بررسی پدیده اسلمینگ در قایق پرنده

محمدرضا خسروی[۱] ، امیر حسین نیک سرشت[۲] ، محمدمهدی علیشاهی[۳]

۱- مربی پژوهشکده هیدروآیرودینامیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر شیراز
۲- استادیار دانشکده مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز
۳- استاد بخش مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

چکیده

بررسی نیروهای هیدرودینامیکی ایجاد شده در اثر برخورد اجسام به سطح آب در طراحی سازه از اهمیت خاصی برخوردار است. نیروی برخورد با آب در شناورهای تندرو و ضربه امواج به سکوها از نمونه های متداول این پدیده هستند. بررسی پدیده فوق با استفاده از روشهای تحلیلی به علت پیچیدگی فراوان آن عملاً امکان پذیر نیست. همچنین ساخت مدل و انجام آزمایش به زمان و هزینهٔ زیادی نیاز دارد. در این مقاله ابتدا با در نظر گرفتن سرعت ثابت جهت مقایسه با نتایج موجود برای یک استوانه و یک گوشه[1] اثر ضربه هیدرودینامیکی بوسیله اجرای یک کد حل میدان جریان بررسی و نیروی ناشی از آن محاسبه گردیده است. سپس با استفاده از یک زیر برنامه و روش تکرار، توزیع سرعت واقعی حین برخورد برای مقطع زیر بدنه یک قایق پرنده که مشابه یک گوشه می‌باشد بدست آمده، و اثر کاهش سرعت برخورد عملاً در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج این روش با نتایج آزمایشگاهی، دقت بالا و مفید بودن این روش را در حل این گونه مسائل مورد تأیید قرار داده است. برای حل میدان جریان حول هر جسم اثرات لزجت، آشفتگی سیال، نیروی جاذبه، کشش سطحی و جریان هوای اطراف آب نیز در نظر گرفته شده است.

کلمات کلیدی: سرعت برخورد متغیر، ضربه هیدرودینامیکی، اسلمینگ، قایق پرنده

Prediction Of Slamming Force On Flying-Boat

Abstract

Prediction of hydrodynamic loads during water impact is of great significance in the structural design of flying vehicles. Also the importance of the slam force of waves on the members of offshore structures cannot be overemphasized. No theoretical tool is available to handle this complicated phenomenon exactly and the experimental procedures in the laboratory are both time-consuming and expensive.

In this paper, a computer program based on the VOF method is applied to evaluate the water impact outcome in a real situation. To asses the capabilities of the CFD code, two classical problems including water impact of a wedge and a circular cylinder traveling at constant speeds are studied. In a real situation the descend velocity is decreased by the impact loads known as “deceleration effect”. This change in speed is taken into account in an iterative procedure and the flow field around the base of a WIG craft is computed. All flow field computations in this study include the effects of viscosity, turbulence, gravity and surface tension.

The comparison of results with experimental data shows the efficiency and correctness of this straightforward iterative method.

Keywords : Deceleration effect, Hydrodynamic Impact, Slamming Force, Flying Boat

[1] -Wedge

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]

۱- مقدمه

قایق پرنده یا اکرانوپلن[2] از دو کلمهٔ اکرانو به معنی مسطح و صفحه‌ای[3] ، و پلن به معنی هواپیما تشکیل شده است. اکرانوپلن وسیله‌ای بین هاورکرافت و هواپیما است که اندکی بالای سطح (معمولاً سطح آب) پرواز می‌کند، شکل (۱). قایق پرنده بر روی بالشتکی از هوا حرکت می‌کند. بالشتک هوا توسط هندسه خاص قایق پرنده و جریان آیرودینامیکی هوا حول آن ایجاد می‌شود. لذا بالشتک هوا زمانی ایجاد می‌گردد که قایق پرنده از سرعت کافی برخوردار باشد و نیروی بالابر ایجاد شده توانایی جداسازی قایق پرنده را از سطح آب داشته باشد. قایق پرنده برای بهره‌بری از پدیدهٔ اثر سطح[4] طراحی شده است،[۱]، بنابراین شناور همیشه در نزدیکی سطح پرواز می‌کند و در معرض برخورد با سطح آب است. ضربات آب یکی از بحرانی‌ترین پدیده‌ها در مهندسی سازه‌های دریائی و طراحی شناور می‌باشد. به طور خاص، بارهای وارد بر کف شناورها و المانهای افقی سازه‌های دریائی، در چند مورد باعث شکستن سازه و آسیب‌دیدگی کامل آنها شده است. اثرات نیروی برخورد با آب در شناورها عبارتند از: تلف کردن سرعت شناور، ایجاد ارتعاشات در بدنه و نهایتاً آسیب دیدگی کامل سازهٔ شناورها است. با افزایش سرعت شناورها تأثیر این نیرو به شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۱- قایق پرنده

حرکت در راستای قائم شناور[5] و برخورد آن با سطح آب و یا امواجی که مستقیماً از جلو و عقب کشتی با آن برخورد می‌کنند، باعث می‌شوند تا سینه و یا پاشنه کشتی به طور متناوب بالا و پائین[6] روند، این پدیده ها مثالهایی از ضربه هیدرودینامیکی هستند. برای محاسبه نیروی حاصل از ضربه هیدرودینامیکی تحقیقات زیادی صورت گرفته است، ولی به علت وجود پیچیدگی‌های فراوان در این پدیده هنوز روش تحلیلی مناسبی برای بررسی آن وجود ندارد. ضربه هیدرودینامیکی اولین بار توسط Von Karman در سال ۱۹۲۹ مورد مطالعه قرار گرفت. کارمن یک روشی تحلیلی با استفاده از تئوری اندازه حرکت برای پیش‌بینی ضربه وارد به هواپیمای آب‌نشین(Sea Plane) ارائه نمود[۲]. در این تحقیق با فرض غیر لزج، غیر چرخشی و تراکم‌ناپذیر بودن سیال و بدون در نظر گرفتن اثر نیروی جاذبه و کشش سطحی، رابطه‌ای برای محاسبه نیروی وارده به یک گوشه بدست آمد. کارمن اندازه حرکت جسم را قبل از برخورد برابر با اندازه حرکت جسم بعد از برخورد به اضافه اندازه حرکت مقدار آبی که به همراه جسم به حرکت در می‌آید، در نظر گرفت. بنابراین نیروی هیدرودینامیکی جسمی که با سرعت ثابت به سطح آب برخورد می‌کند، برابر نرخ تغییر اندازه حرکت جرم آب اضافه شده[7] است. تئوری فوق توسط Wagner در سال ۱۹۳۲ اصلاح شد و اثر بالا آمدن آب از دو سمت جسم نیز در نظر گرفته شد [۳].

تحقیقات بیشتر در این زمینه توسط Fabula [۴] در سال ۱۹۵۷ و Ferdinande [۵] در سال ۱۹۶۶ انجام شده است. نتایج تئوری های فوق بدون در نظر گرفتن اسپری آب، اثر نیروی جاذبه و کشش سطحی، جدائی جریان از جسم به دست آمده‌اند. براین اساس، از سال ۱۹۸۵ روشهای عددی برای غلبه بر این محدودیت‌ها توسعه پیدا کرده‌اند.

در این مقاله، ابتدا نیروی برخورد با آب وارد بر یک استوانه، و یک گوشه که عملاً مقطع برخورد یک قایق

[2] - Ekranoplan
[3] - Screen
[4] - Ground Effect

[5] - Heaving
[6] - Pitching
[7] -Added Mass

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]

پرنده در محل پله[8] آن می باشد با استفاده از یک کد آماده و سرعت ثابت مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس یک زیر برنامه تهیه گردیده است که توسط آن و با استفاده از نتایج نیروی محاسبه شده از قسمت قبل و با در نظر گرفتن این نیروها سرعت لحظه ای محاسبه شده و اثر تغییر سرعت نیز وارد مساله شده است و با مقایسه نتایج بدست آمده از این روش و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که این روش پیشنهادی از دقت بسیار مناسبی برخوردار است، ضمن اینکه در مدت زمان کوتاهی می‌توان نتایجی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی به دست آورد.

۲- معادلات حاکم

روش حل کردن مسائل سطح آزاد در بررسی دقیق این پدیده تأثیر بسزایی دارد. لذا انتخاب شیوه مناسب در این خصوص از ضروریات حل عددی می‌باشد. دو روش اساسی از نظر انتخاب نوع شبکه برای حل مسائل سطح آزاد وجود دارد. روش اول، استفاده از شبکه متحرک است. این روش عملاً برای جریانهای ساده کاربرد دارد و در هندسه‌های پیچیده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. روش دوم، بکارگیری شبکه ثابت برای حل مسائل سطح آزاد است، که این روش اغلب در مسائل عملی با جریانهای پیچیده بکار گرفته می‌شود [۶ و ۷]. یکی از متداولترین و قویترین روشهای مورد استفاده در حل مسائل سطح آزاد در گروه دوم روش حجم سیال[9] است که بخصوص در حل مسائل دریائی کاربرد زیادی دارد. با توجه به قابلیت فراوان روش فوق در این تحقیق نیز برای مدل کردن سطح آزاد سیال از این روش استفاده شده است.

در این روش یک نسبت حجمی برای سیال در هر سلول در نظر گرفته می‌شود. نسبت حجمی (α) عددی بین صفر و یک است که صفر مشخصه سیال اول و یک مشخصه سیال دوم می باشد. لازم به یاد آوری است که در این روش سطح سیال به صورت غیر مستقیم مدل می‌گردد و ابتدا نسبتهای حجمی در مرز دو سیال حساب می‌شود و با توجه به نسبتهای حجمی در هر سلول یک خط به عنوان سطح آزاد رسم می‌گردد، که این روش مشهور به روش قطعه‌ای خطی[10] است [۸ و ۹].

در سطح آزاد علاوه بر ارضاء شرط دینامیکی باید شرط سینماتیکی ذرات نیز اعمال شود. شرط دینامیکی عملاً همان شرط پیوستگی فشار در سطح آزاد است که به صورت خود به خود در حل معادله ناویراستوکس در سلولهای دو فازی اعمال می‌شود ولی شرط سینماتیک که بیان کننده حرکت سطح آزاد سیال می باشد به صورت زیر تعریف می شود.

$$\partial_t \alpha + \vec{V}.\nabla \alpha = 0.0 \qquad (۱)$$

که $\vec{V}$ بردار سرعت سیال است. همچنین خصوصیات سیال مانند دانسیته و ویسکوزیته در هر حجم کنترل به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho = \sum \alpha_q \, \rho_q \qquad (۲)$$

که ρ_q دانسیته هر فاز و ρ دانسیته میانگین می‌باشد. در این روش یک معادله اندازه حرکت برای هر دو فاز در کل میدان حل می‌شود و سرعت بدست آمده برای همه فازها در نظر گرفته می‌شود. ولی مقادیر μ و ρ در این معادله به نسبت حجمی سیالهای موجود در حجم کنترل بستگی دارد. معادله اندازه حرکت در جهت jبرای جریان آشفته عبارتست از :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + \rho g_j + F_j \qquad (۳)$$

که در این معادله P فشار استاتیکی، g_j شتاب ثقل در جهت j، F_j نیروهای خارجی در جهت j می‌باشد.

[8] - Step
[9] - Volume of Fluid, VOF
[10]- Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]

معادله پیوستگی نیز برای جریان غیر قابل تراکم به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\nabla . \vec{V} = 0. \qquad (۴)$$

روش مجزا سازی عبارتهای مختلف معادلات فوق بدینصورت است که عبارت اندازه حرکت بصورت Quick و عبارت مربوط به کوپل فشار و سرعت بصورت Piso و عبارت فشار بصورت Body Force weighted مدل می‌گردد.

۳- نتایج

در این مقاله ابتدا به مقایسه نتایج برخورد هیدرودینامیکی یک استوانه و یک گوشه با سرعت ثابت که عموماً در تحقیقات قبلی بکار رفته، پرداخته شده است سپس به ارائه روشی برای مدل کردن ضربه هیدرودینامیکی با سرعت متغیر از طریق نوشتن و اضافه کردن یک زیر برنامه به کد موجود پرداخته شده است.

۳-۱- ضربه هیدرودینامیکی یک استوانه

برای طراحی سازه‌های دریائی تحقیقات زیادی روی ضربه هیدرودینامیکی یک استوانه انجام شده است. در این مقاله، به برخی از نتایج تجربی و حلهای عددی که اخیراً انجام شده اند، اشاره می شود.

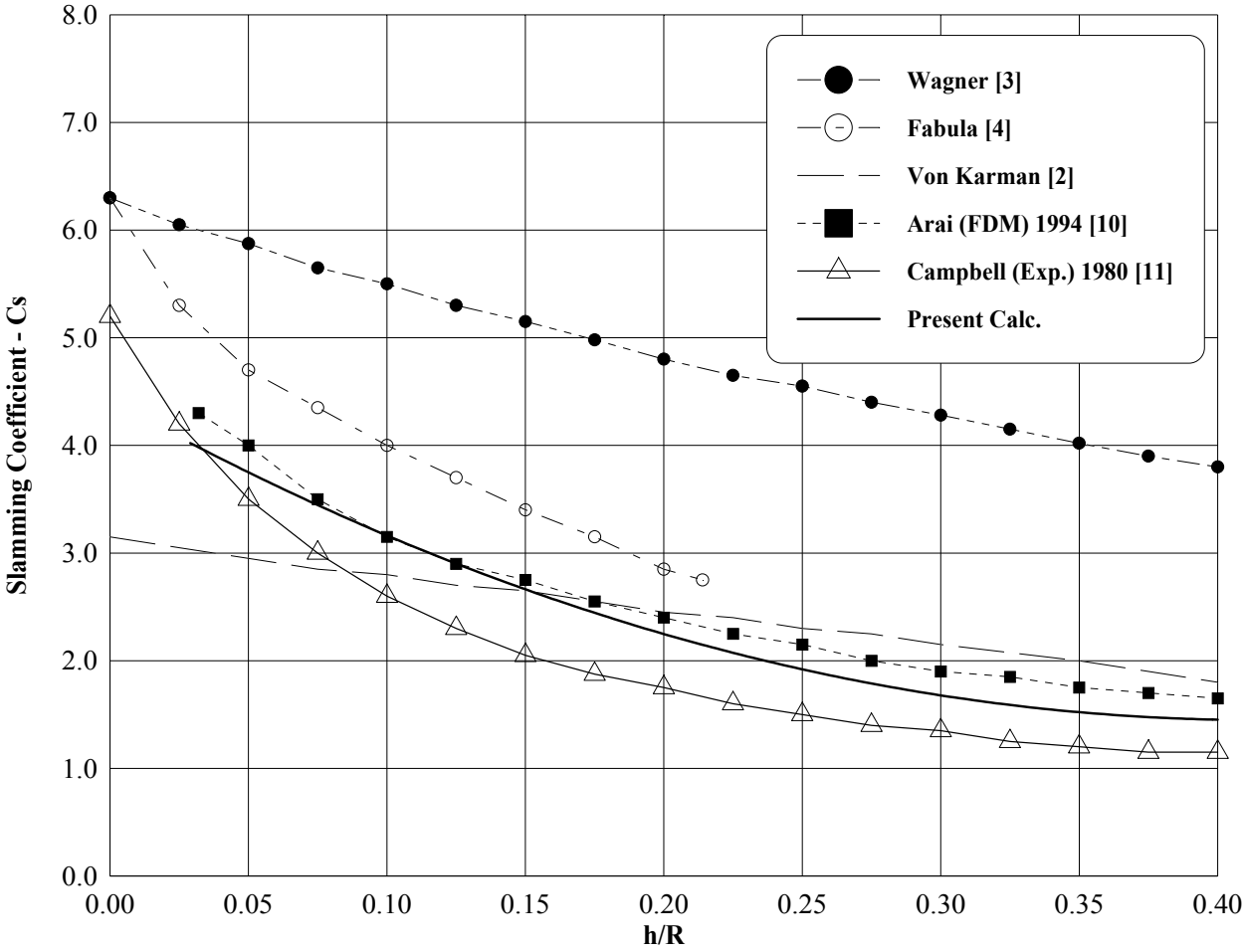
استوانه‌ای به قطر m ۱۱ که با سرعت m/s ۱۰ به سطح آب برخورد می‌کند، مدل شده است. میدان محاسباتی در نظر گرفته شده، بر اساس پیشنهاد Arai [۱۰]، ۷ برابر ابعاد جسم بوده و به صورت المانهای مربعی سازمان یافته[11] با تعداد (۲۰۰×۲۵۰) گره شبکه‌بندی شده است. برای آشفتگی از مدل (RSM) (Reynolds Stress) و برای مدل کردن جریان دو فازی از روش VOF استفاده شده است. بنابراین معادلات ناویراستوکس متوسط رینولدز[12] در کل میدان و برای هر دو سیال آب و هوا حل می‌شود. برای دقیق بودن نتایج فاصله زمانی[13] به اندازهٔ 1×10^{-5} ثانیه انتخاب شده است.

در شکل (۲) ضریب نیروی برخورد با آب $C_S = \frac{F}{0.5\rho V^2 D}$ بر حسب h/R رسم شده است. h میزان فرورفتگی جسم در آب است. در مدل تئوری Von Karman [۲] ضریب برخورد با آب را در لحظه برخورد برابر با $C_{S_0} = \pi$ و مدل Wagner [۳] مقدار $C_{S_0} = 2\pi$ بدست می‌آید. مقادیر C_{S_0} به دست آمده از آزمایش‌های تجربی به دلیل تفاوت در دقت اندازه‌گیری بسیار پراکنده هستند و در محدوده ۵/۵ تا ۶/۵ قرار می‌گیرند. براساس این داده‌های تجربی Campbell [۱۱] یک فرمول تجربی به دست آورده است. نتایج حل عددی به روش تفاضل محدود (FDM) که توسط Arai با سرعت ثابت انجام گرفته نیز در این شکل رسم شده است. حل عددی Arai با فرض غیر لزج و بدون در نظر گرفتن کشش سطحی و اثرات جریان هوا انجام شده است. نتایج به دست آمده از حل عددی حاضرکه اثرات فوق در آن در نظر گرفته شده است، بیشترین مطابقت را با نتایج تجربی دارد، شکل (۲). این دقت در کلیه مراحل برخورد جسم با سطح آب مشاهده می‌شود.

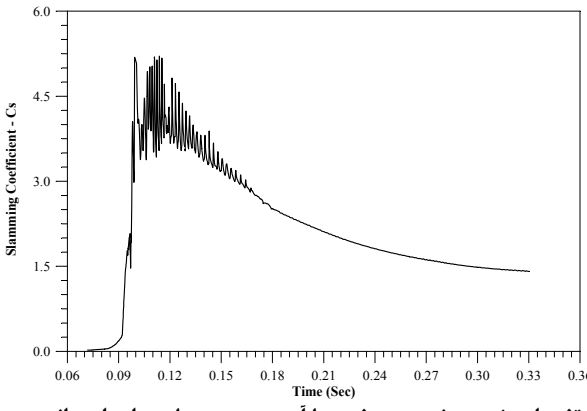
در شکل (۳) نمودار فشار در پایین ترین قسمت استوانه و در شکل (۴) تغییرات نیروی برخورد با آب بر حسب زمان رسم شده است. مشاهده می‌شود که در لحظه برخورد جسم به سطح آب فشار به شدت افزایش می‌یابد. سپس با فرو رفتن جسم در آب فشار کاهش یافته و بعد از مدتی به مقدار ثابت فشار هیدرواستاتیک که متناسب با عمق فرو رفتن جسم در آب است، می‌رسد. همانگونه که مشاهده می‌شود، در لحظه برخورد جسم به سطح آب حداکثر فشار به ۱۰ برابر فشار هیدرواستاتیک می‌رسد.

[11] - Structured
[12] - RANSE
[13] - Time Step

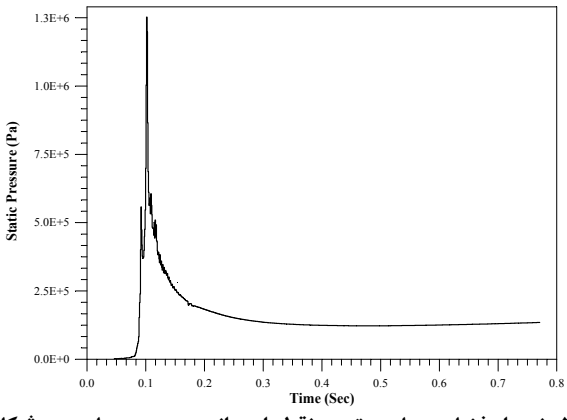
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]



شکل ۲- تغییرات ضریب نیروی برخورد با آب برحسب h/R
(سرعت برخورد ۱۰m/s و شعاع استوانه ۵/۵ m)



شکل۴- تغییرات ضریب نیروی برخورد با آب برحسب زمان برای استوانه



شکل۳- نمودار فشار در پایین ترین نقطه استوانه بر حسب زمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]

۳-۲- ضربه هیدرودینامیکی یک گوشه

سینهٔ[14] شناورهای تندرو و قایق‌های پرنده تقریباً شبیه گوشه است. برای بررسی صحت نتایج حل عددی حاضر، مدلی مشابه از زیر بدنه یک شناور به صورت یک گوشه به عرض m ۶ و زاویه $\beta = 30^\circ$ که با سرعت ثابت ۱۰m/s به سطح آب برخورد می‌کند، مورد بررسی قرار گرفته است. با مطالعه انجام شده بر روی میدان محاسباتی و تعداد گرههای مورد نیاز برای شبکه‌بندی بهترین حالت هنگامی است که میدان محاسباتی ۸ برابر ابعاد جسم بوده و المانها، بصورت المانهای مربعی سازمان یافته با تعداد (۱۷۰×۲۴۰) گره شبکه‌بندی شود. مدل اغتشاشات و گام زمانی همانند آنچه در بخش ۳-۱ بیان گردید، استفاده شده است.

درشکل (۵) توزیع فشار روی بدنهٔ گوشه در یک لحظه خاص رسم شده است، همچنین مقایسه‌ای بین نتایج حل عددی حاضر، حل عددی Arai روشهای تحلیلی Wagner و Ferdinande صورت گرفته است.

تئوری Wagner توزیع فشاری که روی بدنه پیش بینی می‌کند، نسبت به مقدار واقعی خیلی بیشتر است. تئوری فوق توسط Ferdinande اصلاح شده و حداکثر فشار کاهش یافته است. ولی در این تئوری اثرات اسپری آب و نیروی جاذبه در نظر گرفته نشده است. به طور کلی تأثیر اسپری آب، لزجت سیال و نیروی جاذبه باعث کاهش فشار حداکثر در روی بدنهٔ جسم می‌شود.

درشکل (۵) نیز مانند شکل (۲) نتایج حل حاضر پایین‌تر از حل Arai قرار گرفته است. با توجه به اعمال اثرات کشش سطحی، نیروی جاذبه، اسپری آب و لزجت سیال و همچنین با استناد به شکل (۲) که در آن حل حاضر به نتایج تجربی نزدیکتر بود، در اینجا نیز می‌توان گفت دقت حل حاضر، از حل Arai بهتر است.

درشکل (۶) خطوط فشار ثابت در چند لحظه خاص رسم شده‌اند. این خطوط مقادیر زیاد فشار و نیز گرادیان فشار در نزدیکی ریشه اسپری را نشان می‌دهند.

با توجه به نتایج به دست آمده از حل عددی حاضر، برای دو مدل فوق اکنون با اطمینان می‌توان این روش را برای مدل کردن زیر بدنهٔ قایق پرنده، در هنگامی که جسم با سرعت متغیر به سطح برخورد می‌کند، بکار برد.

۳-۳- ضربه هیدرودینامیکی یک قایق پرنده

هنگامی که شناورهای تندرو برای شرایط دریائی متلاطم طراحی می‌شوند محاسبه نیروی برخورد با آب از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین برای طراحی سازهٔ قایق پرنده محاسبه نیروی فوق اجتناب‌ناپذیر است.

سرعت قائم یک هواپیمای غیر نظامی هنگام تماس با زمین از مقدار m/s ۳/۱ تجاوز نخواهد کرد و این مقدار برای قایق پرنده که به سطح آب برخورد می‌کند از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۲].

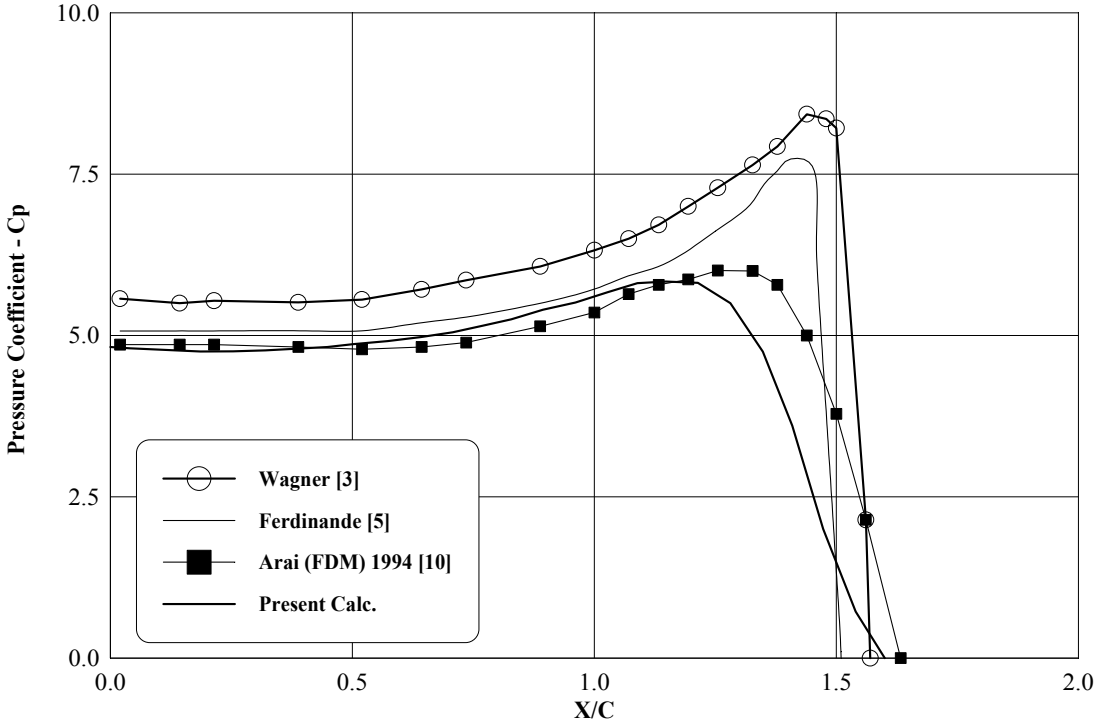
$$V = 0.61\left[\frac{Mg}{S}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (۵)$$

در این معادله M بیشترین جرم قایق پرنده، g شتاب جاذبه و S تصویر سطح بال قایق پرنده است.

در این قسمت، قایق پرنده‌ای به طول ۰/۷۲ متر که در ارتفاع ۴ متری پرواز می‌کند، به صورت متداول کنونی یعنی با سرعت برخورد ثابت m/s ۲/۸۲ به دو صورت آرام و مغشوش مدل شده است. میدان محاسباتی در نظر گرفته شده ۸ برابر ابعاد جسم بوده و بصورت المانهای مربعی سازمان یافته با تعداد (۲۲۰×۳۲۰) گره شبکه‌بندی شده است، شکل (۷). مدل اغتشاشات و گام زمانی همانند آنچه در بخش۳-۱ بیان گردید، استفاده شده است [۱].

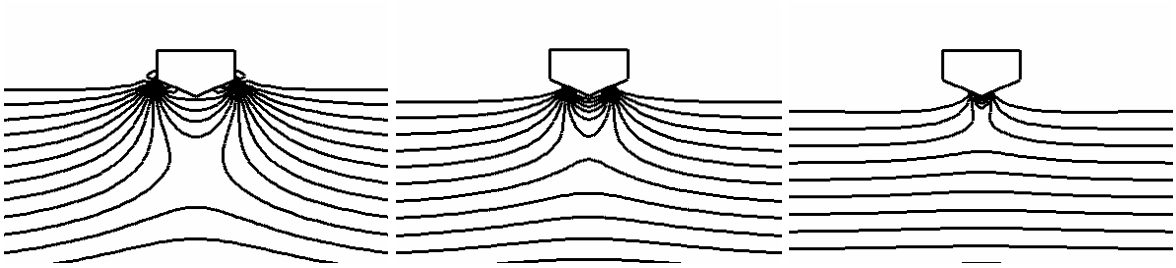
[14] - Bow

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]

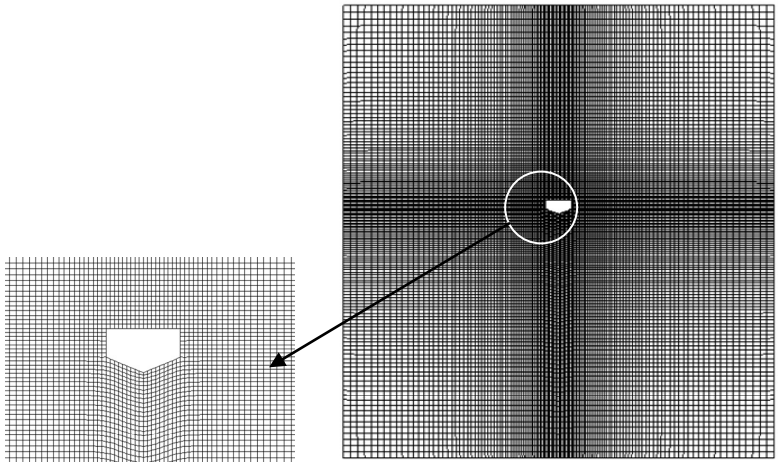


شکل ۵- توزیع فشار روی بدنه گوشه

(سرعت برخورد 10 m/s، زاویه گوشه $\beta = 30$ و Vt/(B/2) = 0.267)



شکل۶- کانتور فشار در زمانهای مختلف



شکل ۷- شبکه بندی میدان محاسباتی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]

در شکل (۸) نمودار فشار در پایین‌ترین قسمت بدنهٔ قایق پرنده (Step) و در شکل (۹) تغییرات ضریب نیروی برخورد با آب $C_S = \frac{F}{0.5\rho V^2 L}$ بر حسب زمان برای جریان آرام و مغشوش رسم شده است. در شکلهای (۸) و (۹) مشاهده می‌گردد که فشار و ضریب نیرو ابتدا افزایش می‌یابد و در حدود ۰/۶ عرض بی بعد (2X/B) به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس شروع به کاهش می‌کند. در شکل (۹) تفاوت بین نتایج جریان آرام و مغشوش فقط در قسمت بیشترین مقدار نیرو محسوس است ولی از نظر زمان مورد نیاز برای حل جریان، مدت زمان مورد نیاز برای جریان مغشوش چندین برابر جریان آرام است، که شاید در اکثر موارد حل جریان مغشوش مقرون به صرفه نباشد. در شکل (۱۰) نیز شکل سطح آب در زمانهای مختلف نمایش داده شده است و اسپری آب از گوشه‌های آن کاملاً مشاهده می‌شود.

۳-۴- اثر کاهش سرعت

زاو (Zhao) تحقیقاتی در زمینه ضربه هیدرودینامیکی گوشه در سال ۱۹۹۶ انجام داده است. نتایج آزمایشگاهی زاو نشان می‌دهد که سرعت برخورد در زمان ضربه ثابت نیست و به هندسه و جرم جسم بستگی دارد [۱۳ و ۱۴] به عبارت دیگر نیروهای هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی (نیروی برخورد با آب) که در جهت عکس حرکت در هنگام برخورد به جسم اعمال می‌شود باعث کاهش سرعت می‌گردد. حال با توجه به اینکه سرعت لحظه‌ای برخورد و هندسه جسم، تعیین کننده مقدار فشار ضربه است. بنابراین محاسبه سرعت لحظه‌ای برخورد ضروری به نظر می‌رسد.

در مدلسازی عددی اگر توزیع سرعت در حین ضربه از قبل مشخص باشد، می‌توان تغییرات سرعت را به عنوان یکی از شرایط مرزی در نظر گرفت. اما در عمل این تغییرات سرعت در دسترس نیست، بنابراین برای حل معادلات جریان نیاز است ابتدا سرعت تخمین زده و سپس با محدودیتهایی که برای جریان وجود دارد، سرعت فوق اصلاح شود.

در این قسمت از مقاله به بررسی اثر کاهش سرعت برخورد پرداخته شده است و روشی مناسب برای محاسبه این پدیده ارائه گردیده است. بدین منظور، ابتدا مدلی مشابه زیر بدنه یک قایق پرنده به صورت یک گوشه به عرض ۰/۵ m، زاویه $\beta = 30^\circ$، جرم (۲۴۱ Kg) و طول واحد که در مرجع [۱۴] به آن اشاره شده است در نظر گرفته شد و با سرعت برخورد ثابت ۶/۱۵ متر بر ثانیه معادلات حاکم بر جریان حل شده و با استفاده از نتایج نیروهای برخورد با آب در هر لحظه از تکرار اول زمانی (سرعت ثابت) و نیز با داشتن وزن جسم می توان شتاب لحظه ای را محاسبه کرد و سرعتهای لحظه ای برخورد جسم را بدست آورد و عملاً مساله را با سرعتهای لحظه‌ای جدید به صورت شبه تعادلی(Quasi-Steady) و در تکرار دوم حل کرد. حل مراحل فوق تا هنگامی که سرعتهای لحظه‌ای یا نیروی برخورد با آب نسبت به تکرار قبل تغییر داشته باشد ادامه می‌یابد. منظور از تکرار در متن فوق این است که یکبار مساله با یک توزیع سرعت زمان مشخص، حل شود.

در ضربه هیدرودینامیکی نیروهای عمودی که به جسم وارد می‌شود عبارتند از نیروی برخورد با آب و نیروی وزن و می توان رابطه آن را به صورت زیر نوشت :

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = S - mg \qquad (۶)$$

و یا به عبارتی:

$$m\frac{dv}{dt} = S - mg \qquad (۷)$$

که v و m سرعت و جرم جسم برخورد کننده با آب می‌باشند.

بنابراین سرعت لحظه‌ای جسمی که به سطح آب برخورد می‌کند متأثر از نیروهای هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی (نیروی برخورد با آب S) و وزن جسم (mg) است. در مدلسازی عددی حاضر، نیروی برخورد با آب برای یک سرعت برخورد ثابت از تکرار اول

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]

محاسبه شده سپس از رابطه (۸) برای محاسبه سرعت لحظه‌ای استفاده شده است.

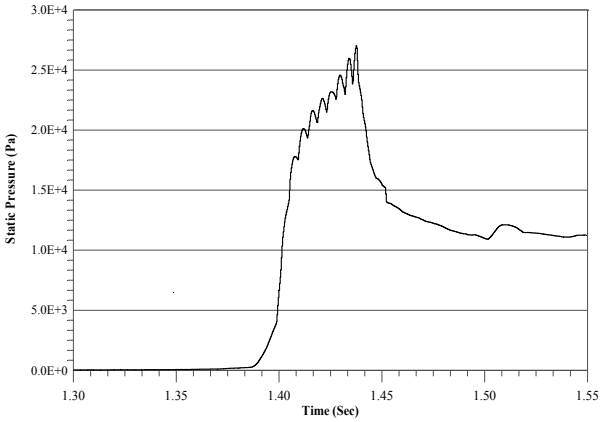
$$V = \int_0^t (\frac{S}{m} - g)dt + V_0 \qquad (۸)$$

برای این منظور یک زیر برنامه نوشته شده است (User Define Function) که ورودی آن نیروی‌های برخورد با آب از تکرار قبل ($S(t)$) یعنی بعد از تمام شدن محاسبات با سرعت ثابت می باشد و سپس معادله (۸) حل می‌گردد و تغییرات سرعت جدید با زمان محاسبه و برای حل معادلات حرکت در تکرار جدید، بکار می‌روند عملاً در تکرار جدید در هر گام زمانی به جای سرعت ثابت سرعت محاسبه شده از معادله (۸) که در زیر برنامه محاسبه می‌شود بکار می‌رود و در انتهای این مرحله یک منحنی جدید تغییرات نیروی اسلمینگ با زمان بدست می‌آید که برای مرحله بعدی بکار می‌رود. با تکرار مراحل فوق در نهایت تغییرات نیروی اسلمینگ ناچیز و در نتیجه توزیع سرعت لحظه‌ای ثابتی حاصل می‌شود، با این توزیع سرعت لحظه‌ای نهائی مجدداً یک تکرار دیگر انجام می شود و معادلات جریان دو فازی حل می‌شود.

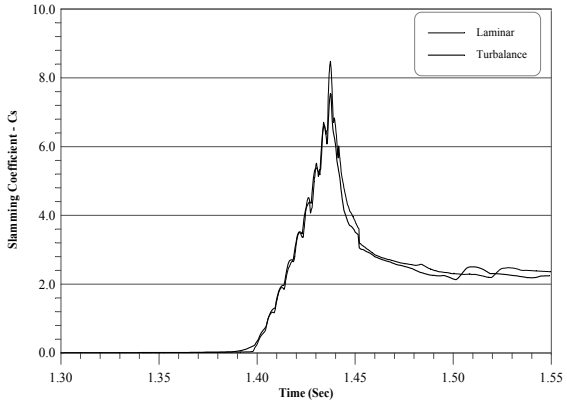
در شکل (۱۱) تغییرات سرعت لحظه‌ای در تکرارهای متفاوت مشاهده می‌شود. لازم به یادآوری است که حداکثر نیرو در محدوده ۰/۶عرض بی بعد(2X/B) حاصل می‌شود که این محدوده در شکل (۱۴) مشخص است، در محاسبات نیز این حداکثر مورد نیاز می‌باشد و بعد از ثابت شدن این حداکثر نیرو دیگر تکرار انجام نگرفته است و همانطور که در شکل (۱۲) نشان داده شده، هنوز در مرحله پایین آمدن نیرو از زمان۰/۰۲ثانیه به بعد تغییراتی در نیرو و سرعت وجود دارد که چون از اهمیت برخوردار نمی‌باشد تکرار قطع شده است در صورت نیاز به نیروهای دقیق تر این قسمت، می‌توان تکرار را باز هم انجام داد. با توجه به سرعت بدست آمده در شکل (۱۱) از مقایسه آن با سرعت آزمایشگاهی زاو مشاهده می‌شود که نتایج با مقدار سرعت واقعی زاو متفاوت می‌باشد، ولی با این وجود با توجه به شکل (۱۲) مقدار نیرو خیلی نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی بدست می‌آید برای مقایسه بهتر این محاسبات با سرعت برخورد ثابت، سرعت واقعی زاو و سرعت محاسبه شده از روش تکرار مجدداً انجام شده است و در شکل (۱۳) تغییرات نیرو بر حسب زمان نشان داده شده است. با مقایسه نیروهای محاسبه شده با توزیع سرعت واقعی و توزیع سرعت حاصل از روش تکرار مشاهده می‌شود که نتایج روش تکرار به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است، شاید این بدین خاطر است که آزمایشهای زاو با یک گوشه سه بعدی انجام شده و به همین علت با توزیع سرعت حاصل از روش تکرار که دو بعدی است متفاوت می‌باشد. البته این تفاوت در توزیع سرعت باعث شده که نتایج بهتری در مقدار نیروها بدست آید که در شکل (۱۲) کاملاً مشخص است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد روش متداول تاکنون برای محاسبه نیروهای وارده بر هواپیماهای آب نشین و قایق‌های پرنده بر اساس سرعت ثابت بوده است، در شکل (۱۴) نمودار ضریب بار بر حسب عرض بی بعد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از محاسبات با سرعت برخورد ثابت با استاندارد بارگذاری هیدرودینامیکی FAR [۱۵] و IMO [۱۶] تطابق دارد. بنابراین حتی هنگامی که سرعت برخورد ثابت در نظر گرفته می‌شود به نتایج بدست آمده برای بدست آوردن بار حداکثر جهت طراحی سازه می‌توان اطمینان کامل داشت، اما نتایج روش جدید نشان می‌دهد که جهت پیش بینی تغییرات نیرو بر حسب زمان پیش بینی استاندارد بیش از مقادیر واقعی نیروها است و باید اصلاح گردد. ضمناً تجارب نویسندگان این مقاله در تستهای میدانی قایق پرنده نیز مزید بر این ادعا است.

در این روش برای حل مساله با چهار تکرار و با استفاده از یک کامپیوتر Pentium IV با سرعت ۲۸۰۰ MHz حدود ۱۶۸ ساعت زمان نیاز می‌باشد و نتایج به صورت دقیق محاسبه می‌شود و عملاً نشان می‌دهد نیازی به آزمایشهای بسیار گران قیمت و زمان بر نیست، بنابراین روش فوق گامی جدید در محاسبه نیروهای برخورد با آب در اثر پدیده ضربه به اجسام دریایی می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]



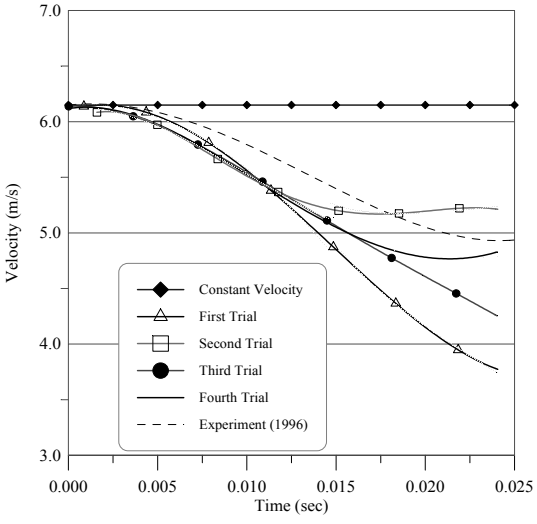
شکل۸- نمودار فشار در ناحیه Step قایق پرنده بر حسب زمان



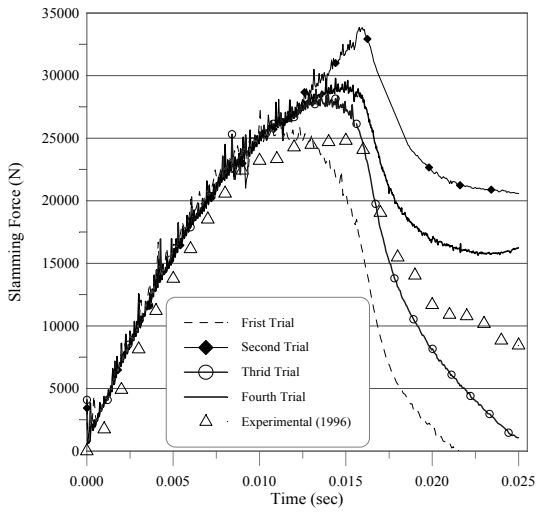
شکل ۹-تغییرات ضریب نیروی برخورد با آب بر حسب زمان



شکل۱۰- شکل سطح آزاد آب در زمانهای مختلف

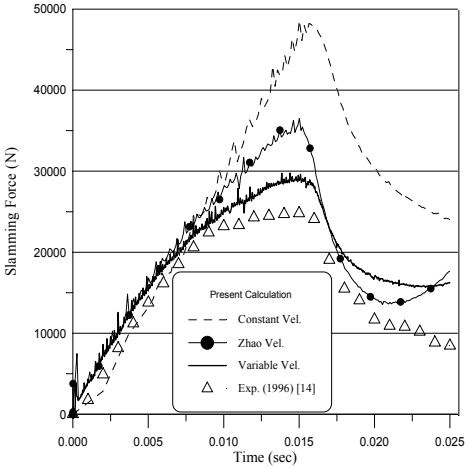


شکل ۱۱- نمودار سرعت بر حسب زمان

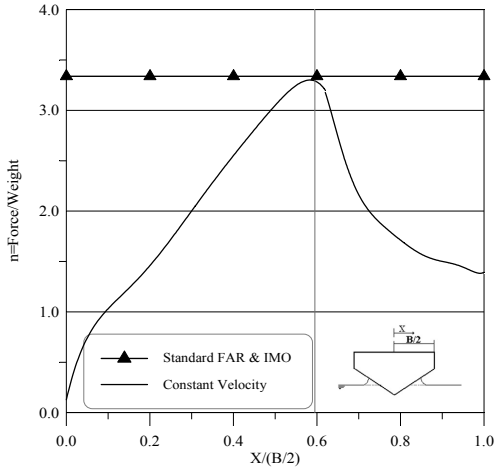


شکل۱۲- تغییرات نیروی برخورد با آب بر حسب زمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]



شکل ۱۳- تغییرات نیروی برخورد با آب بر حسب زمان



شکل ۱۴- نمودار ضریب بار بر حسب عرض بی بعد

۴- نتیجه گیری

پیش‌بینی مقدار نیروی برخورد با آب در طراحی شناورهای تندرو از اهمیت خاصی برخوردار است. نتایج روشهای تحلیلی موجود مقدار نیروی برخورد با آب را خیلی بیشتر از مقدار واقعی آن پیش‌بینی میکند و هزینه اضافی جهت ساخت سازه مصرف خواهد شد. در این مقاله، ضربه هیدرودینامیکی مربوط به یک استوانه، یک گوشه با سرعت ثابت و با سرعت برخورد متغیر با نوشتن یک زیر برنامه و اضافه کردن آن به یک کد آماده بررسی شده است. نتایج بسیار دقیقی از حل عددی حاضر، در مقایسه با نتایج تجربی و روشهای تحلیلی بدست آمده است.

۵- مراجع

۱- خسروی، م.ر. نیک سرشت، ا. ح. " حل عددی ضربه هیدرودینامیکی یک شناورWIG " دوازدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک ، تهران، ۱۳۸۳.

2-Von Karman, T. “The Impact on Seaplane Float During Landing”, NACA, TN 321, 1929.

3-Wagner, H., “ Landing of Sea Planes ”, NACA TM622.1931.

4-Fabula, A., “Ellips Fitting Approximation of Two Dimensional Normal Symmetric Impact of Rigid Bodies on Water”, Fifth Midwestern Conference on Fluid Mechanics, University of Michigan Press, 1957.

5-Ferdinande, V., “Theoretical Considerations on the Penetration of a Wedge in to the Water”, International Shipbuilding Progress , Vol. 13 , No. 140, 1966.

6-Miyata, H., and Nishimura, S., “Finite-Difference Simulation of Nonlinear Ship Waves ”, Journal of Fluid Mechanics, 157, PP 327-357, 1985.

7-Rozhdestvensky, K., “Nonlinear Aerodynamics of Ekranoplan in Strong Ground Effect”, Third International Conference on Fast Sea Transportation (FAST 95), Lubeck-travemunde, Germany, 621 P, 1995.

8-Nikseresht, A.H., Alishahi, M.M., and Emdad, H., “Volume - of – Fluid Interface Tracking with Lagrangian Propagation for Incompressible Free Surface Flows ”, Vol.No.2, PP 131-140, SCIENTIA IRANICA, 2005.

9-Gueyffier, D., Li, J., and Nadim, A., Scardovelli, R., and Zaleski, S. “ Volume -of-Fluid interface tracking with

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]

smoothed surface stress methods for three-dimensional flows", Journal of Computatioal Physics, 152, PP 423-456, 1999.

10-Arai, M., Inoue, Y., "A Computing Method for the Analysis of Water Impact of Arbitrary Shaped Bodies", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 176, 1994.

11-Campbell, I.M.C., Weynberg, P. A., " Measurment of Parameters Affecting Slamming ", Wolfson unit for Marine Technology and Industrial Aerodynamics, University of Southampton, Report No. 440, 1980

12-Stintion, D., The Anatomy of the Aeroplane, London, Foulis & Co Ltd. St Albans, Granada Publishing Ltd. 1980.

13- Zhao, R., and Faltinsen, O., " Water Entry of Two Dimensional Bodies " Journal of Fluid Mechanics, Vol. 246, 593-612, 1993.

14-Zhao, R., Faltinsen, O., and Aarsnes, J.V., " Water Entry of Arbitary Two Dimensional Sections With and Without Flow Seperation " Proc. Of 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, 118-138, 1996.

15-Federal Aviation Requirements, (FAR), Part 23-473, 2001.

16-International Maritime Organization, IMO, 2002.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1385.3.5.5.7]