مطالعه تجربی فشار ناشی از پدیده کوبش در سینه یک شناور سطحی

مجتبی شکری[۱]، محمدرضا خدمتی [۲] ، کریم اکبری وکیل‌آبادی*[۳]، محمد رضایی سنگتابی[۴]

[۱] کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی(ره)، moj121259@yahoo.com
[۲] استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، khedmati@aut.ac.ir
[*۳] استادیار، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی(ره)، Akbari.karim@gmail.com
[۴] دکترای مهندسی دریا، دانشکده تکنولوژی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، rezai_sangtabi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵

کلمات کلیدی:
کوبش
آزمایش سقوط در آب آرام
مقطع سینه شناور

چکیده

امروزه تعیین دقیق بارگذاری ناشی از پدیده کوبش در شناورها مورد توجه محققان قرار دارد. به منظور مطالعه تجربی پدیده کوبش، آزمایش سقوط مدل قسمت سینه شناور در آب آرام صورت پذیرفته است. وجود تاثیر انحنای طولی در قسمت سینه بدنه شناور این کار آزمایشگاهی را نسبت به اکثر کارهای گذشتگان متمایز می‌نماید. همچنین از روش تحلیلی واگنر جهت مقایسه نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. نتایج تحلیلی مقدار فشار بیشینه حاصل از کوبش را بزرگ‌تر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌نمایند و این اختلاف نتایج در برخی از نقاط به ۲۵ درصد نیز می‌رسد. علت اصلی اختلاف ایجاد شده در نتایج تجربی و تحلیلی را می‌توان در تفاوت فیزیک مسئله دانست. به طور معمول در استخراج روابط تحلیلی انحنای طولی بدنه شناور لحاظ نمی‌گردد که این انحنا موجب تغییر در رژیم جریان سیال شده و جدایی سیال از بدنه و کاویتاسیون ایجاد می‌نماید که در ناحیه سینه موجب کاهش در فشار اعمالی به بدنه می‌شود. بنابراین روش‌های تحلیلی مبتنی بر فرضیات دو بعدی و یا تحلیلهای سه بعدی که از انحنای طولی بدنه شناور صرفنظر می‌نمایند همواره فشار ناشی از کوبش را به صورت سختگیرانه‌تر پیش‌بینی می‌نمایند.

Experimental Analysis of slam-induced pressure on the bow-segment of surface ship

Mojtaba Shokri[1], Mohammadreza Khedmati[2], Karim Akbari Vakilabadi[3]*, Mohammad Rezaei Sangtabi[4]

[1] Department of Marine Engineering, Imam Khomeini Maritime Academy; Moj121259@yahoo.com
[2] Department of Marine Technology, Amirkabir University of Technology; Khedmati@aut.ac.ir
[3] Department of Marine Engineering, Imam Khomeini Maritime Academy; Akbari.karim@gmail.com
[4] Doctoral Degree of Marine engineering, Department of Marine Technology, Amirkabir University of Technology; Rezai_sangtabi@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 10 Nov. 2019
Accepted: 24 Jan. 2021

Keywords:
Slamming
Water Entry
Bow-segment

ABSTRACT

Today, determination of slam-induced pressure is one of the interested issue of the researchers. Water entry of bow section of a ship is experimentally examined, in order to investigation of slamming pressure. This experimental study is distinguished because of the effect of longitudinal curvature in the ship shape body. A generalized Wagner theory is used to compare of experimental results. The predicted slamming pressure of experimental results is approximately 25 percent lower than Wagner theory because of differences in the assumption of theories. Longitudinal curvature of ships is ignored in the analytical method which is change of flow regime and produce of flow separation and air cavity. Thus, analytical method based on ignoring of longitudinal curvature cannot precinct predication of slamming pressure and a water entry test or 3D numerical method must be performed.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.7.7]

۱ - مقدمه

بارگذاری ضربه‌ای ناشی از کوبش در شناورها می‌تواند موجب ایجاد خرابی سازه‌ای شود. به طور خاص این پدیده در شناورهای سرعت بالا که در دریای متلاطم قرار می‌گیرند به میزان بیشتری گزارش شده است. برای مثال تراژدی شناور MV Estonia در دریای بالتیک سال ۱۹۹۴، یکی از فاجعه‌های قرن بیستم بوده که به دلیل خرابی درب سینه شناور ویژه حمل خودرو تحت بارگذاری شدید کوبش اتفاق افتاده است [۱]. این گزارشات حوادث دریایی نشان می‌دهد که بارگذاری کوبش یک تهدید در برابر ایمنی شناورها می‌باشد. این امر موجب شده موسسات رده‌بندی نیز در بروزرسانی بارگذاری ناشی از کوبش و تاثیر آن در طراحی سازه‌ای شناورها فعال باشند. نتیجه تحقیقات در این زمینه نیز موجب تغییرات در روابط محاسبه فشار ناشی از بارگذاری کوبش در قوانین موسسات رده‌بندی شده است.

در سالیان اخیر تحقیق‌های متعددی در مورد مرور کارهای گذشتگان در رابطه با پدیده کوبش صورت پذیرفته که هر کدام از آن‌ها از یک دیدگاه به بررسی این پدیده پرداخته‌اند. فالتینسن [۲] در سال ۲۰۰۰ بررسی جامع هیدروالاستیک پدیده کوبش را منتشر نموده است. همچنین پدیده‌های مختلف ناشی از برخوردهای ضربه‌ای آب در شناورها از قبیل سقوط بدنه به آب آرام، کوبش بر صفحات تخت، ضربه آب بر روی عرشه و کوبش آب مخازن توسط فالتینسن و همکارانش [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. ژو و همکارانش [۴] مروری بر روش‌های تحلیلی و تکنیک‌های عددی برای شبیه‌سازی فشار ضربه‌ای هیدرودینامیکی در کشتی‌ها انجام داده‌اند. اکثر تحقیقات مروری بر روی کارهای تحلیلی و عددی تمرکز داشته‌اند اما لو و سوارز [۱] به مرور کارهای تجربی و آزمایش‌های مدل انجام شده در زمینه پدیده کوبش پرداخته است. وانگ و سوارز[۵] نیز آخرین دستاوردها در زمینه بررسی پدیده‌های مرتبط با کوبش را مرور نموده‌اند.

به طور کلی کارهای تحلیلی و عددی گسترده‌ای بر روی بررسی پدیده کوبش انجام شده است. در این حوزه سقوط هندسه‌های مختلف در آب به کمک روش‌های عددی متفاوت مورد تحلیل قرار گرفته است. هندسه‌های متداول تحلیل شده در این زمینه شامل ورق تخت، گوه، مخروط، سیلندر و نیم‌کره می‌باشند اما در برخی از تحقیقات نیز هندسه سینه بدنه شناور [۶-۸] مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اینکه تمرکز این تحقیق بر روی کارهای تجربی می‌باشد بنابراین تنها مرور کارهای تجربی مرتبط با پدیده کوبش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در کارهای گذشتگان تست‌های مدل انجام شده جهت بررسی پدیده کوبش به دو دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شود: یکی سقوط بدنه در آب آرام و دیگری تست مدل آب مواج در حوضچه تحلیل حرکات شناور یا حوضچه کشش. البته تست در ابعاد واقعی نیز یکی از روش‌های تجربی بررسی پدیده کوبش می‌باشد که به دلیل هزینه بالا و پیچیدگی‌های انجام آن، استفاده از آزمایش مدل برای صحه‌گذاری طراحی بسیار بیشتر از آزمایش در ابعاد واقعی مورد استقبال قرار گرفته است. بنابراین در زمینه آزمایش در ابعاد واقعی اطلاعات بسیار محدودی یافت می‌شود که تنها می‌توان به بررسی آزمون‌های شناور ویزبی اشاره کرد[۹].

آزمایشات متعددی بر روی ورود بدنه با هندسه‌های مختلف در آب آرام صورت گرفته است. در این آزمایشات پارامترهای مختلفی از قبیل دوبعدی یا سه بعدی بودن بدنه، الاستیک یا صلب بودن بدنه، وجود و یا عدم وجود تقارن در بدنه، سقوط آزاد یا قابلیت کنترل سرعت حرکت مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین جنبه‌های متفاوتی از اندازه‌گیری پارامترهای مختلف در این آزمایشات وجود دارد. در این آزمایشات از فشارسنج و نیز شتاب‌سنج‌ها برای ثبت اطلاعات حرکتی و فشارهای وارد بر بدنه استفاده می‌شود. همچنین در برخی از تحقیقات جهت بررسی‌های هیدروالاستیک از کرنش‌سنج‌ها برای ثبت رفتار سازه‌ای بدنه‌ها استفاده شده و نیز به منظور ثبت جریان آب حول بدنه سقوط کننده نیز از سیستم‌های اپتیکی [۱۰] استفاده می‌شود. برای کاهش خطا و نوسانات در داده‌های اندازه‌گیری شده، یک سیستم هدایت‌کننده در آزمایشات سقوط آزاد استفاده می‌شود و گاهی این سیستم توانایی کنترل سرعت ورود بدنه به آب آرام را دارا می‌باشد[۱۱].

در سالیان اخیر آزمایشات متعددی در زمینه تست‌های سقوط اشکال هندسی متداول مانند گوه و مخروط صورت پذیرفته است. یانگ و همکارانش [۸] سقوط یک گوه در آب آرام را آزمایش نمودند و بعد از صحه‌گذاری روش عددی خود با این آزمایش انجام شده به تحلیل عددی سقوط مقطع پاشنه شناور کانتینربر در آب پرداخته شده است. لویز و همکارانش [۱۲] ورود یک گوه با زاویه ۲۵ درجه را مورد آزمایش قرار داده و از یک دوربین سرعت بالا برای ثبت جت آب تشکیل شده در کناره بدنه استفاده نموده و سیگنالهای فشار و شتاب اندازه‌گیری شده است. علاوه بر سقوط هندسه‌های متقارن، بررسی برخورد هندسه‌های نامتقارن به آب آرام نیز مورد بررسی قرار گرفته که در این زمینه می‌توان به تحقیق انجام شده توسط برجسته و همکارانش [۱۳] اشاره کرد.

پسوکس و همکارانش [۱۴] یک سری تست برای سقوط آزاد نمونه‌های مخروطی شکل صلب و الاستیک با ضخامت‌ها و زوایای خیز مختلف انجام داده است. همچنین یک تحلیل عددی با استفاده از روش اجزای محدود نیز برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در این تحقیق صورت پذیرفته است. دی‌بکر و همکارانش [۱۵] تست

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.7.7]

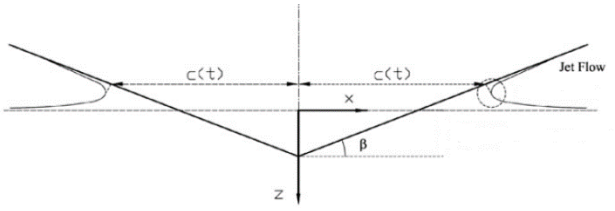
سقوط آزاد بدنه‌های نیم‌کروی و مخروطی با زوایای مختلف را انجام داده است. در آزمایش انجام شده یک سیستم هدایت برای جلوگیری از چرخش‌های کوچک حین ورود بدنه به آب تعبیه شده است. در حین آزمایش توزیع فشار و پارامترهای حرکتی بدنه اندازه‌گیری گردید و حرکت رو به بالای آب در حین برخورد بدنه به سطح آب به کمک دوربین‌های سرعت بالا ثبت شده است.

آزمایش‌های ورود بدنه به آب برای مدل‌های سه بعدی از بدنه شناور بسیار محدود می‌باشند. فالتینسن و همکارش [۱۶] برخورد یک شکل ساده‌سازی شده شامل یک بخش میانی استوانه‌ای و نیمکره‌های انتهایی در حضور ریل‌های هدایت‌شونده را مورد آزمایش قرار دادند. در این آزمایش نیروی عمودی، سطح خیس شده بدنه و فشار وارد بر بدنه بر حسب زمان اندازه‌گیری شده است. آزمایشات در دو زاویه تریم صفر و ۱۰ درجه برای مطالعه تاثیر زاویه طولی برخورد جسم با سطح آب تکرار گردید. همچنین تئوری عمومی واگنر برای مطالعه بیشتر و مقایسه نتایج آزمایشگاهی بکارگیری شده است. ژیه و همکارانش [۱۷] سقوط مدل قسمت سینه شناور را در آب آرام مورد آزمایش قرار داده‌اند. در این آزمایش از خطوط بدنه شناور با نسبت ابعاد ۱:۲۵ برای ساخت مدل استفاده شده است. از یک تحلیل عددی دو بعدی و یک تحلیل سه بعدی به روش VOF جهت مقایسه و صحه‌گذاری استفاده شده است. نتایج عددی دوبعدی مقادیر بیشینه فشار را حدود ۲۵ درصد بالاتر از نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌نماید. نتایج تحلیل سه‌بعدی نشان داد که اثرات سه‌بعدی بودن جریان در نواحی سینه شناور که انحنای بدنه زیاد است بسیار مهم‌تر از دیگر نواحی شناور می‌باشد زیرا اثرات پدیده‌هایی از قبیل جدایی سیال از بدنه و کاویتاسیون بر روی فشار قابل ملاحظه می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده کارهای بسیار محدودی بر روی تحلیل تجربی پدیده کوبش بر روی مدل هندسی بدنه شناور انجام شده است. بنابراین در این تحقیق سعی شده با انجام آزمایش بر روی مدل سینه شناور موجود در آب آرام، فشار ناشی از پدیده کوبش اندازه گیری شود. نتایج حاصل با روابط متداول توزیع فشار پدیده کوبش مقایسه خواهد شد.

۲ – مدل تحلیلی فشار کوبش

با توجه به مطالعات کارهای گذشتگان روش تحلیلی واگنر یکی از متداولترین روش‌های پیش‌بینی فشار ناشی از برخورد گوه با آب آرام بوده که برای زوایای خیز عرضی بزرگتر از ۱۸ درجه تطابق بسیار مناسبی با نتایج تجربی دارد. واگنر با فرض یک میدان پتانسیل سرعت پیرامون یک صفحه تخت توزیع فشار آب را بر اساس رابطه برنولی در نقاط مختلف به استثناء لبه‌های صفحه تخمین زده است. رابطه (۱) معادله فشار بر مبنای تئوری واگنر را نشان می‌دهد و در این رابطه $P(x)$ فشار وارد به بدنه گوه در راستای عرض آن بوده و $V(t)$ سرعت ورود گوه در زمان t به درون آب می باشد. همچنین پارامترهای هندسی بکاررفته در رابطه واگنر را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود. در بخش نتایج از رابطه ذیل جهت مقایسه با نتایج تست‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.



شکل ۱- معرفی پارامترهای رابطه واگنر [۱۸]

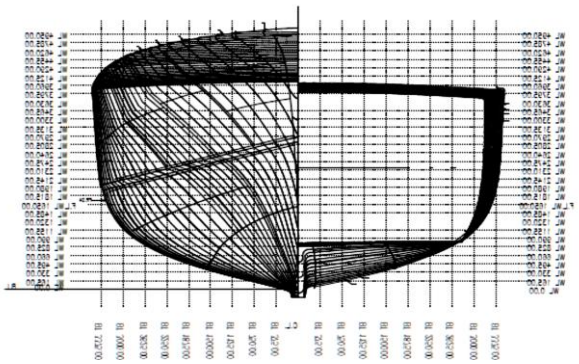
$$\frac{P(x)}{\rho}=\sqrt{c^2-x^2}\,\frac{dV}{dt}+V\frac{C}{\sqrt{c^2-x^2}}\frac{dc}{dt}-\frac{1}{2}\frac{V^2x^2}{C^2-x^2}$$
$$\frac{dc}{dt}=V\cot\beta \qquad (1)$$

۳ – تهیه مدل آزمایشگاهی

جهت اندازه‌گیری فشار ناشی از کوبش قسمت سینه شناور از آزمایش سقوط بدنه در آب آرام استفاده شده است. بدین منظور یک شناور موجود مورد مطالعه قرار گرفته که مشخصات اصلی آن در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به اینکه پدیده کوبش در ۱۰ الی ۲۵ درصد طول ناحیه سینه کشتی موثر است بنابراین چهارده ایستگاه ابتدایی شناور شامل حدود ۲۲ درصد از طول شناور مورد مطالعه قرار گرفته است. خطوط بدنه شناور در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به محدودیت‌های ابعادی موجود جهت انجام آزمایش از نسبت تشابه هندسی ۱:۱۶ برای ساخت مدل استفاده شده است.

جدول ۱ - مشخصات اصلی شناور مورد مطالعه

مشخصه	طولی سراسری $[m]$	عرض $[m]$	آبخور $[m]$	وزن جابجایی $[ton]$	سرعت $[knot]$
مقدار	۴۵	۶/۵	۱/۶	۲۷۰	۳۰



[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.7.7]

شکل ۲- خطوط بدنه شناور مورد مطالعه

برای ساخت مدل ابتدا فریم‌های عرضی توسط دستگاه CNC از ورق با ضخامت ۱میلیمتر ساخته شده است که نمایی از چند فریم عرضی شناور در شکل ۳ ارائه شده است. سپس محل قرارگیری فریم‌ها بر روی یک نگهدارنده چوبی ثابت شده و فرآیند ساخت با اتصال ورق‌های پوسته مدل با ضخامت ۰/۷ میلیمتر تکمیل گردید. سپس با پرداخت نهایی سطح و رنگ‌آمیزی مدل نهایی آماده شده که نمایی از آن در شکل ۴ قابل مشاهده می باشد. مدل دارای طول ۶۰ و عرض ۴۲ و ارتفاع ۲۹ سانتیمتر می‌باشد و وزن آن به میزان ۷/۴۵۰ کیلوگرم می‌باشد. در روند ساخت مدل تغییرات ممان اینرسی سطوح مقاطع عرضی برای مدل محاسبه شده و این تغییرات با ممان اینرسی مقاطع عرضی نمونه اصلی مطابقت داشته است.



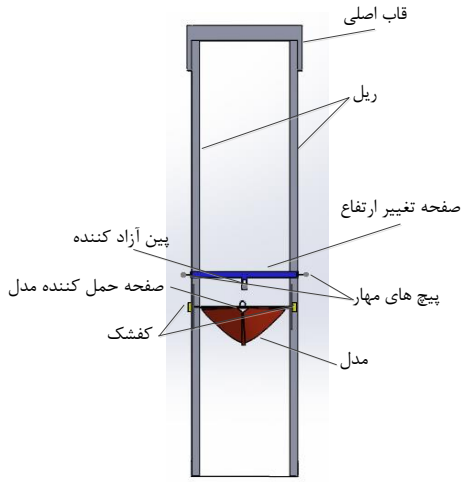
شکل ۳- نمایی از چند فریم عرضی ساخته شده به کمک دستگاه CNC



شکل ۴- مدل ساخته شده از شناور

۴ – تجهیزات آزمایشگاهی

در حین انجام آزمایش سقوط بدنه به آب آرام از یک مکانیزم جهت هدایت مدل در راستای عمود و جلوگیری از انحرافات مدل استفاده شده است. نمایی از این مکانیزم در شکل ۵ به صورت شماتیک نمایش داده شده است. مکانیزم استفاده شده از دو ریل تشکیل شده که از قسمت بالا توسط قاب اصلی به سقف ساختمان آزمایشگاه و از قسمت پایین بر روی کف حوضچه آزمایش قرار گرفته است. مدل به یک صفحه حمل کننده با قابلیت دوران حول محور مربوطه، متصل شده و مجموعه مذکور به دو عدد کفشک متصل شده است. کفشک‌ها روی ریل‌ها به راحتی قابلیت لغزش داشته و دارای حداقل اصطحکاک می‌باشد. صفحه تغییر ارتفاع پیرامون ریل‌ها را احاطه کرده و به وسیله پیچ‌های مهار در هر طرف مکانیزم کشویی، بر روی ریل‌ها تثبیت می‌گردد. صفحه و مدل با سازوکار پینی، به وسیله پین آزادکننده بر روی صفحه تغییر ارتفاع ثابت می‌گردد. با کشیدن پین، صفحه حمل‌کننده و مدل به صورت سقوط آزاد بر روی سطح آب رها می‌گردد. با استفاده از این مکانیزم، قابلیت تغییر ارتفاع مفید برای انجام آزمایش‌ها از ۴۰ تا ۱۴۰ سانتیمتر وجود دارد که این امر موجب تغییر در سرعت برخورد بدنه شناور با سطح آب می‌شود. شکل ۶ نمایی از مکانیزم اجرا شده جهت انجام آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۵- شماتیکی از مکانیزم هدایت مدل در آزمایش



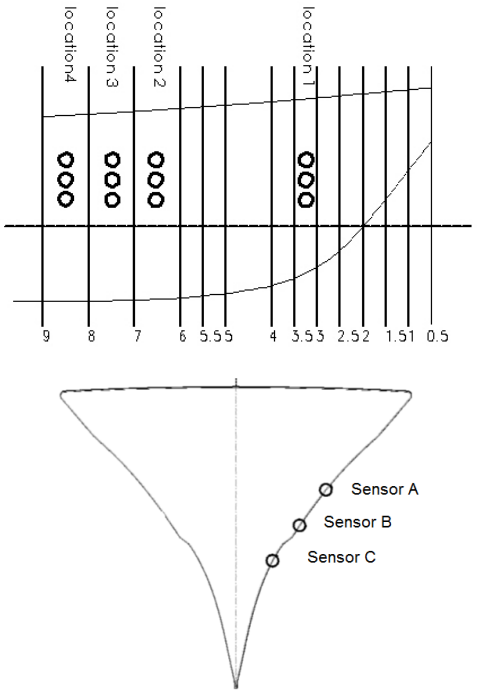
شکل ۶- نمایی از تجهیزات آزمایش به همراه مدل

به منظور اندازه‌گیری فشار حاصل از برخورد بدنه با سطح آب، از سه عدد سنسور پیزوالکتریک استفاده شده است. این سنسورها از نوع دینامیکی بوده و قابلیت اندازه‌گیری فشارهای لحظه‌ای را دارا می‌باشند. این سنسورهای فشار در چهار مقطع از بدنه نصب شده و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.7.7]

اندازه‌گیری فشار در سه ارتفاع مختلف از هر چهار مقطع عرضی شناور صورت خواهد پذیرفت. مکان قرارگیری طولی و همچنین ارتفاع نصب این فشارسنج‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل قابل مشاهده است فشارسنج‌ها در حدفاصل بین فریم‌های عرضی نصب خواهند شد و موقعیت اول قرارگیری فشارسنج‌ها به سینه شناور نزدیک‌تر بوده است. همچنین محل‌هایی که برای نصب این فشارسنج‌ها بر روی بدنه مدل سوراخکاری شده در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۷- نمایی از محل نصب طولی و عمودی فشارسنج‌ها

۵ – شرایط انجام آزمایش

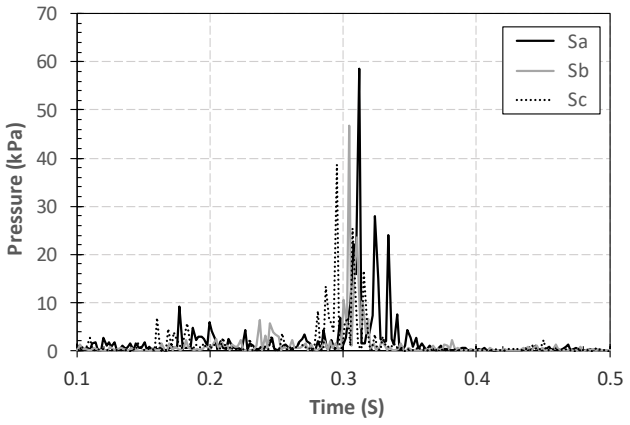
آزمایش سقوط مدل ساخته شده از بدنه شناور در آزمایشگاه حوضچه کشش دانشگاه امام خمینی نوشهر صورت پذیرفته است. این آزمایشگاه دارای طول ۱۰۰ متر، عرض ۴ متر و عمق آب ۲ متر می‌باشد. آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۷۰ درصد انجام شده است. سناریوی انجام آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به محدودیت‌های موجود در تعداد سنسورهای فشار، سناریو آزمایش به نحوی تعیین گردید که در هر مرحله از آزمایش سنسورها در یک مقطع آرایش داده شده و آزمایش در ارتفاع‌های مختلف سقوط بدنه انجام می‌شود سپس سنسورها به مقطع بعد انتقال داده شده و آزمایشات ادامه می‌یابد. بنابراین با توجه به جدول ۲ هر ردیف از آزمایش بیانگر قرارگیری سه فشارسنج در یک مقطع بوده و آزمایش در ارتفاع‌های مختلف صورت می‌پذیرد. همچنین می‌توان سرعت‌های متناظر برخورد بدنه با سطح آب را در ارتفاع‌های مختلف انجام آزمایش در این جدول مشاهده نمود.

جدول ۲ – سناریوی انجام آزمایش‌های سقوط بدنه در آب آرام

مراحل مختلف آزمایش	ردیف آزمایش	ارتفاع سقوط (mm)	سرعت متناظر (m/s)
مرحله اول	۱	۴۰۰	۲/۸۰
	۲	۶۰۰	۳/۴۳
	۳	۸۰۰	۳/۹۶
	۴	۱۰۰۰	۴/۴۲
مرحله دوم	۱	۴۰۰	۲/۸۰
	۲	۶۰۰	۳/۴۳
	۳	۸۰۰	۳/۹۶
	۴	۱۰۰۰	۴/۴۲
مرحله سوم	۱	۴۰۰	۲/۸۰
	۲	۶۰۰	۳/۴۳
	۳	۸۰۰	۳/۹۶
	۴	۱۰۰۰	۴/۴۲
مرحله چهارم	۱	۴۰۰	۲/۸۰
	۲	۶۰۰	۳/۴۳
	۳	۸۰۰	۳/۹۶
	۴	۱۰۰۰	۴/۴۲

۶ – نتایج

یکی از مهمترین خروجی‌های این آزمایش دیاگرام فشار بر حسب زمان می‌باشد. یک نمونه از دیاگرام فشار - زمان سقوط از ارتفاع ۰/۴ متری هنگامی که مطابق جدول ۲ در مرحله اول آزمایش بوده در شکل ۸ ارائه شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود فشار کوبش در سنسور C در زمان‌های کوچکتر اتفاق می‌افتد. اما میزان فشار بیشینه در مکان سنسور A بیشتر بوده که به دلیل ارتفاع بالاتر نصب این سنسور می‌باشد. وجود نویز در اندازه‌گیری‌های فشار انجام شده امری طبیعی است که به دلیل ماهیت فیزیکی پدیده ایجاد می‌شود. مطالعه مقادیر فشار بیشینه در آزمایشات می تواند اطلاعات مفیدی را در اختیار محققان قرار دهد.



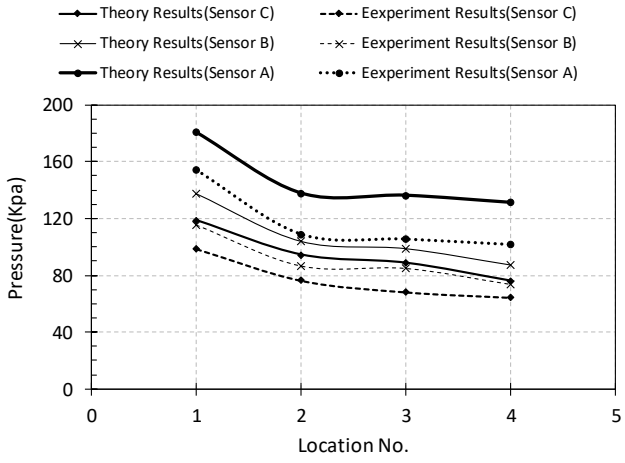
شکل ۸- دیاگرام فشار - زمان برای سقوط از ارتفاع یک متری

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.7.7]

جهت مطالعه دقیقتر پدیده کوبش مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی بدست آمده از رابطه (۱) برای فشار بیشینه کوبش انجام شده است. نتایج مقایسه بیشینه فشار در جدول ۳ آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود نتایج تحلیلی مقدار فشار بیشینه حاصل از کوبش را بزرگ‌تر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌نمایند و این اختلاف نتایج در برخی از نقاط به ۲۵ درصد نیز می‌رسد. نتایج بیشینه فشار در سنسور A نسبت به سنسورهای دیگر بیشتر است که این امر به دلیل ارتفاع نصب سنسورها قابل انتظار بوده است. همچنین مقادیر فشار بیشینه در موقعیت نصب اول که به سینه شناور نزدیکتر بوده نیز نسبت به دیگر موقعیت‌های نصب بیشتر است که این امر نیز به دلیل انحنای طولی بدنه شناور و افزایش سرعت برخورد سیال قابل توجیه می‌باشد.

به صورت نمونه دیاگرام مقایسه‌ای از نتایج تجربی و تحلیلی واگنر در ارتفاع سقوط ۱ متری در شکل ۹ ارائه شده است که می‌توان میزان اختلاف بین نتایج را در این دیاگرام نیز مشاهده نمود. علت اصلی اختلاف ایجاد شده در نتایج تجربی و تحلیلی را می‌توان در تفاوت فیزیک مسئله بررسی نمود. در استخراج روابط تحلیلی انحنای طولی بدنه شناور لحاظ نمی‌گردد که این انحنا موجب تغییر در رژیم جریان سیال شده و جدایی سیال از بدنه و کاویتاسیون ایجاد شده در ناحیه سینه موجب کاهش در فشار اعمالی به بدنه می‌شود. بنابراین روش‌های تحلیلی مبتنی بر فرضیات دوبعدی و یا تحلیل‌های سه‌بعدی که از انحنای طولی بدنه شناور صرفنظر می‌نمایند همواره فشار ناشی از کوبش را به صورت سختگیرانه‌تر پیش‌بینی می‌نمایند.



شکل ۹- مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی برای سقوط از ارتفاع یک متری

جدول ۳ – مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی برای بیشینه فشار ناشی از کوبش

مراحل مختلف آزمایش	ارتفاع سقوط (میلی متر)	فشار (کیلوپاسکال)								
		سنسور A			سنسور B			سنسور C		
		تئوری واگنر	نتایج تجربی	درصد خطا	تئوری واگنر	نتایج تجربی	درصد خطا	تئوری واگنر	نتایج تجربی	درصد خطا
مرحله اول	۴۰۰	۷۳/۰۴	۵۸/۰۲	۲۰/۵۶	۵۵/۶۳	۴۵/۴۲	۱۸/۴	۴۸/۲۵	۳۸/۳۶	۲۰/۴۸
	۶۰۰	۱۰۹/۱۵	۹۰/۲۶	۱۷/۳	۸۲/۹۶	۶۸/۳۲	۱۷/۶	۷۱/۸۳	۵۴/۷۱	۲۳/۸۳
	۸۰۰	۱۴۵/۱۹	۱۲۳/۱۷	۱۵/۱۶	۱۱۰/۲۴	۹۰/۱۷	۱۸/۲	۹۵/۳۷	۷۳/۲۶	۲۳/۱۸
	۱۰۰۰	۱۸۰/۶۶	۱۵۴/۳۷	۱۴/۵۵	۱۳۷/۰۷	۱۱۵/۱۲	۱۶	۱۱۸/۵۳	۹۸/۴۱	۱۶/۹۷
مرحله دوم	۴۰۰	۵۵/۹۷	۴۳/۲۳	۲۲/۷۷	۴۲/۵۴	۳۱/۳۵	۲۶/۳	۳۸/۸۱	۳۰/۱۲	۲۲/۳۷
	۶۰۰	۸۳/۳۷	۶۶/۶۸	۲۰/۰۱	۶۳/۱۱	۴۷/۱	۲۵/۴	۵۷/۴۶	۴۵/۶۹	۲۰/۴۸
	۸۰۰	۱۱۰/۷۱	۹۳/۴۵	۱۵/۵۹	۸۳/۶۳	۶۸/۰۴	۱۸/۶	۷۶/۰۷	۵۸/۱۵	۲۳/۵۵
	۱۰۰۰	۱۳۷/۶۱	۱۰۸/۷۸	۲۰/۹۵	۱۰۳/۸۳	۸۶/۳۴	۱۶/۸	۹۴/۳۹	۷۶/۲۲	۱۹/۲۵
مرحله سوم	۴۰۰	۵۵/۳۴	۴۲/۰۱	۲۴/۱	۴۰/۵۲	۳۲/۱۲	۲۰/۷	۳۶/۵۱	۲۹/۳۴	۱۹/۶۴
	۶۰۰	۸۲/۴۲	۶۱/۳	۲۵/۶۲	۶۰/۰۵	۴۶/۳۵	۲۲/۸	۵۳/۹۹	۴۴/۳۴	۱۷/۸۸
	۸۰۰	۱۰۹/۴۴	۹۱/۵۶	۱۶/۳۴	۷۹/۵۴	۶۵/۱۳	۱۸/۱	۷۱/۴۳	۵۷/۲۲	۱۹/۸۹
	۱۰۰۰	۱۳۶/۰۳	۱۰۵/۲۱	۲۲/۶۵	۹۸/۷۳	۸۴/۶۲	۱۴/۳	۸۸/۶	۶۸/۱۵	۲۳/۰۸
مرحله چهارم	۴۰۰	۵۳/۲۷	۴۱/۳۱	۲۲/۴۵	۳۵/۹۵	۲۸/۷۲	۲۰/۱	۳۱/۴۵	۲۴/۲۴	۲۲/۹۳
	۶۰۰	۷۹/۳۴	۶۲/۲۷	۲۱/۵۱	۵۳/۲	۴۱/۱	۲۲/۷	۴۶/۳۸	۳۸/۲۸	۱۷/۴۶
	۸۰۰	۱۰۵/۳۷	۸۷/۵۲	۱۶/۹۳	۷۰/۴۲	۵۳/۸۸	۲۳/۵	۶۱/۲۹	۴۷/۷۶	۲۲/۰۷
	۱۰۰۰	۱۳۰/۹۷	۱۰۱/۳۶	۲۲/۶۱	۸۷/۳۶	۷۳/۴۴	۱۵/۹	۷۵/۹۶	۶۴/۳۳	۱۵/۳۱

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.7.7]

۷ - نتیجه گیری

در این تحقیق سیستم انجام آزمایش سقوط مدلی از قسمت سینه بدنه یک شناور در آب آرام تنظیم شده است. سقوط مدل شناور از چهار ارتفاع مختلف انجام شده و اندازه‌گیری فشار در چهار مقطع مختلف صورت پذیرفته است. فشار در هر مقطع به کمک نصب سه فشارسنج اندازه‌گیری شده است. نتایج تحلیلی مقدار فشار بیشینه حاصل از کوبش را بزرگ‌تر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌نمایند و این اختلاف نتایج در برخی از نقاط به ۲۵ درصد نیز می‌رسد. علت اصلی اختلاف ایجاد شده در نتایج تجربی و تحلیلی را می‌توان در تفاوت فیزیک مسئله بررسی نمود. در استخراج روابط تحلیلی اولا بدنه شناور به صورت گوه فرض شده و انحنای عرضی آن درنظر گرفته نمی شود. ثانیا انحنای طولی بدنه شناور نیز در روابط تحلیلی لحاظ نمی‌گردد که این انحنا موجب تغییر در رژیم جریان سیال شده و جدایی سیال از بدنه و کاویتاسیون ایجاد شده در ناحیه سینه موجب کاهش در فشار اعمالی به بدنه می‌شود. بنابراین روش‌های تحلیلی مبتنی بر فرضیات دوبعدی و یا تحلیل‌های سه‌بعدی که از انحنای طولی بدنه شناور صرفنظر می‌نمایند همواره فشار ناشی از کوبش را به صورت سختگیرانه‌تر پیش‌بینی می‌نمایند.

۸ - مراجع

1- Luo, H. and Soares, C.G., (2012), Marine Engineering and technology, *Review of model test techniques of local slamming on ships*, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-62146-5.

2- Faltinsen, O.M. (2000), *Hydroelastic Slamming*, Journal of Marine Science and Technology, Vol.5, p.49-65.

3- Faltinsen, O.M., Landrini M. and Greco, M., (2004), *Slamming in Marine Application*, Journal of Engineering Mathematics, Vol.48, p.187-217.

4- Xu, G.D., and Duan, W.Y., (2009), *Review of prediction techniques on hydrodynamic impact of ships*, Journal of Marine Science and Applications, Vol.8, p.204-210.

5- Wang, S. and Soares, C.G., (2017), *Review of ship slamming loads and response*, Journal of Marine Science and Applications, Vol.16, p.427-445.

6- Ghadimi, P. Chekab M.A.F. and Dashtimanesh, A., (2014), *Numerical simulation of water entry of different arbitrary bow sections*, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, Vol.11, p.117-125.

7- Wang, S., (2001), *Assessment of slam induced loads on two dimensional wedges and ship sections*, Journal of Computational Physics, Vol.168, p.464-499.

8- Yang, S.H., Lee, H.H., Park, T.H., Lee, I.H. and Lee Y.W., (2007), *Experimental and numerical study on the water entry of symmetric wedges and a stern section of modern containership*, 10th International symposium on practical design of ships and other floating structures (PRADS 2007), Houston, Texas:518-526.

9- Anders, R., Garme, K. and Kuttenkeuler, J., (2007), *Design evaluation of the Visby class corvette*, Ninth International Conference on Fast Sea Transportation (FAST07), Shanghai:583-588.

10- Ren, B., Li X.L. and Wang, Y., (2007), *Experimental investigation of instantaneous properties of wave slamming on the plates*, China ocean engineering, Vol.21, p.533-540.

11- Tveitnes, T., Fairlie-Clarke A.C. and Varyani, K., (2008), *An experimental investigation into the constant velocity water entry of wedge-shaped sections*, ocean engineering, Vol.35, p.1463-1478.

12- Lewis, S.G., Hudson D.A., Turnock, S.R. and Taunton D.J., (2010), *Impact of a free-falling wedge with water: synchronized visualization, pressure and acceleration measurement*, Fluid Dynamic Research, Vol.42, p.1-30.

13- Barjasteh, M., Zeraatgar H. and Javaherian, M.J., (2016), *An experimental study on water entry of asymmetric wedges*, Applied ocean Research, Vol.58, p.292-304.

14- Peseux, B., Gornet, L. and Donguy, B., (2005), *Hydrodynamic impact: numerical and experimental investigation*, Journal of fluids and structures, Vol.21, p.277-303.

15- De Backer, G., Vantorre, M., Beels, C., De Pre, J., Victor, S., De Rouck, J., Blommaert, C. and Van Paepegem, W., (2009), *Experimental investigation of water impact on axisymmetric bodies*, Applied ocean Research, Vol.31, p.143-156.

16- Faltinsen, O.M., Chezhian, M., (2005), *A generalized Wagner method for three-dimensional slamming*, Journal of Ship Research, Vol.49, p.279-287.

17- Xie, H., Ren, H., Deng, B. and Tang, H., (2018), *Experimental drop test investigation into slamming loads on a truncated 3D bow flare model*, Ocean Engineering, Vol.169, p.567-585.

18- Hanbing Luo, Hui Wang, C. Guedes Soares, (2012), *Numerical and experimental study of hydrodynamic impact and elastic response of one free-drop wedge with stiffened panels*, Ocean Engineering, Vol.40, p.1-14.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.7.7]