مطالعه‌ی عددی حرکات و مقاومت افزوده‌ی کشتی کانتینربر ایران بوشهر در امواج منظم با استفاده از نرم‌افزار +STAR-CCM

امیرحسین امیری[۱] ، محسن شاکری[۲] ، عباس رامیار[۳] ، مصطفی جعفرزاده خطیبیانی[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد معماری کشتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، amirhossein.amiri47@gmail.com
[۲] استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، shakeri@nit.ac.ir
[۳] دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، aramiar@nit.ac.ir
[۴] عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، m.jafarzadeh@kmsu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۸

کلمات کلیدی:
دینامیک سیالات محاسباتی
دریای آرام
امواج منظم
مقاومت افزوده
دریامانی

چکیده

امروزه در بحث طراحی و ساخت کشتی، استفاده بهینه از انرژی، افزایش سرعت، کاهش مصرف سوخت و جلوگیری از آلودگی محیط زیست، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ بنابراین ارزیابی عملکرد کشتی در شرایط دریای مواج، به دلیل افزایش مقاومت کشتی، افزایش مصرف سوخت و به دنبال آن افزایش آلودگی‌های زیست محیطی، حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، به حل عددی مدل کشتی کانتینربر ایران بوشهر در آب آرام جهت شبیه‌سازی جریان سطح آزاد اطراف بدنه و برآورد نیروی مقاومت کل و سپس پیش‌بینی حرکات کشتی با دو درجه آزادی هیو و پیچ تحت امواج منظم با زاویه‌ی برخورد ۱۸۰ درجه پرداخته شده است. در انتها نتایج حاصل از شبیه‌سازی کشتی در شرایط مختلف ارائه و مقایسه گردیده است. جهت اعتبارسنجی روش حل، از مدل کشتی KCS استفاده شد. شبیه‌سازی عددی جهت حل جریان ناپایدار سه‌بعدی تراکم ناپذیر، بر پایه‌ی RANS ناپایدار در +STAR-CCM انجام شده است.

Numerical study of Iran-Bushehr Container Ship motions and added resistance in regular head waves using STAR-CCM+

Amirhossein Amiri[1], Mohsen Shakeri[2], Abas Ramiar[3], Mostafa Jafarzadeh Khatibani[4]

[1] M.Sc. Student, Babol Noshirvani University of Technology; amirhossein.amiri47@gmail.com
[2] Professor, Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology; shakeri@nit.ac.ir
[3] Associate Professor, Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology; aramiar@nit.ac.ir
[4] Associate Lecturer, Marine Engineering, Khoramshahr Marine Science and Technology University; m.jafarzadeh@kmsu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 26 Jun. 2019
Accepted: 06 Apr. 2020

Keywords:
CFD
Calm water
Regular head waves
Added resistance
Seakeeping

ABSTRACT

Nowadays, the optimal use of energy, speed increase, fuel consumption reduction and environmental pollution prevention are essential in the ship design and manufacturing discussion. So it is critical to be able to estimate ship's response to waves, since the resulting added resistance and increasing fuel consumption also increasing environmental pollution. In this study, the numerical solution of the Iran-Bushehr container ship model was determined to simulate the free surface flow around the hull and estimate the total resistance and investigate ship motions in 2 degree-of-freedom (heave and pitch) in regular head waves. Finally, the results of simulation in different conditions are presented and compared. KCS container ship used for validation. CFD codes in Star-CCM+ used to calculate three dimensional, incompressible, unsteady RANS equations.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

۱- مقدمه

از آغاز انقلاب صنعتی، صنعت حمل و نقل دریایی یک صنعت پررونق بوده و در حال حاضر به عنوان یکی از بزرگ‌ترین صنایع جهان شناخته می‌شود. با گسترش روزافزون تجارت جهانی، معاملات بین‌المللی و واردات و صادرات بین کشورها، تعداد و مقدار حمل و نقل کالا روز به روز در حال افزایش است. با وجود راه‌های زمینی و هوایی، بیشتر محموله‌ها از طریق دریاها و اقیانوس‌ها توسط کشتی‌های مخصوص بار، جابجا می‌شوند که در این بین، کشتی کانتینربر به دلیل سهولت در بارگیری و تخلیه، جایگاه ویژه‌ای دارد. مطابق شکل ۱، کشتی کانتینربر با سهم ۲۳٪ از انتشار کل گاز کربن دی‌اکسید تولید شده توسط کشتی‌ها، به عنوان اولین و بزرگ‌ترین تولید کننده‌ی گاز کربن دی‌اکسید در صنعت حمل و نقل دریایی شناخته می‌شود [۱].

قابل ذکر است که هزینه‌ی سوخت یک کشتی تجاری معمولی، بیش از نیمی از هزینه‌های عملیاتی آن می‌باشد؛ در حالی که برای یک کشتی کانتینربر، این مقدار ممکن است به ۷۵٪ برسد [۲].



شکل ۱- انتشار گاز CO_2 بر اساس نوع کشتی [۱]

مطابق آنچه گفته شد، ارزیابی عملکرد کشتی به‌خصوص برای کشتی کانتینربر، یک گام مهم جهت کنترل مصرف سوخت، استفاده‌ی بهینه از انرژی و جلوگیری از گرمایش کره‌ی زمین می‌باشد.

درک رفتار یک کشتی در دریای واقعی، برای تعیین عملکرد آن، موضوع مهم و حیاتی می‌باشد. شرایط ناهموار دریا باعث ایجاد حرکات کشتی، افزایش مقاومت، کاهش بهره‌وری حرکتی و افزایش مصرف سوخت می‌گردد. همچنین رفتار و حرکات کشتی در امواج، برای خدمه و ایمنی حمل و نقل بسیار اهمیت دارد. بنابراین نیاز به آگاهی از تأثیرات حرکات کشتی حیاتی است.

استفاده از مدل‌های عددی برای پیش‌بینی عملکرد کشتی در مرحله طراحی اولیه در حال فراگیرشدن است. روش دینامیک سیالات محاسباتی[1] انتخاب مناسبی در زمینه پیش‌بینی رفتار کشتی است. به دلیل پیچیدگی ساخت شناور مدل، هزینه‌بر بودن آزمایش تجربی در حوضچه کشش و پیچیدگی هندسه در برخی مسائل، از روش‌های شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزارهای CFD استفاده می‌شود. در گذشته روش‌های CFD بر پایه‌ی تئوری جریان پتانسیل بودند، زیرا حل معادلات ناویر-استوکس دشوار بود. با پیشرفت‌های اخیر در فن‌آوری محاسبات، محققان قادر شدند تا مسائل مربوط به صنعت کشتی‌سازی را با استفاده از معادلات میانگین‌گیری رینولدز[2] حل کنند. به کمک شبیه‌سازی می‌توان مؤلفه‌هایی نظیر انواع مقاومت (فشاری، اصطکاکی، موج‌سازی و ...)، الگوی امواج تولیدشده ناشی از حرکات کشتی، تحلیل دریامانی کشتی، مانور کشتی و ... را با دقت مناسبی در شرایط مختلف دریایی و سرعت‌های متفاوت کشتی محاسبه کرد. با این حال دستیابی به تمام خواسته‌های هیدرودینامیکی به دلیل گستردگی و پیچیدگی جریان و تأثیر متقابل اجزا و مسائل بر یکدیگر امکان‌پذیر نیست. بنابراین ناچار به ساده‌سازی هندسه و جریان و همچنین صرف نظر از برخی ویژگی‌های هیدرودینامیکی خواهیم بود. اگرچه با گسترش هرچه بیشتر قدرت محاسباتی و دانش عددی، توانایی مدل‌سازی و محاسبه‌ی کامل پدیده‌های طبیعی، امکان‌پذیر می‌گردد.

اکثریت روش‌های موجود پیش‌بینی حرکات کشتی مانند مقاومت افزوده در امواج، بر پایه‌ی تئوری جریان پتانسیل به همراه اثرات سطح آزاد است. با این حال، بسیاری از مطالعات قبلی مانند اشمیتکه [۳] در سال ۱۹۷۸ نشان داده‌اند که اثرات ویسکوز به‌خصوص در امواج با دامنه‌ی بالا و اعداد فرود بالا، مهم‌ترین عامل است. نیومن [۴] در سال ۱۹۷۸ دریافت که حل تئوری نواری در اعداد فرود بالا و برخی از امواج، ناقص است. فالتینسن و ژائو [۵]در سال ۱۹۹۱ دلیل این نقصان را تأثیرات سرعت و ماهیت پیچیده‌ی امواج اعلام کردند. بک و رییید [۶] در سال ۲۰۰۱ تخمین زدند که بیش از ۸۰٪ از محاسبات دریامانی تا قبل از سال ۲۰۰۰، از روش تئوری نواری انجام شده است. دلیل استفاده‌ی گسترده از این تئوری، دستیابی سریع به حل، به دلیل ساده‌سازی هندسه کشتی است. در نتیجه محققان به دلیل تفاوت بین نتایج نظریه تئوری نواری و نتایج آزمایشگاهی برای کشتی‌های سریع و یا کشتی‌هایی با هندسه‌ی پیچیده، از تئوری‌های پیشرفته‌تر مانند میانگین‌گیری رینولدز ناپایدار و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده کردند.

سیمونسن و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۳، دریافتند که اثراتی که در تئوری پتانسیل نادیده گرفته می‌شوند، مانند شکست امواج، آشفتگی و ویسکوزیته، باید مستقیماً از روش‌های عددی محاسبه شوند. به عنوان مثال، روش‌های RANS جایگزین مناسبی برای تئوری پتانسیل هستند زیرا در این معادلات، مستقیماً اثرات ویسکوز لحاظ می‌گردد. هاچبام و ووت [۸] در سال ۲۰۰۲، یک کشتی کانتینربر را در سه درجه آزادی سرج، هیو و پیچ در آب مواج شبیه‌سازی کردند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

از شبیه‌سازی CFD برای کشتی‌های با هندسه‌ی پیچیده نیز استفاده می‌شود. کاریکا و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۸، حرکات مدل کشتی DTMB 5415 را در امواج با دامنه‌ی کم را بررسی کردند و به نتایج قابل قبولی در مقایسه با آزمایش تجربی دست یافتند. کانداسامی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۱، نشان دادند نتایج حل عددی معادلات RANS برای کشتی‌های پر سرعت مانند کاتاماران، به خوبی با نتایج تجربی هم‌خوانی دارد. سیمونسن و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۳، با مقایسه‌ی نتایج حل عددی و آزمایش تجربی کشتی کانتینربر KCS در دریای آرام و مواج با موج از رو به‌رو در دامنه های موج بالا و همچنین مطالعه‌ی پدیده‌ی تشدید، به نتایج کاملاً نزدیک و قابل قبولی دست یافتند. لازم به ذکر است که در اکثر محاسبات، از مدل آشفتگی k-ε استفاده شده و در برخی از بررسی‌ها، به دلیل کوچک بودن حرکات کشتی در آب آرام، شبیه‌سازی به صورت کشتی ثابت انجام شده است.

در پژوهش حا ضر، به حل عددی جریان اطراف بدنه‌ی مدل کشتی کانتینربر ایران بو شهر پرداخته شده است. شبیه سازی کشتی در نرم‌افزار +STAR-CCM، در آب آرام و آب مواج با زاویه‌ی برخورد موج ۱۸۰ درجه و دو درجه آزادی هیو و پیچ، انجام شده است.

۲- معادلات اساسی حاکم

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی جهت حل جریان، بر پایه‌ی RANS ناپایدار انجام شده است. بنابراین معادلات حاکم، معادلات RANS و معادلات پایستگی جرم و اندازه حرکت برای جریان ناپایدار سه بعدی تراکم ناپذیر با سرعت متوسط می‌باشد.

معادله‌ی پایستگی جرم:

$$\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{x_j}} = 0 \qquad (۱)$$

و معادله‌ی اندازه حرکت سیال:

$$\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial (\mathrm{U_i U_j})}{\partial \mathrm{x_j}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{x_i}} + \frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}\left[\nu\left(\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{x_j}} + \frac{\partial \mathrm{U_j}}{\partial \mathrm{x_i}}\right)\right] - \frac{\partial(\overline{\acute{\mathrm{u}}_\mathrm{i}\acute{\mathrm{u}}_\mathrm{j}})}{\partial \mathrm{x_j}} = 0 \qquad (۲)$$

به طوری که $\mathrm{U_i}$ و $\acute{\mathrm{u}}_\mathrm{i}$ بیان کننده‌ی سرعت متوسط و نوسانات سرعت در راستای محور مختصات $\mathrm{x_i}$، P فشار متوسط، ρ چگالی و ν ویسکوزیته ی سینماتیک می‌باشد.

تنش رینولدز نیز طبق معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{\acute{\mathrm{u}}_\mathrm{i}\acute{\mathrm{u}}_\mathrm{j}} = -\mathrm{v_t}\left(\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{x_j}} + \frac{\partial \mathrm{U_j}}{\partial \mathrm{x_i}}\right) + \frac{2}{3}\delta_{\mathrm{ij}}k \qquad (۳)$$

که در آن $\mathrm{v_t}$ ویسکوزیته‌ی ادی است و برابر است با:

$$\mathrm{v_t} = \mathrm{C_\mu} k^2/\varepsilon \qquad (۴)$$

به طوری که $\mathrm{C_\mu}$ ثابت تجربی و k انرژی جنبشی و ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی جریان آشفته می‌باشد.

به منظور شبیه سازی آشفتگی جریان اطراف بدنه کشتی، از مدل آشفتگی دو معادله‌ای k-ε استفاده شده است. معادلات انتقال k و ε در این مدل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial k}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial (k\mathrm{U_j})}{\partial \mathrm{x_j}} = \frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}\left[\left(\nu + \frac{\mathrm{v_t}}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial \mathrm{x_j}}\right] + \mathrm{P}_k - \varepsilon \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial (\varepsilon \mathrm{U_j})}{\partial \mathrm{x_i}} = \frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}\left[\left(\nu + \frac{\mathrm{v_t}}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{x_j}}\right] + \frac{\varepsilon}{k}\mathrm{C_{\varepsilon 1}}\mathrm{P}_k - \frac{\varepsilon^2}{k}\mathrm{C_{\varepsilon 2}} \qquad (۶)$$

$$\mathrm{P}_k = -\overline{\acute{\mathrm{u}}_\mathrm{i}\acute{\mathrm{u}}_\mathrm{j}}\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{x_j}} \qquad (۷)$$

ضرایب ثابت این مدل آشفتگی، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ضرایب مدل آشفتگی k-ε

ضریب	$\mathrm{C_\mu}$	$\mathrm{C_{\varepsilon 1}}$	$\mathrm{C_{\varepsilon 2}}$	σ_k	σ_ε
مقدار	۰,۰۹	۱,۴۴	۱,۹۲	۱,۰۰	۱,۳۰

جهت مدل‌سازی جریان سطح آزاد از روش حل جریان دو فازی کسر حجمی سیال[۳] استفاده شده است. با تعریف α به عنوان نسبت حجم سیال ۱ به کل سیال، جهت تعیین سطح آزاد معادله‌ی زیر نوشته می‌شود:

$$\phi = \phi_1\alpha + \phi_2(1-\alpha) \qquad (۸)$$

به طوری که ϕ به عنوان یک خاصیت فیزیکی همانند چگالی، ویسکوزیته و غیره در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} \alpha = 1 & \text{درون سیال ۱} \\ \alpha = 0 & \text{درون سیال ۲} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{مرز مشترک دو سیال} \end{cases} \qquad (۹)$$

قابل ذکر است که α برابر با ۰,۵ به این معناست که سلول محاسبه شده با ۵۰ در صد آب و ۵۰ در صد هوا پر شده است که موقعیت سطح برخورد بین آب و هوا موسوم به سطح آزاد را معرفی می‌کند.

به منظور شبیه سازی حرکات کشتی، از مدل DFBI[۴] با دو درجه آزادی حرکات هیو و پیچ استفاده شده است. از مدل DFBI در حل‌گر RANS جهت محاسبه‌ی نیروها و ممان‌های نا شی از امواج بر بدنه‌ی کشتی و حل معادلات حاکم حرکت جسم صلب استفاده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

۳- معرفی مدل هندسی، دامنه حل و شبکه‌بندی

۳-۱- مدل هندسی

با توجه به اینکه در این پژوهش، بدنه‌ی کشتی کانتینربر ایران بو شهر به عنوان هند سه‌ی ا صلی جهت شبیه سازی انتخاب شده است، مشخصات ابعاد کشتی ایران بوشهر و مدل برگزیده شده، در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نمای سه‌بعدی از مدل کشتی در شکل ۱ آورده شده است.

جدول ۲- ابعاد اصلی و مدل کشتی ایران بوشهر

عنوان	نماد و واحد	کشتی اصلی	کشتی مدل
	λ	۱	۵۰
طول کلی	L_{OA} (m)	۱۸۷,۳۵	۳,۷۴۷
طول بین دو عمود	L_{PP} (m)	۱۷۷,۰۸	۳,۵۴۱
عرض کلی	B (m)	۲۹,۸	۰,۵۹۶
ارتفاع کلی	D (m)	۱۶,۵	۰,۳۳۰
آبخور	T (m)	۱۱,۵۵	۰,۲۳۱
ضریب بلوکی	C_B	۰,۶۳۶	۰,۶۳۶
سرعت	V (m/s)	۱۰,۸۰	۱,۵۲۸
عدد فرود	F_r	۰,۲۶	۰,۲۶



شکل ۱- نمای سه‌بعدی از هندسه‌ی کشتی ایران بوشهر

۳-۲- دامنه حل

انتخاب دامنه محاسباتی متناسب با نوع مسئله، یکی از مهم‌ترین بخش‌های شبیه‌سازی و تحلیل کشتی می‌باشد. در صورتی که ابعاد دامنه مناسب نباشد، سبب بروز خطا در نتایج شده و یا زمان حل و هزینه‌های محاسباتی را افزایش می‌دهد. در پژوهش حاضر، با توجه به نوع مسئله از دامنه‌های محاسباتی متفاوتی در شرایط آب آرام و دریای مواج استفاده شده است. مشخصات کلی دامنه محاسباتی آب آرام و دریای مواج در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات کلی دامنه محاسباتی آب آرام و دریای مواج

موقعیت	مبدأ	بر حسب L_{PP}	بر حسب متر
ورودی	مرکز جرم	۱,۸۵	۶,۵
خروجی	مرکز جرم	۴,۲۵	۱۵
کناره	محور تقارن طولی	۱,۷	۶
بالا	خط آب	۱,۱۳	۴
پایین	خط آب	۱,۱۳	۴

۳-۲-۱- دامنه محاسباتی آب آرام

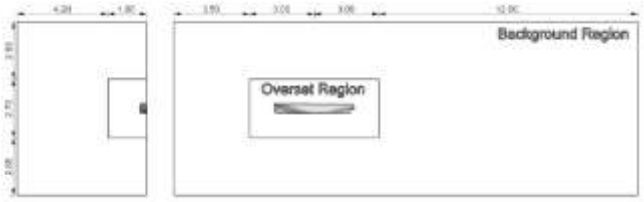
به دلیل ثابت بودن کشتی در تحلیل آب آرام، نیازی به استفاده از مش متحرک نیست. بنابراین از دامنه ثابت با ابعاد مشخص شده در جدول ۳، استفاده شده است. ابعاد این دامنه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- ابعاد دامنه محاسباتی آب آرام

۳-۲-۲- دامنه محاسباتی دریای مواج

با توجه به دو درجه آزادی هیو و پیچ کشتی در دریای مواج و به منظور تسهیل حرکات کشتی، از مش متحرک اُورِست[5] استفاده شده ا ست. بنابراین از دامنه محا سباتی همانند شکل ۳، ا ستفاده شده است. لازم به ذکر است که ابعاد کلی این دامنه نیز مطابق جدول ۳ می‌باشد. به طور کلی دامنه‌ی دریای مواج، از دو قسمت ناحیه‌ی مش اُورِست و ناحیه‌ی پس‌زمینه تشکیل شده است. در مش اُور ِست ، ناحیه‌ی اُور ِست بر روی ناحیه‌ی پس‌زمینه می‌لغزد و حرکات کشتی به راحتی شبیه‌سازی می‌شود. همچنین کیفیت مش در سطح آزاد و اطراف بدنه کشتی، بالا بوده و به تعداد مش کمتری نیاز دارد.

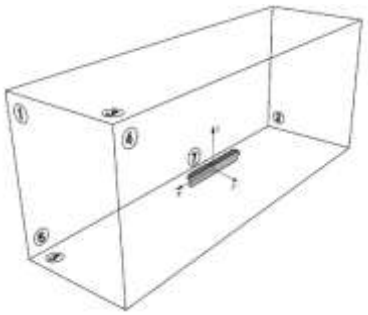


شکل ۳- ابعاد دامنه محاسباتی دریای مواج

۳-۳- شرایط مرزی

شرایط اولیه و مرزی بر اساس نوع مسئله و هدف حل انتخاب می‌گردد. انتخاب شرایط مرزی، یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحلیل جهت رسیدن به جواب صحیح است. صفحات دامنه‌ی مکعب مستطیل استفاده شده جهت تحلیل در شکل ۴ شماره‌گذاری شده است. برای حل مسائل پژوهش حاضر، شرایط مرزی بسیاری وجود دارد؛ اما انتخاب مناسب‌ترین شرایط مرزی، مطابق آنچه که در جدول ۴ ارائه شده است، می‌تواند هزینه‌های محاسباتی غیرضروری را کاهش دهد. با اعمال این شرایط مرزی، سرعت حل مسئله به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]



شکل ۴- شماره‌گذاری صفحات دامنه محاسباتی

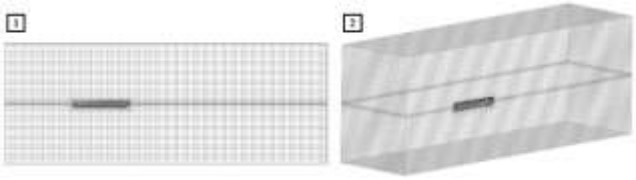
جدول ۴- شرایط مرزی دامنه محاسباتی

شماره صفحات	شرایط مرزی
۱	سرعت ورودی[۶]
۲	فشار خروجی[۷]
۳	سرعت ورودی
۴	صفحه‌ی تقارن[۸]
۵	سرعت ورودی
۶	سرعت ورودی
۷	دیواره بدون لغزش[۹]

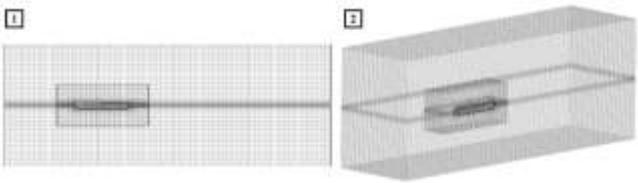
۳-۴- شبکه‌بندی

۳-۴-۱- شبکه‌بندی دامنه‌ی حل

به منظور شبکه‌بندی دامنه‌ی حل، از شبکه‌بندی خودکار[۱۰] با مش حجمی تریم[۱۱] به علت کیفیت بالای این نوع مش در سطح آزاد و هند سه‌ی پیچیده‌ی کشتی به خصوص در نواحی سینه و پاشنه، استفاده شده است. در شکل‌های ۵ و ۶، به ترتیب شبکه‌بندی دامنه حل در آب آرام و در دریای مواج آورده شده است.



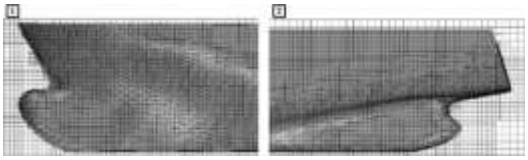
شکل ۵- شبکه‌بندی دامنه‌ی حل آب آرام در: ۱.نمای جانبی، ۲.نمای سه‌بعدی



شکل ۶- شبکه‌بندی دامنه‌ی حل دریای مواج در: ۱.نمای جانبی، ۲.نمای سه‌بعدی

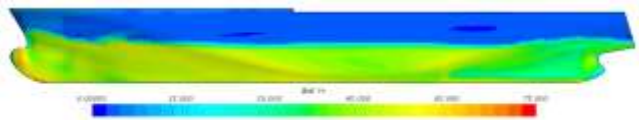
۳-۴-۲- شبکه‌بندی هندسه

شکل ۷، مش هندسه‌ی کشتی و نواحی اطراف آن را نشان می‌دهد. با توجه به انحنای بدنه در سینه و پاشنه‌ی کشتی، مش‌های ریزتری بکار گرفته شده است.



شکل ۷- مش بدنه‌ی کشتی، ۱.سینه کشتی، ۲.پاشنه کشتی

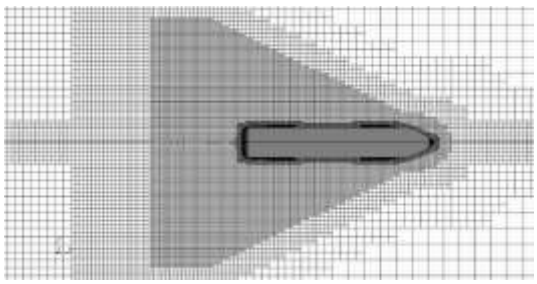
فاصله اولین گره تا سطح دیواره در نزدیکی بدنه کشتی، توسط مؤلفه‌ای با نماد y^+ تعیین می شود. y^+ در مدل آ شفتگی k-ε، بین ۳۰ تا ۳۰۰ در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر ا ست که مقادیر y^+ نزدیک به ۳۰، نتایج دقیق‌تری به همراه خواهند داشت. در شکل ۸، مقادیر y^+ بدنه‌ی مدل کشتی ایران بوشهر نشان داده شده است.



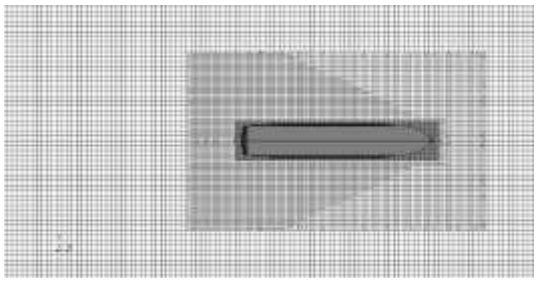
شکل ۸- y^+ بدنه مدل کشتی ایران بوشهر

۳-۴-۳- شبکه‌بندی سطح آزاد

به منظور بهبود کیفیت مش و اطمینان از صحت نتایج، تراکم شبکه‌های تولید شده در سینه، پاشنه و نواحی اطراف بدنه‌ی کشتی، بیشتر شده است. شبکه‌بندی سطح آزاد آب آرام و دریای مواج در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹- مش سطح آزاد دامنه‌ی آب آرام



شکل ۱۰- مش سطح آزاد دامنه‌ی دریای مواج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

۵-۳- استقلال از شبکه

اندازه‌ی مش در نتایج تحلیل بسیار تأثیرگذار می‌باشد؛ به طوری که درشت بودن مش سبب ایجاد خطا در تحلیل می‌شود. بنابراین بهتر است سایز مش‌ها تا حد امکان ریز باشد. با افزایش تعداد مش‌ها، حجم محاسبات افزایش می‌یابد. بنابراین اندازه و تعداد مش‌ها به گونه‌ای انتخاب می شود که نتایج با کمترین خطا محا سبه شوند و سخت‌افزارهای در دسترس، توانایی انجام محاسبات را داشته باشند. در جداول ۵ و ۶، به ترتیب ضریب مقاومت کل دامنه‌ی آب آرام و دریای مواج مدل کشتی ایران بوشهر در هر شبکه بر حسب اندازه‌ی مش ارائه شده است.

جدول ۵- استقلال مش دامنه‌ی حل آب آرام

اندازه‌ی مش	آب آرام		
	تعداد مش	ضریب مقاومت کل ($\times 10^3$)	درصد خطا
درشت	۸۵۰۹۲۹	۴,۶۳	-
متوسط	۱۱۹۱۵۲۵	۴,۴۲	۴,۵۴٪
ریز	۱۶۶۸۷۲۴	۴,۳۲	۲,۲۶٪
بسیار ریز	۲۳۳۵۶۱۳	۴,۲۷	۱,۱۶٪

جدول ۶- استقلال مش دامنه‌ی حل دریای مواج

اندازه‌ی مش	دریای مواج		
	تعداد مش	ضریب مقاومت کل ($\times 10^3$)	درصد خطا
درشت	۱۳۹۷۵۲۵	۷,۰۲	-
متوسط	۱۵۶۳۶۴۲	۶,۷۵	۳,۸۵٪
ریز	۲۲۰۸۹۳۹	۶,۵۹	۲,۳۷٪
بسیار ریز	۲۸۳۰۸۴۷	۶,۵۰	۱,۳۷٪

همان‌طور که مشخص است، با افزایش تعداد مش، ضریب مقاومت کل کاهش پیدا می‌کند. با توجه به اهمیت خطا در پژوهش حاضر، سعی شده است که نتایج با کمترین خطا و بیشترین کیفیت محاسبه شوند. به همین دلیل با وجود در صد خطای قابل قبول در مش متوسط، از مش ریز استفاده شده است.

جهت محاسبه‌ی همگرایی مش، از نسبت تغییرات زیر استفاده می‌شود:

$$R_G = \frac{\epsilon_{21}}{\epsilon_{32}} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_3 - \epsilon_2} \qquad (۱۰)$$

$$\begin{cases} 0 < R_G < 1 & \text{همگرایی} \\ R_G < 0 & \text{نوسانی} \\ R_G > 1 & \text{واگرایی} \end{cases} \qquad (۱۱)$$

که ϵ_1، ϵ_2 و ϵ_3 به ترتیب مقاومت کل حاصل از مش ریز، متوسط و درشت ارائه شده در جداول ۵ و ۶ می‌باشد. بنابراین با انتخاب مش ریز به عنوان مش اصلی، نسبت تغییرات ضریب مقاومت کل در آب آرام ۰,۴۸ و در آب مواج ۰,۵۹ می‌باشد که در هر دو شرایط، همگرایی مش تائید شده است.

۴- مدل‌سازی حرکات کشتی

۴-۱- مدل‌سازی در آب آرام

مطابق جدول ۲، مدل کشتی در آب آرام با سرعت ۱,۵۲۸ متر بر ثانیه، در عدد فرود ۰,۲۶ شبیه‌سازی شده است.

به طور کلی، مقاومت کل کشتی در آب آرام، از دو مؤلفه‌ی اصلی مقاومت اصطکاکی و مقاومت باقیمانده تشکیل شده است. ضریب مقاومت باقیمانده C_R برابر با اختلاف ضریب مقاومت کل C_T و ضریب مقاومت اصطکاکی C_F است.

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho A V^2} \qquad (۱۲)$$

به طوری که R_T نیروی مقاومت کل، A مساحت سطح خیس کشتی و V سرعت کشتی می‌باشد. C_F نیز با انتگرال گیری از تنش برشی سطح خیس کشتی بدست می آید.

۴-۲- مدل‌سازی در دریای مواج

در حالت کلی، امواج در دریا نامنظم و به صورت تصادفی هستند. بررسی و تحلیل رفتار کشتی در این امواج امری پیچیده و دشوار است. بنابراین به منظور بررسی رفتار کشتی، امواج را به صورت مجموعه‌ای از امواج منظم در نظر گرفته می‌شود

برای یک موج ساده سینوسی در آب عمیق، موقعیت مکانی سطح موج ξ، طبق معادله‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\xi = \xi_a \cos(kx - 2\pi f_e t) \qquad (۱۴)$$

که در آن ξ_a دامنه‌ی موج، k عدد موج، f_e فرکانس برخورد موج می‌باشد؛ به طوری که:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (۱۵)$$

که λ طول موج است.

فرکانس برخورد موج از روبه‌رو کشتی برابر است با:

$$f_e = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}} + \frac{V}{\lambda} \qquad (۱۶)$$

در صورتی که فرکانس برخورد موج برابر با فرکانس طبیعی کشتی شود و یا در محدوده‌ی آن قرار گیرد، پدیده‌ی رزونانس رخ خواهد داد که در این حالت کشتی در شرایط بحرانی قرار می‌گیرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

جدول ۷- مشخصات موج شبیه‌سازی شده

شرایط موج	سرعت (متر/ثانیه)	عدد فرود	طول موج (متر)	دوره تناوب برخورد موج (ثانیه)	ξ_w (متر)	$\frac{\lambda}{L_{PP}}$
موج ۱	۱,۵۲۸	۰,۲۶	۴,۰۷	۱,۰۱	۰,۰۶۲۵	۱,۱۵
موج ۲	۱,۵۲۸	۰,۲۶	۴,۷۱	۱,۱۱	۰,۰۶۲۵	۱,۳۳
موج ۳	۱,۵۲۸	۰,۲۶	۵,۳۱	۱,۲۰	۰,۰۶۲۵	۱,۵۰
موج ۴	۱,۵۲۸	۰,۲۶	۷,۰۸	۱,۴۶	۰,۰۶۲۵	۲,۰۰

در صورتی که فرکانس برخورد موج برابر با فرکانس طبیعی کشتی شود و یا در محدوده‌ی آن قرار گیرد، پدیده‌ی رزونانس رخ خواهد داد که در این حالت کشتی در شرایط بحرانی قرار می‌گیرد. معمولاً بیشترین نیرو و ممان تحریک یک کشتی در محدوده‌ی $\frac{\lambda}{L_{PP}}$ برابر با ۱,۳۳ رخ خواهد داد.

حرکات مدل کشتی ایران بوشهر بر اثر برخورد چهار موج مختلف، مطابق جدول ۷ شبیه‌سازی شده است.

ξ_w واقع در جدول، بیانگر ارتفاع موج و دو برابر ξ_a می باشد. همچنین دوره تناوب برخورد موج به کشتی T_e برابر با $1/f_e$ است.

نتایج شبیه‌سازی دریای مواج، با توابع تبدیل حرکات هیو و پیچ ارائه می‌گردند. این توابع تبدیل بی‌بعد، عملگر دامنه‌ی پاسخ[۱۲] نام دارند. رائو هیو و پیچ کشتی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$TF_3 = \frac{x_{31}}{\xi_a} \quad (۱۷)$$

$$TF_5 = \frac{x_{51}}{k\xi_a} \quad (۱۸)$$

که در آن x_{31} و x_{51} اولین دامنه حرکت هیو و پیچ شناور می‌باشد.

اختلاف بین میانگین مقاومت کل در دریای مواج و مقاومت کل کشتی در دریای آرام را مقاومت افزوده می‌نامند. این مقاومت که ناشی از حرکات کشتی در آب مواج و نیروهای امواج است، طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{AW} = \overline{R_{T,Wave}} - R_{T,Calm} \quad (۱۹)$$

ضریب مقاومت افزوده C_{AW} مطابق فرمول زیر به دست می‌آید:

$$C_{AW} = \frac{R_{AW}}{\rho g {\xi_a}^2 B^2/L_{PP}} \quad (۲۰)$$

که در آن g شتاب گرانشی و B عرض کشتی است.

۵- نتایج

ابتدا به منظور بررسی دقت و صحت حل عددی، نتایج شبیه سازی توسط کشتی KCS ارائه می‌گردد.

۵-۱- اعتبارسنجی

بهترین راه اعتبارسنجی نتایج، مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی کشتی مدل با نتایج حاصل از حوضچه کشش می‌باشد. به دلیل در دسترس نبودن یا عدم آزمایش حوضچه کشش کشتی ایران بوشهر، تنها راه اعتبار سنجی نتایج و روش حل، شبیه سازی شناوری دیگر با دامنه، مش و شرایط مرزی مشابه پژوهش و درنهایت مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با آزمایش تجربی آن شناور می‌باشد.

۵-۱-۱- اعتبارسنجی نتایج آب آرام

جهت اعتبارسنجی نتایج و با توجه به هندسه‌ی پیچیده‌ی بدنه کشتی ایران بوشهر، شبیه‌سازی توسط کشتی کانتینربر KCS انجام شده است. ابعاد و مشخصات اصلی و مدل کشتی KCS، در جدول ۸ و شکل ۱۱ آورده شده است.

جدول ۸- ابعاد و مشخصات کشتی KCS

عنوان	نماد و واحد	کشتی اصلی	کشتی مدل
	λ	۱	۳۱,۶
طول بین دو عمود	**L_{PP} (m)**	۲۳۰	۷,۲۷۸
عرض کلی	**B (m)**	۳۲,۲	۱,۰۱۹
آبخور	**T (m)**	۱۰,۸	۰,۳۴۲
ضریب بلوکی	**C_B**	۰,۶۵	۰,۶۵
سرعت	**V (m/s)**	۱۲,۳۵	۲,۱۹۶
عدد فرود	**F_r**	۰,۲۶	۰,۲۶



شکل ۱۱- نمای سه‌بعدی از هندسه‌ی کانتینربر KCS

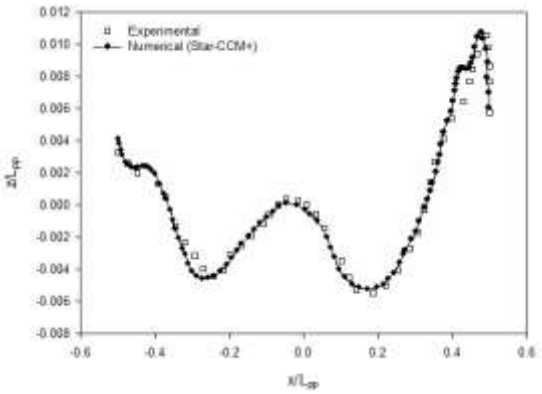
ابعاد دامنه و شرایط مرزی شبیه سازی، همانند آنچه در جدول ۳ و ۴ ارائه شد، انتخاب شده است.

نتایج به دست آمده با آزمایش تجربی کشتی در جدول ۹ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مقایسه شده است.

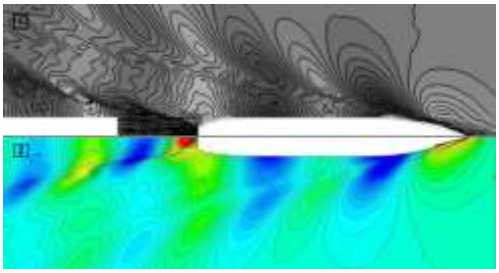
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

جدول ۹- ضرایب مقاومت کشتی KCS

نتایج ($\times 10^3$)	پژوهش حاضر	آزمایش تجربی [۱۱]
ضریب مقاومت اصطکاکی	۲,۸۶	۲,۸۳
ضریب مقاومت باقی‌مانده	۰,۷۵	۰,۷۳
ضریب مقاومت کل	۳,۶۱	۳,۵۶
درصد خطا ضریب مقاومت کل	۱,۴٪	-



شکل ۱۲- خط آب بر روی بدنه‌ی کشتی KCS



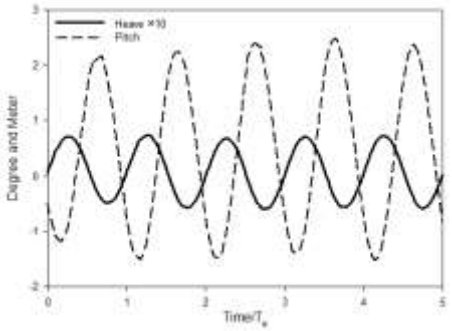
شکل ۱۳- الگوی موج کشتی KCS در آب آرام، ۱.حوضچه کشش، ۲.پژوهش حاضر

با توجه به خطای ۱,۴ درصدی ضریب مقاومت کل بدست آمده، تطابق خط آب روی بدنه کشتی و الگوی موج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حوضچه کشش، دقت و صحت شبیه‌سازی در آب آرام تائید شده است.

۲-۱-۵- اعتبارسنجی نتایج دریای مواج

جهت اعتبار سنجی نتایج دریای مواج، کشتی KCS با دو درجه آزادی هیو و پیچ، در موج ساده سینوسی از روبه‌رو، نسبت $\frac{\xi_w}{\lambda}$ برابر با $\frac{1}{60}$ و $\frac{\lambda}{L_{PP}}$ برابر با ۱,۱۵، شبیه‌سازی شده است. نتایج بدست آمده در جدول ۱۰ ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۴، دامنه حرکات هیو و پیچ کشتی KCS نشان داده شده است.

با توجه به درصد خطای کمتر ضریب مقاومت افزوده و توابع تبدیل هیو و پیچ پژوهش حاضر در مقایسه با شبیه‌سازی انجام شده توسط سیمونسن و همکاران [۷]، صحت و دقت شبیه‌سازی در دریای مواج تائید شده است.



شکل ۱۴- حرکات هیو و پیچ کشتی KCS

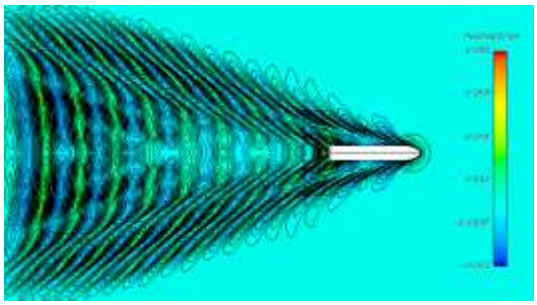
۲-۵- نتایج شبیه‌سازی کشتی ایران بوشهر در آب آرام

جهت برآورد نیروی مقاومت کل و محاسبه‌ی مقاومت افزوده کشتی در دریای مواج، شبیه‌سازی در آب آرام انجام شده است.

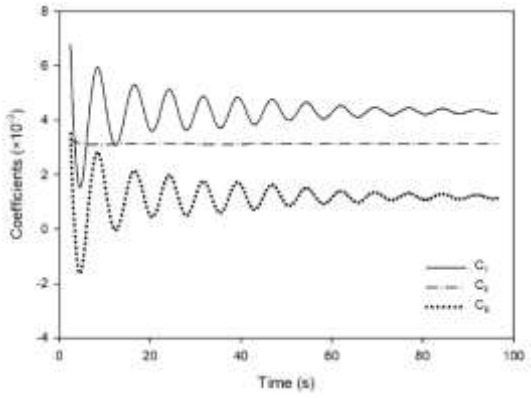
شکل ۱۵ الگوی موج تشکیل شده ناشی از حرکت مدل کشتی با سرعت ۱,۵۲۸ متر بر ثانیه، در آب آرام را نشان می‌دهد. تعدیل امواج در انتهای دامنه حاکی از انتخاب صحیح ابعاد دامنه محاسباتی است.

شکل ۱۶ نمودار همگرایی ضرایب مقاومت حرکت مدل کشتی در مدت زمان ۱۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از این شبیه‌سازی، در جدول ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۵- الگوی موج تشکیل شده در آب آرام



شکل ۱۶- ضرایب مقاومت کشتی ایران بوشهر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

جدول ۱۰- ضریب مقاومت افزوده و توابع تبدیل کشتی KCS

نتایج	آزمایش تجربی[۷]	سیمونسن و همکاران[۷]	درصد خطا	پژوهش حاضر	درصد خطا
ضریب مقاومت افزوده	۹,۱۰۶	۱۱,۰۷۴	۹,۰۳٪	۸,۳۷۴	۸,۰۴٪
تابع تبدیل هیو	۰,۹۵۰	۰,۸۶۱	۹,۳۷٪	۱,۰۲۸	٪۸,۲۱
تابع تبدیل پیچ	۰,۶۹۳	۰,۷۳۱	۵,۴۸٪	۰,۶۵۹	۴,۹۱٪

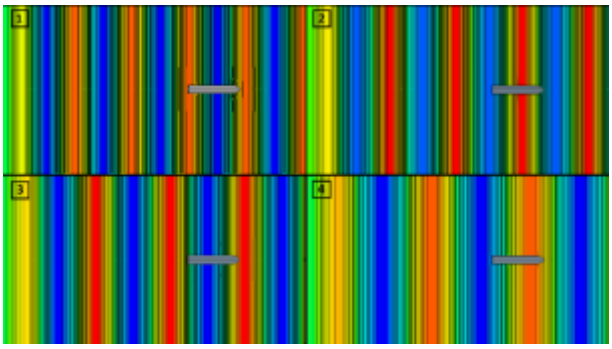
جدول ۱۱- ضرایب مقاومت کشتی ایران بوشهر در آب آرام

نتایج ($\times 10^3$)	پژوهش حاضر
ضریب مقاومت اصطکاکی	۳,۱۴
ضریب مقاومت باقی‌مانده	۱,۱۸
ضریب مقاومت کل	۴,۳۲

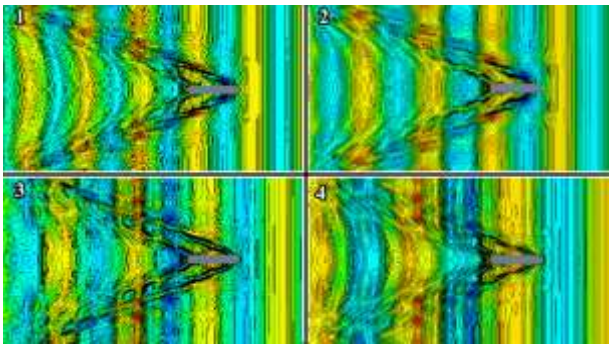
۳-۵- نتایج شبیه‌سازی کشتی ایران بوشهر در دریای مواج

حرکات مدل کشتی ایران بوشهر بر اثر برخورد چهار موج مختلف، مطابق جدول ۷ شبیه‌سازی شده است.

شکل ۱۷ الگوی موج پس از اعمال شرایط اولیه و شکل ۱۸، الگوی موج پس از اتمام حل را نشان می‌دهد.



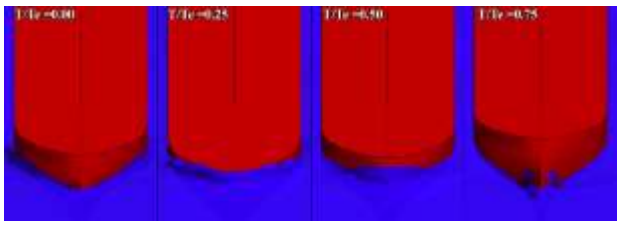
شکل ۱۷- الگوی موج پس از اعمال شرایط اولیه



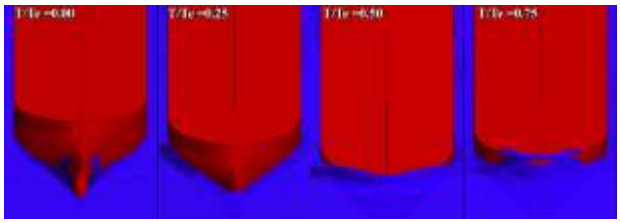
شکل ۱۸- الگوی موج پس از اتمام حل

به منظور مشاهده‌ی بهتر حرکات سینه‌ی کشتی در شرایط موج اعمال شده، موقعیت دماغه در دوره‌ی تناوب برخورد موج به کشتی در اشکال ۱۹ تا ۲۲، ارائه شده است؛ به طوری که شکست امواج قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که این اشکال پس از اتمام حل و در شرایط شبیه‌سازی پایدار ارائه شده‌اند.

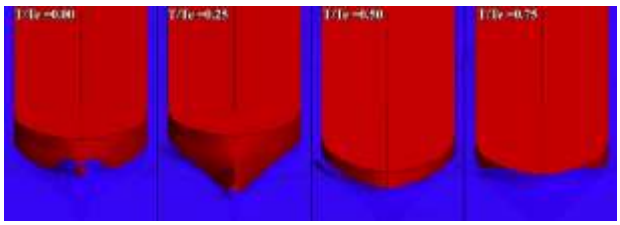
همچنین میانگین ضریب مقاومت کل مدل کشتی در شرایط موج اعمال شده و اختلاف نتایج بدست آمده با ضریب مقاومت کل شبیه‌سازی در آب آرام، در جدول ۱۲ ارائه شده است.



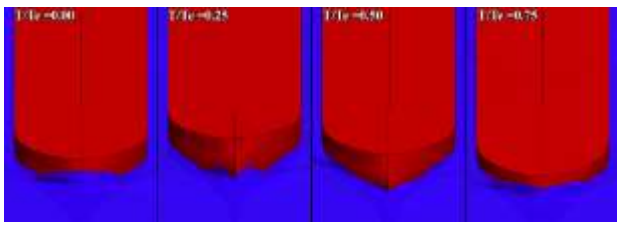
شکل ۱۹- حرکات دماغه کشتی در موج ۱



شکل ۲۰- حرکات دماغه کشتی در موج ۲



شکل ۲۱- حرکات دماغه کشتی در موج ۳



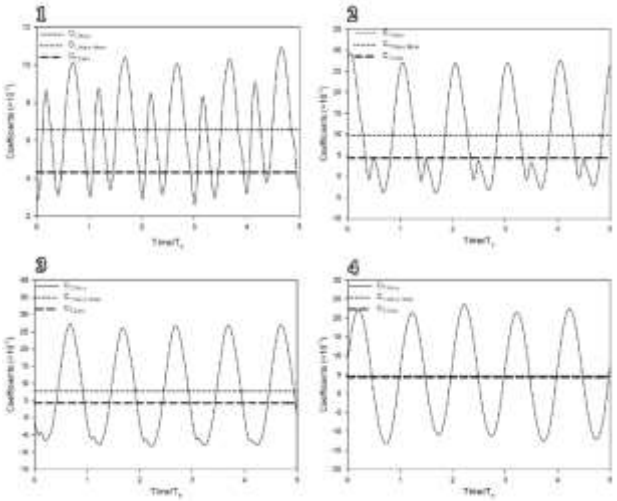
شکل ۲۲- حرکات دماغه کشتی در موج ۴

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

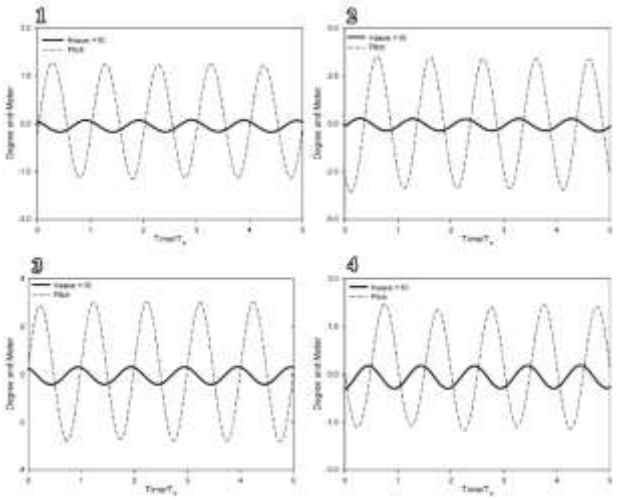
جدول ۱۲- ضریب مقاومت کل مدل کشتی ایران بوشهر

شرایط موج	ضریب مقاومت کل ($\times 10^3$)	٪ اختلاف با ضریب مقاومت کل در آب آرام
موج ۱	۶,۵۹	۵۲,۵۵
موج ۲	۹,۷۹	۱۲۶,۶۲
موج ۳	۷,۷۴	۷۹,۱۷
موج ۴	۴,۶۴	۷,۴۱

در شکل ۲۳، به ترتیب نمودار ضریب مقاومت کل مدل کشتی ایران بوشهر در آب آرام، در دریای مواج و همچنین میانگین ضریب مقاومت کل آن و در شکل ۲۴، نمودار حرکات هیو و پیچ کشتی، در پنج دوره‌ی تناوب برخورد امواج به کشتی، نشان داده شده است.



شکل ۲۳- مقایسه ضرایب مقاومت کل در آب آرام و امواج اعمال شده



شکل ۲۴- حرکات هیو و پیچ کشتی در امواج اعمال شده

ضریب مقاومت افزوده و توابع تبدیل هیو و پیچ کشتی ناشی از امواج اعمال شده، در جدول ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۱۳- ضریب مقاومت افزوده و توابع تبدیل هیو و پیچ کشتی

نتایج	موج ۱	موج ۲	موج ۳	موج ۴
ضریب مقاومت افزوده	۸,۱۱۳	۱۹,۵۴۲	۱۲,۲۴۳	۱,۱۴۷
تابع تبدیل هیو	۰,۵۸۹	۱,۰۳۶۸	۱,۱۷۸	۱,۱۴۶
تابع تبدیل پیچ	۰,۶۵۹	۱,۴۸۶	۱,۳۳۸	۱,۲۱۷

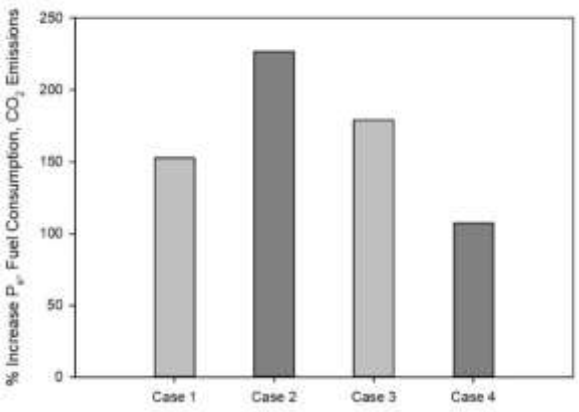
۴-۵- افزایش توان مؤثر[۱۳] بر اثر مقاومت افزوده

توان مؤثر، نیروی لازم جهت حرکت رو به جلوی کشتی با سرعت ثابت در آب می‌باشد؛ بنابراین به صورت تابعی از سرعت و مقاومت کل کشتی محاسبه می‌گردد. از توان مؤثر می‌توان به عنوان مؤلفه‌ای جهت محاسبه‌ی مصرف سوخت کشتی استفاده کرد. با توجه به اینکه مصرف سوخت کشتی به عواملی همچون بار موتور[۱۴]، مصرف سوخت مخصوص[۱۵]، سرعت پروانه و بسیاری از دیگر موارد مرتبط با شرایط عملیاتی کشتی، وابسته می‌باشد، به طور مستقیم امکان محاسبه‌ی آن وجود ندارد. با این حال، می‌توان درصد افزایش توان مؤثر بر اثر مقاومت افزوده را، مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$\%\ Increase\ P_E\ due\ R_{AW} = \frac{C_{T,Wave} - C_{T,Calm}}{C_{T,Calm}} \times 100 \quad (۲۱)$$

با فرض بر ثابت بودن راندمان و مصرف سوخت مخصوص کشتی، این معادله نشان دهنده‌ی مصرف سوخت و میزان انتشار گاز CO_2 کشتی می‌باشد.

در نمودار شکل ۲۵، میزان افزایش در صد توان، مصرف سوخت و انتشار گاز CO_2 کشتی ایران بوشهر، نشان داده شده است. بیشترین افزایش توان مؤثر، مصرف سوخت و میزان انتشار گاز CO_2، مربوط به حرکت کشتی در شرایط موج ۲ و کمترین میزان متعلق به موج ۴ می‌باشد.

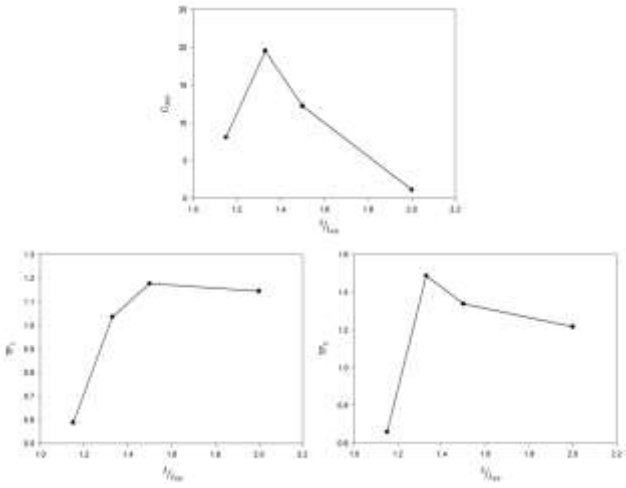


شکل ۲۵- میزان افزایش توان مؤثر، مصرف سوخت و انتشار گاز CO_2 مدل کشتی ایران بوشهر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

۶- نتیجه‌گیری

جهت مقایسه‌ی بهتر نتایج شبیه‌سازی مدل کشتی ایران بوشهر در امواج اعمال شده، نمودار ضریب مقاومت افزوده و توابع تبدیل هیو و پیچ کشتی بر حسب نسبت طول موج به طول بین دو عمود کشتی، در شکل ۲۶ نشان داده شده است.



شکل ۲۶- مقایسه‌ی نموداری نتایج شبیه‌سازی مدل کشتی ایران بوشهر در امواج بر حسب نسبت $\frac{\lambda}{L_{PP}}$

با توجه به جدول ۱۲ و نمودار ضریب مقاومت افزوده در شکل ۲۶، بیشترین افزایش نیروی مقاومت در موج ۲ رخ می‌دهد؛ از دلایل افزایش نیروی مقاومت کشتی در این موج، می‌توان به قرار گرفتن فرکانس برخورد در محدوده‌ی فرکانس طبیعی بدنه‌ی کشتی، خیسی عرشه و افزایش سطح خیس اشاره کرد. خیسی عرشه و شکست امواج در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

بیشینه‌ی دامنه‌ی حرکات هیو کشتی در موج ۳، مطابق آنچه که در نمودار ضریب تبدیل هیو شکل ۲۶ ارائه شد، با اختلاف اندکی در مقایسه با موج ۲، اتفاق افتاده است.

همچنین با توجه به نمودار تابع تبدیل پیچ کشتی در شکل ۲۶، بیشترین دامنه‌ی حرکات پیچ همان‌طور که انتظار می‌رفت در شرایط موج ۲ اتفاق افتاده است زیرا در این طول موج، فرکانس برخورد موج در محدوده‌ی فرکانس طبیعی حرکات هیو کشتی می‌باشد.

۷- جمع‌بندی

در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی حرکات کشتی ایران بوشهر با دو درجه آزادی هیو و پیچ و همچنین تخمین مقاومت افزوده در سرعت طراحی، شبیه‌سازی در آب آرام و چهار موج منظم با زاویه‌ی برخورد ۱۸۰ درجه انجام شد. جهت اعتبارسنجی روش حل، از مدل کشتی KCS استفاده شد. اختلاف ۱,۴ درصدی مقاومت کل در آب آرام و ۸,۰۴ درصدی ضریب مقاومت افزوده در مقایسه با نتایج تجربی، بیانگر صحت و دقت شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد.

افزایش ۱۲۶,۶۲ درصدی مقاومت کل مدل کشتی در شرایط موج ۲ در مقایسه با مقاومت کل آب آرام و بیشترین مصرف سوخت و افزایش توان موثر و بالاترین ضریب مقاومت افزوده و تابع تبدیل پیچ در این موج، بیانگر اهمیت بررسی حرکات کشتی به ویژه کشتی کانتینربر در شرایط موج با نسبت $\frac{\lambda}{L_{PP}}$ برابر با ۱,۳۳ می‌باشد. حرکات کشتی در امواج موجب افزایش مصرف سوخت کشتی، افزایش آلودگی زیست محیطی، کاهش سرعت، تأخیر و یا تغییر مسیر دریانوردی و در نتیجه ضررهای اقتصادی می‌گردد. بنابراین نیاز است که در محاسبات هیدرودینامیکی کشتی، مقاومت افزوده‌ی ناشی از حرکت کشتی در امواج نیز در نظر گرفته شود.

۸- پژوهش‌های آتی

در پژوهش‌های آتی می‌توان حرکات کشتی کانتینربر را با حضور پروانه و ملحقات بدنه به دلیل تأثیرگذاری قابل‌توجه بر عملکرد کشتی، بررسی کرد. با حضور پروانه و انتخاب روش مناسب جهت شبیه‌سازی چرخش آن، امکان مطالعات بیشتر و درک بهتر از عملکرد کشتی و میزان مصرف سوخت آن در یک سفر دریایی فراهم می‌گردد. سایر پیشنهادات در زیر آورده شده است:

- بررسی حرکات کشتی کانتینربر ایران بوشهر در شرایط موج ۲ با سرعت‌های متفاوت
- مطالعه‌ی مقاومت افزوده‌ی کشتی ایران بوشهر در زوایای مختلف موج ورودی
- شبیه‌سازی حرکات کشتی ایران بوشهر در امواج نامنظم
- بهینه‌سازی بدنه‌ی کشتی کانتینربر ایران بوشهر و مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه سازی در امواج پژوهش حاضر

کلید واژگان

1- CFD: Computational Fluid Dynamics
2- RANS: Reynolds-Averaged Navier–Stokes
3- VOF: Volume of Fluid
4- DFBI: Dynamic Fluid Body Interaction
5- Overset Mesh
6- Velocity Inlet
7- Pressure Outlet
8- Symmetry
9- No-Slip Wall
10- Automatic Meshing
11- Trimed Volume Mesh
12- RAO: Response Amplitude Operators
13- P_E: Effective Power
14- Engine Load
15- SFOC: Specific Fuel Oil Consumption

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]

۹- مراجع

1- Olmer N, Comer B, Roy B, Mao X, Rutherford D. *"Greenhouse gas emissions from global Shipping, 2013–2015"*. The International Council on Clean Transportation. 2017.

2- Ronen D. *"The effect of oil price on containership speed and fleet size"*. Journal of the Operational Research Society. 2011;62(1):211-6.

3- Schmitke RT. *"Ship sway, roll, and yaw motions in oblique seas"*. 1978.

4- Newman JN. *"The theory of ship motions"*: Academic Press New York; 1978.

5- Faltinsen O, Zhao R. *"Numerical predictions of ship motions at high forward speed"*. Phil Trans R Soc Lond A. 1991;334(1634):241-52.

6- BECK RF, REED AM, SCLAVOUNOS PD, HUTCHISON BL. *"Modern computational methods for ships in a seaway. Discussion. Author's closure"*. Transactions-Society of Naval Architects and Marine Engineers. 2001;109:1-51.

7- Simonsen CD, Otzen JF, Joncquez S, Stern F. *"EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves"*. Journal of Marine Science and Technology. 2013;18(4):435-59.

8- Hochbaum AC, Vogt M, editors. *"Towards the simulation of seakeeping and maneuvering based computation of the free surface viscous ship flow"*. Proceedings of the 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan; 2002.

9- Carrica PM, Paik K-J, Hosseini HS, Stern F. *"URANS analysis of a broaching event in irregular quartering seas"*. Journal of Marine Science and Technology. 2008;13(4):395-407.

10- Kandasamy M, Ooi SK, Carrica P, Stern F , Campana EF, Peri D, et al. *"CFD validation studies for a high-speed foil-assisted semi-planing catamaran"*. Journal of marine science and technology. 2011;16(2):157-67.

11- Kim W, Van S, Kim D. *"Measurement of flows around modern commercial ship models"*. Experiments in fluids. 2001;31(5):567-78.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.5.4]

[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.41]