J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 49, 2026. (24-38)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Investigation of the Effect of Lateral Longitudinal Bulkhead Removal on the Hydroelastic Response of Horizontal Sections in the Ship Bow Region Using Two-Way Fluid–Structure Interaction

Daniyal Esmaeili Roshanavand[1], Mohammad Reza Khedmati [2*]

[1] *M.Sc. in Naval Architecture Engineering – Ship Structures, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; daniyal.esmaeili@aut.ac.ir*
[2] *Professor, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; khedmati@aut.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 22 Feb 2026
Last modification: 29 Jun 2026
Accepted: 29 Jun 2026
Available online: 30 Jun 2026

Article type:
Article type

Keywords:
Slamming load
Fluid–structure interaction (FSI)
Ship hydroelasticity
Two-way coupling
Ship bow structure

ABSTRACT

The slamming phenomenon at the ship bow during navigation in rough seas is one of the most critical causes of stress concentration and structural deformation. The sudden impact of the hull on the water surface generates transient pressure peaks and complex hydroelastic responses. This study aims to investigate the structural and hydroelastic responses of the bow region of a 187-meter container ship under slamming loads, considering the removal of lateral longitudinal bulkheads. A modified structural model of the bow, including the shell and stiffeners with the longitudinal bulkheads removed, was developed. Numerical simulations were performed using a two-way coupling between the Abaqus finite element solver and the STAR-CCM+ computational fluid dynamics solver. The results revealed that the maximum slamming pressure occurred near the bottom of the bow, while the maximum equivalent stress appeared along the bow flare. The removal of the longitudinal bulkheads led to an increase in both the extent and magnitude of stresses, with higher stress concentrations observed in regions with fewer stiffeners. Comparison with the complete structural model indicated that the maximum stress in the lower horizontal sections exhibited smaller differences, less than 10 percent, whereas in the upper sections the discrepancy reached up to 3.7 times. The results demonstrate significant differences between the complete structural configuration and the simplified configuration with removed longitudinal bulkheads, emphasizing the role of longitudinal bulkheads in the structural response of the ship bow under slamming loads.

ISSN: 2645-8136

DOI:

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۲، شماره ۴۹، ۱۴۰۵، (۳۸-۲۴)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بررسی اثر حذف دیواره‌های طولی جانبی بر پاسخ هیدروالاستیک مقاطع افقی ناحیه سینه کشتی با استفاده از اندرکنش دوطرفه سازه – سیال

دانیال اسمعیلی روشناوند[۱]، محمدرضا خدمتی[۲*]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی دریا–سازه کشتی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، daniyal.esmaeili@aut.ac.ir

[۲] عضو هیئت علمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، khedmati@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

نوع مقاله:

کلمات کلیدی:

بار کوبش

اندرکنش سازه – سیال

هیدرو الاستیسیته کشتی

جفت‌سازی دوطرفه

سازه‌ی سینه‌ی کشتی

چکیده

پدیده‌ی کوبش در سینه‌ی کشتی هنگام حرکت در دریای مواج، یکی از مهم‌ترین علل تمرکز تنش و تغییر شکل سازه‌ای در کشتی‌ها است. برخورد ناگهانی بدنه با سطح آب، پیک‌های فشار گذرا و پاسخ‌های هیدروالاستیک پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند. هدف این مطالعه، بررسی پاسخ سازه‌ای و هیدروالاستیک ناحیه‌ی سینه‌ی یک کشتی کانتینربر ۱۸۷ متری در شرایط حذف دیواره‌های طولی کناری تحت بارهای کوبش است در این پژوهش، مدل اصلاح‌شده‌ی سینه کشتی با جزئیات پوسته و تقویت‌کننده‌ها و با حذف دیواره‌های طولی کناری ایجاد گردید. شبیه‌سازی عددی با استفاده از جفت‌سازی دوطرفه حلگر اجزای محدود آباکوس و حلگر دینامیک سیالات محاسباتی اِستار–سی‌سی‌اِم پلاس انجام گرفت. نتایج نشان دادند که بیشینه فشار کوبش در ناحیه کف سینه و بیشینه تنش معادل در ناحیه پهلوهای سینه ایجاد می‌شوند. حذف دیواره‌های طولی موجب افزایش وسعت و شدت تنش‌ها شده و در مناطقی با تقویت‌کننده کمتر تمرکز تنش بیشتر مشاهده شد، به‌طوری که در مقایسه با مدل کامل بیشینه تنش در مقاطع افقی پایین اختلاف کمتری نسبت به مقاطع بالاتر دارد. این اختلاف در مقاطع پایین کمتر از ۱۰ درصد و در مقاطع بالایی تا ۳٫۷ برابر می‌رسد. نتایج نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌توجه میان مدل کامل سازه‌ای و پیکربندی ساده‌سازی‌شده با حذف دیواره‌های طولی است و نقش این دیواره‌ها را در پاسخ سازه‌ای سینه کشتی تحت بارهای کوبش برجسته می‌سازد.

DOI:

ISSN: 2645-8136

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

۱ - مقدمه

هنگامی که کشتی در دریای مواج حرکت می‌کند، به دلیل وجود حرکات عمودی نسبی قابل‌توجه بین کشتی و سطح امواج، بدنه‌ی کشتی با آب برخورد می‌کند. در زمان برخورد بدنه با آب، بارهای ضربه‌ای همراه با پیک‌های فشار بالا ایجاد می‌شوند. ازسوی‌دیگر، پاسخ‌های هیدروالاستیک کشتی‌های بزرگ که در اثر ضربه‌های شدید و تأثیر امواج پدید می‌آیند، موضوعی حیاتی در حوزه‌ی هیدرودینامیک به شمار می‌روند [۱].

پیشینه انجام مطالعات عددی کوبش در دهه‌های گذشته به کارهای بنیادی فون‌کارمن و سپس واگنر برمی‌گردد که پایه‌های تئوری برخورد هیدرودینامیکی را بنا نهادند [۳-۲]. این پژوهش‌ها پایه‌های تئوری نوین برخورد هیدرودینامیکی را بنا نهادند که برای هندسه‌های سه‌بعدی و شرایط ورود غیرخطی توسعه داده شدند [۴]. این مطالعات تحلیلی همچنان به‌عنوان منابع بنیادی در تحقیقات کوبش شناخته می‌شوند. پژوهشگران با استفاده از مدل‌های ساده‌شده‌ای نظیر تیر اویلر–برنولی نشان دادند با افزایش سرعت برخورد، گشتاور خمشی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و مفاهیمی مانند ضریب بار دینامیکی برای تبدیل بارهای گذرا به معادل استاتیکی معرفی شدند [۶-۵]. در رویکردهای دیگر، معادلات تغییر شکل صفحه‌ای موجود توسعه یافتند تا اثرات دینامیکی مرتبط با فشارهای بالای کوبش در نظر گرفته شوند [۷]. این روش‌ها اگرچه دیدگاه‌های بنیادی ارائه دادند، اما عمدتاً بر فرضیات ساده‌کننده در خصوص هندسه و رفتار سیال استوار بودند.

برای رفع محدودیت‌های مدل‌های تحلیلی، آزمایش‌های تجربی نقش غیرقابل‌انکاری در اعتبارسنجی نظریه‌ها و ارائه‌ی داده‌های دقیق ایفا کردند. آزمایش‌های رهاسازی، امکان بررسی فشار، بارهای ضربه‌ای و اثر پارامترهایی نظیر سرعت و زاویه‌ی خیز را در شرایط کنترل‌شده فراهم کردند [۹-۸]. همچنین کمپین‌های آزمایشگاهی تأثیر کشسانی و پلاستیسیته بر پاسخ سازه‌ای و رفتار تحت کوبش‌های متوالی را بررسی کرده‌اند [۱۰]. این داده‌ها معیارهای اساسی برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی به شمار می‌روند. این آزمایش‌ها نشان دادند که بارهای کوبش ماهیتی گذرا و موضعی دارند و به‌شدت تحت‌تأثیر زوایای بدنه، ارتفاع موج و سرعت برخورد هستند. فراتر از آزمایش‌های موضعی، مدل‌های مقطع‌بندی‌شده و مدل‌های کامل آزمایشگاهی امکان بررسی پاسخ کلی هیدروالاستیک بدنه‌ی کشتی، توانسته‌اند توزیع بارهای کوبش بر سازه و فرکانس‌های طبیعی تحریک‌شده را فراهم کرده است. این آزمایش‌ها قابلیت اندازه‌گیری مستقیم ارتعاشات، گشتاورهای خمشی قائم و پاسخ کلی حرکتی کشتی را در شرایط واقعی امواج و سرعت شناور ایجاد می‌کنند [۱۳-۱۱].

با پیشرفت توان محاسباتی، روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به ابزار اصلی پژوهش‌های کوبش تبدیل شدند. از روش‌هایی مانند فرمول‌بندی لاگرانژی - اویلری دلخواه برای مقاطع دوبعدی [۱۵-۱۴] تا روش‌های پیشرفته‌ای مانند روش تنظیم سطح برای ثبت تغییر شکل شدید سطح آزاد و پدیده‌های کوبش آب به عرشه و پیش‌بینی فشارهای کوبش در بخش‌های مختلف سینه‌ی کشتی [۱۷-۱۶]. اندرکنش سیال – سازه نقش تعیین‌کننده‌ای در پیش‌بینی پاسخ هیدروالاستیک کشتی‌ها دارد [۱۹-۱۸].

برای شبیه‌سازی این اثرات، روش‌های اندرکنش سازه – سیال توسعه یافته‌اند. روش‌های یک‌طرفه ساده‌تر و سریع‌ترند، اما اثر جرم افزوده را نادیده می‌گیرند و اغلب ارتعاشات با فرکانس بالا را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند [۲۰]. در مقابل، روش‌های دوطرفه با تبادل هم‌زمان نیروها و جابه‌جایی‌ها، بین حلگرهای سازه‌ای و سیالاتی در هر گام زمانی، بازنمایی واقع‌بینانه‌تری از اندرکنش هیدروالاستیک فراهم می‌کنند [۲۴-۲۱].

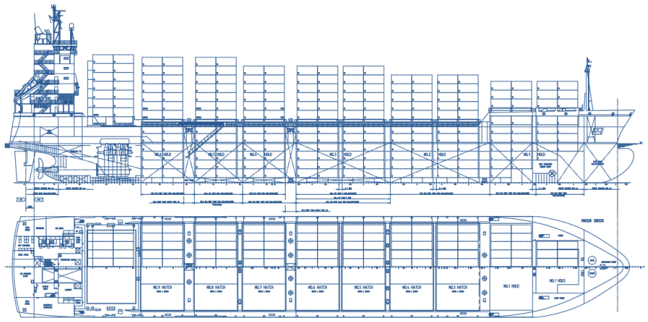
با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در مدل‌سازی اندرکنش سیال – سازه، تحلیل رفتار واقعی سازه‌ی سینه‌ی کشتی همچنان یک چالش است. سازه‌ی داخلی ناحیه‌ی سینه‌ی کشتی‌های کانتینربر بزرگ، به‌منظور تأمین استحکام طولی و توزیع مناسب تنش‌ها، به‌طور معمول از دیواره‌های طولی بهره می‌گیرد. این دیواره‌ها علاوه بر نقش سازه‌ای، بر الگوی تغییرشکل و پاسخ دینامیکی بدنه در برابر بارهای ضربه‌ای اثرگذارند. بااین‌حال، در فرایند بهینه‌سازی چیدمان سازه‌ای این ناحیه، ممکن است سناریوهایی نظیر حذف یا کاهش تعداد این دیواره‌ها به‌منظور کاهش وزن سازه، ساده‌سازی فرایند ساخت، یا تخصیص فضای بیشتر برای بارگیری مطرح شود. در چنین شرایطی، پرسش اساسی آن است که حذف دیواره‌های طولی کناری چه تأثیری بر پاسخ هیدروالاستیک سینه در برابر کوبش خواهد داشت و آیا این تغییر می‌تواند به افزایش آسیب‌پذیری سازه منجر شود یا خیر.

مطالعات محدودی به تأثیر تغییرات سازه‌ای داخلی سینه بر استحکام بدنه پرداخته‌اند، اما هیچ‌یک، حذف دیواره‌های طولی و اثر آن بر پاسخ دینامیکی تحت کوبش را بررسی نکرده‌اند. این خلأ از آن‌رو اهمیت دارد که بدون شناخت نقش این اجزاء در رفتار هیدروالاستیک، هرگونه اصلاح چیدمان داخلی با اهدافی نظیر کاهش وزن یا ساده‌سازی ساخت، می‌تواند با عدم‌قطعیت‌های جدی در عملکرد سازه همراه باشد. هدف از مطالعه‌ی حاضر بررسی پاسخ هیدروالاستیک سینه‌ی کشتی کانتینربر بزرگ در شرایط حذف دیواره‌های طولی کناری در این ناحیه، تحت بارهای کوبش با استفاده از روش اندرکنش دوطرفه روش اجزای محدود – دینامیک سیالات محاسباتی است.

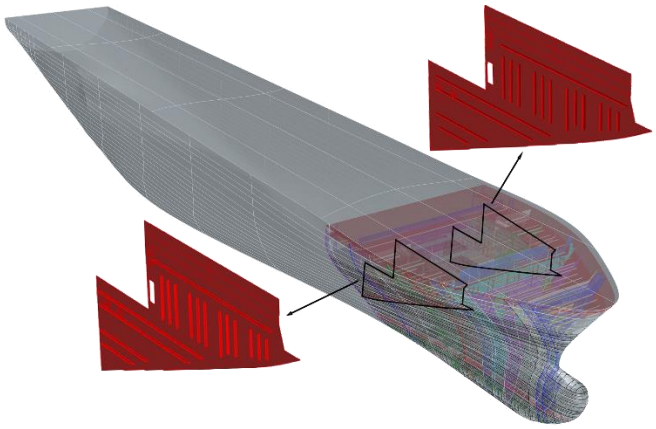
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

۲ - مدل سازه‌ای

در این پژوهش، کشتی کانتینربر با طول ۱۸۷ متر به‌منظور بررسی اندرکنش سازه – سیال و تحلیل رفتار سازه‌ای در ناحیه سینه کشتی تحت بار کوبش، مورداستفاده قرار گرفته است (شکل ۱). در ناحیه سینه کشتی کلیه اجزای سازه‌ای به همراه تقویت‌کننده‌های آن‌ها تا ۰٫۳ از طول کشتی نسبت به جلوی کشتی مدل‌سازی شدند. این مدل‌سازی به طور کامل توانایی بازسازی اندرکنش سازه – سیال در این ناحیه را با کاهش هزینه محاسباتی و زمان را به همراه خواهد داشت. اطلاعات ابعادی کشتی مورد بررسی در جدول (۱) ارائه شده است. مدل کامل این ناحیه، شامل دیواره‌های طولی کناری، پیش‌تر در پژوهش نویسنده‌ی اول توسعه یافته است[۲۵]. در پژوهش حاضر، مدل اصلاح‌شده با حذف دیواره‌های طولی و با همان ابعاد و شرایط مرزی مدل کامل ساخته شد تا نتایج دو پیکربندی مستقیماً قابل مقایسه باشند (شکل ۲).



(الف)

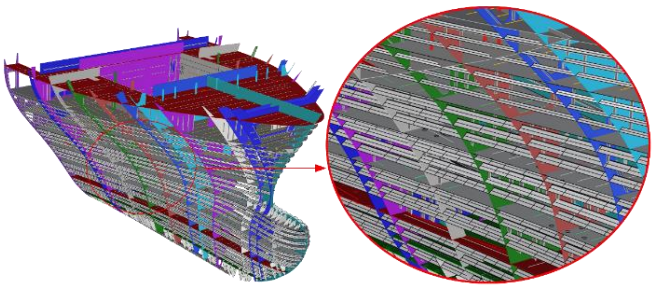


(ب)

شکل ۱- نمای کلی از کشتی کانتینر بر. (الف) چیدمان عمومی، (ب) مدل‌سازی سینه کشتی با دیواره‌های جانبی[۲۵].

جدول ۱- اطلاعات ابعادی کشتی مورد بررسی.

مورد	ابعاد کشتی کامل (۱:۱)	ابعاد کشتی مدل (۱:۴۰)
طول سر تا سری $[m]$	۱۸۷٫۲۵	۴٫۶۸۲
طول بین دو عمود $[m]$	۱۷۷٫۰۸	۴٫۴۲۷
عرض $[m]$	۲۹٫۸۰	۰٫۷۴۵
ارتفاع ساختمانی $[m]$	۲۱٫۹۰	۰٫۵۴۷
ارتفاع آبخور تابستانه $[m]$	۱۱٫۵۵	۰٫۲۸۸
وزن جابه‌جایی $[t]$	۳۹۵۰۰٫۵	۶۱۷



(ج)

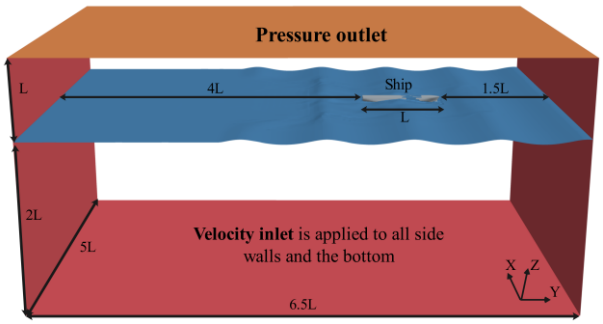
شکل۲- دیواره‌های طولی کناری حذف شده در مدل کشتی.

۳ - مدل سازی عددی روش اجزای محدود – دینامیک سیالات محاسباتی

در این پژوهش با به‌کارگیری روش جفت سازی دوطرفه بین حلگر سیالاتی اِستار - سی‌سی‌اِم پِلاس و حلگر سازه‌ای آباکوس، شبیه‌سازی انجام شده است. جزئیات روش انجام و مدل‌سازی در قسمت‌های بعدی آورده شده است.

۳-۱- مدل دینامیک سیالات محاسباتی

شکل (۳) مخزن عددی مورد استفاده برای انجام محاسبات را نشان می‌دهد. شرایط مرزی در تمامی دیواره‌ها به جز دیواره بالایی، سرعت ورودی و در دیواره بالایی به صورت فشار خروجی تعریف شده است. همچنین شرط عدم لغزش برای بدنه کشتی نیز در نظر گرفته شده است. مخزن عددی دارای ابعادی برابر با ۳ × ۵ × ۶٫۵ طول کشتی می‌باشد. این مقدار به خوبی می‌تواند از تغییرات ناگهانی جریانی و اثرات آشفتگی به دلیل کوچک بودن مخزن جلوگیری کند. محور مختصات مخزن دقیقاً بر روی مرکز جرم کشتی قرار داده شد و سرعت کشتی با اعمال سرعت بر جریان پیش‌رو مدل‌سازی گردید.



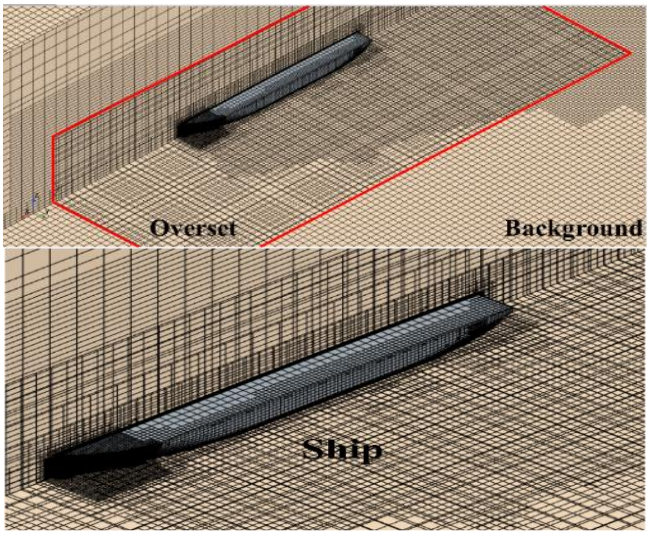
شکل ۳- شرایط مرزی اعمال شده بر مدل دینامیک سیالات محاسباتی.

در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، جریان آشفته، چند فازی و گسسته‌سازی بالادست مرتبه دوم به کار گرفته شده است. در این مطالعه مدل آشفتگی کا – اِپسیلون به‌دلیل پایداری عددی، هزینه‌ی محاسباتی معقول و کاربرد گسترده در مسائل کوبش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

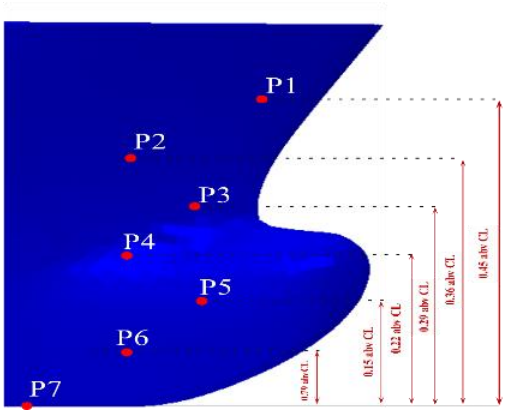
انتخاب شده است. روش حجم سیال برای بررسی سطح تماس آب‌وهوا در نظر گرفته شده که با استفاده از روش نیمه ضمنی معادلات پیوسته فشار – سرعت، جفت‌سازی ضمنی بین سرعت و فشار سیال را مدیریت می‌کند. همچنین روش هم‌پوشانی اولر نیز برای تولید موج درجه پنج استوکس به کار گرفته شده است. اطلاعات دقیق‌تر در مورد معادلات را می‌توان در کار ژی و همکاران یافت [۲۶].

در این مطالعه از موج استوکس مرتبه پنج با سرعت ۱٫۷۵ متر بر ثانیه (معادل عدد فرود ۰٫۲۶) با نسبت طول‌موج به طول کشتی برابر یک و ارتفاع موج ۰٫۲۸ متر در مدل مقیاس شده استفاده شده است. همچنین سطح آب مماس بر مرکز جرم کشتی مدل قرار دارد. گام زمانی مورداستفاده ۱/۷۰۰ دوره برخورد موج برای شبیه سازی می باشد. کشتی در لحظه‌ی صفر در آب ساکن قرار دارد و ناحیه‌ی اعمال نیروی موج در فاصله‌ی ۱٫۵ متری از دیواره‌ی سرعت ورودی جلویی قرار گرفت. شکل (۴) طرح شبکه‌بندی در نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی، دو ناحیه شبکه‌بندی با اندازه متفاوت ایجاد شده و در هر دو ناحیه از تنظیمات بازسازی سطح، شبکه‌ساز لبه بُر و شبکه‌ساز لایه منشوری استفاده شده است. بهره‌گیری از لایه منشوری در ناحیه پوششی برای ثبت دقیق لایه‌مرزی نقطه پاشش در مرحله برخورد حیاتی است. این شبکه‌ساز، سلول‌های منشوری عمود بر دیواره را با افزایش تدریجی ضخامت به نسبت ۱٫۲ تولید می‌کند (مقدار y+ در بازه ۳۰ تا ۶۰ قرار دارد). فرایند تولید شبکه نیز به‌صورت خودکار توسط ابزارهای داخلی نرم‌افزار انجام شده و منجر به تولید سلول‌های شش‌وجهی نامنظم و سلول‌های برش خورده در نواحی مجاور سطح کشتی شده است که همگی به‌عنوان سلول شش‌وجهی تلقی می‌گردند. برای افزایش دقت تحلیل، ناحیه پیرامون سطح آزاد و سازه به‌صورت محلی ریز شبکه‌بندی شده است.



شکل ۴: طرح شبکه‌بندی در دینامیک سیالات محاسباتی.

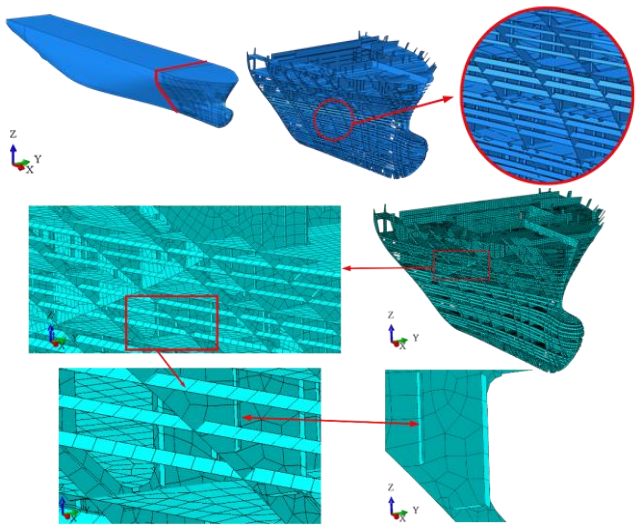
برای مطالعه کوبش سینه، ۷ نقطه به منظور ثبت دقیق فشار بر روی سینه کشتی و پهلوها قرار گرفته است. محل دقیق این نقاط در شکل (۵) مشاهده می‌کنید.



شکل ۵- نقاط تعیین شده بر روی سینه کشتی.

۳-۲- مدل اجزای محدود

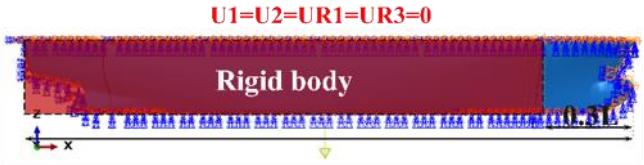
شکل (۶) مدل اجزای محدود کشتی در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد که شامل ناحیه‌ی سینه با کلیه‌ی جزئیات سازه‌ای، بدنه‌ی کشتی و پوسته‌ی بیرونی آن است. فلز مورد استفاده دارای چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول یانگ ۲۰۶ گیگاپاسکال و ضریب پوواسون ۰٫۳ می‌باشد. فلز فولاد استحکام بالا با مقدار حد الاستیک ۳۱۵ مگاپاسکال می‌باشد. برای مطابقت وزن کشتی با نمونه اصلی و کامل و با توجه به نمودار توزیع وزن در حالت بارگذاری کامل، قسمت‌های دور از ناحیه سینه کشتی به گونه ای که مرکز جرم تغییر نکند، افزایش ضخامت داده‌شده است. همچنین نواحی دور از سینه کشتی، به عنوان جسم صلب در نظر گرفته شده است. این رویکرد علاوه بر کاهش زمان محاسبات، موجب شد اثر افزایش ضخامت نادیده گرفته شود. اطلاعات دقیق‌تر در مورد معادلات را می‌توان در کار ژی و همکاران یافت [۲۶].



شکل ۶- مدل سه بعدی اجزای محدود در نرم افزار آباکوس.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

در مدل اجزای محدود، هم برای پوسته بیرونی و هم برای بخش‌های مختلف داخلی کشتی، از اجزای پوسته‌ای تغییرشکل‌پذیر سه‌بعدی استفاده شده است. مبنای این انتخاب آن است که ضخامت صفحات در قیاس با طول و عرض آن‌ها بسیار ناچیز بوده است. از نظر نوع اجزاء، پوسته کشتی با اجزای چهارضلعی هشت‌گره‌ای و تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی با اجزای چهارضلعی چهارگره‌ای جزءبندی شده‌اند. این تفکیک با هدف ایجاد تعادل میان دقت و زمان محاسباتی صورت گرفته است. برای شبیه‌سازی اتصالات جوشی میان بخش‌های مختلف سازه، از قید Tie استفاده گردید. این قید امکان انتقال کامل جابه‌جایی و چرخش میان سطوح در تماس را فراهم می‌کند. مدل اجزای محدود تحت بارهای ثقلی و شرایط مرزیِ دو درجه آزادیِ هیو و پیچ قرار گرفته است. به‌منظور کاهش حجم محاسبات و تمرکز تحلیل بر ناحیه هدف، به استثنای ناحیه سینه، سایر بخش‌های کشتی به‌صورت جسم صلب در نظر گرفته شده‌اند که این صلب‌سازی صرفاً جنبه محاسباتی داشته و کل سازه کشتی همچنان در شبیه‌سازی مشارکت کامل دارد و تمامی شرایط مرزی اعمال‌شده بر بدنه را تجربه می‌کند. پیکربندی نهایی مدل و شرایط مرزی در شکل (۷) نمایش داده شده است [۲۷].



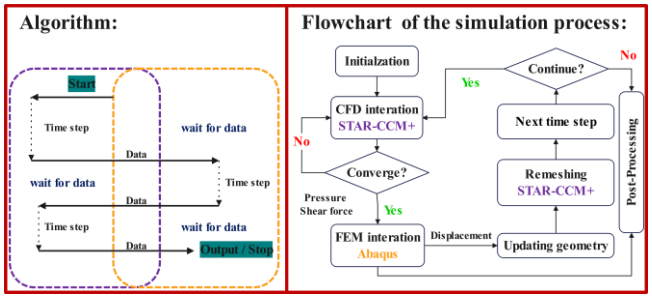
شکل ۷- شرایط مرزی اعمال شده در آباکوس.

۴ - روش جفت‌سازی دوطرفه

شبیه‌سازی عددی فرایند کوبش با استفاده از جفت‌سازی دوطرفه بین حلگر اجزای محدود آباکوس و حلگر دینامیک سیالات محاسباتی اِستار - سی‌سی‌اِم پِلاس از طریق موتور شبیه‌سازی مشترک سیمولا انجام می‌شود. پدیده کوبش را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های جفت‌سازی یک‌طرفه و دوطرفه بررسی کرد. بر اساس یافته‌های لاکشمینارایانانا و هیردریس تکنیک جفت‌سازی یک‌طرفه، مؤلفه‌های ارتعاشی فرکانس بالا را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند، عمدتاً به این دلیل که اثرات جرم اضافی نادیده گرفته می‌شوند. در این مطالعه از روش جفت‌سازی دوطرفه برای ثبت بهتر پاسخ هیدروالاستیک بدنه و تولید نتایج دقیق‌تر استفاده شده است [۲۰].

در فرایند اندرکنش دوطرفه، پوسته بیرونی کشتی به‌عنوان سطح تبادل داده بین حلگرهای دینامیک سیالات محاسباتی و اجزای محدود تعریف می‌شود. در هر گام زمانی جفت‌شده، حلگر سیالاتی فشار و نیروی برشی دیواره را محاسبه و به حلگر سازه‌ای منتقل می‌کند و حلگر سازه‌ای نیز جابه‌جایی گره‌ای را بازمی‌گرداند. برای انتقال دقیق‌تر اطلاعات، از تکنیک شبکه‌بندی پوششی و مورفِر در نرم‌افزار اِستار – سی‌سی‌اِم پِلاس استفاده شده و شبیه‌سازی هم‌زمان تا دستیابی به شرط همگرایی ادامه می‌یابد. اطلاعات دقیق‌تر در مورد شبیه‌سازی هم‌زمان دوطرفه را می‌توان در کار چِن و همکاران، جیائو و همکاران یافت [۲۴-۲۲].

کوبش سینه‌ی کشتی با سطح آب، یک مسئله‌ی غیرخطی قوی اندرکنش سازه–سیال است که نشان می‌دهد سازه و سیال به طور قابل‌توجهی با یکدیگر تعامل دارند و بازه‌ی زمانی مسئله اهمیت دارد؛ بنابراین، تبادل در فواصل منظم رخ می‌دهد و اطلاعات به طور محکم بین حلگر اجزای محدود و حلگر دینامیک سیالات محاسباتی منتقل می‌شود. برای حل مسئله‌ی کوبش، یک جفت‌سازی ضمنی و تکراری اعمال می‌شود تا جفت‌سازی و همگرایی قوی در طول تبادل اطلاعات بین دو حلگر در هر گام زمانی جفت‌سازی‌شده، تضمین شود. شکل (۸) روندنمای این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که در آن هر دو حلگر دینامیک سیالات محاسباتی و اجزای محدود محاسبه را به طور هم‌زمان انجام می‌دهند.



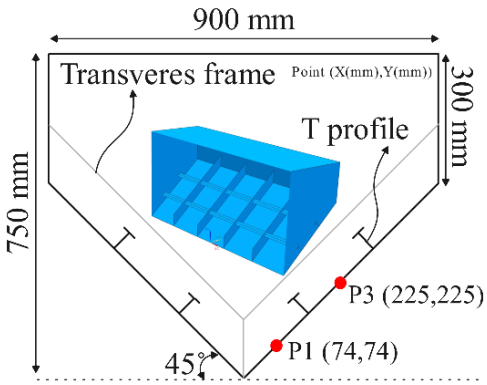
شکل ۸- روندنمای روش جفت‌سازی دوطرفه[۲۸].

۵- اعتبارسنجی روش عددی بر اساس مسئله کوبش گوه

به‌منظور اعتبارسنجی روش عددی، مطالعه‌ای بر اساس آزمایش انجام‌شده در آزمایشگاه کشش مدل کشتی دانشگاه مهندسی هاربین صورت گرفت[۲۲]. مدل آزمایشگاهی شامل یک گوه فولادی به ابعاد ۱۵۰۰ × ۹۰۰ × ۷۵۰ میلی‌متر و وزن ۵۵۳ کیلوگرم با زاویه خیز ۴۵ درجه است. این گوه دارای چهار ردیف تقویت‌کننده طولی T شکل (۵ × ۳۵ × ۵۰ میلی‌متر) و چهار ردیف تقویت‌کننده عرضی (۷۰ × ۵ میلی‌متر) می‌باشد. به‌منظور تطابق وزن مدل عددی با نمونه تجربی،مطابق با کار چِن و همکاران [۲۲] ضخامت صفحه بالایی ۲۲٫۵ میلی‌متر، صفحات کناری ۱۲ میلی‌متر و تقویت‌کننده‌ها و صفحات کف ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. جنس گوه از استیل با چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ ۲۰۶ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰٫۳ است. گوه از ارتفاع ۵ سانتی‌متری با سرعت اولیه ۴٫۳۱۷ متر بر ثانیه رها می‌شود. حرکت تنها در راستای عمودی مجاز و سایر جهات کاملاً مقید شده است.

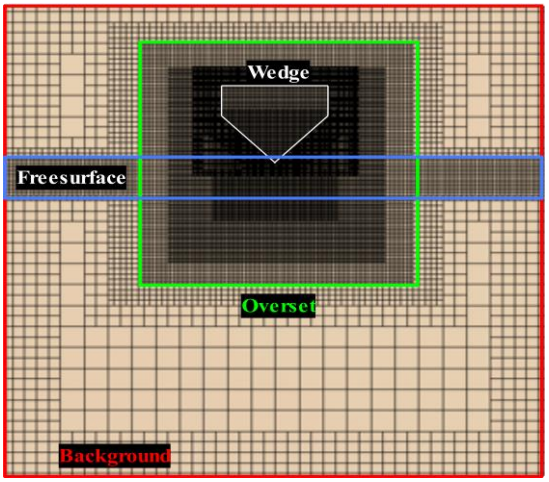
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

مطابق با پژوهش چِن و همکاران، نقاطی را برای اندازه‌گیری فشار بر روی گوه مشخص شده‌است (شکل (۹)).



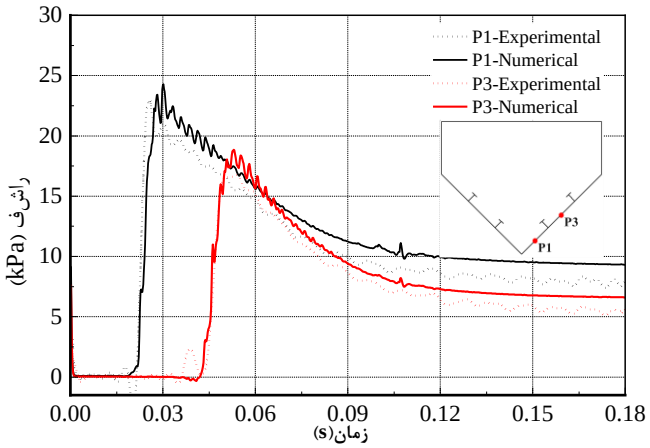
شکل ۹- صفحه عرضی مدل سازه‌ی گوه[۲۲].

دامنه شبکه‌بندی پوششی دارای ابعاد ۱٫۲ × ۱٫۴ × ۱٫۷ متر با ۰٫۵۵ میلیون سلول می‌باشد که درون دامنه شبکه‌بندی پس‌زمینه با ابعاد ۴٫۵ × ۴٫۵ × ۴٫۵ متر و ۲٫۴۳ میلیون سلول قرار می‌گیرد (شکل (۱۰)). تنظیمات مربوط به شبکه‌بندی در بخش ۳-۱ این مقاله ارائه شده است. شبیه‌سازی با گام زمانی اولیه ۰٫۰۰۰۲ ثانیه و در بازه زمانی ۰٫۲ ثانیه انجام گردید. جزئیات بیشتر از تنظیمات اعمال شده و مطالعه همگرایی شبکه‌بندی و گام زمانی در پژوهش اسمعیلی و خدمتی موجود است[۲۵].



شکل ۱۰- جزئیات طرح شبکه‌بندی گوه.

مقایسه فشار کوبش بین شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی چن و همکاران برای نقاط P1 و P3 در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فشار محاسبه‌شده روندی مشابه با داده‌های آزمایشگاهی دارد. شبیه‌سازی عددی نوسانات بیشتری را در اطراف قله فشار نشان می‌دهد و مقادیر اوج فشار در هر دو نقطه اندکی بیشتر از نتایج تجربی هستند. بررسی بیشینه فشار ثبت‌شده نشان می‌دهد که خطای نسبی در نقاط P1 و P3 به‌ترتیب برابر با ۴٫۷۵ و ۸٫۷۱ درصد است. این میزان اختلاف با توجه به ماهیت گذرا و پیچیده پدیده کوبش و ساده‌سازی‌های متداول در مدل‌سازی عددی، قابل انتظار بوده و در محدوده قابل قبول گزارش‌شده در مطالعات مشابه قرار دارد. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده بیانگر توانایی روش عددی به‌کاررفته در بازتولید فشارهای کوبش و پیش‌بینی مناسب روندهای فیزیکی حاکم بر پدیده هستند.



شکل ۱۱- مقایسه فشار کوبش حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش.

نتایج این بخش نشان داد که روش عددی به‌کاررفته توانایی بازتولید فشارهای کوبش را با دقت مناسبی دارد و روندهای فیزیکی حاکم بر پدیده را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. با توجه به اعتبار روش، در ادامه به تحلیل هم‌گرایی شبکه و گام زمانی برای مدل کشتی کانتینربر پرداخته شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نهایی ارائه می‌گردد.

۶- همگرایی نتایج عددی

۶-۱- فرایند همگرایی

در بررسی خطا و عدم قطعیت شبیه‌سازی عددی، وابستگی نتایج به تغییرات تکرار داخلی در مقایسه با شبکه و گام زمانی ناچیز است [۲۹]. بنابراین، در مطالعه حاضر فقط عدم قطعیت شبکه‌بندی و عدم قطعیت گام زمانی بررسی شده‌اند [۳۰]. در بررسی عدم‌قطعیت‌های ناشی از مدل‌سازی و شبیه‌سازی، حلگر دینامیک سیالات محاسباتی با عدم‌قطعیت‌های بیشتری نسبت به حلگر اجزای محدود روبه‌رو است [۳۱]. به همین منظور می‌توان فقط همگرایی اندازه شبکه‌بندی در دینامیک سیالات محاسباتی و اندازه گام زمانی را با درنظر گرفتن مقدار ثابتی از اندازه جزءبندی در اجزای محدود بررسی کرد.

مطابق با دستورالعمل آی‌تی‌تی‌سی[1] برای سه طرح شبکه‌بندی از نسبت همگرایی R_i استفاده می‌شود. در مطالعه همگرایی شبکه‌بندی i با g جایگزین و در مطالعه همگرایی گام زمانی از t به جای i استفاده می‌شود. مقدار R_i از نسبت تغییرات بین

[1] ITTC ≡ International Towing Tank Conference

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

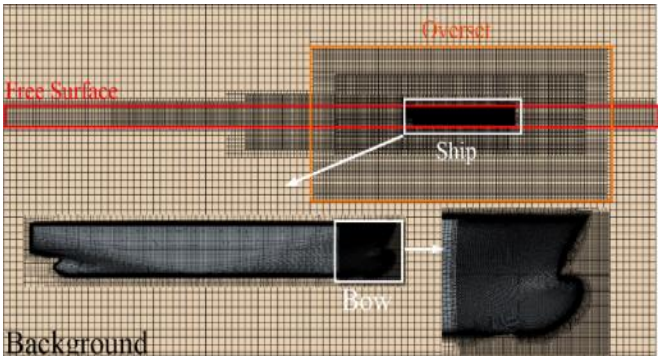
شبکه‌بندی متوسط و ریز ($\varepsilon_{i,21} = S_{i,2} - S_{i,1}$) به تغییرات بین شبکه‌بندی درشت و متوسط ($\varepsilon_{i,32} = S_{i,3} - S_{i,2}$) به دست می‌آید. به‌طورکلی در همگرایی یکنواخت میزان R_i بین ۱ و صفر و در همگرایی نوسانی میزان R_i بین صفر و ۱- قرار دارد. در واگرایی ها اگر مقدار R_i کمتر از ۱- باشد، واگرایی نوسانی و اگر بزرگتر ۱ باشد واگرایی یکنواخت خواهیم داشت. در این بررسی، همگرایی‌ها قابل قبول و واگرایی‌ها غیر قابل قبول هستند.

۶-۲- همگرایی اندازه شبکه در دینامیک سیالات محاسباتی

به‌منظور ارزیابی حساسیت مدل‌ها، ابتدا تغییرات تعداد شبکه‌بندی در بخش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول (۲) اطلاعات مربوط به بررسی همگرایی اندازه شبکه‌بندی را نشان می‌دهد. شکل (۱۲) طرح شبکه‌بندی ریز در دامنه سیال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود عمده تمرکز شبکه بندی در ناحیه پوششی به ویژه سینه کشتی و سطح آزاد می باشد. محاسبات این پژوهش توسط مرکز محاسبات رایانه‌ای شبیه‌سازان امیرکبیر با استفاده از پردازنده مرکزی ۶۴ هسته‌ای صورت گرفته است.

جدول ۲- وضوح شبکه در مطالعه همگرایی.

اندازه شبکه	گام زمانی (s)	تعداد شبکه (میلیون)			زمان حل (h)
		ناحیه پس‌زمینه	ناحیه پوششی	مجموع	
ریز	۰٫۰۰۱	۳٫۴۶	۲٫۲۳	۵٫۶۹	۹۱٫۳
متوسط	۰٫۰۰۱	۳٫۰۹	۰٫۹۴	۴٫۰۳	۶۷٫۶۴
درشت	۰٫۰۰۱	۱٫۵۸	۰٫۸۸	۲٫۴۶	۳۹٫۴



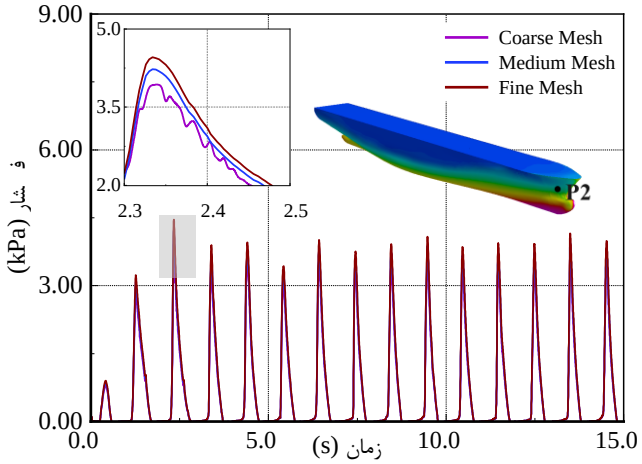
شکل ۱۲- جزئیات شبکه‌بندی در اندازه شبکه‌ی ریز.

شکل (۱۳) نمودارهای مربوط به فشاردر دو نقطه از نقاط هفت‌گانه در سه حالت مختلف شبکه‌بندی نشان می دهد. نتایج نشان می‌دهد میزان تغییرات فشار در شبکه‌بندی درشت بیشتر از دو حالت دیگر است. از سوی دیگر، نتایج حاصل از شبکه‌بندی متوسط تطابق مناسبی با نتایج شبکه‌بندی ریز دارد. با این وجود، شبکه‌بندی متوسط توانسته است پاسخ‌هایی نزدیک به شبکه‌بندی ریز و درعین‌حال کارایی محاسباتی بالاتری را ارائه دهد.

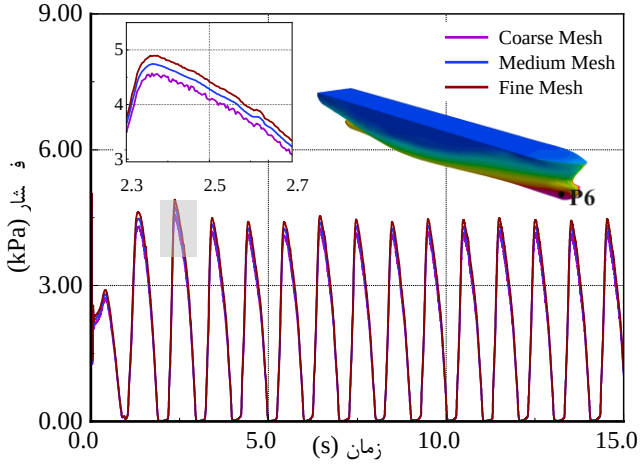
بر اساس بررسی همگرایی در جدول (۳)، فشار در دو نقطه مورد نظر، دارای مقداری بین عدد صفر و یک بوده و همگرایی یکنواخت دارد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که شبکه‌بندی متوسط گزینه‌ای مناسب برای تحلیل‌های عددی با دقت و زمان محاسبه متعادل به‌شمار می‌رود.

جدول ۳-نتایج حاصل از همگرایی اندازه شبکه‌بندی.

مقدار		بیشینه فشار (Pa)	
توضیحات	نماد	P۲	P۶
شبکه‌بندی ریز	S_{G1}	۴۴۵۹٫۴۳	۵۰۳۵٫۱۸
شبکه‌بندی متوسط	S_{G2}	۴۲۲۵٫۶۷	۴۸۹۳٫۲۴
شبکه‌بندی درشت	S_{G3}	۳۹۳۷٫۰۲	۴۷۰۰٫۶۰
تغییرات بین شبکه‌بندی ریز و متوسط	$\varepsilon_{G,21}$	۲۳۳٫۷۶	۱۴۱٫۹۴
تغییرات بین شبکه‌بندی درشت و متوسط	$\varepsilon_{G,32}$	۲۸۸٫۶۵	۱۸۲٫۶۴
نسبت همگرایی	R_G	۰٫۸۰۹	۰٫۷۷۷
نوع همگرایی	/	یکنواخت	یکنواخت



الف) فشار ناشی از کوبش در ناحیه پهلو - نقطه ۲



ب) فشار ناشی از کوبش در ناحیه سینه - نقطه ۶

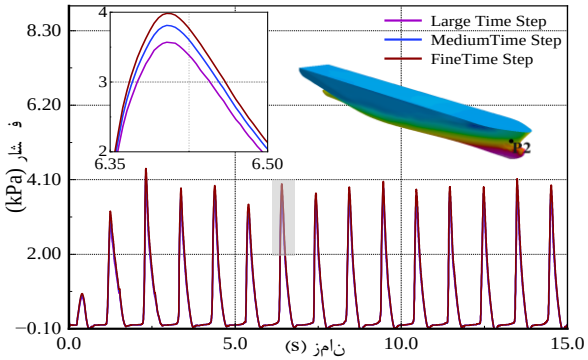
شکل ۱۳- نمودارهای ناشی از فشار کوبش در همگرایی اندازه شبکه.

۶-۳- همگرایی گام زمانی در دینامیک سیالات محاسباتی

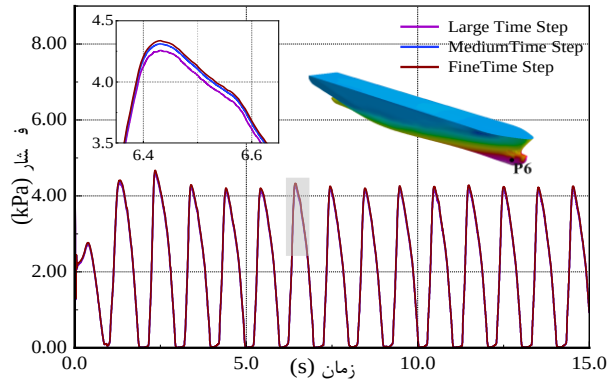
اکنون با استفاده از شبکه‌بندی متوسط به بررسی گام زمانی پرداخته شده است. گام زمانی کوچک‌تر، جزئیات دقیق‌تری از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

پاسخ‌های هیدروالاستیک را ثبت می‌کند. در این مطالعه برای گام زمانی ابتدایی از ۱/۷۰۰ دوره برخورد موج استفاده شده است. بر اساس همین معیار سه گام زمانی ۰٫۰۰۰۸، ۰٫۰۰۱ و ۰٫۰۰۲ برای مطالعه حساسیت گام زمانی استفاده شده است. شکل (۱۴) نمودارهای مربوط به فشارکوبش در سه گام زمانی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تأثیر گام زمانی بر پاسخ‌های هیدرودینامیکی نسبتاً ناچیز بوده، بااین‌حال کاهش گام زمانی موجب افزایش مقدار اوج فشار ناشی از کوبش شده است. از سوی دیگر، منحنی مربوط به گام زمانی متوسط تطابق قابل‌قبولی با نتایج گام زمانی ریز داشته و درعین‌حال زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد.



الف) فشار ناشی از کوبش در ناحیه پهلو - نقطه ۲



ب) فشار ناشی از کوبش در ناحیه سینه - نقطه ۶

شکل ۱۴- نمودارهای ناشی از فشار کوبش در همگرایی اندازه گام زمانی

مطابق داده‌های جدول (۴)، فشار در دو نقطه ۲ و ۶ دارای همگرایی یکنواخت هستند. این موضوع نشان دهنده این است که انتخاب گام زمانی متوسط می‌تواند در بسیاری از تحلیل‌ها، تعادلی مطلوب میان دقت عددی و هزینه محاسباتی ایجاد کند.

با استناد به نتایج ارائه‌شده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) و همچنین جدول‌های (۳) و (۴)، می‌توان نتیجه گرفت که حالت بهینه برای انتخاب گام زمانی و نوع شبکه‌بندی، مربوط به گام زمانی ۰٫۰۰۱ ثانیه و شبکه‌بندی با اندازه متوسط است؛ چراکه این ترکیب، تعادل مناسبی میان دقت نتایج و زمان محاسباتی فراهم می‌کند.

جدول ۴- نتایج حاصل از همگرایی اندازه گام زمانی.

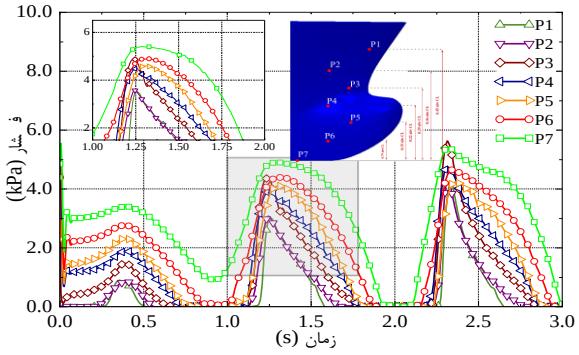
مقدار		بیشینه فشار (Pa)	
توضیحات	نماد	P۲	P۶
گام زمانی ریز	S_{G1}	۴۴۹۳٫۱۴	۴۸۱۵٫۷۳
گام زمانی متوسط	S_{G2}	۴۲۷۸٫۰۰	۴۷۸۷٫۵۳
گام زمانی درشت	S_{G3}	۳۹۶۱٫۴۹	۴۷۲۶٫۱۹
تغییرات بین گام زمانی ریز و متوسط	$\varepsilon_{G,21}$	۲۱۵٫۱۴	۲۸٫۲۰
تغییرات بین گام زمانی درشت و متوسط	$\varepsilon_{G,32}$	۳۱۶٫۵۱	۶۱٫۳۴
نسبت همگرایی	R_G	۰٫۶۷۹	۰٫۴۵۹
نوع همگرایی	/	یکنواخت	یکنواخت

۷- نتایج کوبش

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی کوبش با استفاده از اندرکنش سازه – سیال تا سه ثانیه پس از آغاز شبیه‌سازی ارائه و تحلیل شده‌اند. بررسی تاریخچه زمانی فشار نشان داد که بیشینه فشارهای کوبش در ثانیه‌های نخست رخ می‌دهند و پس از آن پاسخ‌ها با الگوی تناوبی مشابه تکرار می‌شوند. ازاین‌رو، بازه زمانی صفر تا سه ثانیه برای تحلیل پدیده کوبش کافی تشخیص داده شد.

۷-۱- فشار ناشی از کوبش

شکل (۱۵) توزیع فشار کوبش در ۷ نقطه روی سینه‌ی کشتی طی فرایند کوبش را نشان می‌دهد. این نقاط به‌صورت پراکنده در ناحیه سینه‌ی کشتی انتخاب شده‌اند تا نمای دقیقی از رفتار هیدرودینامیکی ناحیه تماس فراهم گردد. فشارها به‌صورت تابع زمان نمایش داده شده‌اند. این داده‌ها مبنای تحلیل اثر بار کوبش بر سازه سینه در این تحلیل خواهد بود. نتایج حاصل از نمودارها نشان می‌دهد که فشار در ناحیه کف کشتی نسبت به نواحی بالاتر کشتی مقدار بیشتری دارد. اگرچه به دلیل تفاوت در هندسه و شرایط بارگذاری، مقایسه کمی مستقیم امکان‌پذیر نیست، اما الگوی تغییرات مکانی فشار و روندهای فیزیکی مشاهده‌شده، از جمله تمرکز بیشینه فشار در ناحیه کف و کاهش آن به در پهلوها، با نتایج گزارش‌شده در مطالعات معتبر پیشین سازگاری مناسبی نشان می‌دهد [۲۱، ۲۳].

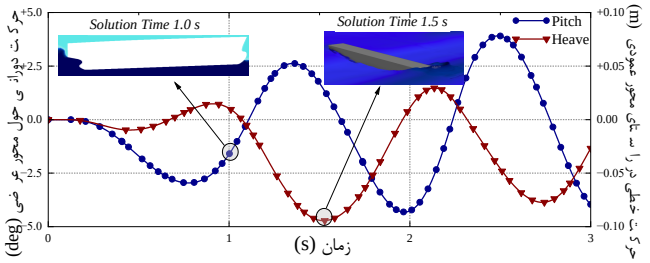


شکل ۱۵- نمودار فشار ناشی از کوبش در هفت نقطه مشخص شده.

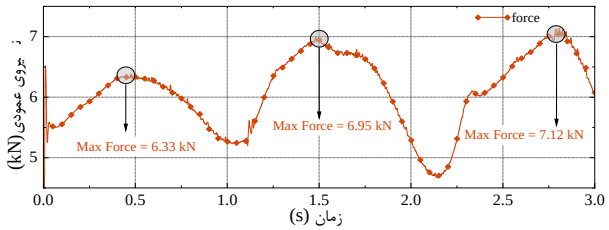
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

۶-۲- حرکات و نیرو ناشی از کوبش

شکل (۱۶) حرکات خطی در راستای محور عمودی، حرکت دورانی حول محور عرضی و همچنین نیروی عمودی وارد شده به کشتی را نشان می‌دهد. بررسی داده‌های حاصل از حرکات امکان تحلیل پاسخ دینامیکی را فراهم می‌سازد. تحلیل همزمان این سه مؤلفه برای درک بهتر اندرکنش بین جریان سیال، سازه و نیز ارزیابی دقت مدل‌سازی عددی در شبیه‌سازی کوبش ضروری است.



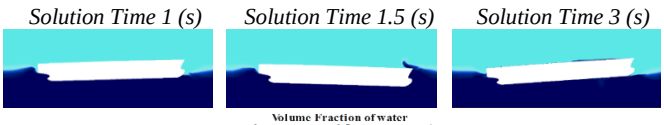
(الف) حرکت خطی در راستای محور عمودی و حرکت دورانی حول محور عرضی



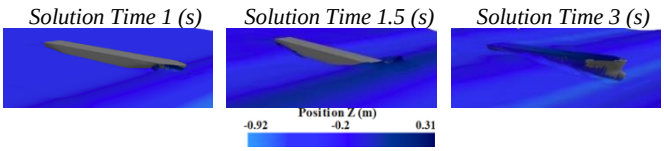
(ب) نیروی عمودی

شکل ۱۶- نمودار حرکات خطی و دورانی کشتی در فرایند کوبش.

بر اساس نتایج شکل (۱۷)، در حین فرایند کوبش، تغییر شکل سطح آزاد نشان‌دهنده وقوع برخورد شدید در ناحیه کف و سینه بدنه است. همچنین در اثر نفوذ بدنه، جابه‌جایی آب و شکل‌گیری جریان و تجمع موضعی سیال در اطراف بدنه مشاهده می‌شود که بیانگر شدت اثر ضربه در این نواحی است. همزمان تغییرات موقعیت عمودی بدنه نشان‌دهنده مرحله نفوذ و ادامه فرآیند برخورد در بازه زمانی مورد بررسی است.



(الف) کسر حجمی سیال

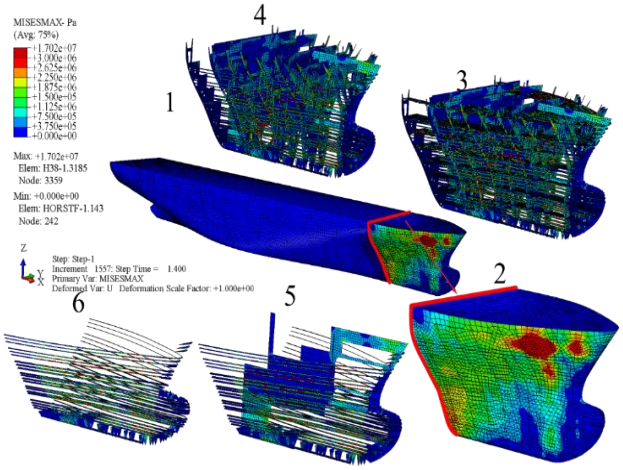


(ب) موقعیت عمودی سیال

شکل ۱۷- تجسم نتایج اندرکنش سازه – سیال در فرایند کوبش.

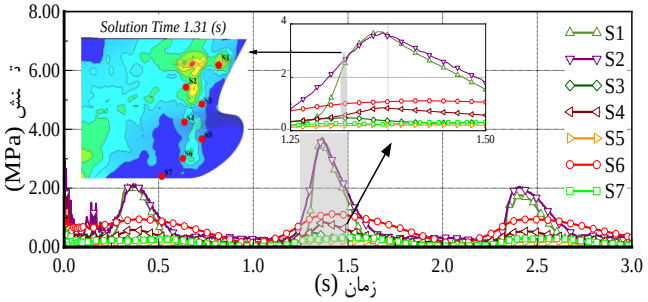
۷-۳- تنش در سازه سینه کشتی

شکل (۱۸) توزیع تنش بر سازه سینه‌ی کشتی در برخورد کشتی به سطح آب را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر قسمت‌های مختلف سینه‌ی کشتی و پوسته بیرونی، به صورت مرحله‌ای جداسازی شده‌اند. شکل نشان می‌دهد در لحظه ۱/۴ ثانیه هنگامی که کشتی در آب وارد شده است بیشینه تنش بر نیم‌عرشه سینه، معادل با ۱۷/۰۲ مگاپاسکال، وارد شده است. مکانی نزدیک به قسمتی از پوسته کشتی که دارای کمترین تعداد تقویت‌کننده می‌باشد. اثر حذف مقاطع طولی در دو سمت بر افزایش میزان و وسعت تنش در پوسته و اجزای داخلی به خوبی در این شکل دیده می‌شود. این در حالی است که اسمعیلی و خدمتی نشان دادند به هنگام حضور دیواره‌های طولی کناری مقدار بیشینه تنش در ناحیه سینه کشتی فراتر از ۱۴/۲۷ مگاپاسکال نمی‌روند[۲۵]. مقایسه‌ی عمیق‌تر نشان داد که بیشینه تنش در مقطع عرضی ۳۸ تقریباً دو برابر مقدار ثبت‌شده در حالت کامل در مطالعه‌ی آنان بود. همچنین، قسمت ششم شکل نشان داد که تقویت‌کننده‌های قرار گرفته بر روی پوسته‌ی سینه‌ی کشتی مقدار قابل توجهی از تنش‌های وارده را جذب می‌کنند.



شکل (۱۸): توزیع تنش معادل بر سازه سینه‌ی کشتی.

شکل (۱۹) نمودارهای تنش در نقاط ۷ گانه بر روی سینه کشتی را نشان می‌دهد. در نمودارها مشاهده می‌شود نقاطی که در خط طولی ناحیه پهلو قرار دارند، دارای بیشترین تنش و نقاطی که در نواحی کف و جلوی سینه‌ی کشتی قرار دارند به دلیل حضور تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی کم‌ترین تنش را ثبت کردند.

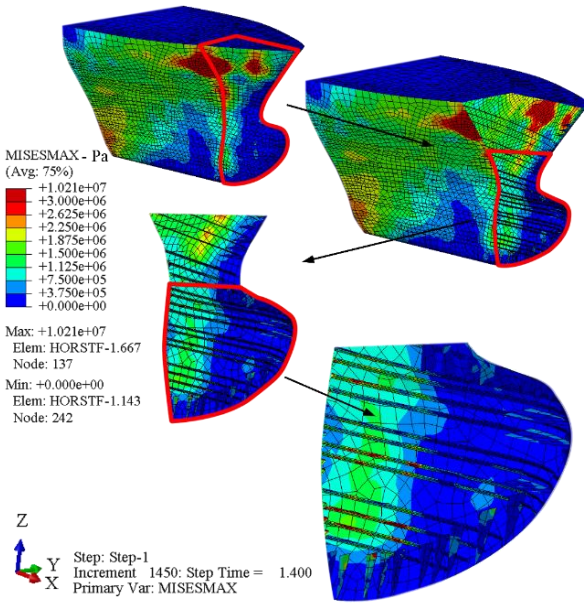


شکل ۱۹- نمودار تنش ناشی از کوبش در هفت نقطه مشخص شده.

شکل (۲۰) توزیع تنش در تقویت‌کننده‌های پوسته‌ی کشتی در ناحیه‌ی سینه را بررسی می‌کند. مشاهده شد که تمرکز تنش در منطقه‌ای از پوسته ایجاد می‌شود که تقویت‌کننده‌ای در آن حضور

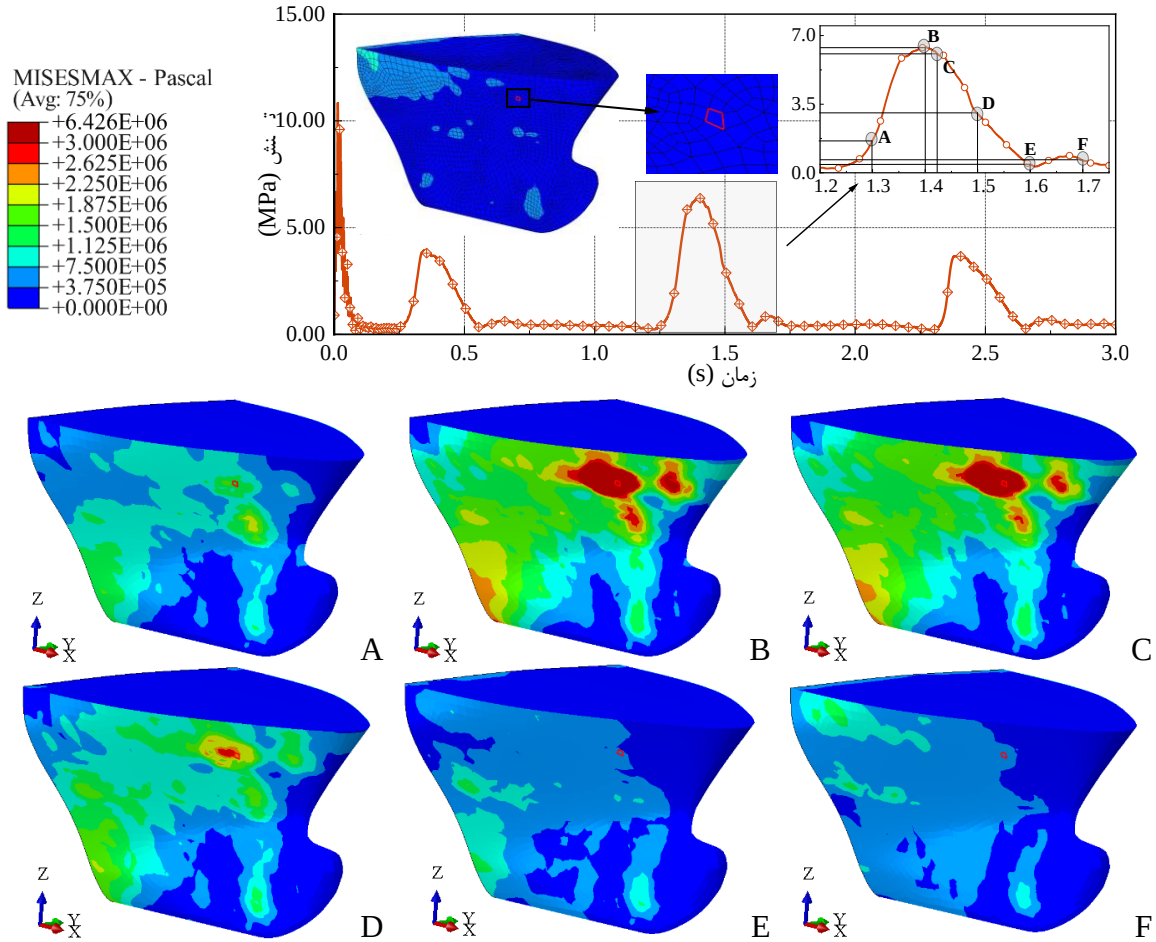
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

ندارد و تنها توسط مقاطع عرضی و افقی تقویت شده است. همچنین، به دلیل حذف مقاطع طولی در دو سمت سینه‌ی کشتی، وسعت تنش به میزان قابل توجهی گسترش یافته است. بیشینه تنش در تقویت‌کننده‌ها کمی بیش از ۱۰ مگاپاسکال ثبت شد که مربوط به تقویت‌کننده‌ی عرضی در ناحیه‌ی کف بود. این در حالی است که اسمعیلی و خدمتی نشان دادند که در حالت کامل، بیشینه تنش در این تقویت‌کننده‌ها فراتر از ۶٫۵ مگاپاسکال نمی‌رود [۲۵]. شکل (۲۱) توزیع تنش معادل بر روی پوسته کشتی در بازه زمانی دومین کوبش، یعنی از لحظه ۱٫۲ ثانیه تا لحظه ۱٫۸ ثانیه را نشان می‌دهد. این بازه زمانی کوبش دوم است شامل لحظات بحرانی پس از برخورد بدنه با سطح آب و زمان اوج‌گیری پاسخ سازه‌ای است که نقش کلیدی در ارزیابی مقاومت سازه در برابر کوبش دارد. در ادامه، به‌تدریج این مقدار افزایش‌یافته و در زمان ۱٫۳۷ ثانیه به نقطه‌ی اوج خود با مقدار بیشینهٔ ۶٫۴۲۶ مگاپاسکال رسیده است. این مقدار، حداکثر تنش ثبت‌شده در کل بازه‌ی زمانی تحلیل در این حالت بر روی پوسته بیرونی است که بیانگر وقوع شدیدترین پاسخ سازه‌ای در اثر انتقال نیروی کوبش به بدنه کشتی است. پس از رسیدن تنش به نقطه اوج، مقادیر تنش به‌تدریج کاهش می‌یابد.



شکل ۲۰- توزیع تنش معادل در تقویت‌کننده‌های بدنه کشتی.

در زمان ۱٫۴۵ ثانیه، مقدار بیشینه تنش به ۴٫۴۹۵ مگاپاسکال رسیده که نسبت به مقدار اوج حدود ۳۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این روند کاهشی، ناشی از پایان انتقال موج اولیه، شروع بازگشت ارتجاعی سازه و تعدیل فشار در ناحیه‌ی تماس با آب است.

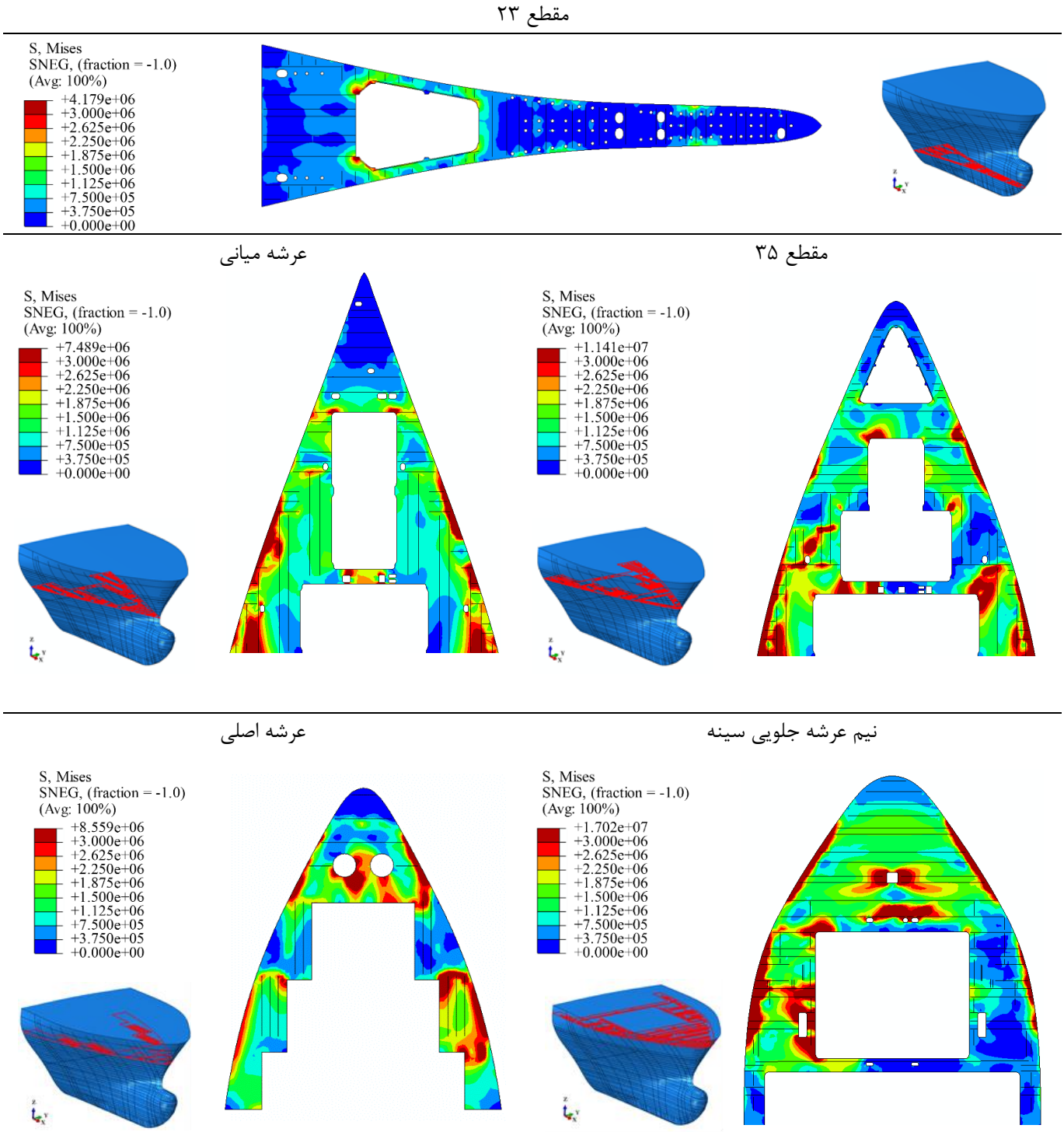


شکل ۲۱- تغییرات تنش معادل بر روی پوسته بیرونی ناحیه سینه کشتی در بازه دومین کوبش به سطح آب بر روی یک جزء.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

۴-۷- تنش در مقاطع اُفقی ناحیه‌ی سینه کشتی

در این بخش، توزیع تنش در مقاطع افقی ناحیهٔ سینه‌ی کشتی در هنگام حذف دیواره‌های طولی کناری بررسی شد. در تحلیل توزیع تنش در مقاطع افقی سینه‌ی کشتی باید توجه داشت که مقاطع مختلف بر میزان تغییرات تنش یکدیگر اثر می‌گذارند. شکل (۲۲) تغییرات تنش در برخی از مقاطع افقی ناحیهٔ سینه را نشان می‌دهد. مشاهده شد که هر چه از ناحیهٔ کف سینه به سمت عرشه حرکت می‌کنیم، تغییرات تنش در مقاطع افقی بالاتر، بیشتر نمایان می‌شود؛ به‌گونه‌ای که وسعت و بیشینه تنش در نیم‌عرشه‌ی جلویی سینه نسبت به سایر مقاطع مقدار بالاتری را نشان می‌دهد. به‌طورکلی، مقاطع واقع در ناحیهٔ پهلوها نسبت به دیگر مقاطع تنش بالاتری را تجربه کردند. این روند لزوماً با ارتفاع مقطع نسبت به کف رابطه خطی ندارد؛ برای نمونه، تنش در مقطع ۳۵ نسبت به عرشه اصلی بالاتر ثبت شده است. این امر می‌تواند ناشی از اثر تقویت‌کننده‌ها و دیواره‌های مجاور باشد که موجب بازتوزیع تنش و تمرکز آن در مقاطع مشخصی مانند مقطع ۳۵ می‌شوند.

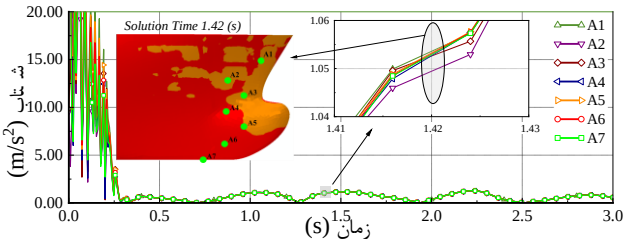


شکل ۲۲- توزیع تنش معادل در مقاطع افقی در ۱/۵ ثانیه - پاسکال.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

۷-۵- تغییرات شتاب

شکل (۲۳) مقایسه‌ی شتاب را در هفت نقطه روی پوسته‌ی شناور نشان می‌دهد. پراکندگی عددی در ابتدای شبیه‌سازی موجب بروز ارتعاشات اولیه در شتاب این نقاط شد که با گذشت زمان به حالت پایدار بازگشتند. در طول هر بار کوبش کشتی به سطح آب، دامنه‌ی این ارتعاشات افزایش یافته و سپس مجدداً میرا گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که با حرکت از کف به سمت عرشه، شتاب افزایش می‌یابد؛ این افزایش در ناحیه‌ی پهلوها ناشی از ارتفاع بیشتر آن‌ها نسبت به کف در هنگام برخورد با موج است. در مقایسه با پژوهش اسمعیلی و خدمتی، تغییرات شتاب در ناحیه‌ی کف حدود ۴٫۵ درصد و در ناحیه‌ی پهلوها حدود ۶ درصد بیشتر ثبت شده است.



شکل ۲۳- نمودار شتاب ناشی از کوبش در هفت نقطه مشخص شده

۷-۶- مقایسه نتایج مدل ساده‌سازی شده با مدل کامل

جدول (۵) مقایسه کمّی بیشینه تنش معادل را در مقاطع افقی مختلف سینه برای مدل ساده‌سازی‌شده و مدل کامل ارائه می‌دهد. مقادیر مربوط به مدل کامل پیش‌تر در پژوهش نویسنده اول شبیه‌سازی و بررسی شده است [۲۵] و در این مطالعه صرفاً برای مقایسه با مدل ساده‌سازی‌شده به‌کار گرفته شده است. ستون نسبت تنش معادل از تقسیم تنش معادل مدل ساده‌سازی‌شده بر مدل کامل به‌دست آمده است؛ به‌طوری‌که مقادیر بزرگ‌تر از یک بیانگر افزایش تنش در مدل بدون دیواره هستند. نتایج نشان می‌دهد با حرکت به سمت مقاطع بالاتر و نواحی تحت تأثیر دیواره طولی کناری (از مقطع ۲۶ تا نیم‌عرشه جلویی)، اختلاف تنش بین دو مدل افزایش یافته و بیشترین اختلاف در مقاطع بالایی سینه مشاهده می‌شود.

جدول ۵-مقایسه نتایج تنش معادل ناشی از کوبش در دو مدل.

مقطع مورد بررسی	مدل ساده‌سازی شده (Pa)	مدل کامل (Pa)	نسبت تنش معادل
کف داخلی	۱٫۴۵۷×۱۰⁶	۱٫۵۶۲×۱۰⁶	۰٫۹۳
مقطع ۲۳	۴٫۱۷۹×۱۰⁶	۴٫۳۶۱×۱۰⁶	۰٫۹۶
مقطع ۲۶	۲٫۸۷۷×۱۰⁶	۱٫۷۵۶×۱۰⁶	۱٫۶۳
مقطع ۲۹	۳٫۸۳۱×۱۰⁶	۲٫۷۰۱×۱۰⁶	۱٫۴۲
عرشه میانی	۷٫۴۸۹×۱۰⁶	۳٫۰۵۹×۱۰⁶	۲٫۴۵
مقطع ۳۵	۱۱٫۱۴۰×۱۰⁶	۳٫۰۲۵×۱۰⁶	۳٫۶۸
عرشه اصلی	۸٫۵۵۹×۱۰⁶	۳٫۹۸۳×۱۰⁶	۲٫۱۵
نیم عرشه جلویی	۱۷٫۰۲۰×۱۰⁶	۸٫۰۳۹×۱۰⁶	۲٫۱۲

در مقطع کف داخلی و مقطع ۲۳ نیز که در ناحیه پایین سینه قرار دارد، تنش مدل ساده‌سازی‌شده اختلاف اندکی با مدل کامل نشان می‌دهد. اما در مقاطع بالاتر، شکاف بین دو مدل به‌تدریج افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که در عرشه میانی و نیم‌عرشه جلویی، تنش مدل ساده‌سازی‌شده به‌ترتیب ۲٫۴۵ و ۲٫۱۲ برابر مدل کامل می‌رسد و بیشترین اختلاف در مقطع ۳۵ با ۳٫۷ برابر ثبت شده است. این نتایج نشان می‌دهد که دیواره‌های طولی به‌ویژه در مقاطع میانی و فوقانی سینه نقش مؤثری در کنترل تنش ایفا می‌کنند.

۸ – نتیجه گیری

در این مطالعه، پاسخ هیدروالاستیک سینه‌ی کشتی کانتینربر تحت بارهای کوبش با هدف بررسی اثر حذف دیواره‌های طولی کناری مورد تحلیل قرار گرفت. شبیه‌سازی عددی با استفاده از جفت‌سازی دوطرفه بین حلگر اجزای محدود و حلگر دینامیک سیالات محاسباتی انجام شد تا اندرکنش سازه – سیال به‌صورت دقیق ثبت شود.

نتایج نشان دادند که حذف دیواره‌های طولی موجب افزایش وسعت و شدت تنش‌ها در پوسته و تقویت‌کننده‌ها شد و تمرکز تنش در مناطقی که فاقد تقویت‌کننده بودند، مشاهده گردید بیشینه فشار کوبش در نواحی پایینی سینه ثبت شد و با حرکت از کف به سمت عرشه، همگام با افزایش شتاب ناشی از ارتفاع بیشتر پهلو نسبت به کف، تغییرات تنش نیز افزایش یافت. مقایسه نتایج مدل ساده‌شده با مدل کامل نشان داد که اختلاف تنش بین دو مدل در مقاطع پایینی ناچیز (کمتر از ۱۰٪ در مقطع ۲۳) و در مقاطع بالایی قابل‌توجه است؛ به‌گونه‌ای که این اختلاف در عرشه میانی و عرشه اصلی ۲٫۱۵ برابر، در مقطع ۳۵ حدود ۳٫۷ برابر و در نیم‌عرشه جلویی ۲٫۱۲ برابر ثبت گردید. این اختلاف فزاینده، نقش مهارکنندگی دیواره‌های طولی در کنترل تنش، به‌ویژه در مقاطع میانی و فوقانی سینه را تأکید می‌کند.

بر این اساس، نتایج حاصل بیانگر اثر مهارکننده دیواره‌های طولی در کاهش شدت و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در نواحی میانی و فوقانی سینه کشتی در چارچوب مدل عددی حاضر است. همچنین انتخاب مناسب شبکه‌بندی و گام زمانی، تعادلی مطلوب بین دقت نتایج و زمان محاسباتی فراهم نمود.

۹- محدودیت‌های پژوهش و مسیر تحقیقات آینده

از جمله محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به محدود بودن شرایط بررسی‌شده به یک سرعت پیشروی و یک ارتفاع موج مشخص اشاره کرد. همچنین، اگرچه روش عددی به‌کاررفته از طریق مسئله مرجع کوبش گوه و مقایسه با داده‌های تجربی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

اعتبارسنجی شد، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های تجربی یا عددی متناظر با هندسه، آرایش سازه‌ای و شرایط بارگذاری مدل حاضر، امکان انجام مقایسه کمی مستقیم برای سینه کشتی مورد مطالعه فراهم نبود. برای پژوهش‌های آتی، بررسی دامنه گسترده‌تری از شرایط دریایی، شامل سرعت‌های پیشروی و ارتفاع امواج مختلف، ارزیابی عملکرد سایر مدل‌های آشفتگی و انجام مطالعات مقایسه‌ای کمی در صورت دسترسی به داده‌های متناظر پیشنهاد می‌شود.

۱۰- مشارکت نویسندگان

دانیال اسمعیلی روشناوند: طراحی پژوهش، روش‌شناسی، شبیه‌سازی‌های عددی، تحلیل داده‌ها، نگارش پیش‌نویس مقاله. محمدرضا خدمتی: نظارت، اعتبارسنجی، بازبینی و ویرایش، مدیریت پروژه.

۱۱- بیانه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پشتیبان نتایج این مطالعه از طریق نویسنده مسئول و با درخواست معقول در دسترس هستند. برخی داده‌ها ممکن است به دلیل ملاحظات سازمانی یا مالکیتی محدود باشند.

۱۲- بیانیه ناشر

هرگونه دیدگاه و اطلاعات بیان‌شده در این نشریه متعلق به نویسندگان است و لزوماً دیدگاه‌های ناشر را منعکس نمی‌کند.

۱۳ - مراجع

1- Luo, H., Wang, S. and Guedes Soares, C., (2011), *Numerical prediction of slamming loads on a rigid wedge subjected to water entry using an explicit finite element method*, Advances in Marine Structures, p.41–47. https://doi.org/10.1201/b10771-7

2- von Karman, T., (1929), T*he Impact on Seaplane Floats during Landing, National Advisory Committee for Aeronautics*, p.309-313.

3- Wagner, H., (1932), *Über Stoß- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten*, ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol.12, No.4, p.193-215. https://doi.org/10.1002/zamm.19320120402

4- Zhao, R. and Faltinsen, O., (1993), *Water entry of two-dimensional bodies*, Journal of Fluid Mechanics, Vol.246, p.593-612. https://doi.org/10.1017/S002211209300028X

5- Lv, J. and Grenestedt, J.L., (2015), *Analytical study of the responses of bottom panels to slamming loads*, Ocean Engineering, Vol.94, p.116-125. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.11.009

6- Sinha, S., Kar, S. and Sarangdhar, D., (2008), *Development of Simplified Structural Design Formulation for Slamming Loads*, Proceedings of OMAE 2008. https://doi.org/10.1115/OMAE2008-57740

7- Paik, J. and Shin, Y., (2006), *Structural damage and strength criteria for ship stiffened panels under impact pressure actions arising from sloshing, slamming and green water loading*, Ships and Offshore Structures, Vol.1, p.249-256. https://doi.org/10.1533/saos.2006.0109

8- El Malki Alaoui, A. and Nême, A., (2014), *Pressure Measurements Comparison Using Transducers During Vertical Slamming Test*, Proceedings of PVP 2014. https://doi.org/10.1115/PVP2014-28974

9- Park, J., Choi, J.H., Lee, H.-H. and Rhee, S.H., (2020), *Experimental study on the effects of stern bulb arrangement on the slamming load*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.12, p.518-530. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2020.03.006

10- Shin, H., Seo, B. and Cho, S.-R., (2018), *Experimental investigation of slamming impact acted on flat bottom bodies and cumulative damage*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.10, No.3, p.294-306. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.06.004

11- Dessi, D. and Ciappi, E., (2013), *Slamming clustering on fast ships: From impact dynamics to global response analysis*, Ocean Engineering, Vol.62, p.110-122. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.051

12- Jiao, J., Ren, H., Sun, S.-Z. and Adenya, C., (2016), *Experimental Investigation of Wave-Induced Ship Hydroelastic Vibrations by Large-Scale Model Measurement in Coastal Waves*, Shock and Vibration, Vol.2016, p.1-14. https://doi.org/10.1155/2016/9296783

13- Kim, K.-H., Kim, B.W. and Hong, S.Y., (2019), *Experimental investigations on extreme bow-flare slamming loads of 10,000-TEU containership*, Ocean Engineering, Vol.171, p.225-240. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.045

14- Wang, S. and Guedes Soares, C., (2013), *Comparison of simplified approaches and numerical tools to predict the loads on bottom slamming of ship structures*, Marine Structures, p.157-168. https://doi.org/10.1201/b15813-21

15- Wang, S. and Guedes Soares, C., (2013), *Slam induced loads on bow-flared sections with various roll angles, Ocean Engineering*, Vol.67, p.45-57. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.04.009

16- Chen, L.L., Ren, H.L., Feng, G.Q. and Duan, F., (2014), *Numerical Calculation of Slamming Pressure on Wet-Deck of Trimaran*, Applied Mechanics and Materials, Vol.543-547, p.414-419. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.543-547.414

17- Chen, C.-R. and Chen, H.-C., (2015), *CFD Simulation of Bow and Stern Slamming on a Container Ship in Random Waves*, International

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]

Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.25, p.185-193. https://doi.org/10.17736/ijope.2015.sh15
18- Lee, Y., White, N., Wang, Z., Zhang, S. and Hirdaris, S.E., (2011), *Comparison of Springing And Whipping Responses of Model Tests With Predicted Nonlinear Hydroelastic Analyses*, Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference.
19- Hirdaris, S.E. et al., (2014), *Loads for use in the design of ships and offshore structures*, Ocean Engineering, Vol.78, p.131-174. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.09.012
20- Lakshmynarayanana, P.A.K. and Hirdaris, S., (2020), *Comparison of nonlinear one- and two-way FFSI methods for the prediction of the symmetric response of a containership in waves*, Ocean Engineering, Vol.203, p.107179. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107179
21- Jiao, J., Huang, S., Wang, S. and Guedes Soares, C., (2021), *A CFD–FEA two-way coupling method for predicting ship wave loads and hydroelastic responses*, Applied Ocean Research, Vol.117, p.102919. https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102919
22- Chen, Z., Jiao, J., Wang, Q. and Wang, S., (2022), *CFD-FEM Simulation of Slamming Loads on Wedge Structure with Stiffeners Considering Hydroelasticity Effects*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.10, p.1591. https://doi.org/10.3390/jmse10111591
23- Chen, Z., Jialong, J., Shuai, C., Fan, Z. and Feng, Q., (2024), *CFD-FEM simulation of hydroelastic responses and slamming loads of a bow-flare ship advancing in head regular waves*, Ships and Offshore Structures, p.1-17. https://doi.org/10.1080/17445302.2024.2397298
24- Jiao, J., Chen, Z., Xu, W., Bu, S. and Zhang, P., (2024), *Asymmetric water entry of a wedged grillage structure investigated by CFD-FEM co-simulation*, Ocean Engineering, Vol.302, p.117612. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117612
25- Esmaeili Roshanavand, D., (2025), Response analysis of ship bow structure under slamming load, MSc Thesis, Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic). (In Persian)
26- Xie, H., Liu, X., Zhang, Z., Ren, H. and Liu, F., (2021), *Methodology of evaluating local dynamic response of a hull structure subjected to slamming loads in extreme sea*, Ocean Engineering, Vol.239, p.109763. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109763
27- DNV, (2021), DNV-CG-0127: *Finite Element Analysis, Class Guideline*, Edition August 2021, DNV AS.
28- Nazari, A., Chen, L., Battaglia, F., Ferris, J.B., Flintsch, G. and Taheri, S., (2020), *Prediction of hydroplaning potential using fully coupled finite element-computational fluid dynamics tire models*, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.142, No.10, p.101202. https://doi.org/10.1115/1.4047393
29- Wilson, R.V., Carrica, P.M. and Stern, F., (2006), *Unsteady RANS method for ship motions with application to roll for a surface combatant*, Computers & Fluids, Vol.35, No.5, p.501-524. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2004.12.005
30- ITTC, (2017), *Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures*, ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, p.1-13.
31- Huang, S., Jiao, J. and Guedes Soares, C., (2022), *Uncertainty analyses on the CFD–FEA co-simulations of ship wave loads and whipping responses*, Marine Structures, Vol.82, p.103129. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103129

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-06-30]