرد ناصحیح و افزایش هزینههای نگهداری
 ماشینآلات و تجهیزات که غالباً تصحیح این موارد بهمنظور کاهش
 تأثیرات ارتعاشی، وقت و هزینه قابل توجهی را صرف مینماید.

قدم اول در بررسی ارتعاشات یک شناور به دست آوردن محدوده فرکانس طبیعی اجزاء و مطالعه شرایط تشدید یا رزونانس در آنها است. اجزا شامل بدنه، موتور، ماشینهای فرعی و سیستم شفت و پروانه است. طبق آییننامه موسسه ردهبندی آمریکا^۱ ارتعاشات ناشی از سیستم رانش، منبع اصلی و مهم ارتعاشات شناور است که ارتعاشات این منبع به چند دسته تقسیم می شود:

- نیروی دینامیکی سیستم شفت که از طریق یاتاقانهای شفت به بدنه منتقل میشود

- فشار متناوب ناشی از پروانه بر روی بدنه شناور که سبب ایجاد ارتعاشات در بدنه میشود

- موتورهای اصلی و فرعی بهطور مستقیم از طریق انتقال نیروی دینامیکی به پایههایشان باعث ارتعاش میشوند[۲].

کیناس و بلور به تحریک ارتعاشی بدنه شناور ناشی از منابع نویز تکقطبی و دوقطبی پروانه پرداختند[۳]. لی و همکاران بهوسیله روش تحلیل عددی، ارتعاشات بدنه شناور را در اثر تحریک پروانه، با استفاده از نرمافزارهای RANS ،Ship-Pro ،MPUF3A بررسی کردند. ارتعاشات ناشی از ویک پروانه را برای بارهای هارمونیک هر یک از پرههای پروانه استخراج نموده و مقادیر سرعت ارتعاش بدنه را در جهتهای مختلف بهدست آوردند. همچنین سازه شناور را که شامل روبنا بوده، تحت تأثیر بار و فرکانس مربوط به پرههای پروانه تشدید جهت مینیمم کردن ارتعاشات انتقالی در شناورهای دریایی پرداختند. در این تحقیق با توجه به منابع نویز در زیردریایی یک آلگوریتم با توابع غیرخطی جهت بهینهسازی مورداستفاده قرار گرفته است[۵]. فنگ به مطالعهای راجع به مسیر انتقال ارتعاش از سیستم شافت به بدنه ازجمله یاتاقانها ارائه داد. در این مطالعه

داده شد که علاوه بر ویژگیهای اصطکاک، نایایداری حالتهای جانبی یک فاکتور مهم در رابطه با وقوع ارتعاش خود برانگیخته ناشی از اصطکاک است [۶]. مرز و همکاران به مینیمم کردن قدرت صوت منتشره توسط یک زیردریایی با در نظر گرفتن بهینهسازی تغییردهنده تشدید پرداختهاند. همچنین نوسانات فشار ناشی از بدنه بر روی پروانه در نظر گرفته شدهاست. جهت بهینهسازی شفت و كاهش ارتعاشات پروانه به بدنه يک سيستم هيدروليکي تغييردهنده تشدید بین پروانه و شفت در نظر گرفته شدهاست[۷]. توسط کو و همكاران يك روش تغييرات اصلاحشده براى تجزيهوتحليل ارتعاشات آزاد و اجباری حلقه تقویت شده مخروطی، استوانهای و پوسته مخروطی، استوانهای، کروی در معرض شرایط مرزی مختلف و با استفاده از نظریه تقویت گر المان گسسته برای در نظر گرفتن تأثیرات تقویت کننده حلقوی، ارائه شدهاست. لازم به ذکر است که برای یک پوسته همراه با تقویت کننده طولی، تمام مودهای محیطی پوسته کوپل شدهاست، که برای پوسته غیر تقویتشده یا پوسته تقویتشده حلقوی هارمونیک ساده نیست[۸, ۹]. سانگ ارتعاشات و انتشار نویز از یک وسیله زیر آب در اثر تحریک نیروی پروانه را با استفاده از تئوری ساختار دورهای^۲ تجزیهوتحلیل شدهاست[۱۰]. کو و همکاران در تحقیقی به تحلیل پاسخ ارتعاشی- آکوستیکی یک پوسته ترکيبی کروی-استوانهای-کروی که بهوسیله تقویت کننده های طولی و محیطی تقویت شده است، پرداخته اند. در این تحقیق از روش نیمه تحلیلی برای حل پاسخ ارتعاشی-آکوستیکی استفاده شدهاست. تأثیر مودال بر توان صدای منتشرشده و میدان فشار صوت دوردست برای پوستههای کوپلشده با تقویت کننده ها، بررسی شده است [۱۱]. توسط کو و همکاران در تحقیقی به بررسی پاسخهای سازهای و صوتی یک سیستم کوپل پروانه- شفت و بدنه فشار زیردریایی تحت تحریکات ناشی از نیرویهای متفاوت پروانه پرداخته شدهاست. کل سیستم که متشکل از یک پروانه صلب، یک محور اصلی، دو بلبرینگ و بدنه فشار تقویت شده است، در یک سیال سنگین غوطهور است. شفت بهصورت الاستیک به بدنه فشار توسط یک یاتاقان شعاعی و یک یاتاقان محوری متصل است. اثر مودهای مختلف موج محیطی بدنه فشار در برابر پاسخ سازهای و صوتی سیستم کوپل شده تحت بارهای محوری، عرضی و نیروهای عمودی پروانه بررسی شدهاست. اثر تقویت کننده حلقوی و سفتی یاتاقانها در پاسخ آکوستیکی سیستم كويل شده بحث شد [17].

با توجه به این که مطالعات کمی در زمینه تحلیل ارتعاشات ناشی از تحریک پروانه با درنظر گرفتن جریان سیال و اثر آن بر روی سازه صورت گرفته است، لذا در مطالعه حاضر به بررسی ارتعاشات آزاد و اجباری شناور کانتینر بر در حالت اندازه کامل پرداخته شدهاست. ابتدا به بررسی ارتعاشات آزاد بدنه شناور پرداخته شد. سپس

نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی و نیروهای تحریک چرخش پروانه بر سازه اعمال شد. در انتها نتایج بهدستآمده از ارتعاشات آزاد و اجباری بررسی شد.

۲- روش حل مساله

استخراج نتایج در تحلیل عددی نیازمند مدل سازی صحیح، مش-بندی مناسب، استفاده از روش مناسب با شرایط مساله و ترتیب صحیح مراحل کار است. در این بخش معادلات حاکم، نحوه مش بندی، شرایط مرزی در تحلیل هیدرودینامیکی و ارتعاشی آورده شدهاست.



شکل ۱- الگوریتم بررسی ارتعاشات سازه

شکل ۱ نشاندهنده لگوریتم کلی تحلیل عددی ارتعاشات ناشی از تحریک پروانه است.

۲-۱- مشخصات هندسی

شناور موردمطالعه کانتینربر KCS به طول ۲۳۰ متر، بیشینه عرض^۳ ۲۲.۲ متر، آبخور ۲۰.۸ متر با پروانه پنج پره KP505 است. ابتدا به علت کامل نبودن هندسه بدنه (نبود تقویت کنندهها) با استفاده از ۱۰ استاندارد GL، اقدام به طراحی تقویت کنندهها شدهاست. تعداد ۱۰ عدد دیواره عرضی (بالکهده[†]) درنظر گرفته شدهاست [۱۳]. همچنین اجزا دیگر بهمانند شاهتیر اصلی^۵، فریمها، تقویت کننده افقی²، تقویت کننده طولی^۷، گیردر^۸ با توجه به اندازه شناور، بر روی شناور قرار داده شدهاست. شکل ۲ نشان دهنده بدنه شناور است.



شکل ۲- بدنه شناور تقویتشده

۲-۲- معادلات حاکم در تحلیل هیدرودینامیک

به منظور حل میدان جریان، معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده توسط رینولدز برای جریان غیر قابل تراکم که در آن معادله پیوستگی به شکل معادله (۱)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

و معادله مومنتوم به شکل معادله (۲)

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right]$$
(7)

نوشته می شود، باید به روش های عددی حل شود. در این معادلات زیرنویس $i \ e \ f$ بیان گر جهت در راستای محور مختصات است. $U \ e$ x به ترتیب بیان گر سرعت های متوسط و جهت مختصات هستند. فشار متوسط، چگالی و لزجت به ترتیب با $p \ q \ e$ نمایش داده شدهاند. جمله آخر معادله مقدار مجهول تنش رینولدز می باشد که برای محاسبه آن برای جریان های مغشوش نیازمند مدل سازی آن هستیم.

۲-۳- شــبکـه محـاســبـاتی و شــرایط مرزی در تحلیـل هیدرودینامیکی

برای به دست آوردن فشار هیدرودینامیکی بر روی بدنه، ابتدا به حل هیدرودینامیک بدنه کشتی در حالت خودرانش با استفاده از نرمافزار استار سیسیام^۹ پرداخته شدهاست. برای ایجاد شبکه در حالت خود رانش، محیط اطراف مدل به دو ناحیه ثابت و دورانی تقسیم بندی شدهاست. محیط اطراف پروانه حالت دورانی و محیط اطراف بدنه در حالت ثابت است. با توجه به دوفازی بودن مساله و بهبود ناحیه سطح آزاد شناور، مش ایجادشده در این ناحیه ریزتر انتخاب شده است. در شبکهبندی ۸ لایهمرزی روی دیوارههای بدنه کشتی، ۱۷

لایهمرزی روی پرهها و ۱۵ لایهمرزی روی هاب پروانه استفاده شد و ارتفاع آن طوری انتخاب شد تا جریان لایهمرزی روی دیواره پره بهخوبی شبیهسازی شود. کل شبکه تولیدشده برای دامنه حل، شامل ۶۹۳۵۵۴۵ سلول است. تعداد ۳۸۷۱۳۰۷ سلول در ناحیه ثابت و ۳۰۶۴۲۳۸ سلول در ناحیه دورانی ایجاد شدهاست. شبکه ایجادشده در شکل ۳ نشان داده شدهاست.





شرایط مرزی به صورت سرعت ورودی در سمت سینه کشتی، فشار خروجی در سمت پاشنه کشتی و شرط عدم لغزش برای بدنه درنظر گرفته شده است. در شکل ۴ جهت بررسی کیفیت مش، توزیع فاصله بیبعد دیواره (y+) روی بدنه و پروانه کشتی نشان داده شده است. با دقت درشکل ۴ میزان y+ از عدد یک تقریباً کمتر است که نشان دهنده کیفیت مش حل جریان مغشوش به خصوص در نزدیکی سطح جسم است.



شکل^۴- توزیع فاصله بی بعد دیواره (+y) روی بدنه و پروانه کشتی

برای جریان آشفته از مدل توربولانسی $w - \omega$ و همچنین برای تحلیل جریان دوفازی از مدل *vof* استفاده شد. ۱–۳–۳– استقلال از شبکه

به منظور بررسی استقلال نتایج حل عددی، از چند شبکه مطابق با جدول ۱ استفاده شده است. تعداد سلول ها و میزان خطا در ضرایب تراست و گشتاور پروانه در جدول ۱ آورده شده است. همچنین در شکل ۵ میزان خطای ضرایب تراست و گشتاور پروانه بر اساس تعداد

مش رسم شده است. با توجه به جدول ۱، شکل ۵ و در نظر گرفتن هزینه محاسبات، مش دسته چهارم انتخاب شدهاست. جدول ۱- مقایسه خطای ضرایب تراست و گشتاور با درنظرگرفتن شبکههای مختلف

درصد خطای	درصد خطاء		
•	مصح		شمار ہ
ضريب	ضريب	ر تعداد سلول كه	شبكه
گشتاور	تراست		
11	77	1111077	۱
۶	۱۳	18766	٢
۴.۵	١٠	7811887	٣
۳.۵	٨	3411414	۴
۳.۳	۷.۲	4261922	۵
	کریب گشتاور ۱۱ ۶ ۴.۵ ۳.۵ ۳.۳	لريب كريب تراست گشتاور ۱۱ ۲۲ ۶ ۱۳ ۶ ۱۰ ۶ ۱۰ ۶ ۸ ۲.۵ ۸ ۳.۵	ترایب کریب تراست گشتاور ۱۱ ۲۲ ۱۱۸۱۵۳۸ ۶ ۱۰ ۲۶۱۱۳۶۲ ۴.۵ ۱۰ ۲۶۱۱۳۶۲ ۳.۷ ۲۰۲۷ ۲۰۰ ۳.۲ ۲.۲ ۲.۲



شكل ۵- نمودار استقلال ازمش

۲-۴- معادلات حاکم بر ارتعاشات آزاد

محاسبه فرکانسهای طبیعی و شکل مودها باید بهواسطه حل مساله مقدار ویژه انجام گردد. فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای نظیرشان در مدل سهبعدی اجزای محدود میتواند بهواسطهی حل معادلهی حرکت (۳) تعیین شود:

$$[M]{\dot{q}} + [C]{\dot{q}} + [K]{q} = 0 \tag{7}$$

در رابطه (۳)، [M] ماتریس جرم که در این تحلیل با توجه به استفاده از المان آکوستیک شامل جرم سازه و جرم افزوده سیال، [K]ماتریس سفتی شامل سفتی سازه و سفتی سیال است. همچنین ماتریس سفتی شامل سفتی سازه و سفتی سیال است. همچنین باتریس سفتی شامل سفتی سازه و مفتی سیال است. مرای ماتریس فر است. جاری ایران و منتی میال است. مرای به دست آوردن فرکانسهای طبیعی در آنالیز مودال، حل مساله به صورت ذیل خواهد بود:

 $[K]\{\varphi\} = \omega^2[M]\{\varphi\}$ (۴) در رابطه (۴)، $\{\varphi\}$ ماتریس ستونی شکل مود و ω فرکانس طبیعی است.

۵-۲- معادلات حاکم برار تعاشات اجباری تحلیل پاسخ در حوزه فرکانس، روشی است که بهمنظور محاسبه پاسخهای سازه به تحریکات خارجی بکار میرود. مدل سهبعدی، در معرض بارهای ناشی از نیروهای تحریک نوسانی پروانه است. در استفاده نمود. روش اول، روش مستقیم بوده که معادلات کوپل استفاده نمود. روش اول، روش مستقیم بوده که معادلات کوپل حرکت را برحسب فرکانس تحریک حل مینماید. روش دوم، روش مودال بوده که از شکل مودهای سازه بهمنظور کاهش معادلات و ممچنین از بین بردن کوپلینگ معادلات حرکت استفاده مینماید. در این روش، حل مسأله ارتعاشی موردنظر برای یک فرکانس تحریک خاص به واسطه جمع پاسخهای مودالمجزا تعیین شده و بهدست میآید.

انتخاب روش حل وابسته به اندازهٔ مدل، تعداد فرکانسهای تحریک و مقدار فرکانس تحریک هست. درصورتیکه از روش مودال استفاده شود، با اعمال نیروها و ممان پروانه، مساله دینامیکی حاصله که توسط معادلهی حرکت (۵) ارائه میشود، حل شده و پاسخ فرکانسی تعیین میشود.

$$[M]{\ddot{q}} + [C]{\dot{q}} + [K]{q} = {F(t)}$$
(Δ)

در معادله (۵)، {*F*} مجموع بردار نیروهای خارجی روی سازه و سیال است.

۶-۲- شبکهبندی و شرایط مرزی در تحلیل ارتعاشی

برای تحلیل ارتعاشات آزاد (مودال) بدنه شناور در حالت خیس^{۱۰} ابتدا به مدلسازی بدنه شناور در نرمافزار المان محدود آباکوس پرداخته شدهاست. المانهای چهاروجهی پوستهای کاهشیافته با میانگین اندازه ۱۰۶ متر برای بدنه در نظر گرفته شدهاست. تعداد المانها ۱۳۱۹۴۳ عدد است. شکل ۶ نشاندهنده مش ایجادشده بر روی بدنه و تجهیزات است. شرایط مرزی در حالت دوسر آزاد است.



شکل ۶- مش ایجادشده بر روی بدنه همچنن در تحلیل ارتعاشات در حالت خیس، جهت شبیهسازی آب دریا از المان آکوستیک چهار گره خطی استفاده شدهاست. المان

استفاده شده AC3D4 است. تعداد کل المانها ۴۴۱۵۰۷ عدد است. شکل شماره ۷ نشاندهنده المان آکوستیک مش بندی شدهاست.



شکل ۷- المان آکوستیک مش بندی شده

۱-۶-۲- بررسی استقلال از شبکه در تحلیل المان محدود به منظور بررسی استقلال نتایج حل عددی المان محدود، از چند شبکه مطابق با جدول ۲ استفاده شده است. تعداد سلولها و اندازه فرکانس اول و دوم در جدول ۲ آورده شده است. همچنین در شکل ۸ اندازه فرکانس اول و دوم بر اساس تعداد مش رسم شده است. با توجه به جدول ۲ و شکل ۸، مش بندی دسته سوم انتخاب شده-است.

جدول ۲- اندازه فرکانسها در شبکههای مختلف

فرکانس دوم	فر کانس اول	t 1 . 1	. C a l a
(هرتز)	(هرتز)	نعداد سلول	شماره شبكه
۱.۶۵	۰.۶۸	88T88	١
۱.۷	۰.٧۶	٩٣۵٧۶	٢
۱.٧۶	٠.٧٧	131943	٣
۱.۷۸	۸۷. •	188029	۴
١.٧٩	۰.۷۸	22220	۵



شکل ۸- نمودار استقلال از شبکه

۳ – نتایج و تفسیر آنها

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، ارتعاشات آزاد در حالت خیس و ارتعاشات اجباری بحث میشود.

۱–۳- نتایج تحلیل دینامیکی سیالات

در این بخش به منظور تصدیق شبیهسازی و دقت جوابهای به دست آمده، ابتدا ضریب درگ بدنه شناور محاسبه و با نتایج تجربی مرجع شماره [۱۴] مقایسهشد. نمودار ضریب درگ بهدست آمده از تحلیل در شکل ۹ نشان داده شده است. با دقت در نمودار شکل ۹ مشاهده شد که میانگین ضریب درگ حدود ۵ درصد اختلاف دارد.



شکل ۹- ضریب درگ

شکل ۱۰ نشاندهنده میدان فشار اطراف بدنه و موج فشاری در اطراف آن است. مقدار فشار در قسمت جلو شناور دارای مقادیر بیشتری است و همچنین منطقه ویک در قسمت پشت کشتی به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۱۰- میدان فشار اطراف بدنه

برای نمایش آشفتگی، میدان جریان اطراف پروانه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱– میدان جریان اطراف پروانه

برای نمایش بهتر، میدان فشار در پشت و جلوی پروانه در شکل ۱۲ نشانداده شده است. همینطور که در شکل نشان داده شده است میدان فشار در جلوی پروانه بیش از پشت پروانه است که ایجاد یک منطقه پرفشار کرده است. همچنین در لبههای حمله پره به دلیل اثرات برخوردی آب با آن، بیشترین فشار وارد بر پره مشاهدهشده-است.





۲–۳– نتایج تحلیل ارتعاشات آزاد با تحلیل ارتعاشات آزاد (مودال) بدنه شناور در حالت خیس، فرکانسهای طبیعی و شکل مودها استخراج شدهاست. فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای بهدستآمده به ترتیب در جدول شماره ۳ طبیعی و شکل شماره ۱۳ آورده شده است. در شکل شماره ۱۳ مودهای ارتعاشی هم با فضای سیال و هم بدون فضای سیال نشان داده شده است.



فرکانس طبیعی (Hz)	نوع مود (گره)	شماره مود
•	خمشی (۲)	١
١.٧۶	ترکیب مد دوم خمشی افقی و پیچشی	٢
Υ٨. (خمشی (۳)	٣
٨.٢	خمشی (۴)	۴
۳.۶۵	ترکیب مد سوم خمشی افقی و پیچشی	۵

A COMPANY AND A

U, Magnitude

U, Magnitude

U, Magnitude

υ, м

nitude .605e-04 .388e-04 .954e-04 .737e-04 .520e-04 .303e-04 .086e-04 .685e-05 .514e-05 .342e-05

-04 -04 -04 -04 -04 -04





U, Magnitude





شکل ۱۳– شکل مودهای حالت خیس الف)همراه فضای سیال ب) بدون فضای سیال

۱-۲-۳- صحت سنجی نتایج ارتعاشات آزاد

جهت صحت سنجی نتایج فرکانسهای طبیعی بهدست آمده از ارتعاشات آزاد از فرمول تجربی کوما استفاده شده است. فرکانس

γ

طبیعی متناسب با مود خمشی دو گرهای بهوسیله فرمول (۶) مشخص میشود[۱۵].

$$N_{2} = (3.07) \times 10^{6} \sqrt{\frac{I}{\Delta_{i}L^{3}}}$$

$$\Delta_{i} = ((1.2) + \frac{1}{3}\frac{B}{T_{m}})\Delta$$
(?)

که N_2 فرکانس طبیعی مود خمشی عمودی دوگرهای (دور بر دقیقه)، I ممان اینرسی مقطع عرضی بر واحد متر مکعب، Δ جابجایی کشتی (تن)، Δ_i جابجایی مجازی شامل جرم اضافی آب (تن)، L طول بین دو عمود (متر)، B اندازه میانی کشتی (متر)، T_m میانگین آبخور (متر) است.

جانسون و اسکار چند فرکانس طبیعی بعدی خمش عمودی را با توجه به مقدار دوگرهای بیانکردند [1۵].

$$N_n \cong N_2(n-1)^{\alpha} \tag{Y}$$

که N_n فرکانس طبیعی مود عمودی n ام (دور بر دقیقه)، n شماره نود و α در کشتی های کانتیربر برابر ۱۰۰۲ است.

$\Delta = 53590.9 \ tons$	B = 32.8 m
$T_m = 10.8 \ m$	$\Delta_i = 117569.2 \ tons$
L = 230 m	I = 117569.2 m

با توجه به فرمول شماره (۶) و (۷) به محاسبه فرکانسهای طبیعی کشتی پرداختهشد.

 $N_2 = 0.73$ $N_3 = 1.48$ $N_4 = 2.21$ $N_5 = 2.96$ جدول شماره ۴ نشاندهنده مقایسه نتایج فرکانس طبیعی بدست آمده از المان محدود و فرکانسهای تجربی است. همانطور که مشاهده می گردد اختلافهای قابل قبولی بین نتایج وجود دارد.

جدول ۴- مقایسه فرکانسهای طبیعی

اختلاف (./)	فرمول تجربى	تحليل المان	شماره مود
	(هرتز)	محدود (هرتز)	خمشى
۵.۵	۰.۷۳	٠.٧٧	مود اول
79	۱.۴۸	١.٨٧	مود دوم
79.9	۲.۲۱	۲.۸	مود سوم

۳ – ۳- نتایج ارتعاشات اجباری

در این پژوهش به تحلیل هارمونیک ارتعاشات ناشی از تحریک پروانه نیز پرداخته شده است. نیروهای تحریک ناشی از پروانه به دو صورت اعمال میشود:

- فشار هیدرودینامیکی ناشی از چرخش پروانه بر روی بدنه
 - نیروهای هارمونیک ناشی از چرخش پروانه

فشـــار هیـدرودینـامیکی نـاشــی از چرخش پروانـه از تحلیـل هیدرودینامیکی بدست آمده و برروی بدنه شناور اعمال میشود.

۱-۳-۳ نیروی هارمونیک ناشی از چرخش پروانه

نیروی ناشی از پروانه، با بدست آوردن فرکانس تحریک پروانه و شفت با استفاده از آنالیز مودال و قرار دادن آن در محل پروانه بر روی شناور اعمال می شود. برای بدست آوردن فرکانس های تحریک ابتدا به تحلیل فرکانسی شفت و پروانه پرداخته شده است. در ادامه فرکانس های تحریک جهت اعمال برروی بدنه شناور، استخراج گردید.

مشخصات شفت و پروانه و محل قرار گیری یاتاقانها به صورت شکل ۱۴ و جدول ۵ آورده شدهاست.



شکل ۱۴ – سیستم شفت و پروانه

اندازه	واحد	پارامتر
٨.٧	m	قطر پروانه
۵	-	تعداد پرەھا
۰.۱۸	-	نسبت هاب
۰.۹۹۶۷	-	نسبت پیچ
۱۰۰	RPM	دور پروانه
۶۳۰.۱	mm	قطر شفت پروانه
۵۱۶.۵	mm	قطر شفت میانی
١٣٢٣	mm	فاصله بیرینگ تیوب عقبی تا پروانه
١٣٨٢۶	mm	فاصله بين دو بيرينگ تيوب
۱۳۳۰	mm	فاصله بین بیرینگهای شفت میانی

جدول ۵- مشخصات شفت و پروانه

در تحلیل فرکانسی ابتدا شفت و پروانه مدل می شود. المانهای استفاده شده بر روی پروانه به صورت المانهای شش وجهی (C3D8R) است. تعداد کل المانها ۲۰۱۸۳ عدد است. شرایط مرزی ایجاد شده در محل یاتاقانها به صورت تکیه گاه ساده و در انتهای شفت تنها دوران حول محور شفت آزاد است. شبکه ایجاد شده برروی شفت و پروانه به صورت شکل ۱۵ است.





شکل ۱۵- مش ایجاد شده روی شفت و پروانه

فرکانسهای بدستآمده از تحلیل و شکل مودها به ترتیب در جدول ۶ و شکل ۱۶ نشان داده شدهاست.

جدول ۶- فرکانسهای طبیعی شفت و پروانه

فرکانس طبیعی (هرتز)	شماره مود
۶.۲	١
۱۱.۷۳	٢
19.4	٣
۲۱.۲	۴
۲۳.۵	۵
74.0	۶



شکل ۱۶- شکل مودهای شفت و پروانه

با توجه به تعداد پره ها، ماکزیمم فرکانس تحریک پیچشی شافت پنج برابر دور پروانه است. با توجه به اینکه دور پروانه ۱۰۰ دور بر دقیقه است بنابراین فرکانس تحریک حداکثر برابر ۸.۳ دور بر ثانیه است [7]. بر این اساس تنها یک فرکانس طبیعی با مود پیچشی در محدوده کاری پروانه قرار خواهد گرفت که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بقیه فرکانسهای طبیعی (مودهای خمشی، ارتعاش پرهها) بالاتر از فرکانس تحریک است. بنابراین میتوان فرکانس تحریک ۶.۲ هرتز را به عنوان فرکانس تحریک در محل اتصال به

۲-۳-۳- پاسخ ار تعاشات اجباری روی بدنه

در این بخش، ابتدا نیروهای تحریک وارد بر بدنه را به دو صورت: ۱- فرکانس تحریک پروانه به میزان ۶.۲ دور بر ثانیه در محل قرارگیری پروانه

۲- فشار هیدرودینامیکی بهدستآمده از تحلیل دینامیک سیالات
 محاسباتی روی بدنه اعمال گردید.

شرایط مرزی بهصورت آزاد- آزاد و نرخ میرایی نیز ۰.۰۱۵ در نظر گرفته شده است. بعد از اعمال نیروهای تحریک بر روی بدنه میزان جابجایی ها و شتاب ها برروی نقاط نشان داده شده در شکل ۱۷ به دست آورده شده است. بیشترین میزان جابجایی ها و شتاب ها در نقاط نشان داده شده در شکل ۱۷، در جدول ۷ آورده شده است.



















شکل ۲۰- نمودار الف) شتاب و ب) جابجایی در نقطه ۳



شکل ۱۷- نقاط محاسبه جابجایی و شتاب در شناور

جدول ۷- میزان جابجایی و شتاب در نقاط کنترلی

بیشترین میزان شتاب (میلیمتر بر مجذور ثانیه)	بیشترین میزان جابجایی (میلیمتر)	شماره نقطه کنترلی
819	۰.۹۶	١
۵۲۹	۰.۹	٢
717	۰.۴	٣
۳۲۹	۰.۷۳	۴

همچنین در شکلهای ۱۸ تا ۲۱ میزان جابجایی و شتاب کلی برحسب فرکانس در چند نقطه نشان داده شده است.







شکل ۱۸- نمودار الف) شتاب و ب) جابجایی در نقطه ۱





شکل ۲۱- نمودار الف) شتاب و ب) جابجایی در نقطه ۴

با دقت در شکلهای ۱۸ تا ۲۱ مشاهده شد که در فرکانسهای ۸۸. و ۲.۱۹ (مود فرکانس خمشی دوم و سه گرهای)، بیشینه جابجایی و شتاب وجود دارد. همچنین دامنه فرکانسی در نقاط ۱ و ۲ یعنی نقاط روی پروانه بیشینه است. بیشینه مقدار جابجایی ۹۶.۰ میلیمتر و در فرکانس مربوط به مود خمشی دو گرهای مشاهده شدهاست. بیشینه مقدار شتاب ۶۱۹ میلیمتر بر مجذور ثانیه و در فرکانس مربوط به مود خمشی دو گرهای مشاهده شدهاست. همچنین مشاهده شد که در فرکانس تحریک پروانه (۶.۲ هرتز) تشدید رخ نداده است.

۳-۳-۳ بررسی نتایج ارتعاشات اجباری

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از ارتعاشات اجباری در اثر تحریک پروانه و نیروهای هیدرودینامیکی پرداخته میشود. جهت بررسی نتایج بهدستآمده از ارتعاشات اجباری مقادیر جابجاییهای و شتابهای بهدستآمده باید با مقادیر استاندارد مقایسه شود. بر طبق استاندارد ارتعاشات شناور (ABS) مقادیر جابجایی، سرعت و شتاب بهدستآمده با شکل مقایسه میشود.



شکل ۲۲- استاندارد ایزو ۶۹۵۴ برای ار تعاشات سازه شناور [۲].

با توجه به شکل ۲۲، نمودار لگاریتمی به سه ناحیه تقسیم شده است که محدوده ارتعاش برای سازه باید پائین تر از محدوده توصیه شده قرارگیرد. محل تقاطع این خطوط باید در ناحیه توصیه شده باشد، تا ارتعاشات در حالت استاندارد قرار گیرند. برای هریک از مؤلفه ها، پیک پاسخ در محدوده فرکانس ۱ تا ۵ هرتز، جابه جایی باید کمتر از ۱ میلی متر باشد. مؤلفه سرعت باید زیر ۳۰ میلی متر بر ثانیه باشد و شتاب باید زیر ۱ متر بر مجذور ثانیه باشد. با توجه به نمودارهای ۱۸ تا ۲ مشاهده شد که مقادیر ارتعاشات به دست آمده در محدوده ارتعاشات استاندارد قرار دارد.

۴- نتیجهگیری

اکثر مطالعات صورت گرفته در ارتباط با سازههای دریایی، بر روی زیردریاییها (مرز، سانگ) یا بر روی مدلهای ساده شده بهصورت پوستههای تقویت شده (کو و همکاران) است. با توجه به اینکه مطالعات کمی در زمینه تحلیل ارتعاشات ناشی از تحریک پروانه با درنظر گرفتن جریان سیال و اثر آن بر روی سازه صورت گرفته است، لذا در مطالعه حاضر به بررسی ارتعاشات آزاد و اجباری شناور کانتینربر در حالت اندازه کامل پرداخته شدهاست. در این مقاله مراحل تحلیل ارتعاش سازه شناور در اثر تحریک پروانه ارائه شده-است. مراحل تحلیل عددی ارتعاشات آزاد و اجباری ناشی از تحریک پروانه روی شناور STM و پروانه کامل انجام شدهاست. با بررسی

DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.4.5

7- Merz, S., Kessissoglou, N., Kinns, R., Marburg, S., (2010), *Minimisation of the sound power radiated by a submarine through optimisation of its resonance changer*, Journal of Sound and Vibration, Vol.329(8), P. 980-993.

8- Qu, Y., Chen, Y., Long, X., Hua, H., Meng, G.,(2013), *A modified variational approach for vibration analysis of ring-stiffened conical–cylindrical shell combinations*, European Journal of Mechanics-A/Solids, Vol.37, P. 200-215.

9- Qu, Y., Wu, S., Chen, Y., Hua, H., (2013), *Vibration analysis of ring-stiffened conical-cylindrical-spherical shells based on a modified variational approach*, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.69, P.72-84.

10- Song, Y., Wen, J., Yu, D., Liu, Y., Wen, X., (2014), *Reduction of vibration and noise radiation of an underwater vehicle due to propeller forces using periodically layered isolators*, Journal of Sound and vibration, Vol.333(14), P.3031-3043.

11- Qu, Y., Hua, H., Meng, G., (2015), Vibro-acoustic analysis of coupled spherical–cylindrical–spherical shells stiffened by ring and stringer reinforcements, Journal of Sound and Vibration, Vol.355, P.345-359.

12- Qu, Y., Su, J., Hua, H., Meng, G., (2017), *Structural vibration and acoustic radiation of coupled propeller-shafting and submarine hull system due to propeller forces*, Journal of Sound and Vibration, Vol.401, P.76-93.

13- G.L. (GL), (2011), *Structural Rules for Container Ships*, in, Hamburg.

14- Kim, Jin., (2021), *Experimental Data for KCS Resistance, Sinkage, Trim, and Self-propulsion*, in, Numerical Ship Hydrodynamics (Springer).

15- Yin, Y., Zhao, D., Cui, H., Hong, M., (2014), *Predicting method of natural frequency for ship's overall vertical vibration*, Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, Vol.65(3), P.49-58.

نتایج ارتعاشات آزاد در حالت خیس و مقایسه آن با فرمول تجربی، میتوان گفت که درنظر گرفتن سیال منجر به نتایج واقعی تر می-شود. همچنین با مقایسه نتایج فرمول تجربی و شبیه سازی مشاهده-شد که شبیه سازی دارای دقت مناسبی است. جهت بررسی ارتعاشات اجباری ناشی از تحریک پروانه بهتر است که همانند حالت واقعی تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از چرخش پروانه بر روی بدنه درنظر گرفته شود. بدین منظور شبیه سازی هیدرودینامیکی بدنه و پروانه شناور در حالت خودرانش صورت گرفت و میدان فشار ناشی از این شبیه سازی بر اسی اسازه اعمال شد. با مقایسه نتایج حاصل از ارتعاشات اجباری با استاندارد، مشاهده شد که ارتعاشات سازه به طور مناسب طراحی شده است. همچنین سازه در محدوده فرکانس تحریک پروانه قرار ندارد.

کلید واژگان

- 1- American Bureau of Shipping
- 2- Periodic Structure Theory
- 3- Maximum Beam
- 4- Bulkhead
- 5- Keel
- 6- Horizontal Stringers
- 7- Longitudinal Stringers
- 8- Girder
- 9- Star CCM
- 10- Wet Mode

۶ - مراجع

1- Biot, M., De Lorenzo, F., (2009), *Criteria for designing noise and vibration comfort of passengers on board of ships*, in: 21st Congreso Panamericano de Ingenieria Naval.

2- Shipping, A.B.O., (2015), *Guidance notes on ship vibration*, American Bureau of Shipping.

3- Kinns, R., Bloor, C., (2004), *Hull vibration excitation due to monopole and dipole propeller sources*, Journal of sound and vibration, Vol.270 (4-5), P.951-980.

4- Lee, S.-K., Liao, M., Wang, S., (2006), *Propeller-induced hull vibration—analytical methods*, in: Proceedings of the second international ship noise and vibration conference. London, UK, June, Citeseer.

5- Dylejko, P.G., Kessissoglou, N.J., Tso, Y., Norwood, C.J., (2007), *Optimisation of a resonance changer to minimise the vibration transmission in marine vessels*, Journal of sound and vibration, Vol.300(1-2), P.101-116.

6- Feng, G.P., (2010), Study on the Stern Vibration Transmission Based on Power Flow Analysis Shanghai Jiao Tong Shanghai, China.