شبیه‌سازی عددی ورود به آب مقطع تونل دار در زوایای خیز کف و شعاع تونل متفاوت

سلمان ایزدی[۱] ، احمدرضا کهنسال[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد معماری کشتی، دانشگاه خلیج‌فارس، salman.izedi@gmail.com
[۲] استادیار گروه مهندسی دریا، دانشگاه خلیج‌فارس، kohansal@pgu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱/۱۵

کلمات کلیدی:
ورود به آب
شناورهای تندرو
مقطع تونل‌دار
تئوری دو و نیم بعدی
دینامیک سیالات محاسباتی

چکیده

این مطالعه به مدل‌سازی عددی ورود به آب متقارن مقاطع تونل دار می‌پردازد. در این مطالعه، ابتدا مسئله ورود به آب مقطع گوه‌ای بدون تونل در چهار زاویه خیز کف متفاوت به‌صورت عددی مدل‌سازی شده است. نتایج به‌دست‌آمده مربوط به توزیع فشار بر روی این مقاطع و ماکزیمم فشار، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. در گام بعد، به شبیه‌سازی عددی مسئله ورود به آب مقطع تونل‌دار پرداخته شده است. بدین منظور، با اضافه کردن تونل به مقطع گوه‌ای ساده، مقطع تونل‌دار ایجاد شد. درنهایت اثرات تغییر زاویه خیز کف در مقاطع تونل‌دار و همچنین تغییر شعاع مقطع تونل مدل‌سازی شده است. در این مطالعه، از معادلات ناویر-استوکس لزج (N-S) برای شبیه‌سازی جریان آب در اطراف مدل و همچنین از روش حجم سیال (VOF) برای مدل‌سازی سطح آزاد استفاده شده است. نتایج تغییرات فشار و ماکزیمم فشار در سه ناحیه مختلف مقطع تونل‌دار به دست آمده است. این سه ناحیه شامل قسمت قبل از تونل، در ناحیه تونل و ناحیه بعد از تونل است. نتایج حاصل از این پژوهش، نشان‌دهنده وقوع تغییرات فشاری شدیدی در ناحیه تونل است. همچنین با افزایش شعاع تونل، مشاهده شد که مقدار فشار روی مقطع نیز افزوده می‌شود. از نتایج این مطالعه می‌توان در تحلیل هیدرودینامیکی شناورهای تونل‌دار استفاده کرد.

Numerical simulation of water entry of tunnel cross section with different deadrise angles and tunnel radiuses

Salman Izadi[1], Ahmadreza Kohansal[2*]

[1] M.Sc. Student in Naval Architecture, Persian Gulf University; salman.izedi@gmail.com
[2] Assistant Professor of Marine Engineering, Persian Gulf University; kohansal@pgu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 27 Jul 2022
Accepted: 04 Apr 2023

Keywords:
Water entry
High speed craft
Tunnel section
2D+T theory
Computational fluid dynamics

ABSTRACT

This study deals with the numerical modeling of symmetrical water entry of tunneled sections. In this study, firstly, the water entry problem of a wedge section without tunnel in four different deadrise angles was numerically modeled. The obtained results related to the pressure distribution on these sections and the maximum pressure have been compared with the experiment results. In the next step, the numerical simulation of the water entry problem with the tunnel section has been done. For this purpose, a tunneled section was created by adding a tunnel to a simple wedge section. Finally, the effects of changing the deadrise angle and also changing the radius of the tunnel section have been modeled. In this study, the viscous Navier-Stokes (N-S) equations are used to simulate water flow around the section and also a Volume of Fluid (VOF)-type method, is employed to capture the free surface. The results of pressure changes and maximum pressure in three different areas of the tunnel section have been obtained. These three areas include the area before the tunnel, in the tunnel area and the area after the tunnel. The results of this research indicate the occurrence of severe pressure changes in the tunnel area. Also, with the increase of the radius of the tunnel, it was observed that the amount of pressure on the section also increases. The results of this study can be used in the hydrodynamic analysis of tunneled vessels.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]

۱ - مقدمه

در سال‌های اخیر ایده‌های زیادی در جهت افزایش سرعت و بهبود دریامانی و پایداری شناورهای تندرو ارائه شده است. معمولاً بیشتر این ایده‌ها بر ا ساس تغییر در فرم بدنه شناور ه ستند. یکی از این تغییرات، ایجاد تونل بر روی بدنه اســـت. تحلیل هیدرودینامیکی شـــناورهای تندرو و بخصـــوص شـــناورهای تونل‌دار یک مســـئله غیرخطی پیچیده ا ست. ازآنجاکه انجام آزمایش‌ها برای این م سئله بســـیار هزینه‌بر و مشـــکل اســـت بنابراین یکی از روش‌هایی که موردتوجه قرار دارد استفاده از مدل‌سازی عددی است.

ازجمله روش‌هایی که برای مطالعه مسئله حرکت شناورهای تندرو ارائه‌شـده اسـت روش دو و نیم بعدی اسـت. در این روش مسـئله سه‌بعدی حرکت شناور با یک م سئله دوبعدی ورود به آب مقاطع عر ضی در یک صفحه عر ضی تقریب زده می شود. علی‌رغم انجام چنین تقریبی، می‌توان با اســتفاده از این روش اطلاعات دقیقی در مورد بارهای وارد بر بدنه شـــناور به دســـت آورد. بنابراین تحلیل دقیق مســـئله ورود به آب مقاطع عرضـــی می‌تواند به مدل‌ســـازی دقیق‌تر هیدرودینامیک شناورهای تندرو کمک کند.

به دلیل اهمیت مسئله ورود به آب در مطالعه و طراحی شناورهای تندرو، هواپیماهای آب‌نشـــین، فرود اضـــطراری هواپیماها در آب و همچنین ســـازه‌های فراســـاحل، محققان زیادی به این موضـــوع پرداخته‌اند. یکی از اولین پژوهش‌ها در این زمینه توسط فن کارمن [۱] انجام شد. او آغازگر راهی شد که امروزه اساس اغلب مدل‌های ریا ضی ا ست. وی با در نظر گرفتن برخورد مقطع گوه‌ای شکل به ســـطح آب، نیروهای وارد بر ســـطح گوه‌ای شـــکل و همچنین جرم افزوده آن را محاسبه نمود. بعد از این پژوهش، کاری مشابه توسط واگنر [۲] انجام گردید. او با در نظر گرفتن میزان بالاآمدگی آب، عرض خیس مؤثر و همچنین نیروها را با دقت بالاتری محاســـبه نمود. ســـپس او رابطه‌ای برای جریان پتانســـیل به دســـت آورد و با ا ستفاده از تابع پتان سیل، رابطه‌ای را برای توزیع ف شار روی دیواره گوه ارائه نمود.

با توجه به پیشـــرفت‌های رخ‌داده، به‌طور هم‌زمان روش‌های عددی نیز وارد فازی جدیدی شدند. ازجمله این مطالعات می‌توان از مدل عددیِ ژائو و فالتین سن [۳] نام برد. آن‌ها با ا ستفاده از روش المان مرزی، ورود جســـم به آب را مدل‌ســـازی کردند. ژائو و فالتینســـن مسئله ورود به آب گوه را با سرعت ثابت عمودی با استفاده از روش المان مرزی (BEM) در حوزه زمان را مطالعه کردند. آنها فشـــار برخورد در ورود به آب آرام گوه را م حاســـبه کرد ند. در م یان مطالعات عددی مختلف، روش پانل ثابت و روش المان مرزی مرتبه اول معمولاً در تجزیه و تحلیل ورود به آب استفاده شده است [6-۴].

وانگ [۷] برای پیش‌بینی ســـه مرحله اول ورود جســـم به آب یعنی کوبش، گذار و فروپا شی حفره از روش المان مرزی و مقایسه نتایج با آزمون های ســـقوط آزاد گوه به درون آب بهره برد. کوربکین ازجمله پژوه شگرانی ا ست که چندین مدل تحلیلی را برای م سئله ورود به آب در شرایط مختلف ارائه کرده است [۱۱-۸]. پس از آن، خاباخپاشـــوا و کوروبکین [۱۲] و شـــمس و پورفیری [۱۳] نظریه واگنر را برای جســـمی با تغییر شـــکل الاســـتیک به کار بردند. در ســـال‌های اخیر روش‌های المان محدود نیز برای پیش‌بینی بارهای کوبش به کار گرفته شـــد [۱۷-۱۴]. مســـئله ورود به آب کره و نیم‌کره نیز ازجمله م سائلی بود که به صورت و سیع تو سط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۱-۱۸].

نتایج روش دینامیک سیالات محا سباتی برای ورود به آب و خروج از آب یک گوه صلب تو سط پیرو [۲۲] ارائه شده ا ست. سمنوف [۲۳] م سئله ورود به آب گوه مایل را مطالعه کرده و رینهارد [۲۴] م سئله ورود به آب اج سام منحنی شکل را مورد مطالعه قرار داد. همچنین ورود به آب یک گوه نامتقارن با ترکیب روش المان مرزی با یک پاسخ تحلیلی معادله انتگرالی در طول مرز ســـیال حل شـــد [۲۶ ,۲۵]. با اضـــافه کردن زاویه کج شـــدن، برجســـته و همکاران [۲۷] به‌صـــورت آزمایشـــگاهی مســـئله ورود به آب گوه نامتقارن را مطالعه کردند.

وو [۲۸] مســـئله هیدرودینامیکی گوه‌های دوقلو را که به‌صـــورت عمودی با سرعت ثابت وارد آب می شوند بر ا ساس نظریه پتانسیل سرعت تحلیل کرد. هو و همکاران [۲۹] م سئله ورود آب گوه‌های دوقلوی سقوط آزاد را بر ا ساس یک کد داخلی، به نام مدل مبتنی بر پروفیل درون‌یابی محدود (CIP) مورد مطالعه قرار داده و اثرات ســـرعت ضـــربه اولیه و فاصـــله افقی بین دو گوه بر روی این نتایج بررسی کردند. یون و همکاران [۳۱ , ۳۰] به‌طور تجربی ویژگی‌های هیدرودینامیکی مرتبط با ورود آب عمودی و مورب دو کره پشـــت سر هم را با استفاده از عکاسی با سرعت بالا بررسی کردند. تداخل بین دو کره مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و شکل‌گیری و تکامل حفره دو کره ارائه شد.

پانسیرولی [۳۲] از روش‌های آزمایشگاهی، عکس‌برداری با سرعت بالا برای یافتن عمق نفوذ و سطح خیس شده گوه و روش پی‌ای‌وی برای پی بردن به فیزیک جریان در حالت ورود به آب استفاده کرد. فارســـی [۳۳] به کمک روش هیدرودینامیک ذرات هموار و با در نظر گرفتن اثرات گرانش، به شبیه‌سازی مسئله ورود گوه به آب در حالت متقارن و غیرمتقارن پرداخت. به‌منظور پیشـــبرد مطالعات و همچنین مدل‌ســـازی دینامیک شـــناور در شـــرایط واقعی، قدیمی و همکاران [۳۴] بر ا ساس تئوری دو و نیم بعدی، کوپل حرکات هیو و پیچ را در شـــناورهای پروازی مورد مطالعه قرار دادند. نیازمند

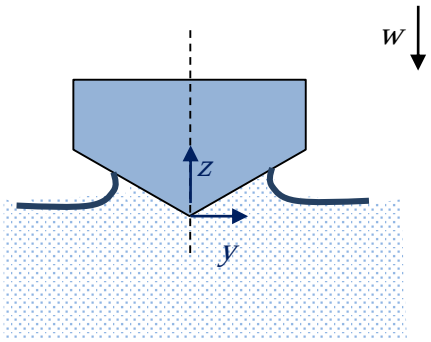
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]

بیلندی [۳۵] نیز یک مدل برای محاسبه ویژگی‌های حرکت شناور پروازی پله‌دار ارائه داد، که در مدل ارائه‌شـــده از تئوری دو و نیم بعدی استفاده شده است.

با توجه به بررسی پژوهش‌های اخیر مشخص شد که اغلب مطالعات ورود به آب، بر روی گوه ســاده انجام شــده اســت. شــناور پروازی تونل‌دار نوع خاصــی از شــناورهای ســه‌بدنه اســت که با طراحی منحصربه‌فرد و ایجاد ناپیوستگی طولی، تأثیر بسزایی در عملکرد پروانه، کاهش ارتعاش و مقاومت بدنه دارند. اســتفاده از تونل‌ها ســبب ایجاد هوادهی زیر بدنه شــناور می‌شــود. این ناحیه در سـرعت‌های بالا، نیروی لیفت موردنیاز شـناور را ایجاد می‌کند. در این پژوهش برخلاف مطالعات پیشــین از یک مقطع تونل‌دار برای بررســی پدیده ورود به آب اســتفاده شــده اســت. به این منظور از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی استارسی‌سی‌ام کمک گرفته و ابتدا یک گوه ساده شبیه‌سازی شده و سپس با اعتبارسنجی نتایج با داده‌های آزمایشـگاهی ژائو و فالتینسـن [۳]، شـبیه‌سـازی برای مقطع تونل‌دار در زوایای خیز کف و شعاع تونل متفاوت انجام شده است.

۲. تشریح مسئله

در ابتدا یک گوه متقارن به عرض B با زوایای خیز کف متفاوت در حال وارد شدن به آب مورد بررسی قرار می‌گیرد. سرعت وارد شدن گوه به آب، ثابت در نظر گرفته می‌شود. در شروع حل مسئله، گوه در تماس با سـطح آزاد قرار می‌گیرد. سـپس با شـروع حل، گوه با سـرعت ثابت وارد آب شـده و حل تا زمان t ادامه می‌یابد. به دلیل وجود تقارن در این مسئله، حل برای نصف گوه انجام می‌گیرد. یک سـیسـتم مختصـات YZ روی گوه قرار داده شـده اسـت. سـیال موردنظر در این مسـئله ویسـکوز فرض شـده و مسـئله دوفازی(آب‌وهوا) است. در شکل۱ مقطع گوه ساده و نحوه ورود به آب آرام به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل۱. شماتیک مقطع موردمطالعه و ورود به آب آن

۳. معادلات حاکم

با فرض سیال ویسکوز، معادله حاکم بر مسئله، معادلات ناویر-استوکس است. معادله پیوستگی با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$\nabla U = 0 \qquad (۱)$$

و همچنین بقای اندازه حرکت از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla.(\rho U U) = -\nabla P_d - g x \nabla \rho + \nabla.\mu \nabla U + (\nabla U).\nabla \mu \qquad (۲)$$

در معادله ۲، U بردار سرعت، t زمان، μ لزجت دینامیکی، ρ چگالی و g شتاب ثقل می‌باشند. P_d نیز فشار دینامیکی است که رابطه آن با فشار کل به‌صورت زیر است:

$$P = P_d - \rho g x \qquad (۳)$$

در مسئله حاضر، مدل سطح آزاد و فشار اهمیت بسیار زیادی دارد. از روش VOF برای مدل‌سازی سطوح آزاد استفاده می‌شود. هر دو فاز مایع (آب) و فاز گاز (هوا) بالای سطوح آزاد به‌وضوح با قرار دادن یک کسر حجمی مایع α1 و کسر حجمی گاز α2 به‌طور واضح مشخص می‌شوند. چگالی، ρ، و لزجت، μ، در هر نقطه با میانگین‌گیری فازهای حجمی به‌صورت زیر به دست می‌آید [۳۶]:

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_{water} + (1-\alpha)\rho_{air} \\ \mu = \alpha \mu_{water} + (1-\alpha)\mu_{air} \end{cases} \qquad (۴)$$

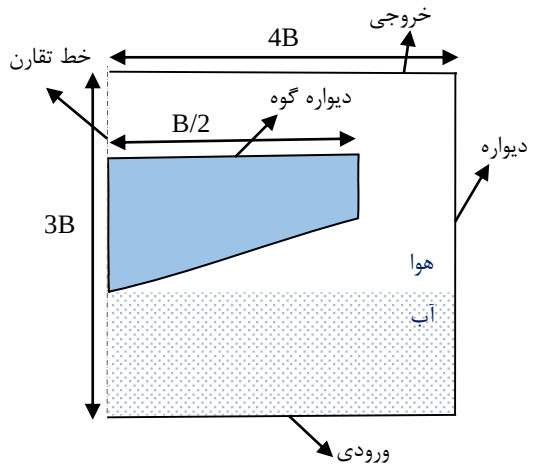
VOF یک تابع پله‌ای مانند α،را تعریف می‌کند. این تابع در هر نقطه اشغال‌شده توسط آب برابر با یک ، و در جایی که با هوا اشغال‌شده است مقدار صفر را خواهد داشت. بنابراین برای کسر حجمی α، سه شرط به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & water \\ 0 & air \\ 0 < \alpha < 1 & water \,\&\, air \end{cases} \qquad (۵)$$

۴. مدل‌سازی مقطع متقارن

برای مدل‌سازی عددی این مسئله، از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی استارسی‌سی‌ام استفاده شده است. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات استفاده می‌گردد. برای شبیه‌سازی مقطع گوه فرض می‌شود که جریان آب از پایین به سمت بالا حرکت می‌کند. انتخاب دامنه محاسباتی ازجمله پارامترهایی است که باید مورد توجه قرار گیرد. ابعاد دامنه محاسباتی باید به نحوی انتخاب گردد که اثر مرزها روی نتایج به حداقل مقدار خود برسد. در شکل۲ ابعاد میدان محاسباتی و شرایط مرزی مورد استفاده در مدل‌سازی عددی نشان داده شده است

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]



شکل۲. ابعاد میدان محاسباتی و شرایط مرزی

برای مدل‌سازی این مسئله، با توجه به ابعاد مقطع و سرعت در نظر گرفته شده، رژیم جریان در محدوده آرام قرار می‌گیرد، بنابراین جریان لایه‌ای در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای حل معادلات در نرم‌افزار، مدل چند فازی آب و هوا انتخاب می‌گردد. سیال موردنظر، تراکم ناپذیر فرض شده است و چگالی گاز ثابت است. تولید شبکه محاسباتی به‌صورت سازمان‌یافته انجام گردیده و حجم-های محدود به شکل مربع تشکیل شده است. همچنین شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره‌ی مقطع و در نزدیکی سطح آزاد ریز شده‌اند.

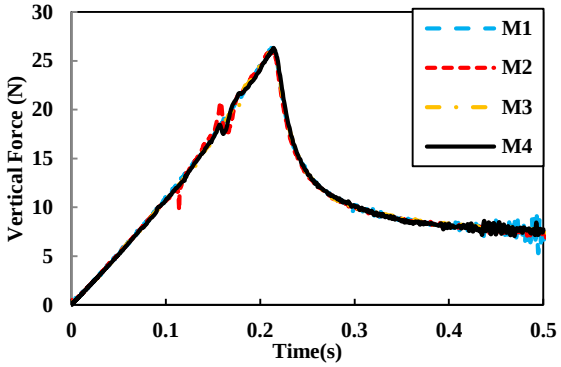
۴-۱. استقلال از شبکه مقطع متقارن

برای بهینه‌سازی شبکه، گوه با زاویه خیز کف ۲۵ درجه مدل گردیده و نیروی عمودی وارد بر گوه در زمان برای چهار حالت متفاوت شبکه‌بندی بزرگ، متوسط، ریز و بسیار ریز محاسبه شده است.

جدول۱. تعداد سلول‌های شبکه حل مقطع متقارن.

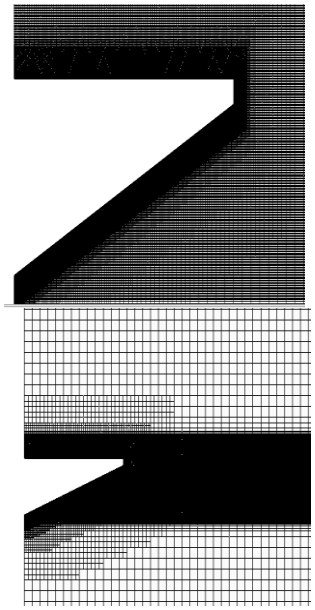
Mesh	M1	M2	M3	M4
Number of cells	57414	160761	505387	710772

جدول۱ تعداد سلول‌های شبکه را نشان دهد. بر اساس این شبکه‌بندی‌ها نتایج زیر برای چهار حالت شبکه‌بندی به‌دست‌آمده است.



شکل۳. نمودار بررسی استقلال از شبکه گوه متقارن.

با توجه به شکل ۳، اختلاف نتایج در شبکه‌بندی M3 و M4 بسیار کم است. لذا از شبکه‌بندی M3 در ادامه استفاده می‌گردد. در شکل۴ شبکه انتخاب‌شده برای حل عددی مشاهده می‌شود.

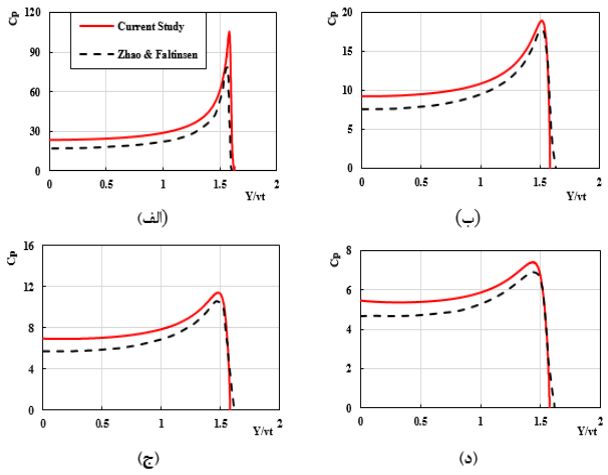


شکل۴. شبکه انتخاب‌شده برای مطالعه گوه متقارن.

۴-۲. اعتبار سنجی نتایج مقطع متقارن

در مسئله مطرح‌شده، جریان سیال پیرامون گوه در حال ورود به آب با صرف‌نظر از اثر گرانش حل شده است. برای اعتبار سنجی حل عددی مورد استفاده، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تجربی ژائو و فالتینسن [۳] در چهار زاویه خیز کف ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه مقایسه گردیده است. همان‌گونه که در شکل۵ مشخص است نتایج حاصل از روش عددی با روش آزمایشگاهی تطابق دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]



شکل۵. نمودار توزیع فشار روی گوه متقارن در زوایای خیز کف: (الف) ۱۰ درجه، (ب) ۲۰ درجه ، (ج) ۲۵ درجه و (د) ۳۰ درجه. .

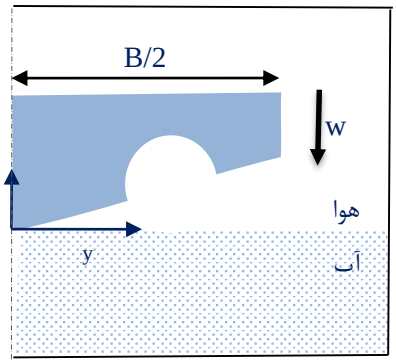
در جدول۲ مقادیر بیشینه فشار که با استفاده از روش عددی حاضر به‌دست‌آمده است، با بیشینه فشار نتایج آزمایشگاهی ژائو و فالتینسن[۳] مورد مقایسه قرار گرفته شده و میزان خطای آن نیز محاسبه گردیده است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که به‌جز نتایج گوه با زاویه خیز کف ۱۰ درجه، نتایج عددیِ حاصل، تطابق خوبی با روش آزمایشگاهی دارد.

جدول۲. مقایسه مقادیر بیشینه فشار روش عددی با داده‌های آزمایشگاهی

β(deg)	$C_{p_{max}}$ Current study	$C_{p_{max}}$ Zhao&Faltinsen	Error %
۱۰	۱۰۵/۳۳۹	۷۸/۶۶۴	۳۳/۹
۲۰	۱۸/۹۶۱	۱۷/۷۳۲	۶/۹۳
۲۵	۱۱/۴۳۶	۱۰/۶۲۶	۷/۶۲
۳۰	۷/۴۳۵	۶/۸۹۶	۷/۸۱

۵. مدل‌سازی عددی مقطع تونل‌دار

در ادامه مطالعات عددی، یک مقطع تونل‌دار به‌صورت عددی مدل-سازی شده است. شرایط مسئله همانند مسئله گوه متقارن در نظر گرفته شده است. جریان آب لایه‌ای و از پایین به سمت بالا حرکت می‌کند. سیال موردنظر تراکم‌ناپذیر است و سلول‌ها در شبکه‌بندی روی دیواره‌ها و همچنین سطح آزاد کوچک‌تر انتخاب شده است. در این مسئله نیز به دلیل وجود تقارن، حل برای نصف مقطع انجام می‌گیرد. شکل۶ نمای شماتیک ورود به آب مقطع موردبحث را نشان می‌دهد. در این شکل، B، عرض مقطع برابر یک متر است.



شکل۶. نمای شماتیک ورود مقطع تونل‌دار به آب .

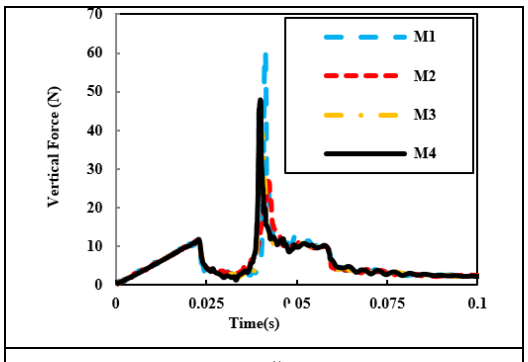
۵-۱. استقلال از شبکه مقطع تونل‌دار

برای بهینه‌سازی این مسئله، نیروی عمودی یک مقطع تونل‌دار با زاویه خیز کف ۱۰ درجه در سه ناحیه قبل از تونل، در محل تونل و بعد از تونل ارائه شده است. تعداد سلول‌های روی مقطع در ۴ حالت مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول۳ تعداد سلول‌ها برای حالات متفاوت نمایش داده شده است.

جدول۳ تعداد سلول‌های شبکه حل مقطع تونل‌دار.

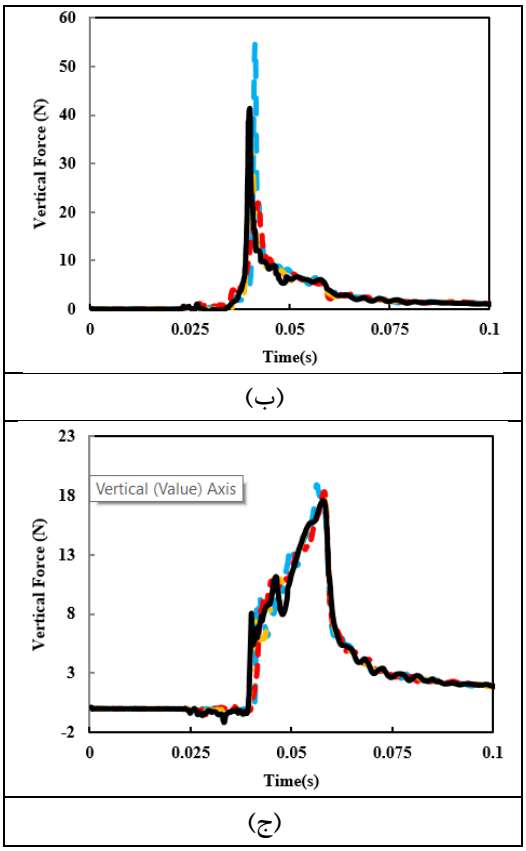
Mesh	M1	M2	M3	M4
Number of cells	47163	126166	477604	681901

با توجه به مشخص شدن ۴ حالت برای تعداد سلول‌های شبکه‌بندی، شکل۷ نشان دهنده تغییرات نیروی عمودی وارد بر مقطع نسبت به زمان در سه ناحیه مختلف مقطع تونل‌دار برای حالات ذکر شده است. در شکل۸ به‌صورت شماتیک مؤلفه‌های نیروی وارد بر مقطع ازجمله نیروی عمودی در سه ناحیه مختلف مقطع تونل‌دار نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، از شبکه‌بندی M3 برای مدل‌سازی استفاده شده است. با استفاده از یک کامپیوتر با پردازنده core i7 و رم ۶ گیگابایت زمان حل تا همگرایی کامل پنج ساعت طول می‌کشد.

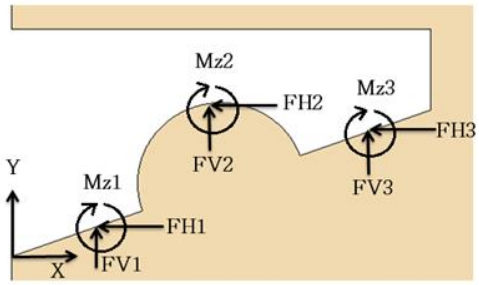


(الف)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]



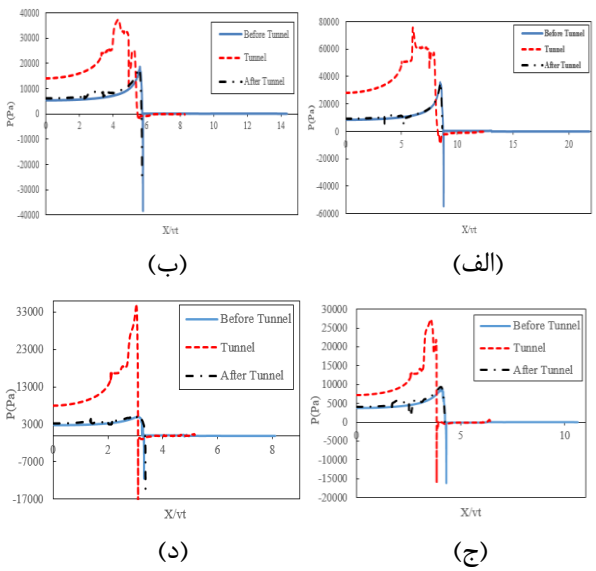
شکل۷. تغییرات نیروی عمودی وارد بر مقطع نسبت به زمان در سه ناحیه مختلف مقطع تونل‌دار: (الف) قبل از تونل، (ب) در محل تونل، (ج) بعد از تونل.



شکل۸. تغییرات نیروی عمودی وارد بر مقطع نسبت به زمان در سه ناحیه مختلف مقطع تونل‌دار

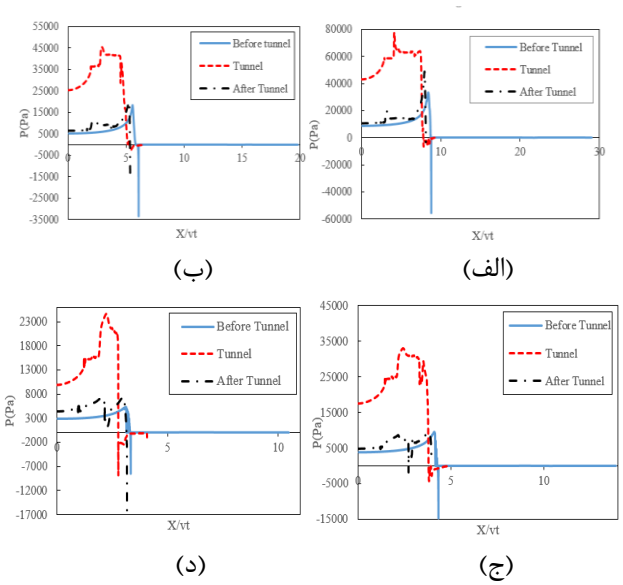
۵-۲. نتایج توزیع فشار مقطع تونل‌دار

مهم‌ترین بخش در مدل‌سازی عددی ورود مقطع تونل‌دار به آب، محاسبه توزیع فشار روی مقطع است. در اینجا به بررسی توزیع فشار مقطع تونل‌دار پرداخته می‌شود. عرض مقطع موردنظر برابر یک است. نتایج در دو شعاع ۰/۱ و ۰/۰۵ به تفکیک برای ناحیه قبل از تونل، در محل تونل و بعد از تونل برای زوایای خیز کف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه نمایش داده می‌شود.



شکل۹. نمودار توزیع فشار مقطع تونل‌دار به شعاع ۰/۰۵ و زوایای خیز کف: (الف) ۱۰ درجه، (ب) ۱۵ درجه ، (ج) ۲۰ درجه و (د) ۲۵درجه.

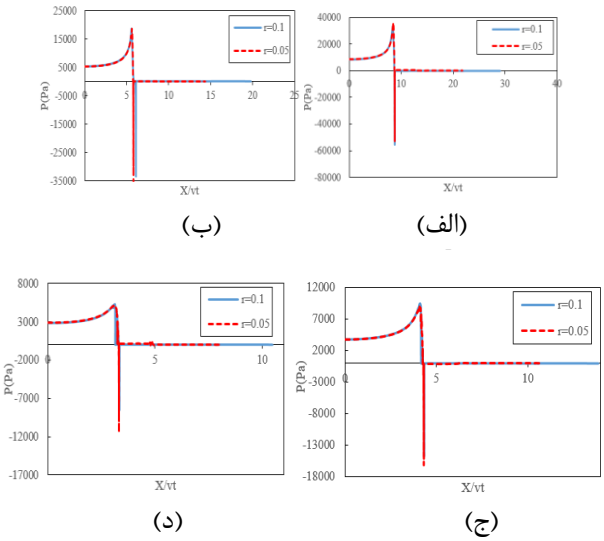
نتایج به‌دست‌آمده در روش حاضر نشان می‌دهد که رفتار نمودارها در شکل۹ برای ناحیه قبل از تونل و بعد از تونل در دو شعاع ۰/۰۵ و ۰/۱ بسیار به هم شبیه است. فشار اتفاق افتاده در این نواحی به نتایج به‌دست‌آمده برای گوه متقارن شباهت بسیاری دارد. در قسمت تونل، به دلیل وجود ناپیوستگی موجود، یک ناحیه پرفشار به وجود می‌آید که نتایج حاصل این اتفاق را به‌خوبی نشان می‌دهد. با افزایش زاویه خیز کف، بیشینه فشار کاهش پیدا می‌کند ولی بین زاویه ۲۰ و ۲۵ درجه این اصل رعایت نشده و مقدار فشار در زاویه ۲۵ درجه افزایش داشته است.



شکل۱۰. نمودار توزیع فشار مقطع تونل‌دار به شعاع ۰/۱ و زوایای خیز کف: (الف) ۱۰ درجه، (ب) ۱۵ درجه ، (ج) ۲۰ درجه و (د) ۲۵درجه.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]

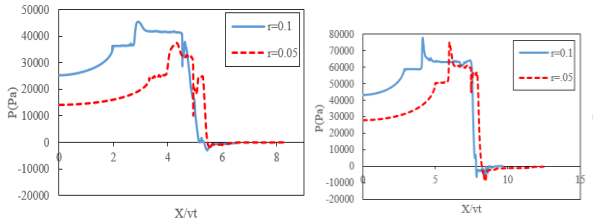
شکل ۱۰ نتایج فشار محاسبه‌شده برای مقطع تونل‌دار در زوایای خیز کف متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقادیر ماکزیمم فشار در ناحیه تونل اتفاق می‌افتد و فشار در این بخش تا حدود دو برابر فشار ناحیه قبل از تونل می‌رسد. با افزایش زاویه خیز کف مقدار فشارها کاهش می‌یابد.



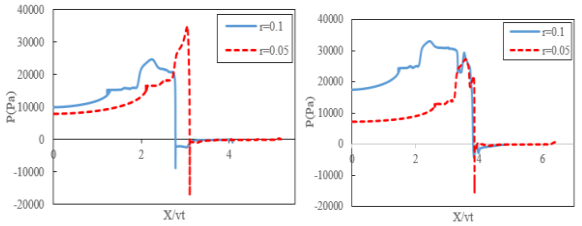
(الف) (ب) (ج) (د)

شکل۱۱. نمودار توزیع فشار در شعاع ۰/۱ و ۰/۰۵ در قسمت قبل از تونل برای زوایای خیز کف: (الف) ۱۰ درجه، (ب) ۱۵ درجه ، (ج) ۲۰ درجه و (د) ۲۵درجه.

شکل۱۱، مقایسه نتایج توزیع فشار مربوط به ناحیه قبل از تونل را در دو شعاع ۰/۰۵ و ۰/۱ نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده گویای تغییرات کم مربوط به افزایش شعاع است به‌گونه‌ای که نمودار مربوطه روی‌هم قرار می‌گیرند. با افزایش زاویه خیز کف مقدار بیشینه در این نمودارها کاهش می‌یابد به این صورت که مقدار بیشینه مثبت در شعاع ۰/۱ و زاویه خیز کف ۱۰ درجه برابر ۳۳۱۶۸ پاسکال است و این مقدار در زاویه خیز کف ۲۵ درجه به ۵۲۷۰ پاسکال می‌رسد.



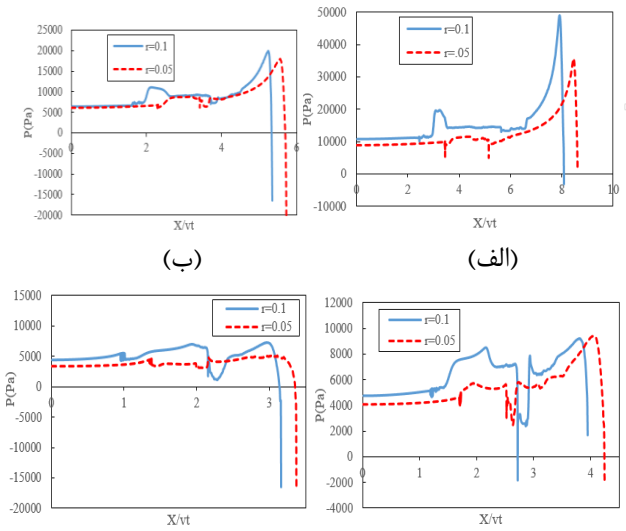
(الف) (ب)



(ج) (د)

شکل۱۲. نمودار مقایسه توزیع فشار در شعاع ۰/۱ و ۰/۰۵ در قسمت تونل برای زوایای خیز کف: (الف) ۱۰ درجه، (ب) ۱۵ درجه ، (ج) ۲۰ درجه و (د) ۲۵درجه.

همان‌گونه که در شکل۱۲ مشخص است، بیشینه مقدار فشار در ناحیه تونل اتفاق می‌افتد. در شعاع ۰/۱ به دلیل بزرگ‌تر بودن شعاع مقطع و تغییرات شدید نیرویی، فشار بیشتری در این ناحیه وارد می‌گردد، ولی این مسئله در زاویه خیز کف ۲۵ درجه در شعاع ۰/۰۵ صدق نمی‌کند و مقدار بیشینه در این نمودار از شعاع ۰/۱ بیشتر است. در زوایای خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه به دلیل خیس شدن بیشتر تونل، شکل نمودار اندکی متفاوت‌تر از قبل می‌گردد.

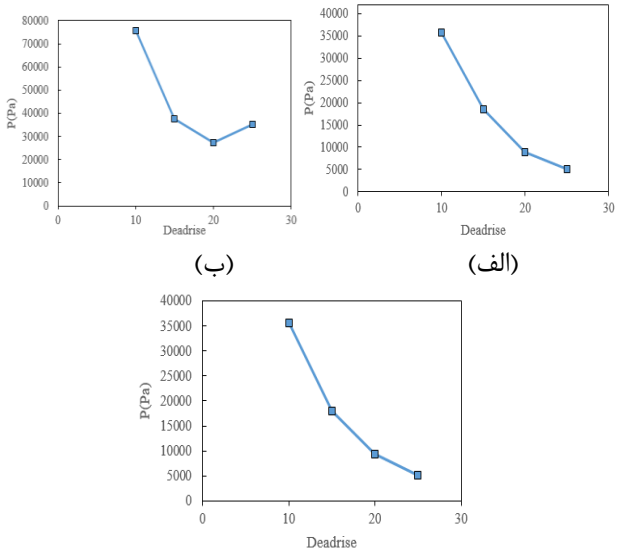


(الف) (ب) (ج) (د)

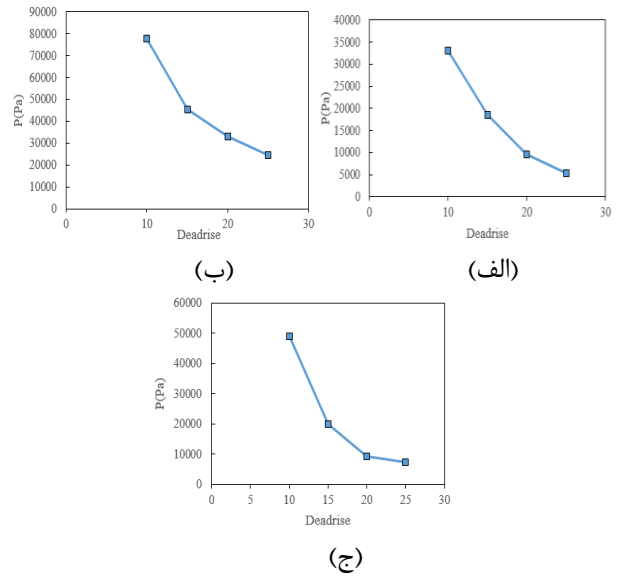
شکل۱۳. نمودار مقایسه توزیع فشار در شعاع ۰/۱ و ۰/۰۵ در قسمت بعد از تونل برای زوایای خیز کف: (الف) ۱۰ درجه، (ب) ۱۵ درجه ، (ج) ۲۰ درجه و (د) ۲۵درجه.

شکل۱۳ مقایسه بین فشار واردشده بعد از خیس شدن تونل را برای دو شعاع ۰/۰۵ و ۰/۱ نشان می‌دهد. روند نمودارها در اینجا اندکی تفاوت دارد. مقدار بیشینه فشار در شعاع ۰/۱ بیشتر است ولی این مسئله برای زاویه خیز کف ۲۰ درجه متفاوت است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]



شکل۱۴ نمودار مقایسه ماکزیمم فشار در شعاع ۰/۰۵ برای زوایای خیز کف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه در ناحیه: (الف) قبل از تونل، (ب) تونل ، (ج) بعد از تونل.



شکل۱۵ نمودار مقایسه ماکزیمم فشار در شعاع ۰/۱ برای زوایای خیز کف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه در ناحیه: (الف) قبل از تونل، (ب) تونل ، (ج) بعد از تونل.

شکل ۱۴ و ۱۵ مقدار بیشینه فشار را در دو شعاع ۰/۰۵ و ۰/۱ نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشخص است مقادیر حاضر با افزایش زاویه خیز کف کاهش یافته‌اند. این روند در هر دو نمودار به‌وضوح مشخص است. نکته قابل‌توجه در نمودارهای فوق تبعیت نکردن زاویه ۲۵ درجه از این قاعده است. به نظر می‌رسد که خیسی بیشتر تونل در این زاویه خیز کف، سبب ایجاد فشار بیشتر نیز می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مدل‌سازی عددی ورود مقاطع تونل‌دار به آب پرداخته شد. تحلیل‌ها ابتدا برای گوه ساده بدون اثر نیروی گرانش انجام شد و سپس مقطع تونل‌دار در حالت متقارن در دو شعاع متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این روش برای مقطع ساده با نتایج آزمایشگاهی ژائو و فالتینسن[۳] مقایسه گردید که نشان از دقت بالای مدل‌سازی انجام شده داشت. در ادامه با در نظرگیری شرایط مورداستفاده در مقطع ساده، تحلیل برای مقطع تونل‌دار انجام شد. با مشاهده نتایج مشخص شد با وارد شدن مقطع به آب، تغییرات ناگهانی فشار در ناحیه تونل اتفاق می‌افتد به‌نحوی‌که فشار واردشده در ناحیه تونل در زاویه خیز کف ۱۰ درجه تقریباً دو برابر بیشترین فشار ناحیه قبل و بعد از تونل است. همچنین مشاهده شد که با افزایش زاویه خیز کف این اختلاف نیز بیشتر می‌شود. با افزایش شعاع از ۰/۰۵ به ۰/۱ سانتیمتر مقادیر فشار نیز افزایش می‌یابد ولی در زاویه خیز کف ۲۵ درجه ناحیه تونل و زاویه خیز کف ۲۰ درجه ناحیه بعد از تونل این روند نقض شده است. به نظر می‌رسد که این تغییر در رفتار، ناشی از تغییر در نحوه جدایش جریان در این ناحیه و تغییر در میزان سطح خیس شده باشد.

۶ – مراجع

[1] Karman, T.V., (1929), The impact of seaplane floats during landing, in *NACA TN321*.

[2] Wagner, H., (1932), Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces, *Z. Angew, Math. Mech*, vol. 12, no. 4, pp. 193-215.

[3] Zhao, R. and Faltinsen, O., (1993), Water entry of two-dimensional bodies, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 246, pp. 593-612.

[4] Wu, G.X., Sun, H., He, Y.S., (2004), Numerical simulation and experimental study of water entry of a wedge in free fall motion, J. Fluids Struct, 19, 277-289.

[5] Bao, C.M., Wu, G.X., Xu, G.D., (2016), Simulation of water entry of a two-dimension finite wedge with flow detachment, J. Fluids Struct. 65, 44-59.

[6] Sun, S.Y., Sun, S.L., Wu, G.X., (2015), Oblique water entry of a wedge into waves with gravity effect, J. Fluids Struct, 52, 49-64.

[7] Wang, J., Lugni, C., and Faltinsen, O.M., (2015), Experimental and numerical investigation of a freefall wedge vertically entering the water surface, *Applied Ocean Research*, vol. 51, p. 181–203.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]

[8] Korobkin A. A. and Pukhnachov V. V., Initial stage of water impact. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 20:159–185, 1988.

[9] Korobkin A. A., (1996), Water impact problems in ship hydrodynamics. In M. Ohkusu, editor, *Advances in Marine Hydrodynamics*, volume 5, Computational Mechanics Publications.

[10] Korobkin A. A., (2001), Water entry of a perforated wedge, In J. Hiroshima, editor, *Proceedings of the 16th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies*.

[11] Korobkin A. A., (2004), Analytical models of water impact. *Eur. J. Appl. Math.*, 15:821–838.

[12] Khabakhpasheva, T.I., Korobkin, A.A., (2013), Elastic wedge impact onto a liquid surface: Wagner's solution and approximate models, J. Fluids Struct, 36, 32-49.

[13] Shams, A., Porfiri, M., (2015), Treatment of hydroelastic impact of flexible wedges, J. Fluids Struct, 57, 229-246.

[14] Bereznitski A., (2001), Slamming: the role of hydroelasticity, *International Shipbuilding Progress*, 48(4):333–351.

[15] Stenius I., Rosen A., and Kuttenkeuler J., (2006), Explicit FE-modelling of fluid–structure interaction in hull–water impacts, *International Shipbuilding Progress*, 53(2):103–121.

[16] Wang S., Luo H. B., and Soares C. G., (2012), Explicit FE simulation of slamming load on rigid wedge with various deadrise angles during water entry, In *Maritime Engineering and Technology*, pages 399–406, Taylor&Francis, UK.

[17] Calderer A., Kans S., and Sotiropoulos F., (2014), Level set immersed boundary method for coupled simulation or air/water interaction with complex floating structures, *J. Comp. Phys.*, 277:201–227.

[18] Tan, B. C. W., Vlaskamp, J. H. A., Denissenko, P. & Thomas, P. J., (2016), Cavity formation in the wake of falling spheres submerging into a stratified two-layer system of immiscible liquids, Journal of Fluid Mechanics 790.

[19] Zhao, S., Wei, C. & Cong, W., (2016), Numerical investigation of water entry of half hydrophilic and half hydrophobic spheres, Mathematical Problems in Engineering, 1, 15.

[20] Tan, B. C. W. & Thomas, P. J., (2018), Influence of an upper layer liquid on the phenomena and cavity formation associated with the entry of solid spheres into a stratified two-layer system of immiscible liquids, Physics of Fluids 30.

[21] Li, D., Zhang, J., Zhang, M., Huang, B., Ma, X. & Wang, G., (2019), Experimental study on water entry of spheres with different surface wettability, Ocean Engineering 187.

[22] Piro, D. J., Maki, K. J., (2013), Hydroelastic analysis of bodies that enter and exit water, Journal of Fluids and Structures 37, 134-150.

[23] Semenov, Y. A. , Yoon, B. S., (2009), Onset of flow separation for the oblique water impact of a wedge, Physics of Fluids 21, 112103.

[24] Reinhard, M., Korobkin, A. A., Cooker, M. J., (2013), Water entry of a flat elastic plate at high horizontal speed, Journal of Fluid Mechanics 724, 123-153.

[25] Battistin, D., Iafrati, A., (2003), Hydrodynamic loads during water entry of two-dimensional and axisymmetric bodies, Journal of Fluids and Structures, 17, 643-664.

[26] Xu, G.D., Duan, W.Y., Wu, G.X., (2008), Numerical simulation of oblique water entry of an asymmetrical wedge, Ocean Eng. 35 (16), 1597-1603.

[27] Barjasteh, M., Zeraatgar, H., Javaherian, M.J., (2016), An experimental study on water entry of asymmetric wedges, Appl. Ocean Res. 58, 292-304.

[28] Wu, X., (2006), Numerical simulation of water entry of twin wedges, J. Fluid Struct, 22(1), 99-108.

[29] Hu, X., Zhao, X., Cheng, D., Zhang, D., (2017), Numerical simulation of water entry of twin wedges using a CIP-based method, The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, California, USA, San Francisco.

[30] Yun, X. Lyu, Wei, Z., (2020a), Experimental study on oblique water entry of two tandem spheres with collision effect, J. Vis. 23 (1), 49-59.

[31] Yun, X. Lyu, Wei, Z., (2020b), Experimental study on vertical water entry of two tandem spheres, Ocean Eng., 201, 107-143.

[32] Panciroli, R., Shams, A. and Porfiri, M., (2015), Experiments on the water entry of curved wedges, High speed imaging and particle image velocimetry, *Ocean Engineering*, vol. 94, p. 213–222.

[33] Farsi, M. and Ghadimi, P., (2015), Simulation of 2D symmetry and asymmetry wedge water entry by smoothed particle hydrodynamics method, *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 37, p. 821–835.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]

[34] Ghadimi, P., Tavakoli, S. and Dashtimanesh, A., (2016), Coupled heave and pitch motions of planing hulls at non-zero heel angle, *Ocean Research*, vol. 59, pp. 286-303.

[35] Niazmanbilandi, R., (2018), Development of a Mathematical Model for Motion Prediction of Stepped Planing Hulls in Calm Water and Wave, *Persian gulf university*, Bushehr.

[36] Chen, C., W., Lu, Y., F., (2019), Computational Fluid Dynamics Study of Water Entry Impact Forces of an Airborne-Launched, Axisymmetric, Disk-Type Autonomous Underwater Hovering Vehicle, 11, *Symmetry*.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.3.7]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.28]