

# شبیه‌سازی حرکات طولی شناور کاتاماران پروازی در امواج نامنظم

امین نجفی (دانشجوی دکتری)

محمدسعید سیف\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۵)  
دوری ۲ - ۳، شماره ۱، ص. ۵۵-۴۱

شناخت پویایی و رفتار شناورهای تندرو، ناپایداری دینامیکی طولی شناور در آب آرام و رفتار آن در امواج حائز اهمیت فراوان است. از آنجا که حرکت و شتاب‌های زیاد در شناورها به‌خصوص در شناورهای تندرو بر عملکرد شناور، خدمه، مسافری و تجهیزات تأثیر منفی دارد، برآورد و تخمین این حرکات بخش مهمی از مرحله‌ی طراحی شناور است. در این راستا، مطالعات بسیاری به‌صورت تجربی و عددی در زمینه‌ی حرکت این‌گونه شناورها در امواج منظم صورت پذیرفته است. اما به‌دلیل پیچیدگی رفتاری شناورهای تندرو و همچنین غیرخطی بودن معادله‌ی حرکت نسبت به زمان، حل عددی معادلات حرکت برای مدل‌سازی شناور در امواج نامنظم بسیار پیچیده و زمان‌بر می‌شود. لذا، محققین برای مطالعات خود، بیشتر به انجام آزمون تجربی اکتفا می‌کنند. با توجه به محدود بودن آزمایشگاه‌های دریایی مجهز به موج‌ساز نامنظم و همچنین هزینه‌بر بودن آزمون در آب‌های آزاد با شناور واقعی، دستیابی به روابط تحلیلی برآورد و تخمین حرکات شناور در امواج نامنظم اهمیت پیدا می‌کند. هدف از انجام این مطالعه، ارائه‌ی روشی تحلیلی بر پایه‌ی فرضیات اولیه برای دستیابی به پاسخ شناورهای پروازی تحت تحریک امواج نامنظم دریا است. در این تحقیق مدلی تحلیلی و با هزینه‌ی محاسباتی پایین - مبتنی بر مطالعات تحلیلی و عددی در نظر گرفته شده در طول این تحقیق و سایر نتایج موجود - برای حرکات طولی شناور کاتاماران تندرو ارائه خواهد شد. در روش ارائه شده از اصل جمع آثار در نیروها استفاده شده است و باید در آن، ضرایب هیدروپدینامیکی شناور نسبت به فرکانس حرکات ثابت باشد. بدین‌منظور ضرایب در فرکانس‌های حرکات به‌صورت عددی بررسی شده است. بررسی ضرایب هیدروپدینامیکی در فرکانس‌های برخورد مختلف نشان داد که با افزایش فرکانس برخورد ضرایب ثابت می‌شود؛ همچنین روش مورد استفاده در این تحقیق در طول موج‌های زیاد نسبت به طول شناور دارای جواب‌های قابل قبولی است.

**واژگان کلیدی:** ضرایب هیدروپدینامیکی، موج نامنظم، روش سويتسکی، دینامیک سیالات محاسباتی، حرکات طولی.

## ۱. مقدمه

تاریخچه‌ی طولانی محاسبه‌ی حرکات شناور به مطالعات فرود (۱۸۶۱) درخصوص حرکت رول شناور برمی‌گردد.<sup>[۱]</sup> سپس کریلوف (۱۸۹۶) به مطالعه‌ی حرکت هیو و پیچ شناور پرداخت.<sup>[۲]</sup> فرود و کریلوف در آن زمان معادله‌ی دیفرانسیل حرکت شناور را با در نظر گرفتن نیروهای اینرسی و بازگرداننده ارائه دادند. در مطالعه‌ی ایشان میدان فشار هیدرواستاتیکی ناشی از پروفیل سطحی موج برای محاسبه‌ی اثر نیروی تحریک بر شناور استفاده می‌شد که این نیرو هنوز هم به نام آن دو شناخته می‌شود.

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت ۱۳۹۳/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۳/۴/۲۱، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۱۷.

گام بزرگ بعدی در این زمینه به مطالعه‌ی فن‌کارمن (۱۹۲۹) درمورد جرم افزوده‌ی مربوط به ارتعاشات سازه‌های شناور برمی‌گردد. او در مطالعه‌ی خود بدنه را باریک فرض کرد، و از تقسیم بدنه در راستای طولی به نوارهای انتگرال‌گیری نیروهای وارده استفاده کرد.<sup>[۳]</sup> این شاید اولین استفاده از نظریه‌ی نواری<sup>۱</sup> در هیدروپدینامیک شناور بود که به بررسی دینامیک شناورهای جابه‌جایی می‌پرداخت. مطالعه‌ی رفتار شناور در موج به‌صورت مدرن از اواسط قرن بیستم آغاز شد. در ادامه، محققین به‌منظور وارد کردن اثرات هیدروپدینامیکی ناشی از حرکت رو به جلوی شناور در امواج سعی کردند از نظریه‌ی جسم باریک که سال‌ها پیش در آیرودینامیک گسترش یافته بود برای بدنه‌هایی با عرض و آب‌خورد کم نسبت به طول، و در امواجی طویل با طول موجی در

مرتبه‌ی طول شناور و بیشتر استفاده کنند. در کنار این تلاش‌ها کوربین کروکوفسکی (۱۹۵۵) و بعداً به همراه جاکوبس (۱۹۵۷) با ترکیب نظریه‌ی جسم باریک و درک فیزیکی مناسب شکل اولیه‌ی نظریه‌ی نواری امروزی را برای محاسبه‌ی هیو و پیچ شناور در امواج ارائه کردند.<sup>[۴]</sup> نقطه‌ی قوت این نظریه علاوه بر نتایج نزدیک به واقعیت و قابل استفاده‌ی آن، امکان پیاده‌سازی با روش‌های محاسبات عددی توسط رایانه‌ها بود. نظریه‌ی نواری در واقع اولین نظریه‌ی حرکت کشتی بود که نتایج مهندسی با دقت کافی در اختیار طراحان قرار می‌داد. در دهه‌ی ۶۰ مطالعات زیادی برای تکمیل این نظریه و ویرایش و اعتبارسنجی نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی انجام شد.

سالوسن (۱۹۷۰) و همکاران طی یک مقاله‌ی جامع نسخه‌ی ارتقاء یافته‌ی از نظریه‌ی نواری را برای پیش‌بینی خطی تمام حرکات شناور در صفحه‌ی قائم و افقی و نیز محاسبه‌ی نیروهای برشی و ممان‌های خمشی و پیچشی برای شناوری که در سرعت ثابت و راستای دلخواه در امواج منظم حرکت می‌کرد ارائه کردند.<sup>[۵]</sup> در این نوشتار برای محاسبه‌ی ضرایب جرم افزوده و دمپینگ سطوح مقطع دوبعدی که بخش مهم و زمان‌بر این نظریه را تشکیل می‌دهد روش‌هایی همچون روش فرم لوتیس (۱۹۵۴) پیشنهاد شده بود. اولین تلاش‌ها برای بررسی دینامیک شناورهای تندرو در سال ۱۹۶۷ توسط اچسو انجام شد.<sup>[۶]</sup> این محقق روش نظریه‌ی نواری را برای بررسی حرکت حالت پایا و نیمه پایای سطح‌های پروازی سه‌بعدی فرموله کرد. آلتمن در سال ۱۹۶۸ بر روی یک شناور منشوری آزمایشات نوسانات اجباری را انجام داد.<sup>[۷]</sup> فریدزما از سال ۱۹۶۹ تا سال ۱۹۷۱ آزمایشات گسترده‌ی روی یک سری از شناورها با زاویه‌ی دراز ثابت در امواج منظم و نامنظم انجام داده است.<sup>[۸]</sup> اگیلوی و شن در سال ۱۹۷۳ پایداری دینامیکی یک صفحه پروازی دوبعدی را بررسی کردند، که در آن تغییرات سطح خیس شده به صورت یک درجه آزادی عمل می‌کرد.<sup>[۹]</sup> دی‌ژان در سال ۱۹۷۳ آزمون‌های نوسانات اجباری را روی یک شناور پروازی در سرعت‌های مختلف انجام داد.<sup>[۱۰]</sup> مارتین در سال ۱۹۷۸ به گسترش روابط ریاضی برای بررسی پایداری قیاسی و حرکات خطی کوپل شده در امواج به کمک نظریه‌ی نواری پرداخت.<sup>[۱۱]</sup> نظریه‌ی مارتین برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی مبتنی بر تقریب جسم لاغر مانک (۱۹۲۴) و آنالیز تأثیر نیروی ثقل صفر و گتر (۱۹۳۱) است. در سال ۱۹۷۸، زارنیک از ضرایب هیدرودینامیکی مارتین در یک شبیه‌ساز غیرخطی حرکات یک قایق تندرو در امواج منظم از مقابل استفاده کرد.<sup>[۱۲]</sup> در سال ۱۹۸۸، وایت و ساویتسکی نتایج تجربی مقاومت و ویژگی‌های دریامانی دو شناور تندرو را با نتایج حاصل از یک برنامه‌ی رایانه‌ی که برای شناورهای جابه‌جایی استفاده می‌شود، مقایسه کردند.<sup>[۱۳]</sup> در سال ۱۹۷۸، زارنیک با استفاده از تجربه‌ی بالای خود در زمینه‌ی شناورهای تندرو، نرم‌افزار شبیه‌ساز حرکات یک شناور پروازی را در امواج تصادفی از روبرو و از عقب نوشت.<sup>[۱۴]</sup> ضرایب هیدرودینامیکی بر پایه نظریه‌ی نواری دوبعدی تعیین شد.

امروزه شیوه‌ی بررسی عملکرد دریامانی این شناورها ترکیبی از روش‌های تجربی و تحلیلی است. آزمایشات شامل آزمون‌های جرم افزوده و میرایی یا بررسی حرکات در امواج تصادفی و منظم است. روش‌های تحلیلی شامل دینامیک غیرخطی است که در آن ضرایب هیدرودینامیکی بر پایه‌ی نظریه‌ی نواری نیروی ثقل صفر یا استفاده از نظریه‌ی خطی شناورهای معمولی تعیین می‌شود. دلیل استفاده از نظریه‌های خطی شناورهای پروازی در دسترس بودن برنامه‌های رایانه‌ی نوشته شده براساس این روش‌هاست. سویتسکی و وایت در سال ۱۹۸۸ نشان دادند که این برنامه برای سرعت‌های پایین زیر حالت پروازی قابل استفاده است.<sup>[۱۵]</sup> با افزایش سرعت شناور میزان خطای این برنامه‌ها نیز افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۲، آرمین تروش ضرایب

هیدرودینامیکی را به صورت تجربی تعیین کرد.<sup>[۱۵]</sup> تروش نشان داد که سطح خیس شده‌ی شناور پروازی وابسته به زمان و ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به فرکانس است. در سال ۱۹۹۴، محققین با استفاده از نتایج به دست آمده از ثبت حرکات شناور، به بررسی تجربی و عددی تأثیر امواج گذرا و منظم بر حرکات شناور تقریبی و مقایسه‌ی بین نتایج دو موج پرداختند.<sup>[۱۶]</sup> جورنی در سال ۱۹۹۷ به بررسی تجربی حرکات و مقاومت اضافی مدل کاتینربر، و بررسی تأثیر امواج سطحی بر حرکات و مقاومت اضافی مدل شناور پرداخت.<sup>[۱۷]</sup> در سال ۱۹۹۷ محققین به بررسی مانور مدل خودرانش و تأثیر تغییر زاویه‌ی برخورد امواج بر حرکات عمودی و غلتش طولی پرداختند. جوزت مولیجن در سال ۱۹۹۸ به بررسی حرکت و مقاومت اضافی ناشی از اثرات امواج سطحی در شناور SES پرداخت.<sup>[۱۸]</sup> در سال ۱۹۹۹ نیز محققین به بررسی حرکات هیو و پیچ و همچنین تأثیر بار امواج بر رفتار شناور کاتاماران در امواج منظم و نامنظم پرداختند.<sup>[۱۹]</sup> در سال ۲۰۰۰ نیز بررسی تجربی و عددی قابلیت دریامانی شناورهای مونوهایلج‌دار و تندرو انجام شد.<sup>[۲۰]</sup> در سال ۲۰۰۲ در مطالعه‌ی دیگر، روش عددی زارنیک در محاسبه‌ی حرکات شناور تندرو (پلینگ) تحلیل و بررسی شد.<sup>[۲۱]</sup> در سال ۲۰۰۱ کارایی یک شناور کاتاماران براساس سری ۶۴ حالت‌های برخورد با موج از روبرو و به صورت مایل بررسی شد.<sup>[۲۲]</sup> ژائو در سال ۲۰۰۳ با برداشتن فرضیات ساده‌کننده و توسعه‌ی مدل غیرخطی مرتبه‌ی اول مربوط به روس، یک نظریه‌ی خطی مرتبه‌ی دوم برای شناور کاتاماران ارائه داد.<sup>[۲۳]</sup> که در قالب یک برنامه‌ی رایانه‌ی به نام New Cat ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که جواب‌های به دست آمده از مدل غیرخطی مرتبه‌ی دوم تفاوت چندانی با جواب‌های به دست آمده از مدل مرتبه‌ی اول غیرخطی ندارد. در سال ۲۰۰۵ مسئله‌ی هیدرودینامیکی یک شناور کاتاماران که با سرعت ثابت به صورت قائم وارد آب می‌شود، با استفاده از نظریه‌ی جریان پتانسیل بررسی شد (از اثرات جاذبه و تراکم‌پذیری صرف‌نظر شده است). مسئله به وسیله‌ی پتانسیل سرعت مختلط به همراه المان مرزی در سه مرحله حل شده است. برای هر یک از دو نیم بدنه -- وقتی هر نیم بدنه با آب تماس پیدا می‌کند -- از روش حل تشابهی استفاده شده است. از جواب‌های روش حل تشابهی به عنوان شرایط اولیه برای مرحله‌ی دوم که در آن از تکرار زمانی استفاده شده است، استفاده می‌شود. وقتی که ناحیه‌ی آشفته‌گی هر یک از نیم‌بدنه‌ها، جریان ایجاد شده توسط نیم‌بدنه‌ی دیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اثر متقابل بین دو نیم‌بدنه به صورت کامل در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از این محاسبات با محاسبات مربوط به نیم‌بدنه مقایسه شده، و اثر دو نیم بدنه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.<sup>[۲۴]</sup> لوتیس (۲۰۰۶) نیز با استفاده از روش RANS و استفاده از نظریه‌ی دو نیم‌بدنه دینامیک شناور پروازی را مورد مطالعه قرار داد.<sup>[۲۵]</sup> در سال ۲۰۰۷ دینامیک پایدار یک شناور با استفاده از روش المان مرزی و با در نظر گرفتن اثرات گرانش بررسی شد.<sup>[۲۶]</sup> آنها نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند و مشاهده شد که روش المان مرزی در کنار نظریه‌ی دو و نیم‌بدنه قادر است میزان بالاآمدگی و تریم شناور پروازی را به خوبی شبیه‌سازی کند. علاوه بر این، آنها توانستند جریان سیال اطراف بدنه را به نحو مناسبی استخراج کنند.

از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی حرکات شناور تندروی کاتاماران استفاده شده است. سیف و همکاران در سال ۲۰۰۸ از یک حلال حجم محدود برای شبیه‌سازی حرکات یک شناور کاتاماران تندرو استفاده کرده‌اند. برای شبیه‌سازی سطح آزاد نیز از روش حجم سیال استفاده شده است. با حل معادلات حرکت در شش درجه آزادی، حرکات، سرعت‌ها و شتاب‌های شناور در زمان‌های مختلف محاسبه شده است.<sup>[۲۷]</sup> برخورد یک گوه با سطح آب و سپس حرکات دائم یک شناور تندروی کاتاماران نیز شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که توافق

## ۱.۲. ضرایب هیدرودینامیکی

ضرایب جرم افزوده برای شناور برپایه نظریه نواری محاسبه می‌شود. همچنین ضرایب دمپینگ و برگرداننده با استفاده از روابط پیشنهادی سویتسکی محاسبه می‌شود. مورایتو در سال ۲۰۱۱ روابط سویتسکی را برای شناور کاتاماران بسط داد، که در این تحقیق از این روابط برای به دست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی و حل معادلات حرکت طولی شناور کاتاماران تندرو استفاده شده است.<sup>[۳۰]</sup>

## ۲.۲. نیروی تحریک

نیروی تحریک اعمال شده در معادله‌ی حرکت، نیروی ناشی از حرکت شناور در امواج دریاست. فرض می‌شود که شناور از آب خارج نمی‌شود و نیروی اسلمینگ در شناور به وجود نمی‌آید. اسلمینگ پدیده پیچیده‌ی است که برای ساده‌سازی از ورود آن به مسئله خودداری می‌کنیم. رابطه‌ی ارتفاع موج برخوردی به شناور چنین بیان می‌شود:<sup>[۳۱]</sup>

$$\zeta = \zeta_a \sin(\omega_e t - kx) \quad (3)$$

که در آن،  $\zeta_a$  دامنه‌ی امواج،  $k$  عدد موج، و  $\omega_e$  فرکانس برخورد موج است و چنین محاسبه می‌شود:

$$\omega_e = \omega_0 + kU \quad (4)$$

$\omega$  در رابطه‌ی ۴ فرکانس موج در دستگاه مختصات متصل به زمین است. با فرض طول موج بزرگ نسبت به طول شناور، و همچنین فرض آب‌های عمیق برای امواج، می‌توان رابطه‌ی ۴ را به این صورت بازنویسی کرد.

$$\omega_0 = kg \Rightarrow k = \frac{\omega_0}{\lambda} = \frac{\omega_0^2}{g} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \zeta &= \zeta_a \sin \omega_e t \cos kx - \zeta_a \sin kx \cos \omega_e t \\ &\approx \zeta_a \sin \omega_e t - xk\zeta_a \cos \omega_e t \end{aligned} \quad (6)$$

عبارت اول رابطه‌ی ۶ (یعنی  $\zeta_a \sin \omega_e t$ )، نشان‌دهنده حرکات عمودی در طول شناور است با این تفاوت که در این حالت سطح آب حرکت می‌کند، نه شناور. بنابراین زمانی که سطح آب بالا می‌رود به معنای هیو منفی است. عبارت دوم (یعنی  $-xk\zeta_a \cos \omega_e t$ ) را می‌توان به عنوان حرکت عمودی منتج از پیچ در نظر گرفت که  $k\zeta_a \cos \omega_e t$  همچون زاویه‌ی پیچ است. در واقع،  $-k\zeta_a \cos \omega_e t$  شیب موج برخوردی در  $x = 0$  است. این شباهت با حرکات هیو و پیچ به منظور فرموله کردن نیروی موج برخوردی با استفاده از ضرایب نیرو و ممان برگرداننده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین ترتیب که:

$$C_{rr}\eta_r + C_{r\delta}\eta_\delta = F_r \quad (7)$$

$$C_{\delta r}\eta_r + C_{\delta\delta}\eta_\delta = F_\delta \quad (8)$$

نتیجتاً نیروی عمودی و ممان پیچ فرود - کرلوف چنین محاسبه می‌شود:

$$F_r^{FK} = C_{rr}\zeta_a \sin \omega_e t + C_{r\delta}k\zeta_a \cos \omega_e t \quad (9)$$

$$F_\delta^{FK} = C_{\delta r}\zeta_a \sin \omega_e t + C_{\delta\delta}k\zeta_a \cos \omega_e t \quad (10)$$

خوبی بین جواب‌های به دست آمده و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. کائو (۲۰۰۸) و وانگ (۲۰۰۹) مقاومت یک شناور پروازی را پیش‌بینی کردند.<sup>[۲۸]</sup> با این وجود، آنها می‌بایست برای شبیه‌سازی عددی مناسب، شرایط اولیه‌ی شناور را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود، به مدل می‌افزودند. شو و همکاران (۲۰۱۲) نیز با ارائه‌ی یک روش محاسباتی جدید، بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناورهای پروازی را محاسبه کردند.<sup>[۲۹]</sup> روش آنها مبتنی بر معادلات ناویر - استوکس میان‌گیری شده رینولدز یا RANS بود و از روش حجم سیال برای شبیه‌سازی حجم سیال استفاده کردند. همچنین، معادلات حرکت جسم صلب در شش درجه آزادی در نظر گرفته شده است.

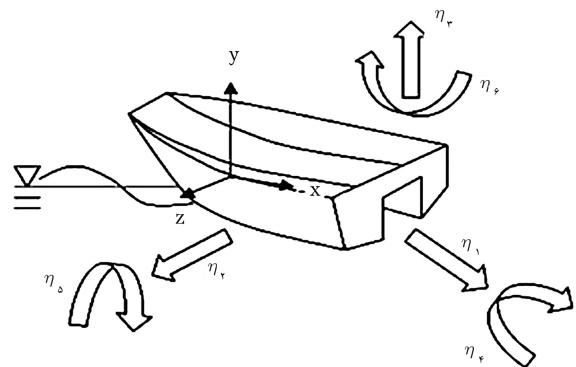
## ۲. معادلات حرکت

قبل از ارائه‌ی معادلات حرکت شناور، دستگاه مختصات مرجع مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور از دستگاه مختصات دکارتی  $(x, y, z)$  نمایش داده شده در شکل ۱ برای بیان حرکت رول (حرکت انتقالی در راستای محور  $z$ ) و پیچ (حرکت دورانی حول محور  $y$ ) استفاده می‌شود. این دستگاه در مرکز ثقل شناور در حالت پایدار تعبیه می‌شود، به گونه‌ی که شناور آزادانه نسبت به دستگاه نوسان می‌کند و دستگاه تنها با سرعت پیشروی شناور در حال حرکت است. در اینجا، حرکات وابسته به زمان شناور در این دستگاه با  $\eta_k$  نمایش داده می‌شود؛  $\eta_r$  نماینده‌ی حرکت دینامیکی عمودی مرکز ثقل شناور و  $\eta_\delta$  نماینده‌ی حرکت دینامیکی غلتش طولی شناور (برحسب رادیان) است. در زوایای ترم  $(\tau)$  و پیچ مثبت، سینه‌ی شناور از آب جدا می‌شود. معادله‌ی کوپل خطی حرکات هیو و پیچ برای شناور عبارت است از:

$$\begin{aligned} (M + A_{rr})\frac{d^2\eta_r}{dt^2} + B_{rr}\frac{d\eta_r}{dt} + C_{rr}\eta_r + A_{r\delta}\frac{d^2\eta_\delta}{dt^2} + B_{r\delta}\frac{d\eta_\delta}{dt} \\ + C_{r\delta}\eta_\delta = F_r \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} A_{\delta r}\frac{d^2\eta_r}{dt^2} + B_{\delta r}\frac{d\eta_r}{dt} + C_{\delta r}\eta_r + (I_{\delta\delta} + A_{\delta\delta})\frac{d^2\eta_\delta}{dt^2} + B_{\delta\delta}\frac{d\eta_\delta}{dt} \\ + C_{\delta\delta}\eta_\delta = F_\delta \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن،  $M$  جرم شناور و  $I_{\delta\delta}$  ممان اینرسی شناور حول محور  $y$  است. همچنین  $A_{jk}$  ضریب جرم افزوده<sup>۱</sup>،  $B_{jk}$  ضریب دمپینگ<sup>۲</sup>،  $C_{jk}$  ضریب برگرداننده<sup>۳</sup>، و  $F_j$  نیروی تحریک<sup>۴</sup> معادله‌ی حرکت شناور است.



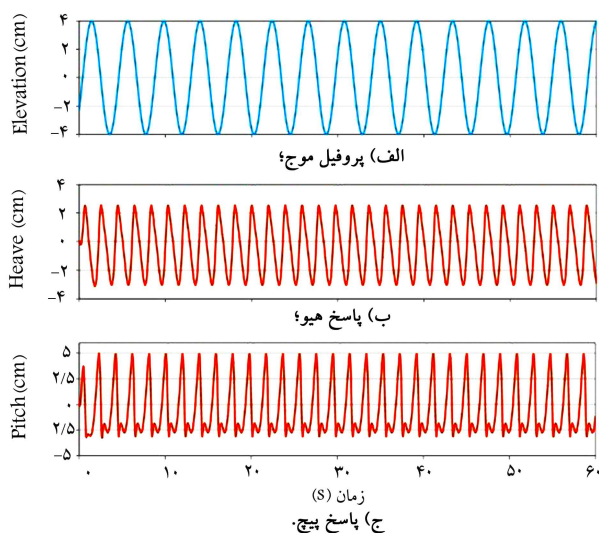
شکل ۱. سیستم مختصات بیان‌گر حرکات شناور.

جدول ۱. مشخصات شناور مدل.

| کمیت                          | مقدار      |
|-------------------------------|------------|
| طول                           | ۳ متر      |
| عرض                           | ۰٫۶۰۴ متر  |
| آبخور                         | ۱۱ متر     |
| تیرم شناور ( $\tau$ )         | ۴٫۷۷ درجه  |
| فاصله مرکز ثقل شناور از پاشنه | ۰٫۵۹۸ متر  |
| ارتفاع مرکز ثقل شناور         | ۰٫۱۶ متر   |
| جرم شناور                     | ۷۶ کیلوگرم |

جدول ۲. مشخصات موج شماره ۱.

| کمیت                     | مقدار               |
|--------------------------|---------------------|
| دامنه‌ی موج ( $A$ )      | ۰٫۴ متر             |
| پریود موج ( $\omega_0$ ) | ۱٫۵ رادیان بر ثانیه |
| طول موج ( $\lambda$ )    | ۲٫۷۴ متر            |
| سرعت شناور               | ۷٫۵ متر بر ثانیه    |



شکل ۲. تاریخچه‌ی زمانی پاسخ تحت تحریک موج منظم شماره ۱.

#### ۱.۴. مطالعه‌ی شناور در امواج منظم

امواج منظم، ابزاری مناسب برای مطالعه‌ی رفتارشناسی شناورها تحت تحریک‌های پریودیک هستند. در گام نخست، رفتار شناور مدل در دو موج منظم با مشخصات ارائه شده در جدول ۲، بررسی خواهد شد. در اینجا، نیروی تحریک شناور با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود. پروفیل سطح دریا با استفاده از رابطه‌ی ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$\zeta = A \sin(\omega_0 t + \phi) \quad (20)$$

که در آن  $A$  دامنه‌ی موج و  $\phi$  اختلاف فاز موج است که به صورت تصادفی محاسبه می‌شود. البته در امواج منظم، اختلاف فاز تنها در پاسخ گذرای سیستم تأثیر می‌گذارد و می‌توان آن را صفر در نظر گرفت.

در شکل ۲ پاسخ هیو و پیچ شناور تحت تحریک موج شماره ۱ نمایش داده می‌شود. به دلیل حضور پارامتر دمپینگ، تاریخچه‌ی پاسخ را می‌توان به دو قسمت:

در محاسبات مربوط به نیروی فرود - کريلوف تأثیر سرعت و شتاب امواج برخوردی لحاظ نشده است. این تأثیر در محاسبات نیروی پراکندگی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، نیروی موج وارد بر شناور در درجات آزادی هیو و پیچ خلاصه می‌شود:

$$F_r = F_{rs} \zeta_a \sin \omega_e t + F_{rc} \zeta_a \cos \omega_e t \quad (11)$$

$$F_\delta = F_{\delta s} \zeta_a \sin \omega_e t + F_{\delta c} \zeta_a \cos \omega_e t \quad (12)$$

که در آن  $F_{js}$  و  $F_{jc}$  به صورت تابعی از ضرایب جرم اضافه، دمپینگ و برگرداننده به فرم زیر بیان می‌شود:

$$F_{rs} = C_{rr} - A_{rr} \omega_0 \omega_e + B_{r\delta}^D \omega_0 k \quad (13)$$

$$F_{rc} = C_{r\delta} k - A_{r\delta} \omega_0 \omega_e k + B_{rr}^D \omega_0 \quad (14)$$

$$F_{\delta s} = C_{\delta r} - A_{\delta r} \omega_0 \omega_e - B_{\delta\delta}^D \omega_0 k \quad (15)$$

$$F_{\delta c} = C_{\delta\delta} k - A_{\delta\delta} \omega_0 \omega_e k + B_{\delta r}^D \omega_0 \quad (16)$$

$$B_{r\delta}^D = B_{r\delta} + U A_{rr}$$

$$B_{\delta\delta}^D = B_{r\delta} + U A_{\delta\delta} \quad (17)$$

### ۳. حل معادلات حرکت

با توجه به غیرخطی بودن معادلات حرکت شناور، حل تحلیلی برای آنها موجود نیست و باید به کمک حل عددی در گام‌های زمانی، پاسخ شناور را محاسبه کرد. در همین راستا، از روش‌های تکرار برای حل معادلات حرکت استفاده شده است. حل معادلات هیو و پیچ، به دلیل قطری نبودن ماتریس‌های ضرایب و مزدوج شدن معادلات، باید به صورت همزمان حل شود:

$$\begin{bmatrix} M + A_{rr} & A_{r\delta} \\ A_{\delta r} & A_{\delta\delta} + I_{\delta\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\eta}_r \\ \ddot{\eta}_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{rr} & B_{r\delta} \\ B_{\delta r} & B_{\delta\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_r \\ \dot{\eta}_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{rr} & C_{r\delta} \\ C_{\delta r} & C_{\delta\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_r \\ \eta_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_r \\ F_\delta \end{bmatrix} \quad (18)$$

در حل معادلات مزدوج ماتریس‌های ضرایب در هر گام زمانی با توجه به شرایط زمانی شناور محاسبه می‌شود. همچنین بردار نیرو پس از محاسبه‌ی ماتریس‌های ضرایب تعیین می‌شود. برای حل معادلات رابطه‌ی ۱۸ به شکل رابطه‌ی ۱۹ بازنویسی می‌شود و با استفاده از روش ode45 محاسبات صورت می‌پذیرد:

$$\{\ddot{\eta}\} = \mathbf{M}^{-1} (\{F\} - \mathbf{B} \{\dot{\eta}\} - \mathbf{C} \{\eta\}) \quad (19)$$

### ۴. مطالعه‌ی موردی

در این مطالعه، حرکات طولی مدل شناور کاتاماران که نتایج آزمون تجربی و مشخصات کامل آن در مطالعات پیشین<sup>[۳۲]</sup> و نیز در جدول ۱ ارائه شده، شبیه‌سازی شده است. نتایج آزمون تجربی شناور موجود است و در این قسمت معادلات حرکت برای مدل ذکر شده محاسبه می‌شود. در ابتدا حرکت شناور در امواج منظم بررسی، و سپس با ترکیب امواج، حرکات شناور در امواج نامنظم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$\omega_{e_i} = \omega_{\cdot i} + k_i U \quad (24)$$

روابط فوق، تنها با فرض خطی بودن امواج و ثابت بودن ضرایب در فرکانس‌های مختلف حرکت شناور صادق است. بنابراین، می‌توان برای هر گام زمانی با توجه به اختلاف فاز امواج، مشارکت هر موج را تعیین، و با جمع نیروها، پاسخ معادله‌ی حرکت شناور را به صورت قبل مشخص کرد. حال به سراغ شبیه‌سازی در امواج نامنظم دریا می‌رویم.

### ۳.۴. امواج نامنظم دریا

با فرض خطی بودن امواج دریا، می‌توان سطح دریا را با استفاده از ترکیب امواج منظم تحت الگوی خاص وابسته به منطقه و شرایط دریایی، مدل‌سازی کرد. این الگو را می‌توان از طیف انرژی امواج دریا استخراج کرد. طیف‌های چگالی انرژی<sup>۷</sup> بیان‌گر مقدار انرژی امواج در فرکانس‌های مختلف است که در آب‌های عمیق برای حالت موج کاملاً نمو یافته به صورت روابط استاندارد پیشنهاد می‌شوند. در این راستا روابط استاندارد متعددی برای شرایط جغرافیایی مختلف ارائه شده است. مدل‌های استاندارد غالباً روابط ساده‌ی متناسب با داده‌های اندازه‌گیری شده در میدان مطالعاتی خاص‌اند. این روابط با استفاده از دانسته‌های بنیادی امواج نامنظم ارائه می‌شود. غالب این مدل‌های استاندارد که برای بیان طیف امواج در یک نقطه (بدون توجه به راستای موج) کاربرد دارند، مطابق رابطه‌ی ۲۵ هستند:

$$S(f) = \frac{A}{f^5} \exp\left(-\frac{B}{f^4}\right) \quad (25)$$

که در آن  $f$  فرکانس و  $A$  و  $B$  ثابت‌ها هستند. این ثابت‌ها در مدل‌های مختلف می‌توانند ارتفاع موج، دوره‌ی تناوب چکادی<sup>۸</sup>، دوره‌ی تناوب میانگین، یا دیگر پارامترها باشند. انتخاب مدل طیف استاندارد، به خصوصیات منطقه‌ی مورد مطالعه وابسته است. برای مناطق محدود به ساحل (موجگاه‌های محدود<sup>۹</sup>)، که امواج آنها توسط باد تولید می‌شود (امواج محلی)، مدل طیف موج جانسون<sup>۱۰</sup> پیشنهاد شده است. در این محدوده امواج تنها توسط باد و در همان منطقه تولید شده است و امواج موجگاه‌های دوردست (امواج دورآ<sup>۱۱</sup>) در این محدوده مشاهده نمی‌شود. بنابراین با توجه به موقعیت جغرافیایی دریای خلیج فارس و محدود بودن آن به سواحل اطراف، می‌توان از طیف موج جانسون برای امواج استفاده کرد.

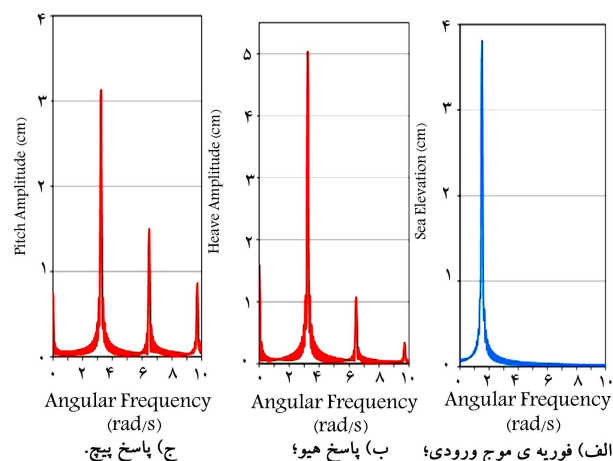
طیف جانسون براساس مطالعات و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در دریای شمال توسط هاسلمن<sup>۱۱</sup> و همکاران (۱۹۷۳) ارائه شده است. رابطه‌ی ریاضی طیف مذکور عبارت است از:

$$S_J(\omega) = \frac{5}{\sqrt{e}} A_s H_s^2 \omega_P^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_P}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp\left(-1.0 \left(\frac{\omega - \omega_P}{\sigma \cdot \omega_P}\right)^{-2}\right)} \quad (26)$$

که در آن  $H_s$  ارتفاع موج مشخصه<sup>۱۲</sup> (ارتفاع موج یک‌سوم) است که طبق تعریف برابر با میانگین ارتفاع‌های یک‌سوم مرتفع‌ترین امواج در بازه زمانی مشخص است.  $\sigma$  پارامتر عرض طیف است که با توجه به موقعیت فرکانس نسبت به فرکانس پیک چنین بیان می‌شود:

$$\sigma = 0.07 \quad \text{for } \omega \leq \omega_P$$

$$\sigma = 0.09 \quad \text{for } \omega > \omega_P \quad (27)$$



شکل ۳. طیف فوریه‌ی پاسخ تحت تحریک موج منظم شماره ۱.

۱. پاسخ گذرا که در مدت کوتاهی میرا می‌شود، ۲. پاسخ مانا که متأثر از تحریک است، تقسیم کرد. پاسخ گذرای مسئله بسیار متأثر از شرایط اولیه است. شرایط اولیه، حالت پایدار شناور در حال حرکت در آب آرام در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ نمودار فوریه تحریک و پاسخ شناور نشان داده شده است. دقت فوریه‌گیری وابسته به گام‌های زمانی انتخاب شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در پاسخ هیو و پیچ شناور چند فرکانس پیک موجود است که این می‌تواند ناشی از غیرخطی بودن معادله‌ی حرکت شناور باشد.

در نمودارهای شکل ۳ نمودار سمت چپ سطح آب، نمودار میانی حرکت هیو و نمودار سمت راست حرکت پیچ شناور را نشان می‌دهد. در نمودار سطح آب فرکانس قله برابر ۱/۵ رادیان بر ثانیه است و در حرکات فرکانس بیشترین دامنه برابر با ۳/۲ رادیان بر ثانیه است که برابر با فرکانس برخورد امواج به شناور است.

### ۲.۴. ترکیب امواج

در روابط فوق، امواج با فرض نظریه‌ی خطی<sup>۶</sup> مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این فرض، می‌توان گفت امواج نامنظم حاصل ترکیب امواج منظم با دامنه و فاز مشخص خطی‌اند. با این تعریف، اجازه خواهیم داشت که از اصل جمع آثار برای امواج استفاده کنیم. این در حالی است که همچنان معادلات حرکت شناور غیرخطی است و نمی‌توان از اصل جمع آثار برای پاسخ‌های شناور تحت تحریک‌های منظم متعدد استفاده کرد. با فرض ثابت بودن ضرایب معادله‌ی حرکت برای فرکانس‌های مختلف تحریک، می‌توان سمت راست معادله‌ی حرکت را برای  $n$  موج منظم بیان کرد:

$$F_T = \sum_{i=1}^n F_{Tsi} \zeta_{ai} \sin(\omega_{e_i} t + \phi_i) + F_{Tci} \zeta_{ai} \cos(\omega_{e_i} t + \phi_i) \quad (21)$$

$$F_D = \sum_{i=1}^n F_{Dsi} \zeta_{ai} \sin(\omega_{e_i} t + \phi_i) + F_{Dci} \zeta_{ai} \cos(\omega_{e_i} t + \phi_i) \quad (22)$$

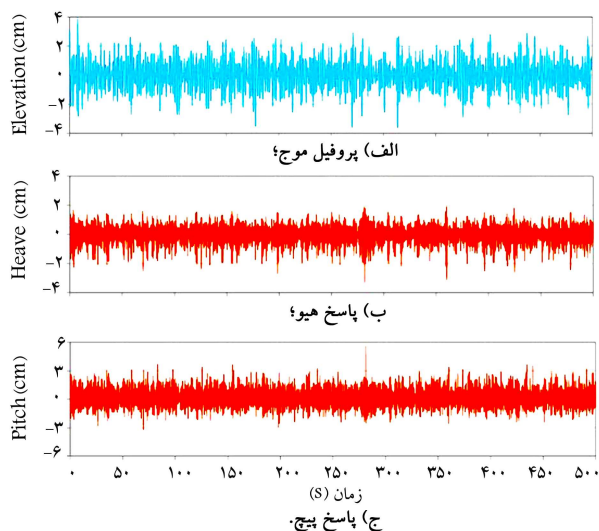
که در آن:

$$F_{Tsi} = C_{T\tau} - A_{T\tau} \omega_{\cdot i} \omega_{e_i} + B_{T0}^D \omega_{\cdot i} k_i \quad (23)$$

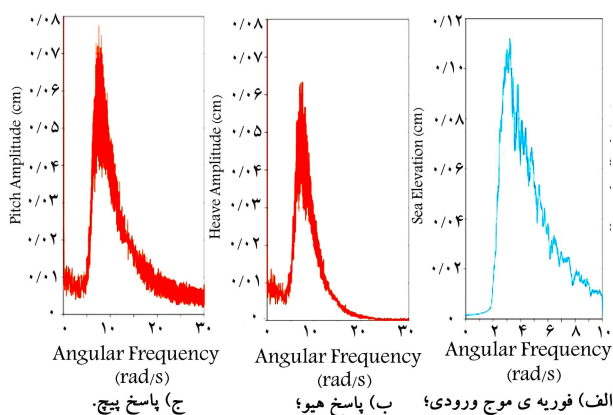
$$F_{Tci} = C_{T0} k_i - A_{T0} \omega_{\cdot i} \omega_{e_i} k_i + B_{T\tau}^D \omega_{\cdot i}$$

$$F_{Dsi} = C_{D\tau} - A_{D\tau} \omega_{\cdot i} \omega_{e_i} - B_{D0}^D \omega_{\cdot i} k_i$$

$$F_{Dci} = C_{D0} k_i - A_{D0} \omega_{\cdot i} \omega_{e_i} k_i + B_{D\tau}^D \omega_{\cdot i}$$



شکل ۵. تاریخچه زمانی پاسخ تحت تحریک امواج نامنظم.

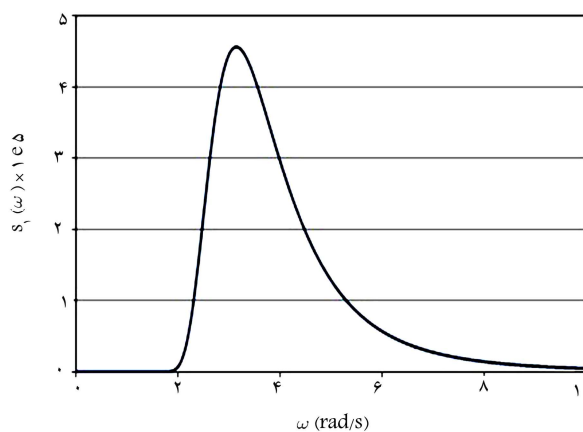


شکل ۶. طیف فوریه‌ی پاسخ تحت تحریک امواج نامنظم.

## ۵. صحت‌سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی نتایج از نتایج آزمون تجربی بوستکس و همکاران (۲۰۱۳) استفاده شده است. مشخصات مدل آزمون شده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده و در شکل ۷ مدل آزموده شده نشان داده شده است.

بوستکس و همکاران در ارتفاع‌های مشخص مختلف آزمون‌های تجربی را روی شناور کاتاماران ذکر شده انجام دادند. [۲۲] نتایج به دست آمده توسط این محققین در عدد فرود ۰/۷۵ و ارتفاع مشخصه ۰/۳ تا ۰/۸ متر برای شناور واقعی (که با توجه به مقیاس یک بیستم معادل ۱/۵ تا ۴ سانتی‌متر برای شناور مدل با طول ۳ متر است) در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در این نمودارها ارتفاع مشخصه‌ی حرکات هیو و پیچ شناور برحسب نسبت طول موج به طول شناور رسم شده است. شرایط آزمون در جدول ۳ بیان شده است. نتایج حاصله بیان‌گر آن است که در طول موج‌های کوچک نسبت به طول شناور دقت جواب‌ها مناسب نیست و با افزایش طول امواج، دقت جواب‌ها مناسب‌تر است؛ دلیل این امر را می‌توان در فرض خطی بودن موج جست‌وجو کرد زیرا با افزایش طول موج، نظریه‌ی موج خطی نمود بیشتری می‌یابد. در نظریه‌ی امواج خطی فرض بر این است که دامنه‌ی امواج نسبت به طول مقدار اندکی باشد؛ با افزایش طول موج در دامنه‌ی ثابت این امر محقق می‌شود. چنان که مشاهده می‌شود با این روش می‌توان به برآوردی مناسب از حرکات



شکل ۴. طیف چگالی انرژی موج با ارتفاع موج مشخصه ۴ سانتیمتر.

$\omega$  بیان‌گر فرکانس زاویه‌ی پیک طیف است که نشان‌گر موقعیت بیشینه‌ی طیف روی محور افقی است.

$$\omega_P = \frac{2\pi}{T_P} \quad (28)$$

از روابط فوق، طیف جانسوپ برای شرایط دریایی خلیج فارس با ارتفاع موج مشخصه‌ی ۴ سانتی‌متر و پرپود پیک طیف ۲ ثانیه در نظر گرفته شده است (شکل ۴). دلیل انتخاب این مقادیر آن است که ابعاد مدل شناور با مقیاس یک‌دهم از شناور اصلی -- که محدوده‌ی کاربری آن در خلیج فارس است -- انتخاب شده است. از قوانین تشابه امواج و مدل‌سازی آنها ارتفاع امواج به نسبت مستقیم و پرپود با نسبت جذر مقیاس مدل‌سازی می‌شود. با توجه به این که در خلیج فارس ارتفاع مشخصه بین ۰/۱ تا ۰/۵ متر و پرپود پیک بین ۳/۳ تا ۱۲/۸ ثانیه است، بنابراین با تشابه و مدل‌سازی ارتفاع مشخصه بین ۱ تا ۵ سانتی‌متر و پرپود پیک بین ۱ تا ۴ ثانیه برای مدل، اعداد انتخابی در این محدوده است.

با توجه به تعریف چگالی انرژی امواج، می‌توان ارتفاع امواج را با استفاده از رابطه‌ی ۲۹ استخراج کرد:

$$\eta_{a_i} = \sqrt{2S(\omega_i) \Delta\omega} \quad (29)$$

که در آن  $\Delta\omega$  اختلاف ثابت میان دو فرکانس متوالی است که با توجه به تعداد تقسیم‌بندی‌ها و امواج تشکیل دهنده تاریخچه‌ی موج نامنظم تعیین می‌شود. با تعیین ارتفاع امواج مجزا، می‌توان با استفاده از روابط ۲۱ و ۲۲ نیروی تحریک معادله‌ی حرکت شناور را برای هر گام زمانی تعیین کرد. باید توجه داشت که اختلاف فاز موجود در این روابط برای هر ارتفاع موج به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و تا انتهای محاسبات برای هر موج مجزا مقداری ثابت است. پاسخ شناور تحت تحریک موج نامنظم با طیف ارائه‌شده در شکل ۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است مطابق با توصیه آیین‌نامه‌های دریایی شرایط دریایی برای زمان سه ساعت محاسبه می‌شود.

طیف فوریه‌ی تاریخچه‌ی زمانی پروفیل سطح دریا و پاسخ‌های شناور مطابق شکل ۶ است. برای نمایش بهتر فوریه‌ی سری‌های زمانی، از جابه‌جایی میانگین ۲۱ نقطه‌ی برای هموارسازی داده‌های فوریه استفاده می‌شود.

طولی شناور کاتاماران در امواج نامنظم دست یافت. چنان که در نمودارهای شکل های ۸ و ۹ مشاهده می شود در طول موج هایی که مقدارشان نسبت به طول شناور ناچیز است، اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج تحقیق حاضر قابل چشم پوشی نیست، اما با افزایش نسبت طول موج به طول شناور دقت نتایج افزایش می یابد و قابل قبول می شود. علت زیاد بودن خطا در طول موج های کم را می توان در نظر نگرفتن عوامل و نیروهای غیرخطی دانست، زیرا نیروهای مورد استفاده در تمام مدل های دینامیکی بررسی حرکات طولی شناور شامل ترم های غیرخطی نیست و این ترم ها را شامل نمی شود. با افزایش طول موج نیروهای غیرخطی وارد بر شناور در مقایسه با نیروهای ناشی از پراکندگی و برخورد موج به سطح شناور ناچیز است؛ شناور نیز حرکات و شتاب های غیرخطی عامل نیروهای غیرخطی را ندارد؛ بنابراین در این طول موج ها مدل تحلیلی مورد استفاده با دقت بسیار بیشتری حرکات شناور را مدل می کند. در استفاده از این روش تنها دو فرض را باید در نظر گرفت: ۱. خطی بودن امواج؛ به عبارت دیگر این روش تا جایی اعتبار دارد که بتوان گفت نظریه ی موج خطی برقرار است. بنابراین در امواج با ارتفاع مشخصه های زیاد این روش اعتبار و کارایی خود را از دست می دهد. ۲. ثابت بودن ضرایب هیدرو دینامیکی نسبت به فرکانس حرکات شناور؛ به عبارت دیگر این سؤال مطرح است که آیا ضرایب هیدرو دینامیکی نسبت به فرکانس حرکات شناور ثابت است؟ برای پاسخ دادن به این سؤال باید به نحوی ضرایب هیدرو دینامیکی را تعیین کرد.

## ۶. تعیین ضرایب هیدرو دینامیکی

برای تعیین ضرایب هیدرو دینامیکی از روش جورنی استفاده شده است. جورنی معادلات کوپل حرکات هیو و پیچ شناور را چنین در نظر گرفت:

$$(\rho \nabla + a_{zz})\ddot{Z} + b_{zz}\dot{Z} + c_{zz}Z + a_{z\theta}\ddot{\theta} + b_{z\theta}\dot{\theta} + c_{z\theta}\theta = X_{wz} \quad (30)$$

$$(I_{yy} + a_{\theta\theta})\ddot{\theta} + b_{\theta\theta}\dot{\theta} + c_{\theta\theta}\theta + a_{\theta z}\ddot{Z} + b_{\theta z}\dot{Z} + c_{\theta z}Z = X_{w\theta} \quad (31)$$

که در آنها،  $Z$  حرکت هیو،  $\theta$  حرکت پیچ،  $a_{iz}$  ضرایب جرم افزوده،  $b_{iz}$  ضریب دمپینگ،  $c_{iz}$  ضرایب سختی،  $X_{wz}$  نیروی هیو،  $X_{w\theta}$  ممان پیچ در معادلات حرکت است. برای تعیین ضرایب هیدرو دینامیکی  $a$  (ضریب هیدرو دینامیکی جرم افزوده) و  $b$  (ضریب هیدرو دینامیکی دمپینگ) جورنی پیشنهاد داد شناور تحت نوسانات اجباری هیو و پیچ قرار گیرد و سپس با جایگذاری معادلات هیو و پیچ اجباری در معادلات فوق ضرایب هیدرو دینامیکی استخراج شود.

## ۱.۶. حرکت هیو اجباری هارمونیک شناور

زمانی که شناور تحت حرکت هیو هارمونیک قرار می گیرد، معادلات حرکت عبارت خواهد بود از:

$$Z = Z_a \cos(\omega t) \quad (32)$$

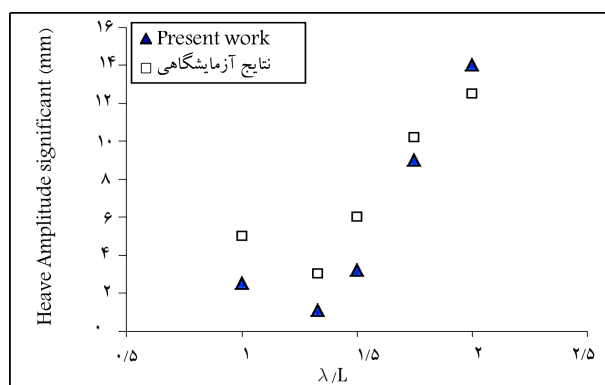
$$(M_{zz} + a_{zz})\ddot{Z} + b_{zz}\dot{Z} + c_{zz}Z = X_{wz} \cos(\omega t + \varepsilon_{X,z}) \quad (33)$$

$$a_{\theta z}\ddot{Z} + b_{\theta z}\dot{Z} + c_{\theta z}Z = X_{\theta z} \cos(\omega t + \varepsilon_{X,\theta z}) \quad (34)$$

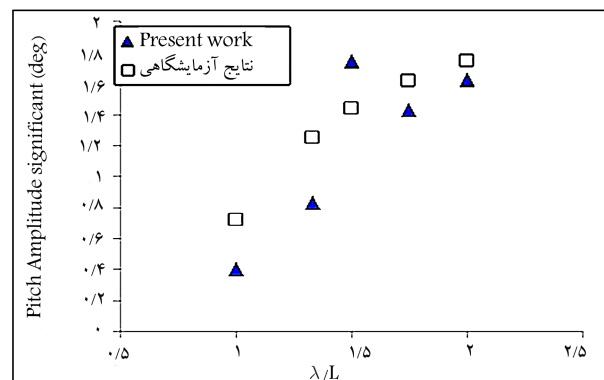
در شکل ۱۰ یک شناور تحت انجام حرکت هیو اجباری نشان داده شده است. دامنه ی حرکت و  $\omega$  فرکانس آن است.



شکل ۷. نمایی از آزمون شناور کاتاماران توسط بوستکس. [۳۲]



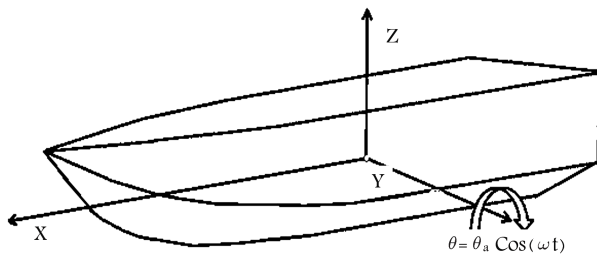
شکل ۸. مقایسه نتایج حرکت هیو شبیه سازی با نتایج تجربی بوستکس.



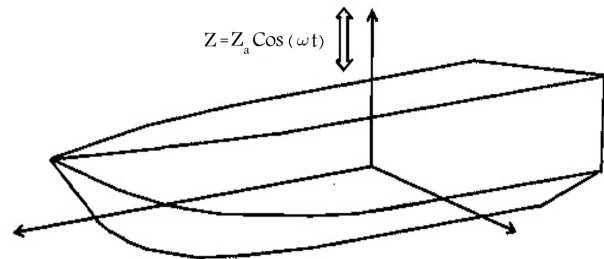
شکل ۹. مقایسه نتایج حرکت پیچ شبیه سازی با نتایج تجربی بوستکس.

جدول ۳. شرایط شناور در آزمون تجربی و شبیه سازی تحلیلی.

| شرایط انجام آزمون          |      |
|----------------------------|------|
| عدد فرود                   | ۰/۷۵ |
| نسبت ارتفاع موج به طول موج | ۰/۰۱ |
|                            | ۱    |
|                            | ۱/۳۳ |
| نسبت طول موج به طول شناور  | ۱/۵  |
|                            | ۱/۷۵ |
|                            | ۲    |



شکل ۱۱. یک شناور تحت انجام حرکت پیچ واداشته.



شکل ۱۰. یک شناور تحت انجام حرکت هیو واداشته.

با استفاده از آزمون حرکت پیچ اجباری عبارت خواهد بود از:

$$a_{\delta\delta} = -\frac{X_{\delta a} \cdot \cos(\varepsilon_{X_{\delta z}})}{\theta_a \cdot \omega^2} + \frac{c_{\delta\delta}}{\omega^2} - M_{\delta\delta} \quad (46)$$

$$b_{\delta\delta} = +\frac{X_{\delta a} \sin(\varepsilon_{X_{\delta z}})}{\theta_a \cdot \omega} \quad (47)$$

$$a_{r\delta} = -\frac{X_{ra} \cdot \cos(\varepsilon_{X_{rz}})}{\theta_a \cdot \omega^2} + \frac{c_{r\delta}}{\omega^2} \quad (48)$$

$$b_{r\delta} = +\frac{X_{ra} \sin(\varepsilon_{X_{rz}})}{\theta_a \cdot \omega} \quad (49)$$

$$c_{\delta\delta} = +2\rho g \int_0^L y_w \cdot x_b \cdot dx_b \quad (50)$$

$$c_{r\delta} = -2\rho g \int_0^L y_w \cdot x_b \cdot dx_b \quad (51)$$

پارامترها و متغیرهای به‌کار رفته در فرمول‌های فوق عبارتند از:  $X_{ra}$  دامنه‌ی نیروی هارمونیک وارد بر بدنه؛  $X_{\delta a}$  دامنه‌ی ممان هارمونیک وارد بر بدنه؛  $\omega$  فرکانس حرکت هارمونیک؛  $Z_a$  دامنه‌ی حرکت هارمونیک هیو؛  $M_{rr}$  جرم شناور؛  $\varepsilon_{X_{rz}}$  اختلاف فاز بین نیروی وارد بر شناور و حرکت هیو؛  $\varepsilon_{X_{\delta z}}$  اختلاف فاز بین ممان وارد بر شناور و حرکت هیو.

چنان‌که مشاهده می‌شود تعیین ضرایب هیدرودینامیکی بستگی دارد به تعیین دامنه‌ی نیرو و ممان هارمونیک وارد بر شناور و همچنین اختلاف فاز این نیرو و ممان هارمونیک با حرکت هارمونیک شناور. پیشتر اشاره شد که در این تحقیق، از روش عددی مبتنی بر معادلات RANS برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی، یا به عبارت دقیق‌تر تعیین این نیروها و ممان‌ها و اختلاف فاز آنها با حرکت هارمونیک استفاده می‌شود.

## ۷. مدل‌سازی شناور تک‌بدنه

در این بخش مدل‌سازی حرکات هارمونیک یک شناور تک‌بدنه در آب آرام به کمک روش عددی بر پایه‌ی معادلات RANS بررسی می‌شود. شناور مذکور شناوری است که در سال ۱۹۹۲ براساس آزمایشات تجربی<sup>[۱۵]</sup> تروش ضرایب هیدرودینامیکی آن تعیین، و از آن جهت انتخاب شده که بتوان با استفاده از نتایج تجربی تروش کار عددی انجام شده را صحت‌سنجی کرد و دامنه‌ی حل، مدل آشفتگی و همچنین شرایط مرزی و اولیه‌ی مناسب را تعیین کرد. در نهایت پس از اتمام و استخراج ضرایب هیدرودینامیکی، نتایج این شبیه‌سازی به کمک نتایج آزمایشات تروش (۱۹۹۲) اعتبارسنجی خواهد شد. هدف از این بخش دست‌یابی به دامنه‌ی حل و مدل‌های مناسب آشفتگی برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی شناور کاتاماران تندرو است.

معادله‌ی ۳۲ بیان‌گر حرکت هیو اجباری شناور است که دامنه‌ی حرکت هیو و فرکانس آن معلوم است. برای به دست آمدن ضرایب،  $Z$  را از معادله‌ی ۳۲ محاسبه و در معادلات ۳۳ و ۳۴ قرار داده، و نیز سمت راست معادلات ۳۳ و ۳۴ بسط داده می‌شود:

$$(M_{rr} + a_{rr}) \cdot Z_a \omega^2 \cos(\omega t) + b_{rr} \cdot \omega \sin(\omega t) + c_{rr} \cdot \cos(\omega t) = -X_{ra} \cdot \cos(\omega t) \cos(\varepsilon_{X_{rz}}) + \sin(\omega t) \sin(\varepsilon_{X_{rz}}) \quad (35)$$

$$(a_{\delta r}) \cdot Z_a \omega^2 \cos(\omega t) + b_{\delta r} \cdot \omega \sin(\omega t) + c_{\delta r} \cdot \cos(\omega t) = -X_{\delta a} \cdot \cos(\omega t) \cos(\varepsilon_{X_{\delta z}}) + \sin(\omega t) \sin(\varepsilon_{X_{\delta z}}) \quad (36)$$

با برابر قرار دادن ضرایب  $\cos(\omega t)$  و  $\sin(\omega t)$  در طرفین دو معادله ضرایب هیدرودینامیکی به دست خواهند آمد:

$$a_{rr} = -\frac{X_{ra} \cdot \cos(\varepsilon_{X_{rz}})}{Z_a \cdot \omega^2} + \frac{C_{rr}}{\omega^2} - M_{rr} \quad (37)$$

$$b_{rr} = +\frac{X_{ra} \sin(\varepsilon_{X_{rz}})}{Z_a \cdot \omega} \quad (38)$$

$$a_{\delta r} = -\frac{X_{\delta a} \cdot \cos(\varepsilon_{X_{\delta z}})}{Z_a \cdot \omega^2} + \frac{C_{\delta r}}{\omega^2} \quad (39)$$

$$b_{\delta r} = +\frac{X_{\delta a} \sin(\varepsilon_{X_{\delta z}})}{Z_a \cdot \omega} \quad (40)$$

$$c_{rr} = +2\rho g \int_0^L y_w \cdot dx_b \quad (41)$$

$$c_{\delta r} = -2\rho g \int_0^L y_w \cdot x_b \cdot dx_b \quad (42)$$

## ۲.۶. حرکت پیچ اجباری هارمونیک شناور

زمانی که شناور تحت حرکت پیچ اجباری هارمونیک قرار می‌گیرد، معادلات حرکت عبارت خواهد بود از:

$$\theta = \theta_a \cdot \cos(\omega t) \quad (43)$$

$$(M_{\delta\delta} + a_{\delta\delta}) \cdot \ddot{\theta} + b_{\delta\delta} \cdot \dot{\theta} + c_{\delta\delta} \cdot \theta = X_{\delta a} \cdot \cos(\omega t + \varepsilon_{X_{\delta\theta}}) \quad (44)$$

$$a_{\delta r} \cdot \ddot{\theta} + b_{\delta r} \cdot \dot{\theta} + c_{\delta r} \cdot \theta = X_{ra} \cdot \cos(\omega t + \varepsilon_{X_{r\theta}}) \quad (45)$$

در شکل ۱۱ یک شناور تحت حرکت پیچ اجباری نشان داده شده است.  $\theta_a$  دامنه‌ی حرکت و  $\omega$  فرکانس آن است.

مانند حرکت هیو هارمونیک با قرار دادن  $\theta$  از معادله‌ی ۴۳ در معادلات ۴۴ و ۴۵ و سپس برابر قراردادن ضرایب  $\cos(\omega t)$  و  $\sin(\omega t)$  ضرایب هیدرودینامیکی

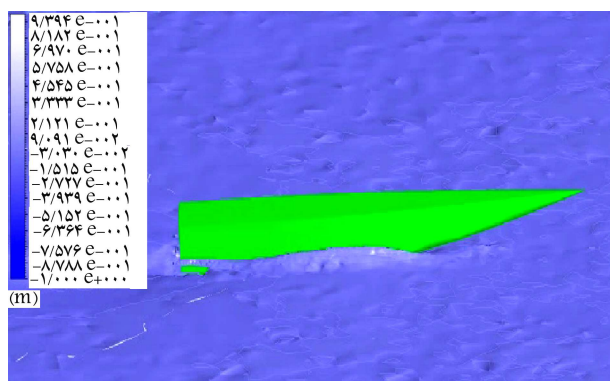
می‌آید. مش شامل حدود ۵۰۰۰۰۰ المان با ۱۰ لایه‌ی باریک اطراف شناور برای دیده شدن اثرات لایه‌ی مرزی است.

## ۲.۷. نتایج مدل‌سازی

چنان‌که پیشتر اشاره شد هدف از به‌کارگیری روش عددی، تعیین دامنه‌ی نیرو و ممان وارد بر شناور و نیز تعیین اختلاف فاز آنها با حرکت هارمونیک شناور برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی است. شکل ۱۳ شبیه‌سازی شناور در محیط نرم افزار را نشان می‌دهد. برای این منظور شناور تندرو را باید تحت اثر حرکت هارمونیک هیو و پیچ قرار داد. باید دقت شود که فرکانس و دامنه‌ی حرکات از نتایج مطالعات تروش (۱۹۹۲) استخراج شده است. این حرکت به مرکز ثقل شناور وارد خواهد شد. نتایج حرکات هیو و پیچ اجباری شناور در شکل ۱۴ خلاصه شده است. نتایج شامل نیروی هارمونیک و ممان وارد بر شناور بر اثر انجام حرکت هیو هارمونیک اجباری با دامنه‌ی ۲ سانتی‌متر و فرکانس ۴٫۷۲، نیروی هارمونیک و ممان وارد بر شناور بر اثر انجام حرکت پیچ هارمونیک اجباری با دامنه‌ی ۰٫۲۶ رادیان و فرکانس ۴٫۷۲ را نشان می‌دهد.

## ۳.۷. محاسبه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی و اعتبارسنجی نتایج

برای محاسبه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی شناور از معادلات استخراج شده توسط جورنی که در بخش قبل بیان شد استفاده می‌شود. چنان‌که پیشتر بیان شد، با استفاده از نتایج آزمون تروش (۱۹۹۲)، نتایج حاصله صحت‌سنجی می‌شود. تروش از مدل آزمایشگاهی برای محاسبه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی استفاده کرد. در این آزمایش‌ها ضرایب مورد نیاز تحت نوسانات اجباری اندازه‌گیری می‌شود. مدل‌سازی طبق تروش در عدد فرود عرضی ۱٫۵ انجام شد. ضرایب  $C$  به هندسه‌ی بدنه وابسته‌اند و برای شناور تندرو انتخاب شده این ضرایب در جدول ۵ ارائه شده است. این ضرایب با استفاده از روش سیمسون تعیین شده است.



شکل ۱۳. زمان شبیه‌سازی  $2s$

شکل ۱۳. شناور تندرو در حال انجام حرکت پیچ هارمونیک.

جدول ۵. ضرایب استاتیکی  $C$  برای شناور تندرو.

| مقدار | ضرایب هیدرواستاتیکی |
|-------|---------------------|
| ۲۹۷۵  | $C_{22}$ (Nm)       |
| ۳۵۳   | $C_{52}$ (N)        |
| ۳۵۳   | $C_{25}$ (N)        |
| ۴۲    | $C_{55}$ (Nm)       |

## ۱.۷. مشخصات هندسی و شبکه‌بندی میدان حل

برای شبکه‌بندی مدل‌سازی نیز از یک مش بی‌سازمان برای دامنه‌ی حل با ابعاد  $3 \times 3 \times 6.3$  متر برای شناوری که مشخصات هندسی آن در جدول ۴ بیان شده، استفاده شده است. این ابعاد دامنه متناسب با طول شناور انتخاب شده، به‌گونه‌ی که جریان در پشت و کنار شناور زمان کافی برای نشان دادن خود داشته باشد. با استفاده از تقارن شناور نسبت به محور طولی از نصف دامنه‌ی سیالات برای حل مسئله استفاده شده که منجر به کاهش حجم محاسباتی می‌شود. میدان سیال دارای مشی است که قابلیت تغییر شکل داشته و با جابه‌جایی جسم صلب شکل و حجم سلول‌ها تغییر می‌کند؛ در این مدل‌سازی از ۵۰۰۰۰۰ سلول استفاده شده است. شرایط مرزی و اولیه عبارتند از: یک ورودی در جلوی شناور و یک خروجی در انتهای دامنه در راستای محور  $X$  است. فشار نسبی در خروجی فشار استاتیکی و در نواحی دور معادل صفر در نظر گرفته شد. سرعت هوا و آب در ورودی ۲٫۵۶ متر بر ثانیه معادل با عدد فرود عرضی ۱٫۵ است و شناور دارای تریم اولیه‌ی ۴ درجه است (تروش، ۱۹۹۲). در بالای مدل نیز شرایط ورود و خروج هوا در نظر گرفته شده است. کف دامنه شرط عدم لغزش و در مرز موجود در انتهای محور  $Y$  دیواری قرار دارد که سیال می‌تواند روی آن حرکت کند. در شکل ۱۲ نیز توزیع شبکه‌ی اطراف شناور تندرو نشان داده شده است.

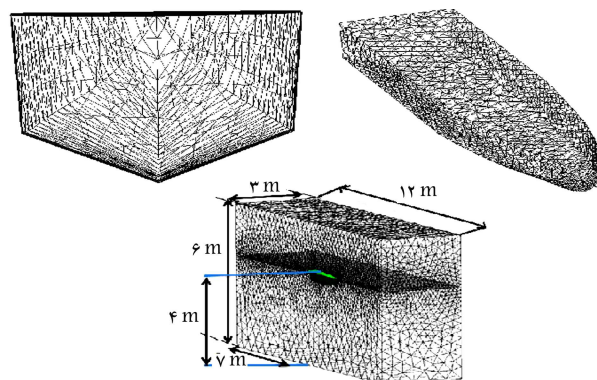
مکان اولین مش روی شناور براساس  $y^+$  تعیین می‌شود.  $y^+$  را می‌توان براساس نظریه‌ی جریان صفحه‌ی مسطح شلیختینگ (۱۹۶۸) محاسبه کرد:

$$y^+ = 0.172 \left( \frac{y}{L} \right) R_n^{1/4} \quad (52)$$

که در آن  $y$  فاصله از دیواره،  $L$  طول جسم، و  $R_n$  رینولدز محلی است. با ثابت نگاه داشتن مقدار  $y^+$  در ۳۵۰، ضخامت لایه‌ی اول معادل ۱ میلی‌متر به دست

جدول ۴. مشخصات هندسی شناور واقعی برای مدل‌سازی عددی.

| مشخصات شناور تندرو      | مقدار  | واحد                 |
|-------------------------|--------|----------------------|
| طول                     | ۲٫۰۹۶  | متر                  |
| عرض                     | ۰٫۳۱۸  | متر                  |
| مرکز ثقل عمودی          | ۰٫۱۹۵  | متر                  |
| مرکز ثقل                | ۰٫۴۷   | متر                  |
| نسبت طول خیس شده به عرض | —      | —                    |
| ممان اینرسی             | ۵۳٫۲۴۵ | کیلوگرم در مجذور متر |
| فاصله بین دو بدنه       | ۰٫۲۴   | متر                  |



شکل ۱۲. توزیع شبکه روی شناور تندرو.

ذکر شده است؛ با توجه به مشخصات ارائه شده در کار تجربی بدنه طراحی و وارد نرم‌افزار شده است. بنابراین یکی از دلایل عمده در اختلاف موجود، اختلاف بین مدل آزموده شده‌ی تجربی و مدل مورد بررسی در کار عددی است. از دلایل دیگر خطای بین نتایج تجربی و عددی می‌توان به دامنه‌ی حل محاسباتی، تعداد مش‌ها و مدل توربولانسی مورد استفاده نیز اشاره کرد که در تمام پژوهش‌های عددی و سیالات منجر به بروز خطا در نتایج می‌شود.

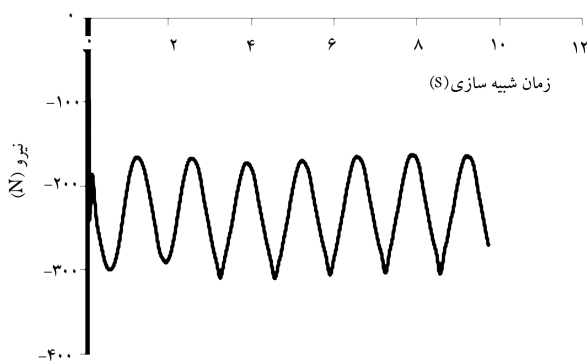
در ادامه با توجه به تطابق خوب نتایج شبیه‌سازی عددی شناور تک‌بدنه با نتایج تجربی آقای تروش، با استفاده از همین روش، ضرایب هیدرودینامیکی شناور کاتاماران برای پاسخ تغییرات ضرایب نسبت به فرکانس حرکات بررسی شده است.

## ۸. تعیین ضرایب هیدرودینامیکی شناور کاتاماران

برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی شناور کاتاماران ابتدا باید یک مدل شناور تعیین کرد. بدین منظور از پژوهش انجام‌شده<sup>[۲۷]</sup> استفاده شده است. دلیل استفاده از این تحقیق این است که خطوط بدنه‌ی مدل و همچنین شرایط کارکرد آن در امواج بیان شده است.<sup>[۲۷]</sup> از آنجا که هندسه‌ی مدل شناورهای تندرو تقریباً یکسان است، می‌توان نتایج به دست آمده از این مدل را برای کد نوشته شده در امواج نامنظم به بحث گذاشت. سرعت مدل و همچنین فرکانس‌های برخورد حرکت شناور از پژوهش انجان شده استخراج شده است.

### ۱.۸. مشخصات هندسی کاتاماران و شبکه بندی میدان حل

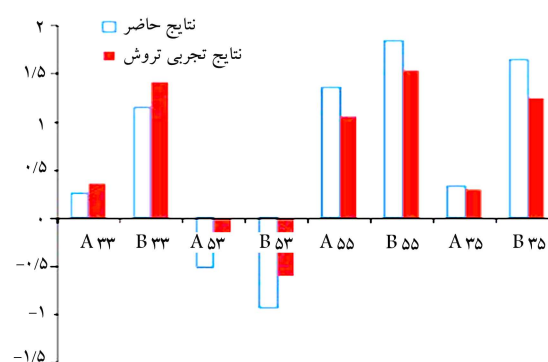
برای شبکه‌بندی مدل‌سازی نیز از یک مش باسازمان برای دامنه‌ی حل با ابعاد  $72 \times 18 \times 36$  متر درخصوص کاتامارانی که هندسه‌ی آن در شکل ۱۶ و مشخصات هندسی آن در جدول ۷ بیان شده، استفاده شده است. این ابعاد دامنه متناسب با طول شناور انتخاب شده، به‌گونه‌ی که جریان در پشت و کنار شناور زمان کافی برای نشان دادن خود داشته باشند. با استفاده از تقارن شناور نسبت به محور طولی از نصف دامنه‌ی سیالاتی برای حل مسئله استفاده شده که منجر به کاهش حجم محاسباتی می‌شود. در این مدل‌سازی از  $700000$  سلول استفاده شده است. شرایط مرزی عبارت‌اند از: سرعت هوا و آب در ورودی  $8/15$  متر بر ثانیه که معادل عدد فرود عرضی  $1/2$  است. در بالای مدل نیز شرایط ورود و خروج هوا در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه‌ی کاتاماران برای انجام شبیه‌سازی، پس از قرار دادن کاتاماران در شرایط هیدرواستاتیکی به دست آمد. آب‌خور کاتاماران حدود  $0/6$  متر و تریم آن نیز حدود  $1$  درجه به دست آمد. مکان اولین مش روی کاتاماران براساس  $y^+$



شکل ۱۶. تغییرات نیروی هارمونیک وارد بر شناور در حرکت هارمونیک.

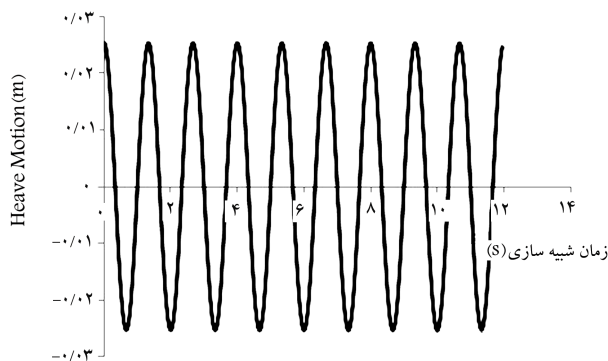
در نهایت ضرایب هیدرودینامیکی به دست آمده از این تحقیق و آزمایشات تروش برای شناور تندرو در شکل ۱۴ مقایسه شده است. چنان که مشاهده می‌شود توافق خوبی بین نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشات آقای تروش وجود دارد. اختلاف موجود بین نتایج نیز ممکن است ناشی از اختلافی باشد که بین شناور تحقیق حاضر با شناور تروش وجود دارد؛ اگرچه سعی شد تا حد امکان هندسه‌ی شناور تحقیق حاضر به هندسه شناور آقای تروش نزدیک باشد. لازم به ذکر است که ضرایب در نمودار شکل ۱۵ به صورت بی بعد در نظر گرفته شده است. در جدول ۶ ضرایب بی بعد معرفی شده است.

در شکل ۱۴ اختلاف بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج تجربی تروش نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود نتایج بین ۸ تا ۴۵ درصد با یکدیگر اختلاف دارند. یکی از دلایل عمده و اصلی در اختلاف بین نتایج این تحقیق با نتایج تروش اختلاف بین مدل ورودی به نرم‌افزار و مدل تجربی آزمون شده توسط تروش است. در آن تحقیق خطوط بدنه‌ی مدل آزمون شده داده نشده و فقط مشخصات مدل



شکل ۱۴. مقایسه نتایج تجربی تروش و نتایج عددی به دست آمده.

حرکت هیدروسیال هارمونیک:  
 $Z = 0.02544 \cos(\frac{\pi}{4} t)$



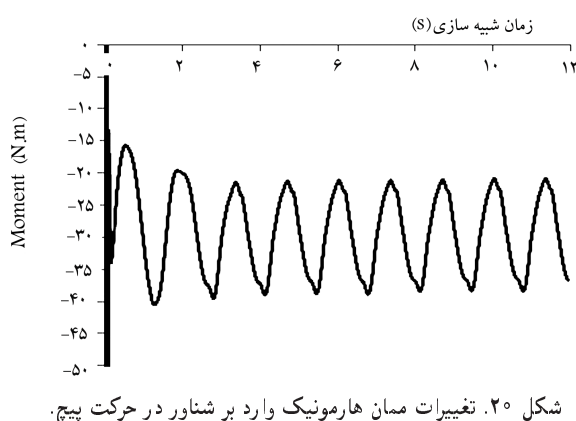
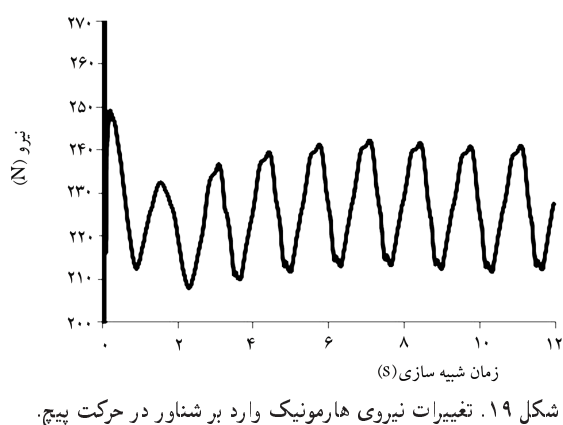
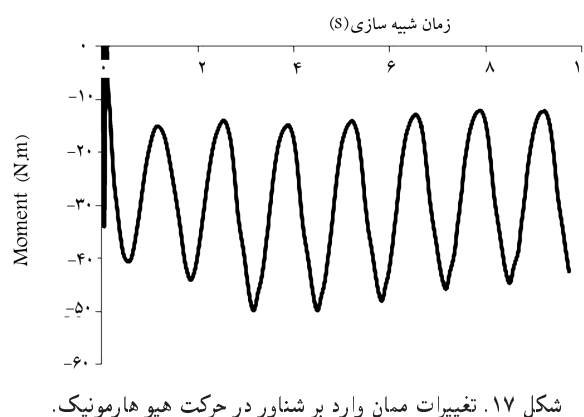
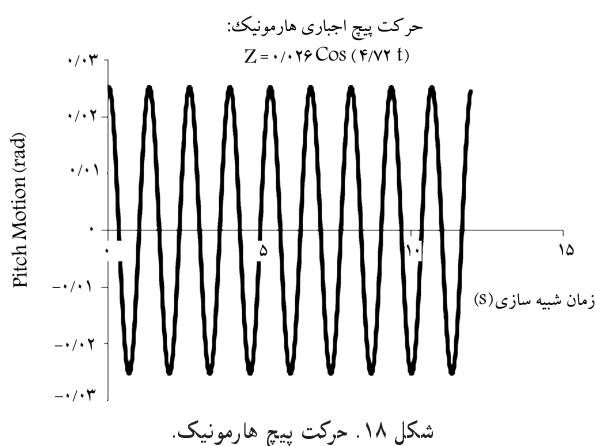
شکل ۱۵. حرکت هیدروسیال هارمونیک.

جدول ۶. ضرایب هیدرودینامیکی بی بعد.

|                                                                         |                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $B_{\delta\tau}'' = \frac{B_{\delta\tau}}{\rho B^2 \sqrt{\frac{g}{B}}}$ | $A_{\delta\delta}'' = \frac{A_{\delta\delta}}{\rho B^2}$                    |
| $A_{\tau\tau}'' = \frac{A_{\tau\tau}}{\rho B^2}$                        | $B_{\delta\delta}'' = \frac{B_{\delta\delta}}{\rho B^2 \sqrt{\frac{g}{B}}}$ |
| $B_{\tau\tau}'' = \frac{B_{\tau\tau}}{\rho B^2 \sqrt{\frac{g}{B}}}$     | $A_{\tau\delta}'' = \frac{A_{\tau\delta}}{\rho B^2}$                        |
| $A_{\delta\tau}'' = \frac{A_{\delta\tau}}{\rho B^2}$                    | $B_{\tau\delta}'' = \frac{B_{\tau\tau}}{\rho B^2 \sqrt{\frac{g}{B}}}$       |

جدول ۷. مشخصات هندسی کاتاماران برای مدل سازی عددی.

| مشخصات کاتاماران | مقدار                                                                             | واحد           |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| طول              | ۱۲٫۰                                                                              | متر            |
| عرض              | ۴٫۶                                                                               | متر            |
| مرکز ثقل         | ۵٫۴                                                                               | متر            |
| ممان اینرسی      | $\begin{pmatrix} ۵۳۲۷۴ & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۲۹۵۹۶۷ & ۰ \\ ۰ & ۰ & ۳۲۵۵۶۳ \end{pmatrix}$ | توان چهارم متر |
| جرم              | ۱۷۸۵۰                                                                             | کیلوگرم        |
| آبخور            | ۰٫۴۵                                                                              | کیلوگرم        |

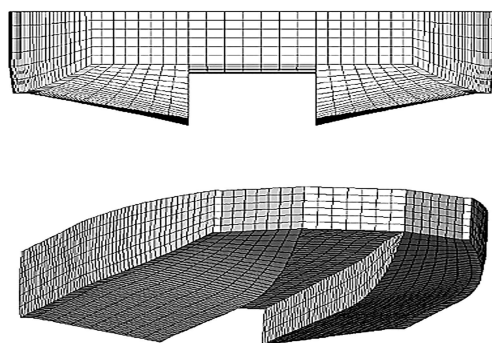


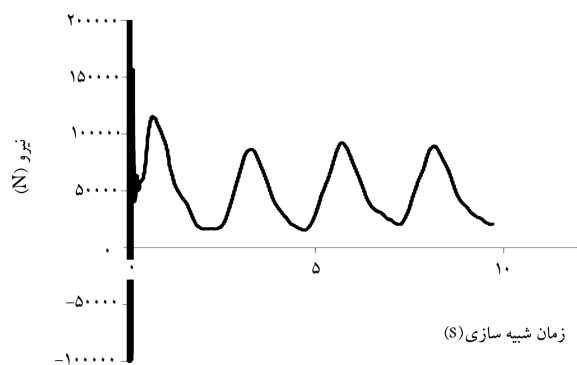
تعیین می شود.  $y^+$  را می توان براساس نظریه ی جریان صفحه ی شلیختینگ (۱۹۶۸) محاسبه کرد. با ثابت نگاه داشتن مقدار  $y^+$  در  $30^\circ$ ، ضخامت لایه ی اول ۱ میلی متر به دست می آید. مش شامل حدود  $700000$  المان با  $10^\circ$  لایه ی باریک اطراف کاتاماران برای دیدن لایه ی مرزی است.

## ۲.۸. نتایج مدل سازی

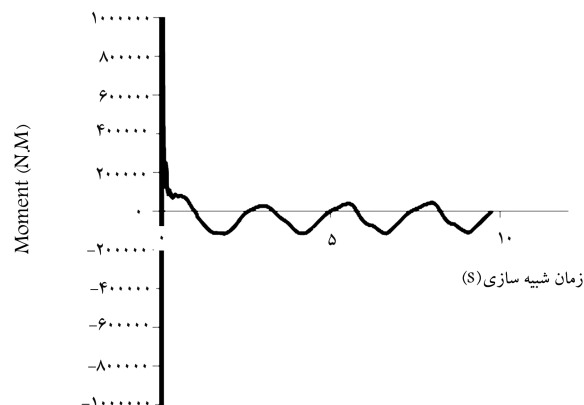
نتایج مربوط به حرکت هارمونیک اجباری هیو در فرکانس  $3/7$  و اجباری پیچ در فرکانس  $2/59$  کاتاماران در شکل ۱۷ نشان داده شده است. شایان ذکر است فرکانس و دامنه ی حرکات با توجه به شرایط موجود در خلیج فارس تعیین شده است. در این مورد  $\omega$  از  $39/27$  تا  $2/59$  تغییر داده می شود و در هر  $\omega$  نیرو و ممان وارد بر کاتاماران به همراه اختلاف فاز آنها با حرکت هارمونیک ثبت می شود. همچنین دامنه ی حرکت هیو اجباری  $16$  سانتی متر و دامنه ی حرکت پیچ  $52^\circ$  رادیان در نظر گرفته شده است. نتایج در فرکانس  $2/59$  رادیان بر ثانیه برای حرکات هیو و پیچ اجباری در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

پس از به دست آوردن نیروها، ممان ها، اختلاف فازها و قراردادن آنها در روابط جورنی، ضرایب هیدرودینامیک شناور کاتاماران به دست می آید (شکل های ۱۸ تا ۳۵). با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که با افزایش فرکانس های برخورد ضرایب هیدرودینامیکی بر مقدار جرم اضافه و دمپینگ تقریباً ثابت شده که می توان آنها را ثابت در نظر گرفت. این بدان معناست که با افزایش فرکانس برخورد، و به عبارتی با افزایش سرعت، می توان فرض ثابت بودن ضرایب در روش موج نامنظم را یک فرض صحیح تلقی کرد. بنابراین می توان در سرعت های زیاد مدعی تحلیل حرکات طولی شناور کاتاماران تدریجاً در امواج نامنظم بود.

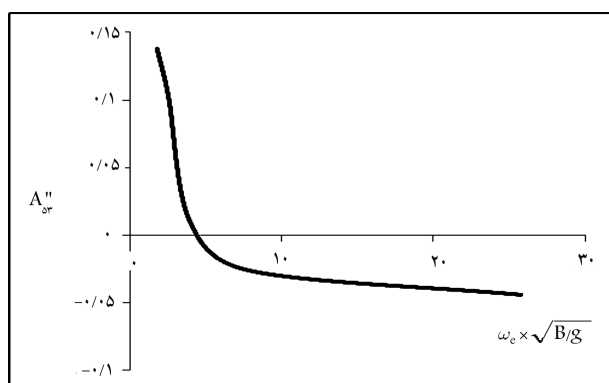




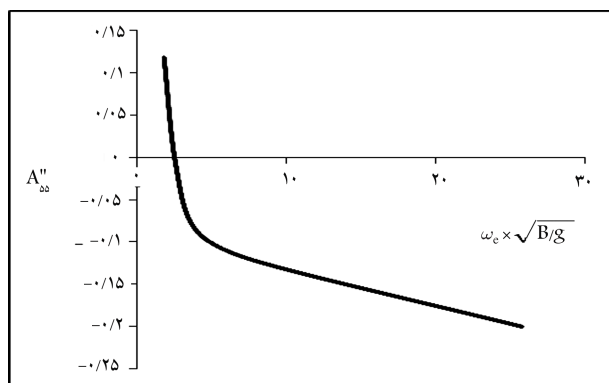
شکل ۲۶. تغییرات نیروی هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۲/۵۹.



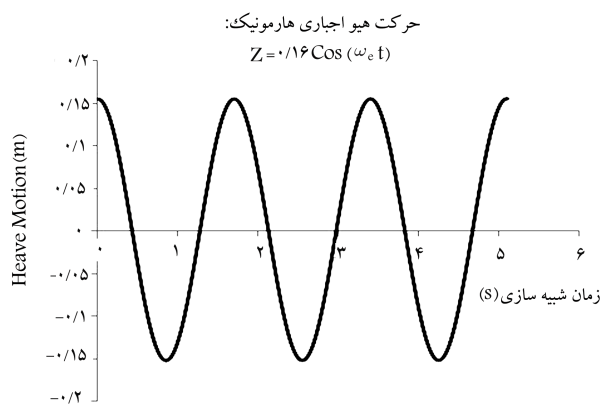
شکل ۲۷. تغییرات ممان هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۲/۵۹.



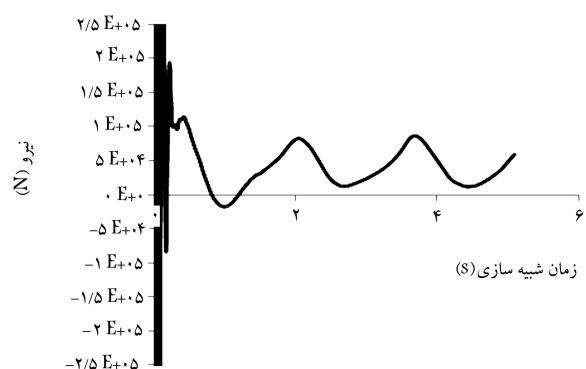
شکل ۲۸. ضریب جرم اضافه ترکیبی حرکات هیو و پیچ.



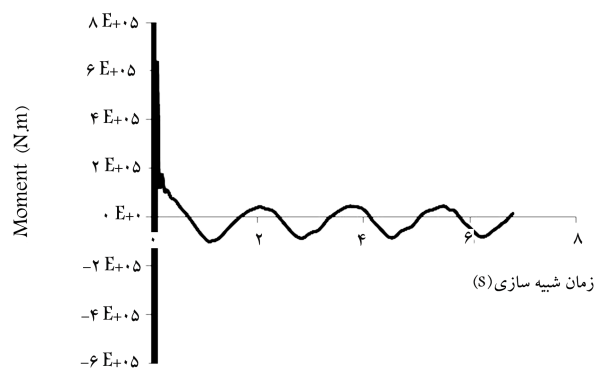
شکل ۲۹. ضریب جرم اضافه حرکت پیچ.



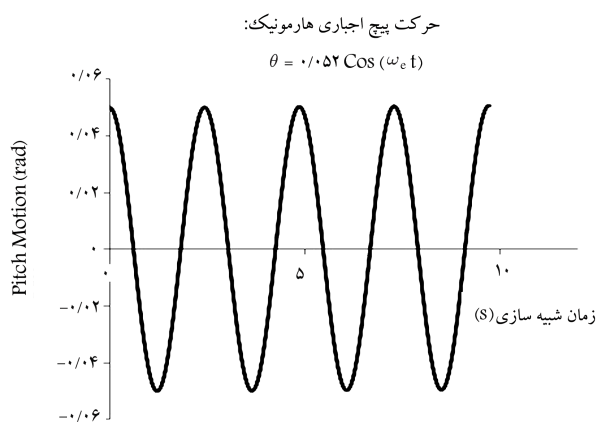
شکل ۲۲. حرکت هیو هارمونیک در فرکانس ۳/۷.



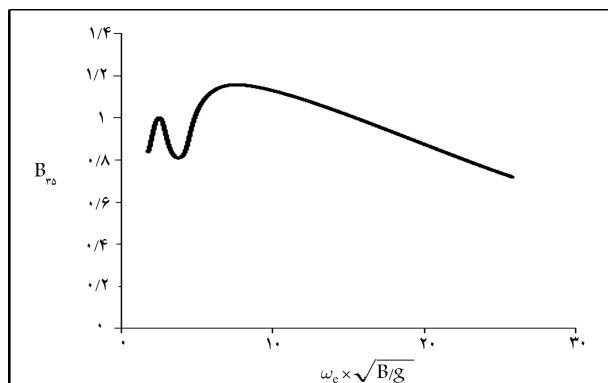
شکل ۲۳. تغییرات نیروی هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۳/۷.



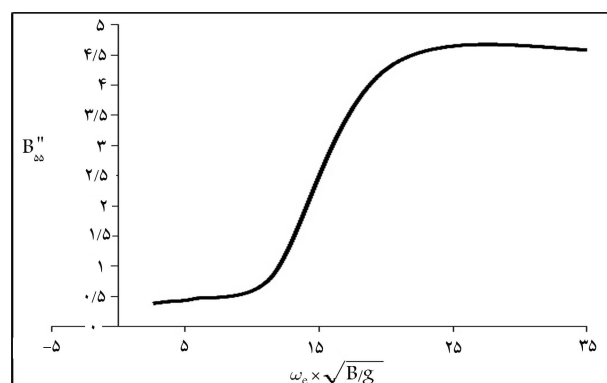
شکل ۲۴. تغییرات ممان هارمونیک وارد بر کاتاماران در فرکانس ۳/۷.



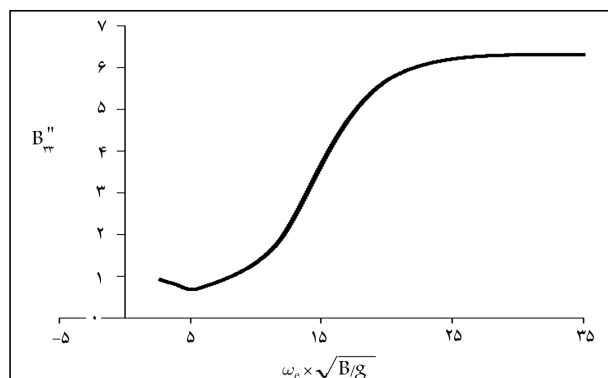
شکل ۲۵. حرکت پیچ هارمونیک در فرکانس ۲/۵۹.



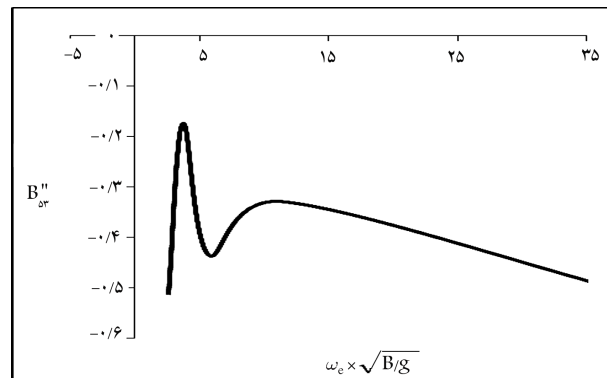
شکل ۳۴. ضریب دمپینگ ترکیبی حرکات هیو و پیچ.



شکل ۳۰. ضریب دمپینگ حرکت پیچ.



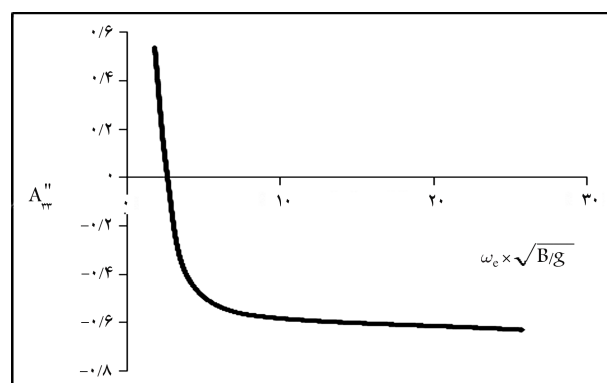
شکل ۳۵. ضریب دمپینگ ترکیبی حرکات هیو و پیچ.



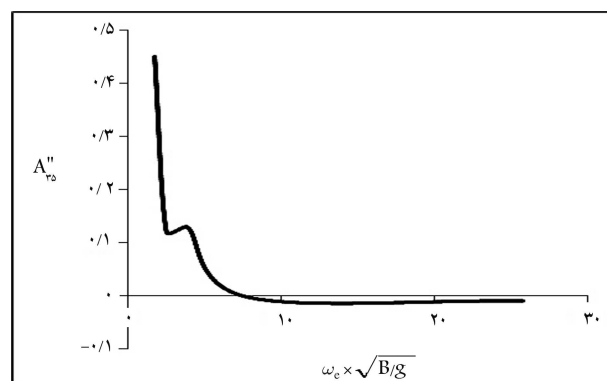
شکل ۳۱. ضریب دمپینگ ترکیبی حرکات هیو و پیچ.

## ۹. نتیجه‌گیری

در این نوشتار برای برآورد حرکات طولی شناور تندرو در امواج نامنظم به توسعه‌ی روش فالتینسن پرداخته شد و نتایج حاصله با نتایج تجربی مقایسه و اعتبارسنجی شد. دقت روش یاد شده با افزایش طول موج‌های برخوردی به شناور افزایش می‌یابد. برای استفاده از روش یاد شده یک سؤال اساسی مطرح بود و آن این که آیا ضرایب هیدرودینامیکی شناور تندرو را نسبت به فرکانس حرکات می‌توان ثابت در نظر گرفت؟ در این راستا و برای به دست آوردن ضرایب، به انجام حرکات هیو و پیچ خالص در یک محیط عددی که معادلات RANS و پیوستگی بر آن حاکم‌اند، پرداخته می‌شود. انجام حرکات هیو و پیچ خالص برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی به روش تجربی توسط تروش (۱۹۹۲) و جورنی (۲۰۰۳) معرفی شده است. تعیین ضرایب هیدرودینامیکی به روش تجربی هزینه‌بر بوده و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی دقیق برای اندازه‌گیری ممان و نیرو دارد. بنابراین به نظر می‌رسد استخراج این ضرایب به روش عددی و ایجاد آزمایشگاه مجازی می‌تواند در شناخت هیدرودینامیک شناور تندرو مفید باشد. یکی از دستاوردهای این پژوهش تبیین نحوه‌ی استخراج ضرایب هیدرودینامیکی با روش دینامیک سیالات محاسباتی بود که مشخص شد مدل توربولانسی  $k-\omega-sst$  مناسب‌ترین مدل در بررسی دینامیک و حرکات شناورهای تندرو است. با توجه به نتایج به دست آمده برای ضرایب، مشخص شد در فرکانس‌های برخورد زیاد که معادل سرعت زیاد شناور است می‌توان ضرایب هیدرودینامیکی را ثابت در نظر گرفت و این بدان معناست که در سرعت‌های زیاد شناور می‌توان حرکات طولی آن را در امواج نامنظم برآورد کرد.



شکل ۳۲. ضریب جرم اضافه حرکت هیو.



شکل ۳۳. دمپینگ ترکیبی حرکات هیو و پیچ.

## پانوشتها

1. strip theory
2. added mass coefficient
3. Damping coefficient
4. restoring coefficient
5. excitation force
6. airy
7. power spectral density
8. peak Period
9. limited fetch
10. swell
11. Hasselemann
12. significant wave height

## منابع (References)

1. Froude, W., *On the Rolling of Ships*, Parker, Son and Bourn (1861).
2. Krylov, A. "A new theory of the pitching motion of ships on waves and the stresses produced by this motion", *Transactions, Institute of Naval Architects*, **37**, (1896).
3. Von Karman, W. "The impact of seaplane floats during landing", Technical Memorandum TN321, NACA, pp. 1-9 (1929).
4. Korvin-Kroukovski, V. and Jacobs, W.R. "Pitching and heaving motions of a ship in regular waves", *Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers*, **65**, (1957).
5. Salvesen, N., Tuck, E.O. and Faltinsen, O.M. "Ship motions and sea loads", *Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers*, **78**, (1970).
6. Hsu, C.C., *On the Motions of High Speed Planing Craft*, Hydro-nautics, Inc., Technical Report 603-1, Laurel, Md (1967).
7. Altman, R., *The Steady-State and Oscillatory Hydrodynamics of a 20 Degree Deadrise Planing Surface*, Hydro-nautics, Inc., Technical Report 603-2, laurel, Md (1968).
8. Fridsma, G., *A Systematic Study of Rough-Water Performance of Planning Boats*, Davidson Laboratory, Report No. 1275, Stevens Institute of Technology, Hoboken, N.J (1969).
9. Fridsma, G., *A Systematic Study of Rough-Water Performance of Planning Boats (Irregular Waves-Parts 2)*, Davidson Laboratory, Report No. DL-71-1495, Stevens Institute of Technology, Hoboken, N.J (1971).
10. Ogilvie, T.F. and Shen, Y-T., *Flutter-Like Oscillations of a Planning Plate*, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Report No. 146, The University of Michigan, Ann Arbor (1973).
11. De Zwaan, A.P., *Oscillation Eproeven Met Even Planerendo Wig*, Report No. 376.M, Baboratorium voor scheepsbouwkunde, Technische Hogeschool, Delf, The Netherland (1973).
12. Martin, M. "Theoretical determination of porpoising instability of high speed planning boats", *Journal of Ship Research*, **22**(1), pp. 32-53 (March 1978a).
13. Zarnick, E.E., *A Nonlinear Mathematical Model of Motions of Planning Boats in Regular Head Waves*, Report 78-032, DTNSRDC (March 1978).
14. White, J.A. and Savitsky, D. "Seakeeping predictions for USCG hard chine patrol boats", SNAME, New York Metropolitan Section (June 1988).
15. Troesch, A.W. "On the hydrodynamics of vertically oscillating planning hulls", *Journal of Ship Research*, **36**(4), (1992).
16. Grigoropoulos, G.J. and et.al. "Transient waves for ship and floating structure testing", *Elsevier Science, Applied Ocean Research*, **16**(2), pp. 71-85 (1994).
17. Journee, J.M.J. "Comparative motion calculations of flokstra container ship model", Delft University of Technology, Netherlands, Updated 2001 (April 1997).
18. Moulijken, J.C. "Motions and added resistance due to waves of surface effect ships", Delft University of Technology, Netherlands (April 1998).
19. Stephen, C., Cook, M. and Klaka, K. "Investigation into wave loads and catamarans", *Hydrodynamics of High Speed Craft Conference (RINA)*, London, UK (24-25 November 1999).
20. Pelaez, J.J. and Gonzalez, V. "Numerical and expeiimental study on the seakeeping performance of a fast round-bilge monohull", To be Presented at the 4th International Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, Osaka, Japan (17-21 Oct. 2000).
21. Christopher, D., Barry, D., Richard, A. and Andrew, U. "Implementation, Application and validation of the Zarnick strip theory analysis technique for planning boats", Delft University of Technology, Netherlands, Updated 2001 (April 1997).
22. Hudson, D.A., Molland, A.F., Price, W.G. and Temarel, P. "Seakeeping performance of high speed catamaran vessels in head and oblique waves", *Sixth International Conference on Fast Sea Transportation*, London, UK, the Royal Institution of Naval Architects (2001).
23. Zhou, Zh. "A theory and analysis of planning catamarans in calm and rough water", PhD Thesis. University of New Orleans (2003).
24. Wu, G.X. "Numerical simulation of water entry of twin wedges", *Journal of Fluids and Structures*, **22**, (2006).
25. Lewis, S.G., Hudson, D.A., Turnock, S.R., Blake, JIR. and Sheno, R.A. "Predicting motions of high speed RIBs: A comparison of non-linear strip theory with experiments", *Proceedings of the 5th International Conference on High Performance Marine Vehicles (HIPER'06)*, Launceston, Australia (2006).
26. Faltinsen, O.M. and Sun, H. "Hydrodynamic forces on a planning hull in forced heave or pitch motions in calm water", 22 nd IWWFEB, Plitvice, Croatia (2007).
27. Seif, M.S., Panahi, R. and Jahanbakhsh, E. "Towards simulation of 3D nonlinear high-speed vessels motion", *Ocean Engineering*, **36**, pp. 256-265 (2009).
28. Wang, Z., Niu, J., Qin, Z. and Pang, Y. "The computation resistance of planning craft based on the CFD techniques", *14th Conference on China Ocean Engineering*, Hohhot (2009).

29. Shuo, W., Yumin, S. and Zhang, X. "RANSE simulation of high-speed planning craft in regular waves", *International Journal of Intelligent Engineering & Systems*, pp.447-452 (2012).
30. Morabiro, G. "Experimental investigation of the lift and interference of asymmetric planning catamaran demi-hulls", *11th International Conference on Fast Sea Transportation*, Honolulu, Hawaii, USA (September 2011).
31. Faltinsen, O.M., *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*, Camb. Univ. Press, New York (2005).
32. Bouscasse, B., Broglia, R. and Stern, F. "Experimental investigation of a fast catamaran in head waves", *Ocean Engineering*, **72**, (2013).