



# 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<sup>1</sup>, Mohammad Reza Khedmati<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. in Naval Architecture Engineering – Ship Structures, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; [daniyal.esmaeili@aut.ac.ir](mailto:daniyal.esmaeili@aut.ac.ir)

<sup>2</sup> Professor, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; [khedmati@aut.ac.ir](mailto: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:

Research paper

### 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:** © 2026 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/>]



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

دانیال اسماعیلی روشناوند<sup>۱</sup>، محمدرضا خدمتی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی دریا-سازه کشتی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، [daniyal.esmaeili@aut.ac.ir](mailto:daniyal.esmaeili@aut.ac.ir)

<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، [khedmati@aut.ac.ir](mailto:khedmati@aut.ac.ir)

### 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 استار-سی‌ام پلاس انجام گرفت. نتایج نشان دادند که بیشینه فشار کوبش در ناحیه کف سینه و بیشینه تنش معادل در ناحیه پهلوه‌های 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.

### اطلاعات مقاله

ناریخچه 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:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

بار کوبش

اندرکنش سازه - سیال

هیدروالاستیسیت کشتی

جفت‌سازی دوطرفه

سازه‌ی سینه کشتی

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز

(CC BY) ارسال شده است.

ISSN: 2645-8136



## ۱ - مقدمه

هنگامی که کشتی در دریای مواج حرکت می‌کند، به دلیل وجود حرکات عمودی نسبی قابل توجه 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. ازسوی دیگر، 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 فون کارمن و سپس واگنر برمی‌گردد که پایه‌های تئوری برخورد هیدرودینامیکی را بنا نهادند [۲-۳]. 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 ساده‌شده‌ی نظیر تیر اوایلر-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 [۵-۶]. 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 [۸-۹]. 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 تحت تأثیر 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 [۱۱-۱۳].

با پیشرفت توان محاسباتی، روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به ابزار اصلی پژوهش‌های کوبش تبدیل شدند. از روش‌هایی مانند فرمول‌بندی لاگرانژی - اوپلری 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 [۱۶-۱۷]. اندرکنش سیال - سازه نقش تعیین‌کننده‌ای در پیش‌بینی پاسخ هیدروالاستیک کشتی‌ها دارد [۱۸-۱۹].

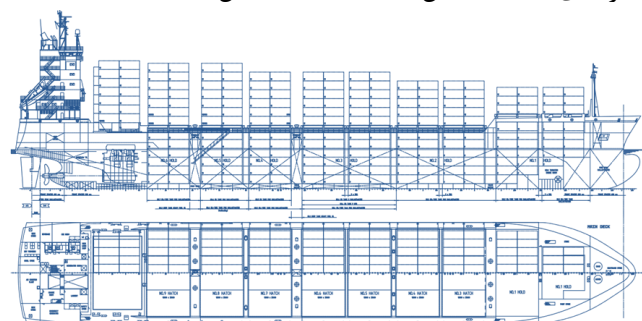
برای شبیه‌سازی این اثرات، روش‌های اندرکنش سازه - سیال توسعه یافته‌اند. روش‌های یک‌طرفه ساده‌تر و سریع‌ترند، اما اثر جرم افزوده را نادیده می‌گیرند و اغلب ارتعاشات با فرکانس بالا را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند [۲۰]. در مقابل، روش‌های دوطرفه با تبادل هم‌زمان نیروها و جابه‌جایی‌ها، بین حلگرهای سازه‌ای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

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.

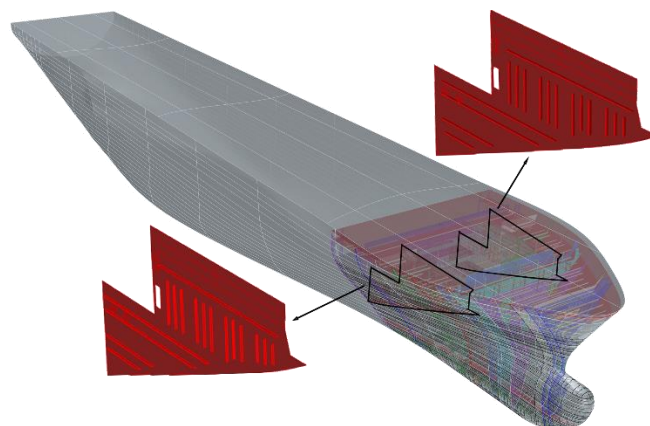
مطالعات محدودی به تأثیر تغییرات سازه‌ای داخلی سینه بر استحکام بدنه پرداخته‌اند، اما هیچ‌یک، حذف دیواره‌های طولی و اثر آن بر پاسخ دینامیکی تحت کوبش را بررسی نکرده‌اند. این خلأ از آن‌رو اهمیت دارد که بدون شناخت نقش این اجزاء در رفتار هیدروالاستیک، هرگونه اصلاح چیدمان داخلی با اهدافی نظیر کاهش وزن یا ساده‌سازی ساخت، می‌تواند با عدم قطعیت‌های 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.

## ۲ - مدل سازه‌ای

در این پژوهش، کشتی کانتینربر با طول ۱۸۷ متر به منظور بررسی اندرکنش سازه - سیال و تحلیل رفتار سازه‌ای در ناحیه سینه کشتی تحت بار کوبش، مورد استفاده 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)

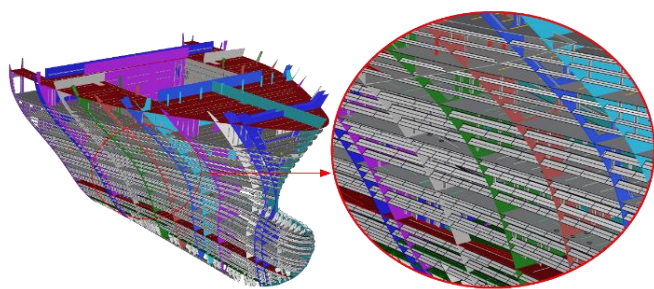


(ب)

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 | ابعاد کشتی مدل |
|----------------------------|-----------------|----------------|
|                            | (۱:۱)           | (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)

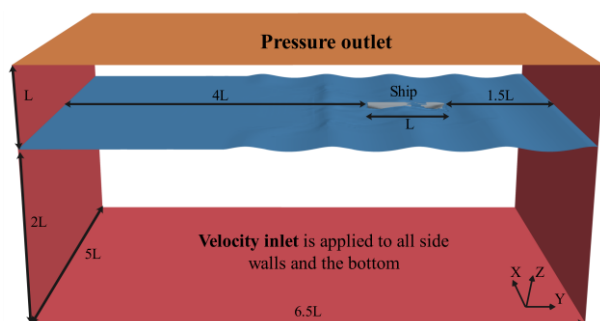
شکل ۲- دیواره‌های طولی کناری حذف شده در مدل کشتی.

## ۳ - مدل‌سازی عددی روش اجزای محدود - دینامیک سیالات محاسباتی

در این پژوهش با به‌کارگیری روش جفت‌سازی دوطرفه بین حلگر سیالاتی استار - سی‌سی‌ام پلاس 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

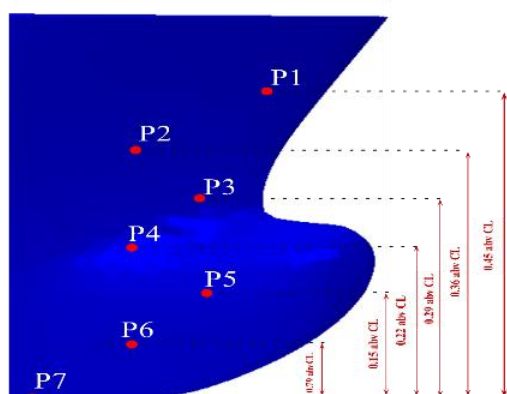
شکل (۳) مخزن عددی مورد استفاده برای انجام محاسبات را نشان می‌دهد. شرایط مرزی در تمامی دیواره‌ها به جز دیواره بالایی، سرعت ورودی و در دیواره بالایی به صورت فشار خروجی تعریف شده است. همچنین شرط عدم لغزش برای بدنه کشتی نیز در نظر گرفته شده است. مخزن عددی دارای ابعادی برابر با  $۶/۵ \times ۵ \times ۳$  طول کشتی می‌باشد. این مقدار به خوبی می‌تواند از تغییرات ناگهانی جریان 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 آشفتگی، چند فاز و گسسته‌سازی بالادست مرتبه دوم به کار گرفته شده است. در این مطالعه مدل آشفتگی کا - اپسیلون به دلیل پایداری عددی، هزینه محاسباتی معقول و کاربرد گسترده در مسائل کوبش

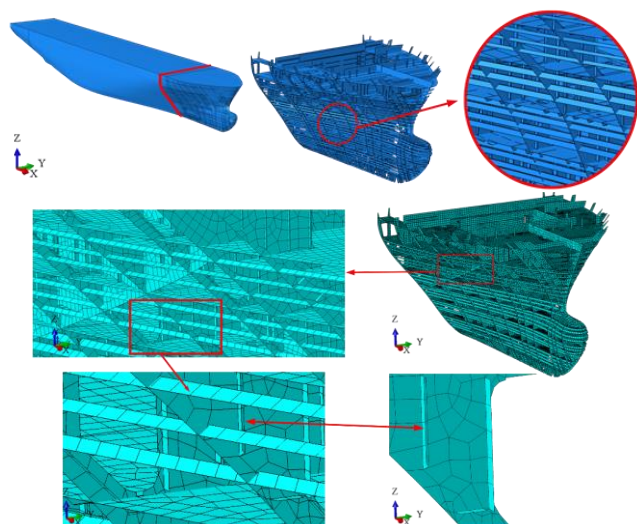
برای مطالعه کوبش سینه، ۷ نقطه به منظور ثبت دقیق فشار بر روی سینه کشتی و پهلوها قرار گرفته است. محل دقیق این نقاط در شکل (۵) مشاهده می‌کنید.



شکل ۵- نقاط تعیین شده بر روی سینه کشتی.

### ۳-۲- مدل اجزای محدود

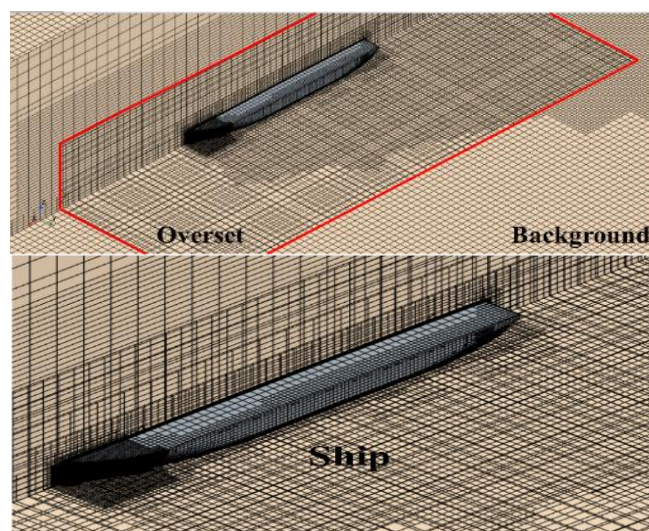
شکل (۶) مدل اجزای محدود کشتی در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد که شامل ناحیه‌ی سینه با کلیه‌ی جزئیات سازه‌ای، بدنه‌ی کشتی و پوسته‌ی بیرونی آن است. فلز مورد استفاده دارای چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول یانگ ۲۰۶ گیگاپاسکال و ضریب پوواسون ۰/۳ می‌باشد. فلز فولاد استحکام بالا با مقدار حد الاستیک ۳۱۵ 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 گونه‌ای که مرکز جرم تغییر نکند، افزایش ضخامت داده شده 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 ژئ و همکاران یافت [۲۶].



شکل ۶- مدل سه بعدی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس.

انتخاب شده است. روش حجم سیال برای بررسی سطح تماس آب‌وهوا در نظر گرفته شده که با استفاده از روش نیمه‌ضمنی 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 ژئ و همکاران یافت [۲۶].

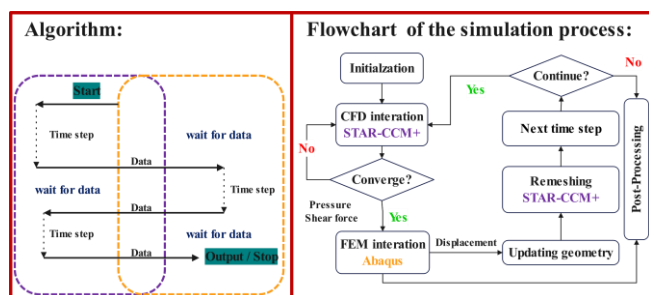
در این مطالعه از موج استوکس مرتبه پنج با سرعت ۱/۷۵ متر بر ثانیه (معادل عدد فرود ۰/۲۶) با نسبت طول موج به طول کشتی برابر یک و ارتفاع موج ۰/۲۸ متر در مدل مقیاس شده استفاده شده است. همچنین سطح آب مماس بر مرکز جرم کشتی مدل قرار دارد. گام زمانی مورد استفاده ۱/۷۰۰ دوره برخورد موج برای شبیه سازی می‌باشد. کشتی 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 مدل سازی، 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 به صورت 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 به عنوان سلول شش‌وجهی تلقی می‌گردند. برای افزایش دقت تحلیل، ناحیه پیرامون سطح آزاد و سازه به صورت محلی ریز شبکه‌بندی شده است.



شکل ۴: طرح شبکه‌بندی در دینامیک سیالات محاسباتی.

انتقال دقیق‌تر اطلاعات، از تکنیک شبکه‌بندی پوششی و مورفر در نرم‌افزار استار - سی‌سی‌ام پلاس استفاده شده و شبیه‌سازی هم‌زمان تا دستیابی به شرط همگرایی ادامه می‌یابد. اطلاعات دقیق‌تر در مورد شبیه‌سازی هم‌زمان دوطرفه را می‌توان در کار چن 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 قابل توجهی 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.

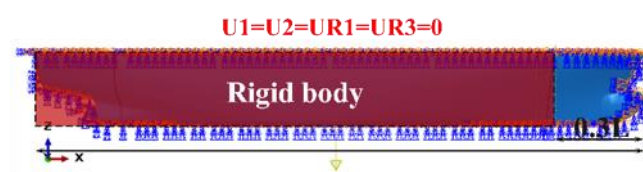


شکل ۸- روندنمای روش جفت‌سازی دوطرفه [۲۸].

#### ۵- اعتبارسنجی روش عددی بر اساس مسئله کوبش گوه

به‌منظور اعتبارسنجی روش عددی، مطالعه‌ای بر اساس آزمایش انجام‌شده در آزمایشگاه کشتی مدل کشتی دانشگاه مهندسی هاربین صورت گرفت [۲۲]. مدل آزمایشگاهی شامل یک گوه فولادی به ابعاد  $1500 \times 900 \times 750$  میلی‌متر و وزن ۵۵۳ کیلوگرم با زاویه خیز ۴۵ درجه است. این گوه دارای چهار ردیف تقویت‌کننده طولی T شکل ( $5 \times 35 \times 50$  میلی‌متر) و چهار ردیف تقویت‌کننده عرضی ( $70 \times 5$  میلی‌متر) می‌باشد. به‌منظور تطابق وزن مدل عددی با نمونه تجربی، مطابق با کار چن 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.

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 هشت‌گه‌ای و تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی با اجزای چهارضلعی چهارگه‌ای 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 مرزی دو درجه آزادی 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].



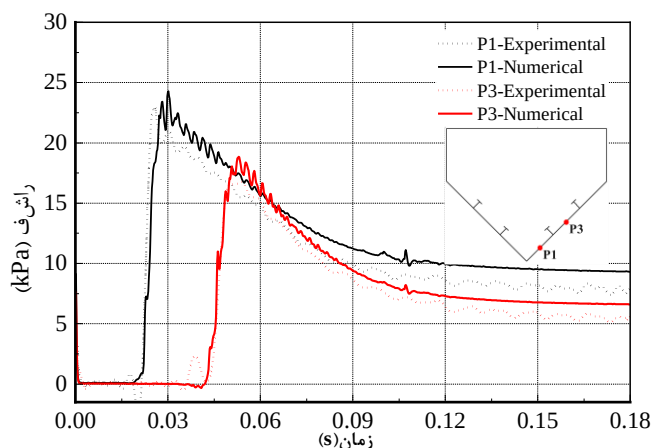
شکل ۷- شرایط مرزی اعمال شده در آباکوس.

#### ۴- روش جفت‌سازی دوطرفه

شبیه‌سازی عددی فرایند کوبش با استفاده از جفت‌سازی دوطرفه بین حلگر اجزای محدود آباکوس و حلگر دینامیک سیالات محاسباتی استار - سی‌سی‌ام پلاس 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 لاکسمینارایانا 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 هیدرواستاتیک 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 باز می‌گرداند. برای

مدل سازی عددی، قابل انتظار بوده و در محدوده قابل قبول گزارش شده در مطالعات مشابه قرار دارد. بنابراین، نتایج به دست آمده بیانگر توانایی روش عددی به کاررفته در بازتولید فشارهای کوبش و پیش بینی مناسب روندهای فیزیکی حاکم بر پدیده هستند.



شکل ۱۱- مقایسه فشار کوبش حاصل از شبیه سازی و آزمایش.

نتایج این بخش نشان داد که روش عددی به کاررفته توانایی بازتولید فشارهای کوبش را با دقت مناسبی دارد و روندهای فیزیکی حاکم بر پدیده را به خوبی پیش بینی می کند. با توجه به اعتبار روش، در ادامه به تحلیل هم گرایی شبکه و گام زمانی برای مدل کشتی کانتینربر پرداخته شده و نتایج حاصل از شبیه سازی نهایی ارائه می گردد.

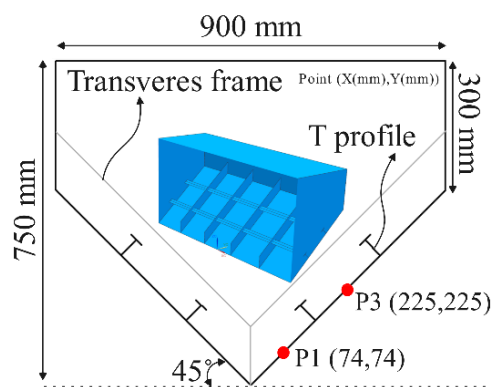
## ۶- همگرایی نتایج عددی

### ۶-۱- فرایند همگرایی

در بررسی خطا و عدم قطعیت شبیه سازی عددی، وابستگی نتایج به تغییرات تکرار داخلی در مقایسه با شبکه و گام زمانی ناچیز است [۲۹]. بنابراین، در مطالعه حاضر فقط عدم قطعیت شبکه بندی و عدم قطعیت گام زمانی بررسی شده اند [۳۰]. در بررسی عدم قطعیت های ناشی از مدل سازی و شبیه سازی، حلگر دینامیک سیالات محاسباتی با عدم قطعیت های بیشتری نسبت به حلگر اجزای محدود روبه رو است [۳۱]. به همین منظور می توان فقط همگرایی اندازه شبکه بندی در دینامیک سیالات محاسباتی و اندازه گام زمانی را با در نظر گرفتن مقدار ثابتی از اندازه جزء بندی در اجزای محدود بررسی کرد.

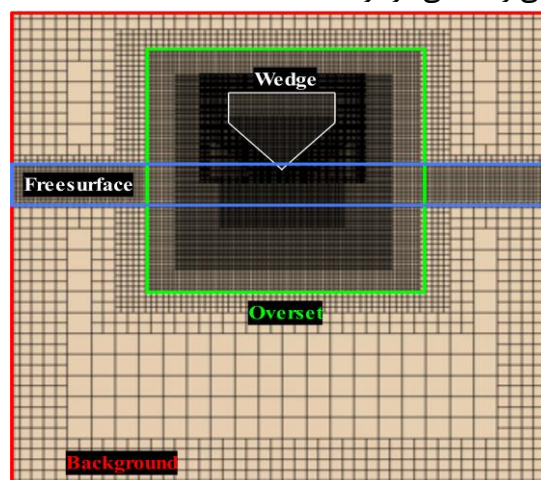
مطابق با دستورالعمل آی تی تی سی<sup>۱</sup> برای سه طرح شبکه بندی از نسبت همگرایی  $R_i$  استفاده می شود. در مطالعه همگرایی شبکه بندی  $i$  با  $g$  جایگزین و در مطالعه همگرایی گام زمانی  $t$  به جای  $i$  استفاده می شود. مقدار  $R_i$  از نسبت تغییرات بین

مطابق با پژوهش چن و همکاران، نقاطی را برای اندازه گیری فشار بر روی گوه مشخص شده است (شکل (۹)).



شکل ۹- صفحه عرضی مدل سازی گوه [۲۲].

دامنه شبکه بندی پوششی دارای ابعاد  $1/2 \times 1/4 \times 1/7$  متر با  $0.55$  میلیون سلول می باشد که درون دامنه شبکه بندی پس زمینه با ابعاد  $4/5 \times 4/5 \times 4/5$  متر و  $2/43$  میلیون سلول قرار می گیرد (شکل (۱۰)). تنظیمات مربوط به شبکه بندی در بخش ۳-۱ این مقاله ارائه شده است. شبیه سازی با گام زمانی اولیه  $0.0002$  ثانیه و در بازه زمانی  $0.2$  ثانیه انجام گردید. جزئیات بیشتر از تنظیمات اعمال شده و مطالعه همگرایی شبکه بندی و گام زمانی در پژوهش اسمعیلی و خدمتی موجود است [۲۵].



شکل ۱۰- جزئیات طرح شبکه بندی گوه.

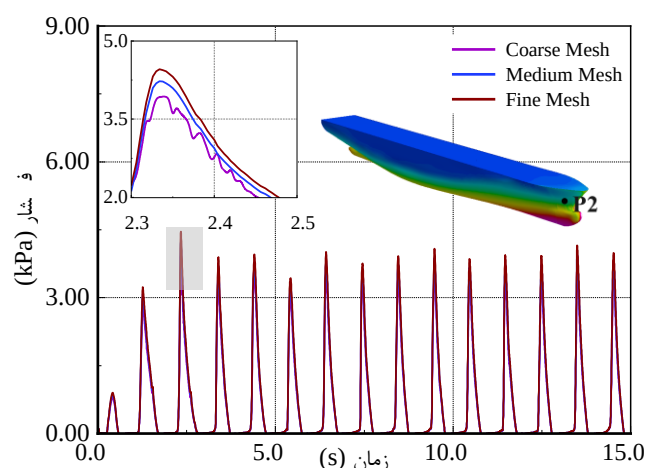
مقایسه فشار کوبش بین شبیه سازی عددی و نتایج تجربی چن و همکاران برای نقاط P1 و P3 در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، فشار محاسبه شده روندی مشابه با داده های آزمایشگاهی دارد. شبیه سازی عددی نوسانات بیشتری را در اطراف قله فشار نشان می دهد و مقادیر اوج فشار در هر دو نقطه اندکی بیشتر از نتایج تجربی هستند. بررسی بیشینه فشار ثبت شده نشان می دهد که خطای نسبی در نقاط P1 و P3 به ترتیب برابر با  $4.75\%$  و  $8.71\%$  درصد است. این میزان اختلاف با توجه به ماهیت گذرا و پیچیده پدیده کوبش و ساده سازی های متداول در

<sup>1</sup> ITTC  $\equiv$  International Towing Tank Conference

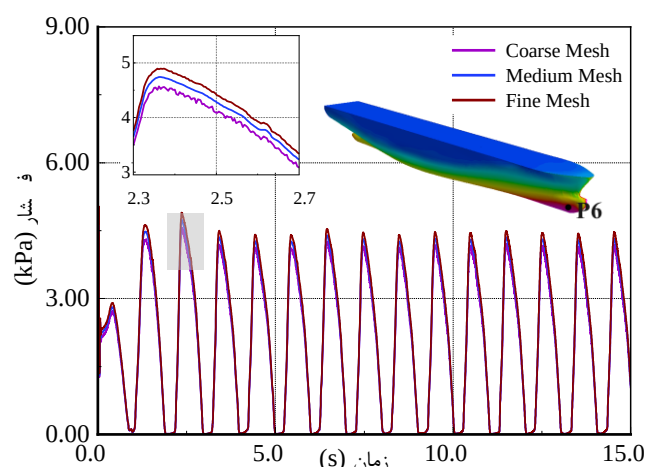
بر اساس بررسی همگرایی در جدول (۳)، فشار در دو نقطه مورد نظر، دارای مقداری بین عدد صفر و یک بوده و همگرایی یکنواخت دارد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که شبکه بندی متوسط گزینه ای مناسب برای تحلیل های عددی با دقت و زمان محاسبه متعادل به شمار می رود.

جدول ۳- نتایج حاصل از همگرایی اندازه شبکه بندی.

| مقدار                              |                      | بیشینه فشار (Pa) |         |
|------------------------------------|----------------------|------------------|---------|
| توضیحات                            | نماد                 | P۲               | P۶      |
| شبکه بندی ریز                      | $S_{G1}$             | ۴۴۵۹,۴۳          | ۵۰۳۵,۱۸ |
| شبکه بندی متوسط                    | $S_{G2}$             | ۴۲۲۵,۶۷          | ۴۸۹۳,۲۴ |
| شبکه بندی درشت                     | $S_{G3}$             | ۳۹۳۷,۰۲          | ۴۷۰۰,۶۰ |
| تغییرات بین شبکه بندی ریز و متوسط  | $\varepsilon_{G,21}$ | ۲۳۳,۷۶           | ۱۴۱,۹۴  |
| تغییرات بین شبکه بندی 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 پهلوی - نقطه ۲



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

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

### ۳-۶ همگرایی گام زمانی در دینامیک سیالات محاسباتی

اکنون با استفاده از شبکه بندی متوسط به بررسی گام زمانی پرداخته شده است. گام زمانی کوچکتر، جزئیات دقیق تری از

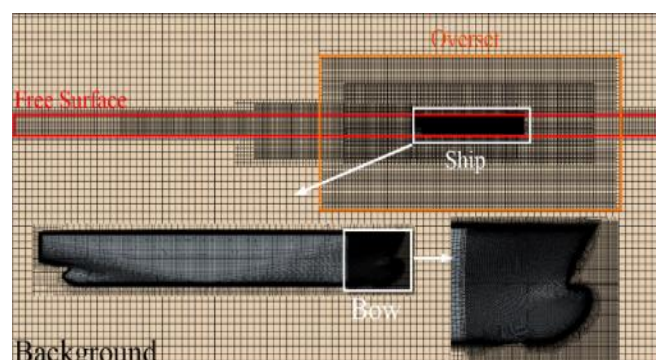
شبکه بندی متوسط و ریز ( $\varepsilon_{i,21} = S_{i,2} - S_{i,1}$ ) به تغییرات بین شبکه بندی درشت و متوسط ( $\varepsilon_{i,32} = S_{i,3} - S_{i,2}$ ) به دست می آید. به طور کلی در همگرایی یکنواخت میزان  $R_i$  بین ۱ و صفر و در همگرایی نوسانی میزان  $R_i$  بین صفر و ۱- قرار دارد. در واگرایی ها اگر مقدار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

### ۴-۶ همگرایی اندازه شبکه در دینامیک سیالات محاسباتی

به منظور ارزیابی حساسیت مدل ها، ابتدا تغییرات تعداد شبکه بندی در بخش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار می گیرد. جدول (۲) اطلاعات مربوط به بررسی همگرایی اندازه شبکه بندی را نشان می دهد. شکل (۱۲) طرح شبکه بندی ریز در دامنه سیال را نشان می دهد. مشاهده می شود عمده تمرکز شبکه بندی در ناحیه پوششی به ویژه سینه کشتی و سطح آزاد می باشد. محاسبات این پژوهش توسط مرکز محاسبات رایانه ای شبیه سازان امیرکبیر با استفاده از پردازنده مرکزی ۶۴ هسته ای صورت گرفته است.

جدول ۲- وضوح شبکه در مطالعه همگرایی.

| اندازه شبکه | گام زمانی (s) | تعداد شبکه (میلیون) |                | زمان حل (h) |
|-------------|---------------|---------------------|----------------|-------------|
|             |               | ناحیه پوششی         | ناحیه پس زمینه |             |
| ریز         | ۰,۰۰۱         | ۳,۴۶                | ۲,۲۳           | ۵,۶۹        |
| متوسط       | ۰,۰۰۱         | ۳,۰۹                | ۰,۹۴           | ۴,۰۳        |
| درشت        | ۰,۰۰۱         | ۱,۵۸                | ۰,۸۸           | ۲,۴۶        |



شکل ۱۲- جزئیات شبکه بندی در اندازه شبکه ی ریز.

شکل (۱۳) نمودارهای مربوط به فشار در دو نقطه از نقاط هفت گانه در سه حالت مختلف شبکه بندی نشان می دهد. نتایج نشان می دهد میزان تغییرات فشار در شبکه بندی درشت بیشتر از دو حالت دیگر است. از سوی دیگر، نتایج حاصل از شبکه بندی متوسط تطابق مناسبی با نتایج شبکه بندی ریز دارد. با این وجود، شبکه بندی متوسط توانسته است پاسخ هایی نزدیک به شبکه بندی ریز و در عین حال کارایی محاسباتی بالاتری را ارائه دهد.

جدول ۴- نتایج حاصل از همگرایی اندازه گام زمانی.

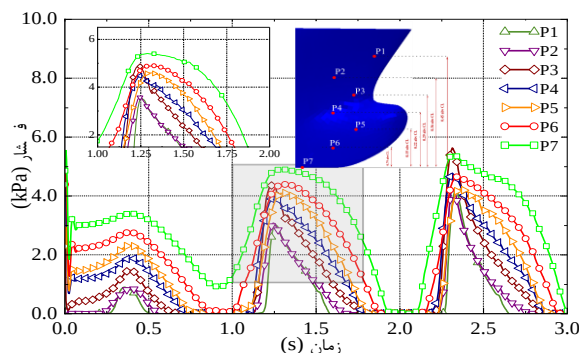
| مقدار                              |                      |         | بیشینه فشار (Pa) |
|------------------------------------|----------------------|---------|------------------|
| توضیحات                            | نماد                 | P۲      | P۶               |
| گام زمانی ریز                      | $S_{G1}$             | 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. از این‌رو، بازه زمانی صفر تا سه ثانیه برای تحلیل پدیده کوبش کافی تشخیص داده شد.

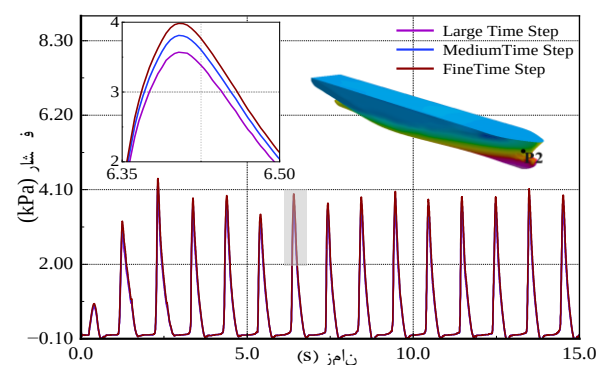
### ۷-۱- فشار ناشی از کوبش

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 هیدروپنماتیکی 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 [۲۳، ۲۱].

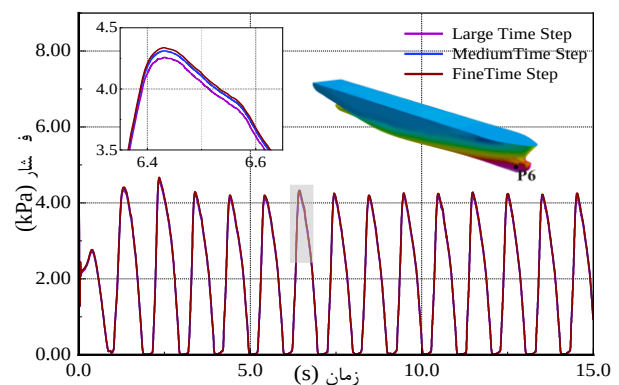


شکل ۱۵- نمودار فشار ناشی از کوبش در هفت نقطه مشخص شده.

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 ۰/۰۰۸، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۲ برای مطالعه حساسیت گام زمانی استفاده شده است. شکل (۱۴) نمودارهای مربوط به فشار کوبش در سه گام زمانی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تأثیر گام زمانی بر پاسخ‌های هیدروپنماتیکی نسبتاً ناچیز بوده، با این حال 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 در عین حال زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد.



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



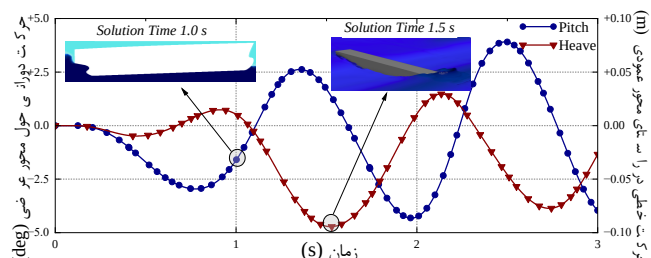
ب) فشار ناشی از کوبش در ناحیه سینه - نقطه ۶

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

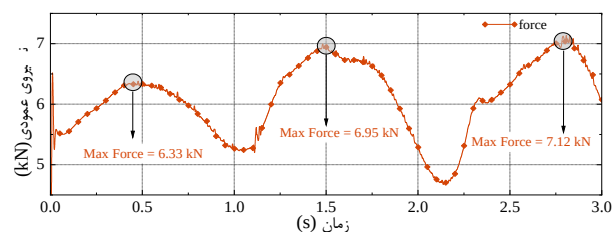
مطابق داده‌های جدول (۴)، فشار در دو نقطه ۲ و ۶ دارای همگرایی یکنواخت هستند. این موضوع نشان دهنده این است که انتخاب گام زمانی متوسط می‌تواند در بسیاری از تحلیل‌ها، تعادلی مطلوب میان دقت عددی و هزینه محاسباتی ایجاد کند. با استناد به نتایج ارائه‌شده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) و همچنین جدول‌های (۳) و (۴)، می‌توان 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.

## ۲-۶- 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.



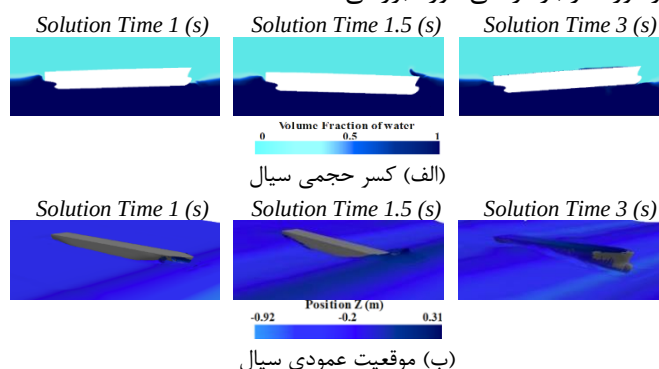
(الف) حرکت خطی در راستای محور عمودی و حرکت دورانی حول محور عرضی



(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 فرایند برخورد در بازه زمانی مورد بررسی است.

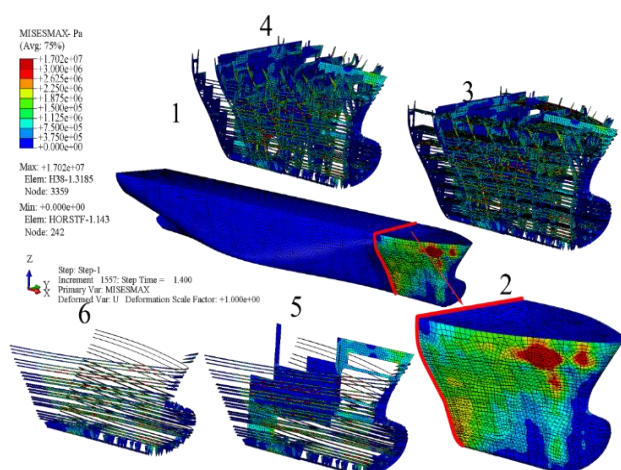


شکل ۱۷- تجسم نتایج اندرکنش سازه - سیال در فرایند کوبش.

## ۳-۷- تنش در سازه سینه کشتی

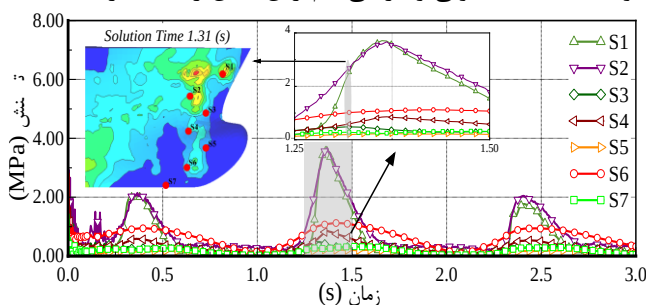
شکل (۱۸) توزیع تنش بر سازه سینه کشتی در برخورد کشتی به سطح آب را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق تر قسمت‌های مختلف سینه کشتی و پوسته بیرونی، به صورت مرحله‌ای

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 عمیق تر 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.



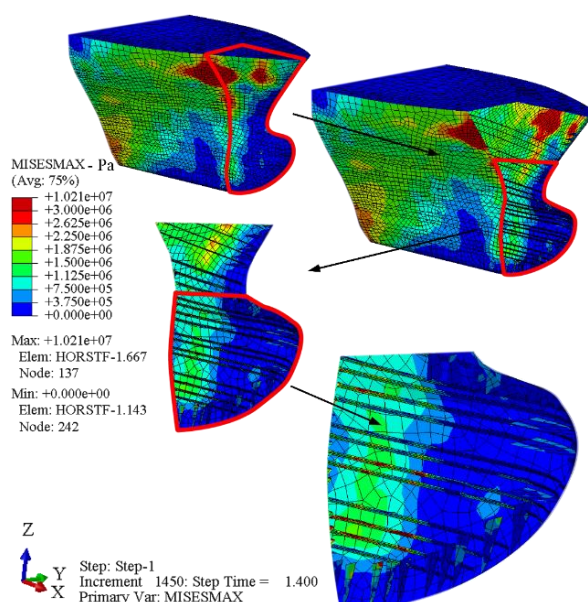
شکل (۱۸): توزیع تنش معادل بر سازه سینه‌ی کشتی.

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 پهلوی 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.

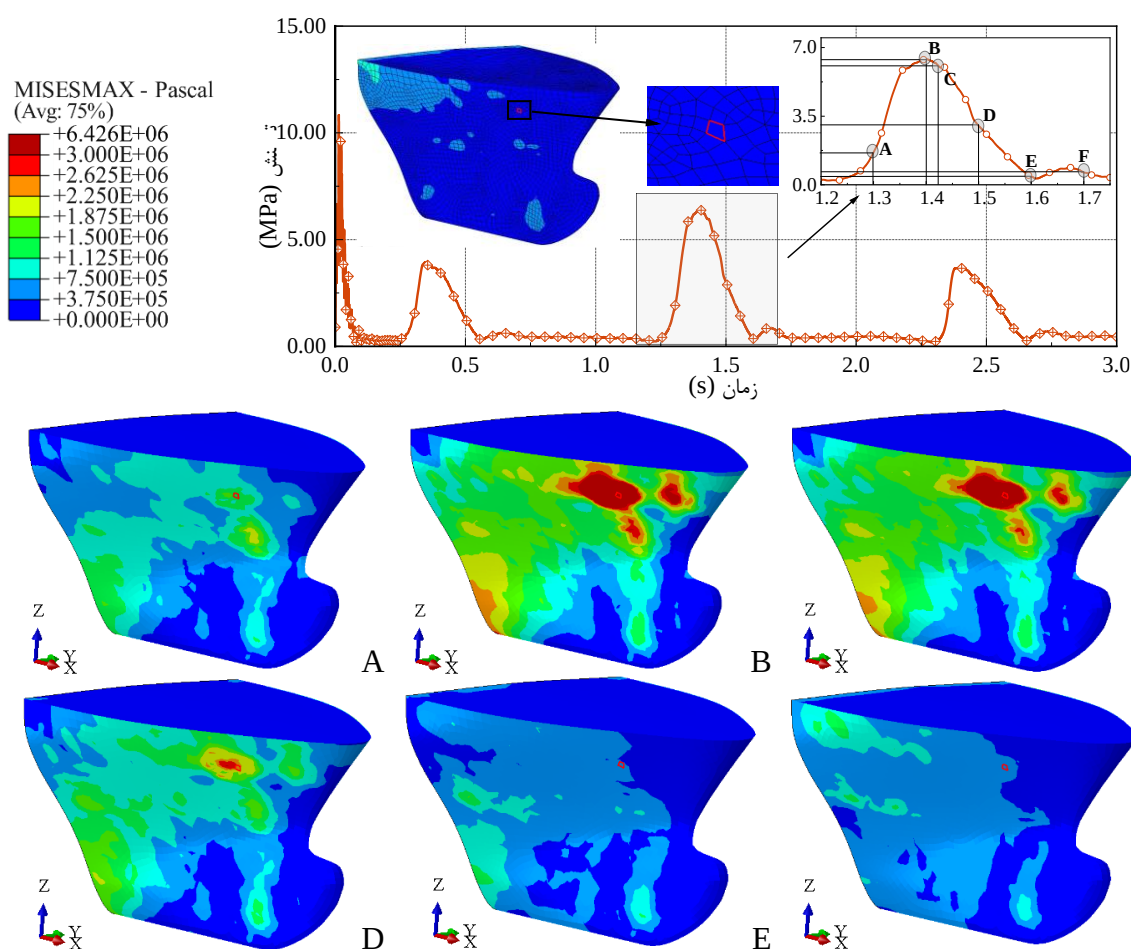
شکل (۲۰) توزیع تنش در تقویت‌کننده‌های پوسته‌ی کشتی در ناحیه‌ی سینه را بررسی می‌کند. مشاهده شد که تمرکز تنش در منطقه‌ای از پوسته ایجاد می‌شود که تقویت‌کننده‌ای در آن حضور



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.

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 اسماعیلی 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، به تدریج این مقدار افزایش‌یافته و در زمان ۱/۳۷ ثانیه به نقطه‌ی اوج خود با مقدار بیشینه 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 به تدریج کاهش می‌یابد.



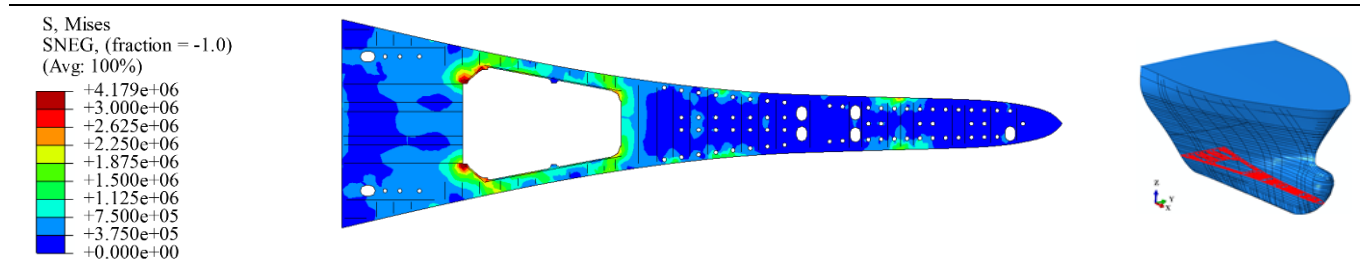
شکل ۲۱- تغییرات تنش معادل بر روی پوسته بیرونی ناحیه سینه کشتی در بازه دومین کوبش به سطح آب بر روی یک جزء.

#### ۴-۷- تنش در مقاطع افقی ناحیه‌ی سینه کشتی

می‌شود؛ به‌گونه‌ای که وسعت و بیشینه تنش در نیم‌عرشه‌ی جلویی سینه نسبت به سایر مقاطع مقدار بالاتری را نشان می‌دهد. به‌طورکلی، مقاطع واقع در ناحیه‌ی 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.

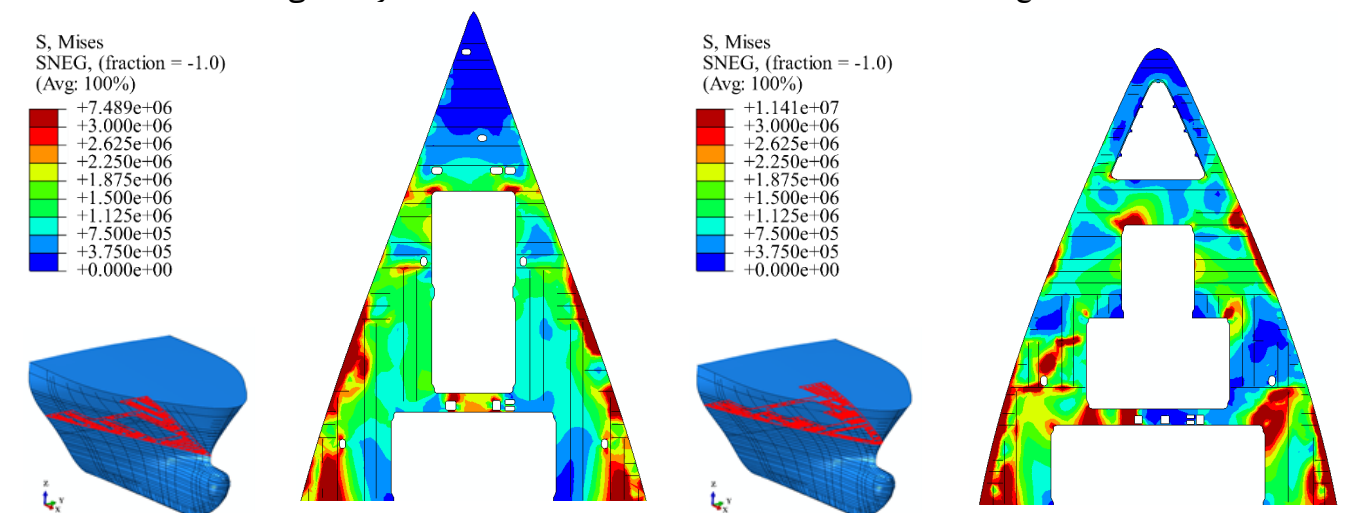
در این بخش، توزیع تنش در مقاطع افقی ناحیه‌ی سینه‌ی کشتی در هنگام حذف دیواره‌های طولی کناری بررسی شد. در تحلیل توزیع تنش در مقاطع افقی سینه‌ی کشتی باید توجه داشت که مقاطع مختلف بر میزان تغییرات تنش یکدیگر اثر می‌گذارند. شکل (۲۲) تغییرات تنش در برخی از مقاطع افقی ناحیه‌ی سینه را نشان می‌دهد. مشاهده شد که هر چه از ناحیه‌ی کف سینه به سمت عرشه حرکت می‌کنیم، تغییرات تنش در مقاطع افقی بالاتر، بیشتر نمایان

مقطع ۲۳



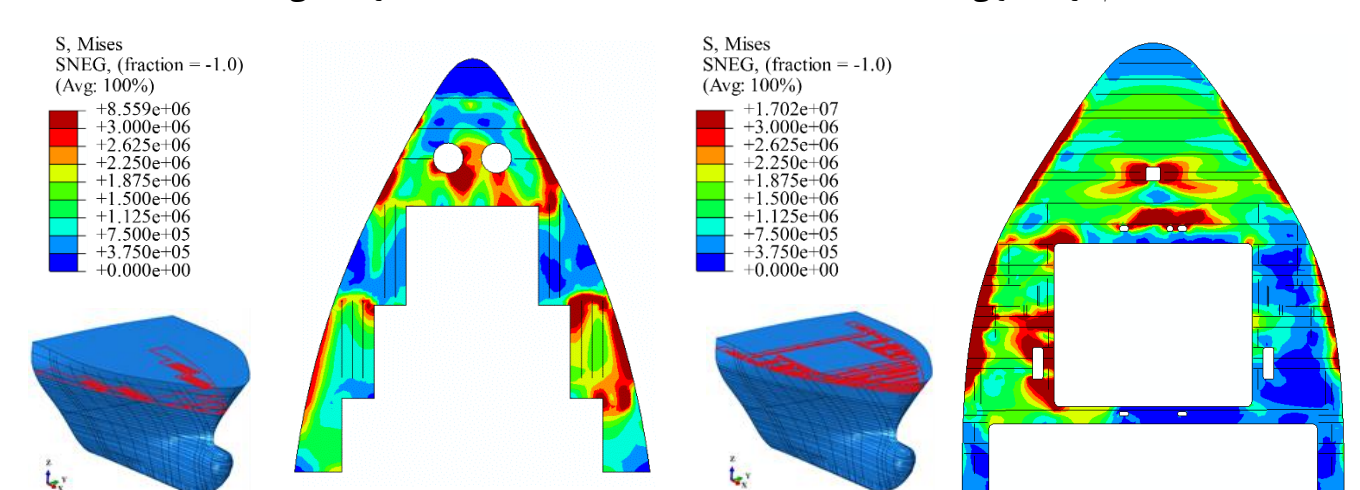
عرشه میانی

مقطع ۳۵



عرشه اصلی

نیم عرشه جلویی سینه



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

در مقطع کف داخلی و مقطع ۲۳ نیز که در ناحیه پایین سینه قرار دارد، تنش مدل ساده‌سازی شده اختلاف اندکی با مدل کامل نشان می‌دهد. اما در مقاطع بالاتر، شکاف بین دو مدل به تدریج افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در عرشه میانی و نیم‌عرشه جلویی، تنش مدل ساده‌سازی شده به ترتیب 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 هیدرواستاتیک 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.

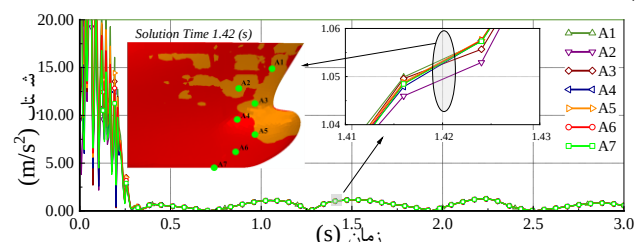
نتایج نشان دادند که حذف دیواره‌های طولی موجب افزایش وسعت و شدت تنش‌ها در پوسته و تقویت‌کننده‌ها شد و تمرکز تنش در مناطقی که فاقد تقویت‌کننده بودند، مشاهده گردید. بیشینه فشار کوبش در نواحی پایینی سینه ثبت شد و با حرکت از کف به سمت عرشه، همگام با افزایش شتاب ناشی از ارتفاع بیشتر پهلوه نسبت به کف، تغییرات 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 قابل توجه است؛ به گونه‌ای 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 بررسی شده 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

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 پهلوه‌ها 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 پهلوه‌ها 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 کمی بیشینه تنش معادل را در مقاطع افقی مختلف سینه برای مدل ساده‌سازی شده 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 ساده‌سازی شده به‌کار گرفته شده است. ستون نسبت تنش معادل از تقسیم تنش معادل مدل ساده‌سازی شده 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        | $1,457 \times 10^6$    | $1,562 \times 10^6$ | ۰/۹۳           |
| مقطع ۲۳         | $4,179 \times 10^6$    | $4,361 \times 10^6$ | ۰/۹۶           |
| مقطع ۲۶         | $2,877 \times 10^6$    | $1,756 \times 10^6$ | ۱/۶۳           |
| مقطع ۲۹         | $3,831 \times 10^6$    | $2,701 \times 10^6$ | ۱/۴۲           |
| عرشه میانی      | $7,489 \times 10^6$    | $3,059 \times 10^6$ | ۲/۴۵           |
| مقطع ۳۵         | $11,140 \times 10^6$   | $3,025 \times 10^6$ | ۳/۶۸           |
| عرشه اصلی       | $8,559 \times 10^6$    | $3,983 \times 10^6$ | ۲/۱۵           |

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 Nème, 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

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- بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پشتیبان نتایج این مطالعه از طریق نویسندگان 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), *The 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

- 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>
- 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- Lakshminarayanan, 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.