

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

سلیمان ایزدی<sup>۱</sup>، احمدرضا کهنسال<sup>۲\*</sup><sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد معماری کشتی، دانشگاه خلیج فارس، [salman.izedi@gmail.com](mailto:salman.izedi@gmail.com)<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، [kohansal@pgu.ac.ir](mailto:kohansal@pgu.ac.ir)

| اطلاعات مقاله   | چکیده  |
|---|--|
| ناریخچه مقاله:<br>تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵<br>تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱/۱۵                                | 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 به صورت عددی مدل‌سازی شده است. نتایج به دست آمده 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 تونل دار پرداخته شده است. بدین منظور، با اضافه کردن تونل به مقطع گوه‌ای ساده، مقطع تونل دار ایجاد شد. در نهایت اثرات تغییر زاویه خیز کف در مقاطع تونل دار 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 تونل دار 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 تونل دار استفاده کرد. |
| کلمات کلیدی:<br>ورود به آب<br>شناورهای تندرو<br>مقطع تونل دار<br>تئوری دو و نیم بعدی<br>دینامیک سیالات محاسباتی |  |

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

Salman Izadi<sup>1</sup>, Ahmadreza Kohansal<sup>2\*</sup><sup>1</sup> M.Sc. Student in Naval Architecture, Persian Gulf University; [salman.izedi@gmail.com](mailto:salman.izedi@gmail.com)<sup>2</sup> Assistant Professor of Marine Engineering, Persian Gulf University; [kohansal@pgu.ac.ir](mailto: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.

## 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 اساس تغییر در فرم بدنه شناور هستند. یکی از این تغییرات، ایجاد تونل بر روی بدنه است. تحلیل هیدرودینامیکی شناورهای تندرو و بخصوص شناورهای تونل‌دار یک مسئله غیرخطی پیچیده است. از آنجاکه انجام آزمایش‌ها برای این مسئله بسیار هزینه‌بر و مشکل است بنابراین یکی از روش‌هایی که مورد توجه قرار دارد استفاده از مدل‌سازی عددی است.

از جمله روش‌هایی که برای مطالعه مسئله حرکت شناورهای تندرو ارائه شده است روش دو و نیم بعدی است. در این روش مسئله سه‌بعدی حرکت شناور با یک مسئله دو بعدی ورود به آب مقاطع عرضی در یک صفحه عرضی تقریب زده می‌شود. علی‌رغم انجام چنین تقریبی، می‌توان با استفاده از این روش اطلاعات دقیقی در مورد بارهای وارد بر بدنه شناور به دست آورد. بنابراین تحلیل دقیق مسئله ورود به آب مقاطع عرضی می‌تواند به مدل‌سازی دقیق‌تر هیدرودینامیک شناورهای تندرو کمک کند.

به دلیل اهمیت مسئله ورود به آب در مطالعه و طراحی شناورهای تندرو، هواپیماهای آب‌نشین، فرود اضطراری هواپیماها در آب و همچنین سازه‌های فراساحل، محققان زیادی به این موضوع پرداخته‌اند. یکی از اولین پژوهش‌ها در این زمینه توسط فن کارمن [۱] انجام شد. او آغازگر راهی شد که امروزه اساس اغلب مدل‌های ریاضی است. وی با در نظر گرفتن برخورد مقطع گوه‌ای شکل به سطح آب، نیروهای وارد بر سطح گوه‌ای شکل 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 محاسبه نمود. سپس او رابطه‌ای برای جریان پتانسیل به دست آورد و با استفاده از تابع پتانسیل، رابطه‌ای را برای توزیع فشار روی دیواره گوه ارائه نمود.

با توجه به پیشرفت‌های رخ داده، به‌طور هم‌زمان روش‌های عددی نیز وارد فازی جدیدی شدند. از جمله این مطالعات می‌توان از مدل عددی ژائو و فالتینسن [۳] نام برد. آن‌ها با استفاده از روش المان مرزی، ورود جسم به آب را مدل‌سازی کردند. ژائو و فالتینسن مسئله ورود به آب گوه را با سرعت ثابت عمودی با استفاده از روش المان مرزی (BEM) در حوزه زمان را مطالعه کردند. آنها فشار برخورد در ورود به آب آرام گوه را محاسبه کردند. در میان مطالعات عددی مختلف، روش پانل ثابت و روش المان مرزی مرتبه اول معمولاً در تجزیه و تحلیل ورود به آب استفاده شده است [۶-۴].

وانگ [۷] برای پیش‌بینی سه مرحله اول ورود جسم به آب یعنی کوبش، گذار و فروپاشی حفره از روش المان مرزی و مقایسه نتایج با آزمون‌های سقوط آزاد گوه به درون آب بهره برد. کوربکین از جمله پژوهشگرانی است که چندین مدل تحلیلی را برای مسئله ورود به آب در شرایط مختلف ارائه کرده است [۸-۱۱]. پس از آن، خاباخپاشوا و کوروبکین [۱۲] و شمس و پورفیری [۱۳] نظریه واگنر را برای جسمی با تغییر شکل الاستیک به کار بردند. در سال‌های اخیر روش‌های المان محدود نیز برای پیش‌بینی بارهای کوبش به کار گرفته شد [۱۷-۱۴]. مسئله ورود به آب کره و نیم‌کره نیز از جمله مسائلی بود که به صورت وسیع توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۱-۱۸].

نتایج روش دینامیک سیالات محاسباتی برای ورود به آب و خروج از آب یک گوه صلب توسط پیرو [۲۲] ارائه شده است. سمونوف [۲۳] مسئله ورود به آب گوه مایل را مطالعه کرده و رینهارد [۲۴] مسئله ورود به آب اجسام 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 سیال حل شد [۲۵، ۲۶]. با اضافه کردن زاویه کج شدن، برجسته و همکاران [۲۷] به صورت آزمایشگاهی مسئله ورود به آب گوه نامتقارن را مطالعه کردند.

وو [۲۸] مسئله هیدرودینامیکی گوه‌های دوقلو را که به صورت عمودی با سرعت ثابت وارد آب می‌شوند بر اساس نظریه پتانسیل سرعت تحلیل کرد. هو و همکاران [۲۹] مسئله ورود آب گوه‌های دوقلوی سقوط آزاد را بر اساس یک کد داخلی، به نام مدل مبتنی بر پروفیل درونی محدود (CIP) مورد مطالعه قرار داده و اثرات سرعت ضربه اولیه و فاصله 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 پشت 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. فارسی [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 پیشبرد مطالعات و همچنین مدل‌سازی دینامیک شناور در شرایط واقعی، قدیمی و همکاران [۳۴] بر اساس تئوری دو و نیم بعدی، کوپل حرکات هیو و پیچ را در شناورهای پروازی مورد مطالعه قرار دادند. نیازمند

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

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

و همچنین بقای اندازه حرکت از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P_d - g x \nabla \rho + \nabla \cdot \mu \nabla U + (\nabla U) \cdot \nabla \mu \quad (2)$$

در معادله ۲،  $U$  بردار سرعت،  $t$  زمان،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $\rho$  چگالی و  $g$  شتاب ثقل می‌باشند.  $P_d$  نیز فشار دینامیکی است که رابطه آن با فشار کل به صورت زیر است:

$$P = P_d - \rho g x \quad (3)$$

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 به وضوح با قرار دادن یک کسر حجمی مایع  $\alpha_1$  و کسر حجمی گاز  $\alpha_2$  به طور واضح مشخص می‌شوند. چگالی،  $\rho$ ، و لزجت،  $\mu$ ، در هر نقطه با میانگین‌گیری فازهای حجمی به صورت زیر به دست می‌آید [۳۶]:

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_{water} + (1 - \alpha) \rho_{air} \\ \mu = \alpha \mu_{water} + (1 - \alpha) \mu_{air} \end{cases} \quad (4)$$

VOF یک تابع پله‌ای مانند  $\alpha$  را تعریف می‌کند. این تابع در هر نقطه اشغال شده توسط آب برابر با یک، و در جایی که با هوا اشغال شده است مقدار صفر را خواهد داشت. بنابراین برای کسر حجمی  $\alpha$ ، سه شرط به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{water} \\ 0 & \text{air} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{water \& air} \end{cases} \quad (5)$$

#### ۴. مدل‌سازی مقطع متقارن

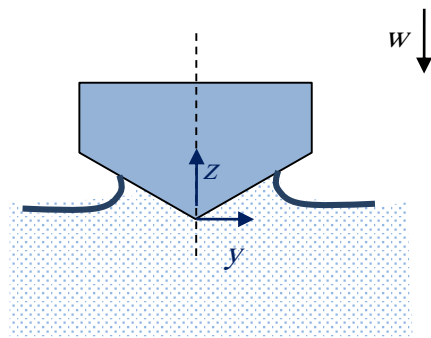
برای مدل‌سازی عددی این مسئله، از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی استارسی‌ام استفاده شده است. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات استفاده می‌گردد. برای شبیه‌سازی مقطع گوه فرض می‌شود که جریان آب از پایین به سمت بالا حرکت می‌کند. انتخاب دامنه محاسباتی از جمله پارامترهایی است که باید مورد توجه قرار گیرد. ابعاد دامنه محاسباتی باید به نحوی انتخاب گردد که اثر مرزها روی نتایج به حداقل مقدار خود برسد. در شکل ۲ ابعاد میدان محاسباتی و شرایط مرزی مورد استفاده در مدل‌سازی عددی نشان داده شده است

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

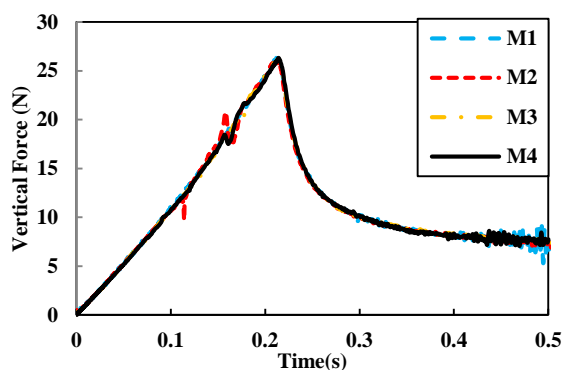
با توجه به بررسی پژوهش‌های اخیر مشخص شد که اغلب مطالعات ورود به آب، بر روی گوه ساده انجام شده است. شناور پروازی تونل‌دار نوع خاصی از شناورهای سه‌بدنه است که با طراحی منحصر به فرد و ایجاد ناپیوستگی طولی، تأثیر بسزایی در عملکرد پروانه، کاهش ارتعاش و مقاومت بدنه دارند. استفاده از تونل‌ها سبب ایجاد هوادهی زیر بدنه شناور می‌شود. این ناحیه در سرعت‌های بالا، نیروی لیفت مورد نیاز شناور را ایجاد می‌کند. در این پژوهش برخلاف مطالعات پیشین از یک مقطع تونل‌دار برای بررسی پدیده ورود به آب استفاده شده است. به این منظور از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی استارسی‌ام کمک گرفته و ابتدا یک گوه ساده شبیه‌سازی شده و سپس با اعتبارسنجی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی ژائو و فالتینسن [۳]، شبیه‌سازی 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 سطح آزاد قرار می‌گیرد. سپس با شروع حل، گوه با سرعت ثابت وارد آب شده و حل تا زمان  $t$  ادامه می‌یابد. به دلیل وجود تقارن در این مسئله، حل برای نصف گوه انجام می‌گیرد. یک سیستم مختصات  $YZ$  روی گوه قرار داده شده است. سیال مورد نظر در این مسئله ویسکوز فرض شده و مسئله دوفازی (آب و هوا) است. در شکل ۱ مقطع گوه ساده و نحوه ورود به آب آرام به صورت شماتیک نشان داده شده است.

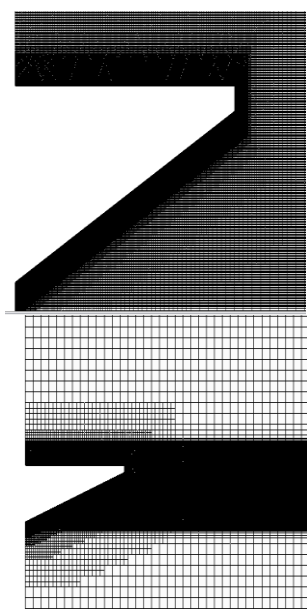


شکل ۱. شماتیک مقطع مورد مطالعه و ورود به آب آن



شکل ۳. نمودار بررسی استقلال از شبکه گوه متقارن.

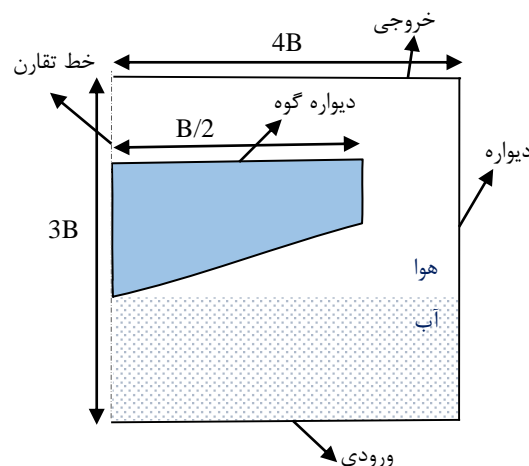
با توجه به شکل ۳، اختلاف نتایج در شبکه‌بندی M3 و M4 بسیار کم است. لذا از شبکه‌بندی M3 در ادامه استفاده می‌گردد. در شکل ۴ شبکه انتخاب شده برای حل عددی مشاهده می‌شود.



شکل ۴. شبکه انتخاب شده برای مطالعه گوه متقارن.

#### ۴-۲. اعتبار سنجی نتایج مقطع متقارن

در مسئله مطرح شده، جریان سیال پیرامون گوه در حال ورود به آب با صرف نظر از اثر گرانش حل شده است. برای اعتبار سنجی حل عددی مورد استفاده، نتایج به دست آمده با نتایج تجربی ژائو و فالتینسن [۳] در چهار زاویه خیز کف ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه مقایسه گردیده است. همان گونه که در شکل ۵ مشخص است نتایج حاصل از روش عددی با روش آزمایشگاهی تطابق دارد.



شکل ۲. 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 فاز آب و هوا انتخاب می‌گردد. سیال مورد نظر، تراکم ناپذیر فرض شده است و چگالی گاز ثابت است. تولید شبکه محاسباتی به صورت سازمان یافته انجام گردیده و حجم‌های محدود به شکل مربع تشکیل شده است. همچنین شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره‌ی مقطع و در نزدیکی سطح آزاد ریز شده‌اند.

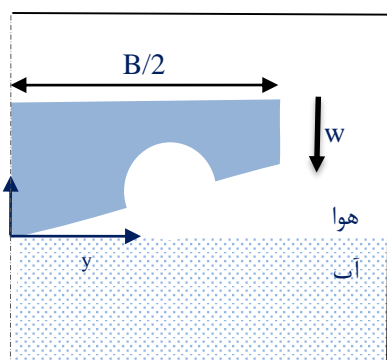
#### ۴-۱. استقلال از شبکه مقطع متقارن

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.

جدول ۱. تعداد سلول‌های شبکه حل مقطع متقارن.

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

جدول ۱ تعداد سلول‌های شبکه را نشان دهد. بر اساس این شبکه‌بندی‌ها نتایج زیر برای چهار حالت شبکه‌بندی به دست آمده است.



شکل ۶. نمای شماتیک ورود مقطع تونل‌دار به آب.

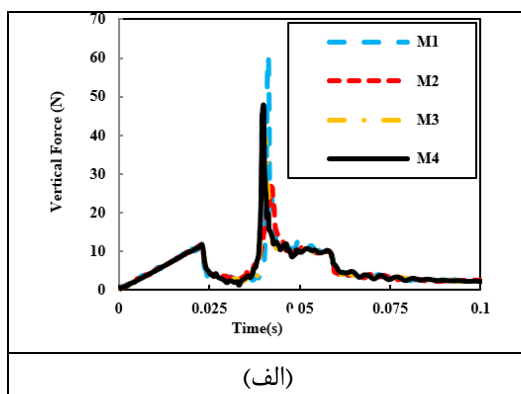
### ۵-۱. استقلال از شبکه مقطع تونل‌دار

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 جدول ۳ تعداد سلول‌ها برای حالات متفاوت نمایش داده شده است.

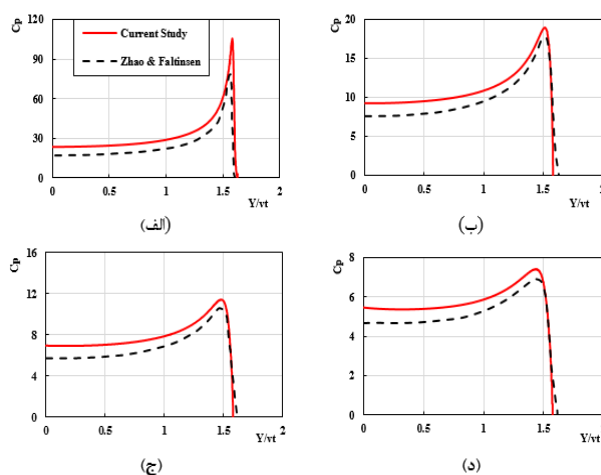
جدول ۳ تعداد سلول‌های شبکه حل مقطع تونل‌دار.

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

با توجه به مشخص شدن ۴ حالت برای تعداد سلول‌های شبکه‌بندی، شکل ۷ نشان دهنده تغییرات نیروی عمودی وارد بر مقطع نسبت به زمان در سه ناحیه مختلف مقطع تونل‌دار برای حالات ذکر شده است. در شکل ۸ به صورت شماتیک مؤلفه‌های نیروی وارد بر مقطع از جمله 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)



شکل ۵. نمودار توزیع فشار روی گوه متقارن در زوایای خیز کف: (الف) ۱۰ درجه، (ب) ۲۰ درجه، (ج) ۲۵ درجه و (د) ۳۰ درجه.

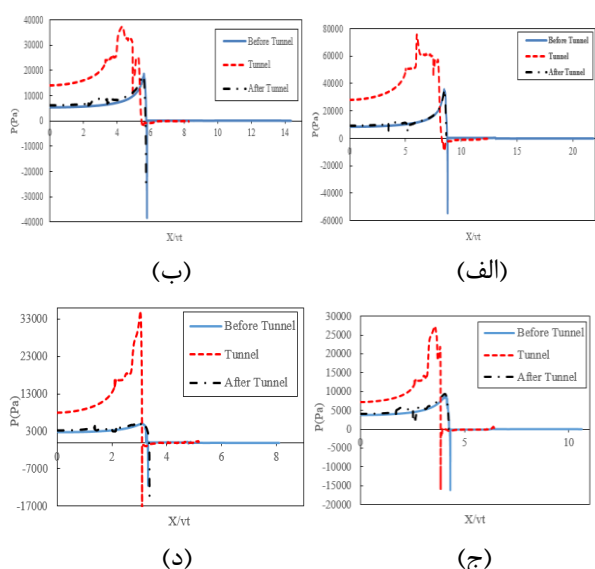
در جدول ۲ مقادیر بیشینه فشار که با استفاده از روش عددی حاضر به دست آمده است، با بیشینه فشار نتایج آزمایشگاهی ژائو و فالتینسن [۳] مورد مقایسه قرار گرفته شده و میزان خطای آن نیز محاسبه گردیده است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که به جز نتایج گوه با زاویه خیز کف ۱۰ درجه، نتایج عددی حاصل، تطابق خوبی با روش آزمایشگاهی دارد.

جدول ۲. مقایسه مقادیر بیشینه فشار روش عددی با داده‌های آزمایشگاهی

| $\beta$ (deg) | $C_{pmax}$ Current study | $C_{pmax}$ 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    |

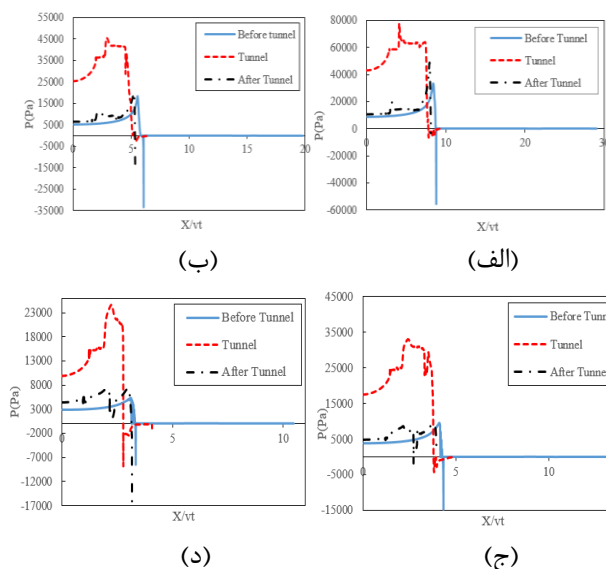
### ۵. مدل‌سازی عددی مقطع تونل‌دار

در ادامه مطالعات عددی، یک مقطع تونل‌دار به صورت عددی مدل‌سازی 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. شکل ۶ نمای شماتیک ورود به آب مقطع موردبحث را نشان می‌دهد. در این شکل، B، عرض مقطع برابر یک متر است.

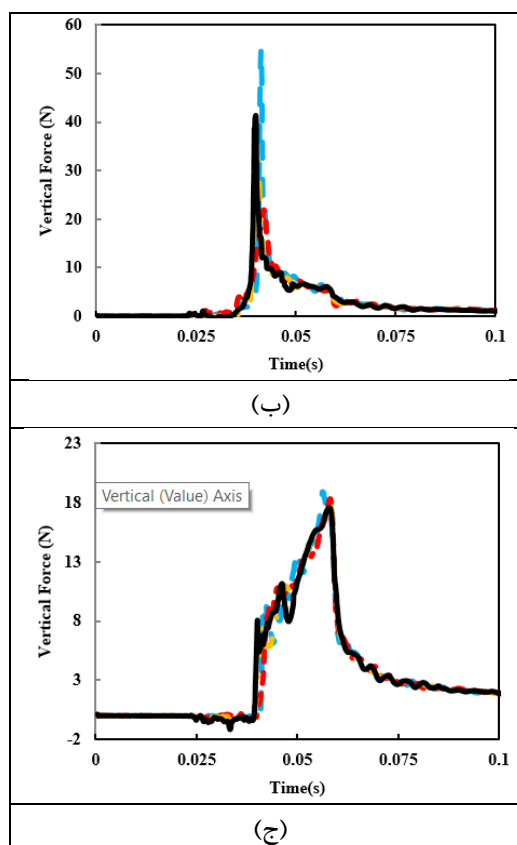


شکل ۹. نمودار توزیع فشار مقطع تونل‌دار به شعاع ۰/۰۵ و زوایای خمیز کف: (الف) ۱۰ درجه، (ب) ۱۵ درجه، (ج) ۲۰ درجه و (د) ۲۵ درجه.

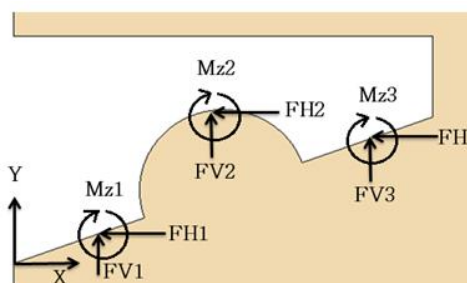
نتایج به‌دست‌آمده در روش حاضر نشان می‌دهد که رفتار نمودارها در شکل ۹ برای ناحیه قبل از تونل و بعد از تونل در دو شعاع ۰/۰۵ و ۰/۱ بسیار به هم شبیه است. فشار اتفاق افتاده در این نواحی به نتایج به‌دست‌آمده برای گوه متقارن شباهت بسیاری دارد. در قسمت تونل، به دلیل وجود ناپیوستگی موجود، یک ناحیه پرفشار به وجود می‌آید که نتایج حاصل این اتفاق را به‌خوبی نشان می‌دهد. با افزایش زاویه خمیز کف، بیشینه فشار کاهش پیدا می‌کند ولی بین زاویه ۲۰ درجه و ۲۵ درجه این اصل رعایت نشده و مقدار فشار در زاویه ۲۵ درجه افزایش داشته است.



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



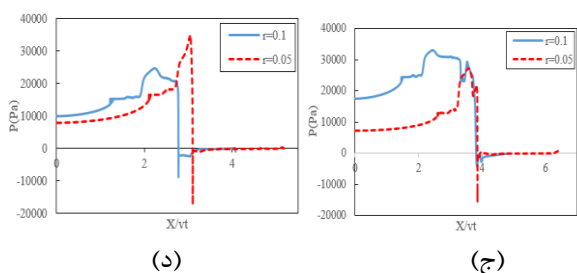
شکل ۷. تغییرات نیروی عمودی وارد بر مقطع نسبت به زمان در سه ناحیه مختلف مقطع تونل‌دار: (الف) قبل از تونل، (ب) در محل تونل، (ج) بعد از تونل.



شکل ۸. تغییرات نیروی عمودی وارد بر مقطع نسبت به زمان در سه ناحیه مختلف مقطع تونل‌دار

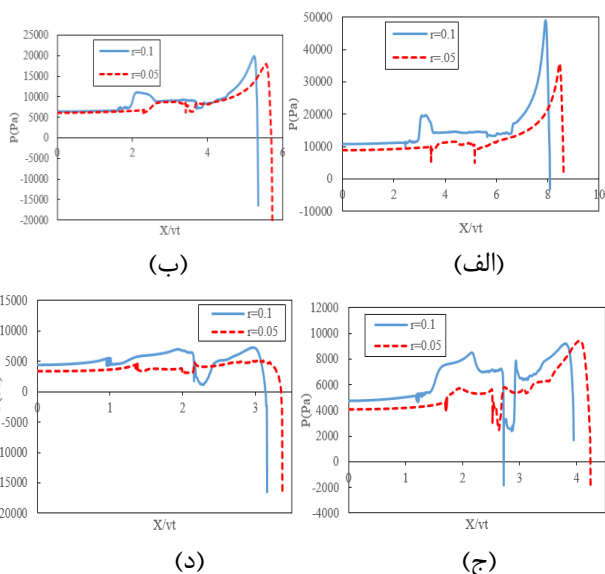
## ۲-۵. نتایج توزیع فشار مقطع تونل‌دار

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 خمیز کف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۲. 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) ۲۵ درجه.

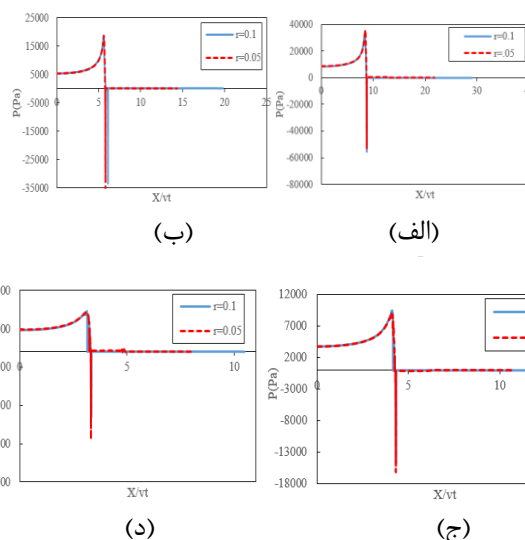
همان گونه که در شکل ۱۲ مشخص است، بیشینه مقدار فشار در ناحیه تونل اتفاق می افتد. در شعاع ۰/۱ به دلیل بزرگ تر بودن شعاع مقطع و تغییرات شدید نیرویی، فشار بیشتری در این ناحیه وارد می گردد، ولی این مسئله در زاویه خیز کف ۲۵ درجه در شعاع ۰/۰۵ صدق نمی کند و مقدار بیشینه در این نمودار از شعاع ۰/۱ بیشتر است. در زوایای خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه به دلیل خیس شدن بیشتر تونل، شکل نمودار اندکی متفاوت تر از قبل می گردد.



شکل ۱۳. 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) ۲۵ درجه.

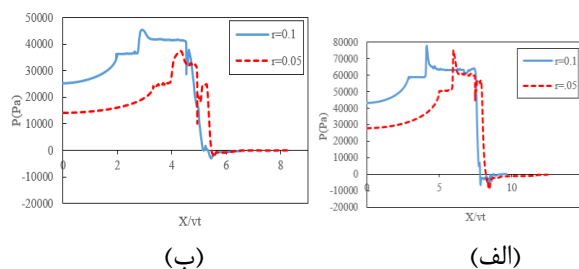
شکل ۱۳ مقایسه بین فشار وارد شده بعد از خیس شدن تونل را برای دو شعاع ۰/۰۵ و ۰/۱ نشان می دهد. روند نمودارها در اینجا اندکی تفاوت دارد. مقدار بیشینه فشار در شعاع ۰/۱ بیشتر است ولی این مسئله برای زاویه خیز کف ۲۰ درجه متفاوت است.

شکل ۱۰ نتایج فشار محاسبه شده برای مقطع تونل دار در زوایای خیز کف متفاوت را نشان می دهد. همان طور که مشخص است مقادیر ماکزیمم فشار در ناحیه تونل اتفاق می افتد و فشار در این بخش تا حدود دو برابر فشار ناحیه قبل از تونل می رسد. با افزایش زاویه خیز کف مقدار فشارها کاهش می یابد.



شکل ۱۱. 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) ۲۵ درجه.

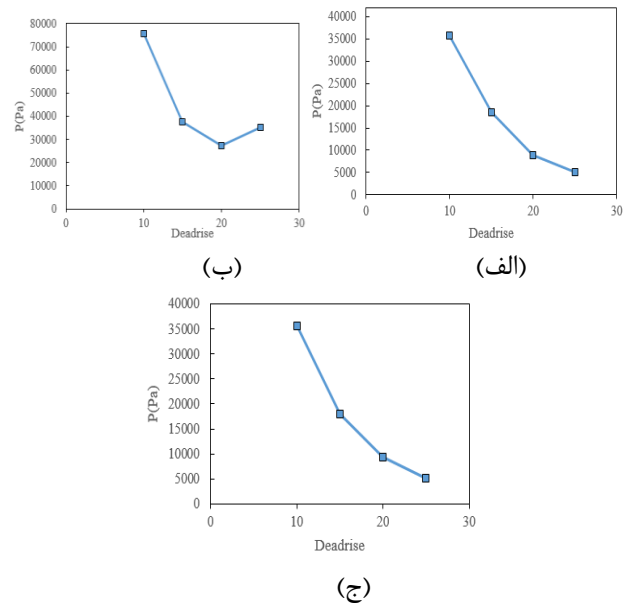
شکل ۱۱، مقایسه نتایج توزیع فشار مربوط به ناحیه قبل از تونل را در دو شعاع ۰/۰۵ و ۰/۱ نشان می دهد. نتایج به دست آمده گویای تغییرات کم مربوط به افزایش شعاع است به گونه ای که نمودار مربوطه روی هم قرار می گیرند. با افزایش زاویه خیز کف مقدار بیشینه در این نمودارها کاهش می یابد به این صورت که مقدار بیشینه مثبت 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 می رسد.



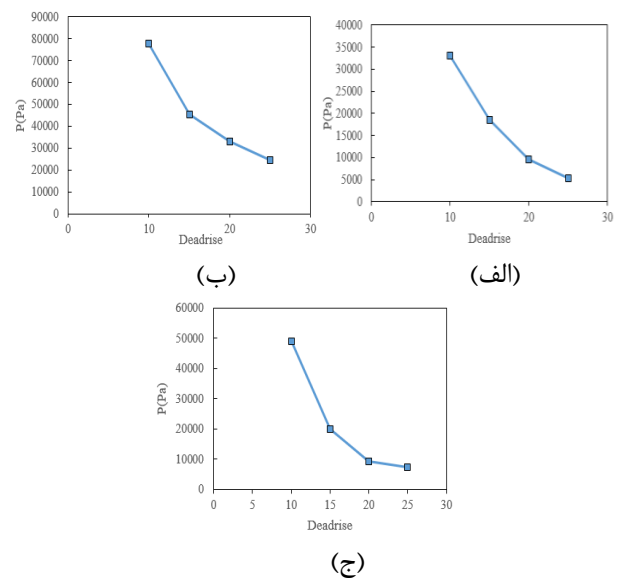
در این پژوهش به مدل‌سازی عددی ورود مقاطع تونل‌دار به آب پرداخته شد. تحلیل‌ها ابتدا برای گوه ساده بدون اثر نیروی گرانش انجام شد و سپس مقطع تونل‌دار در حالت متقارن در دو شعاع متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این روش برای مقطع ساده با نتایج آزمایشگاهی ژائو و فالتینسن [۳] مقایسه گردید که نشان از دقت بالای مدل‌سازی انجام شده داشت. در ادامه با در نظرگیری شرایط مورد استفاده 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 به‌نحوی که فشار وارد شده 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 ۰/۵ 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.



شکل ۱۴ 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.



شکل ۱۵ 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 قابل توجه در نمودارهای فوق تبعیت نکردن زاویه ۲۵ درجه از این قاعده است. به نظر می‌رسد که خیزی بیشتر تونل در این زاویه خیز کف، سبب ایجاد فشار بیشتر نیز می‌شود.

## ۶. نتیجه‌گیری

- 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.
- [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 16<sup>th</sup> 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] Berezniński A., (2001), Slamming: the role of hydroelasticity, *International Shipbuilding Progress*, 48(4):333–351.
- [15] Stenius I., Rosen A., and Kutteneuler 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 of 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

- [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*.