



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Numerical Investigation of the Water Entry Problem of Reticulated Pounders with Matrix Arrangement

Mohammad Hossein Taghizadeh Valdi^{1*}, Edris Merufinia²

1*Ph.D. in Geotechnical Engineering, Lecturer of University and Guilan Construction Engineering Organization, Rasht, Iran.

2-Young Researchers and Elite Club, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran & West Azerbaijan Regional Water Company, Urmia, Iran.

Received: 11 April 2024; Revised: 19 April 2024.; Accepted: 20 April 2024; Published: 21 June 2024

Abstract:

In this article, the water entry problem of reticulated pounder including 4, 9, 16, 25 and 64 holes which are distributed with a matrix arrangement on the surface of the pounder, is investigated numerically and to model the interaction between the pounder and fluid, an explicit dynamic analysis was employed using the Eulerian-Lagrangian couple formulation available in the commercial finite element software Abaqus 6.14-2. The results of the numerical solution were validated by comparing and matching the numerical, theoretical and experimental results of the trajectory of a spherical projectile in the depth of water, including the shape of the air bubble formed and the pinch-off time and depth, which indicated the accuracy and application of the numerical algorithm used. The results of the current research showed that the 9-hole pounder reaches the model bed at a depth of 100 cm in less time than other pounders with different arrangement and number of holes. In 16- and 25-hole pounders, the ratio between the mass of the pounder and the area of the holes is unstable, and due to the decrease in the area of the holes, the effect of water resistance on the bottom of the pounder increases when it moves in its depth. The effect of increasing the mass of the pounder on reducing the duration of its immersion in the water depth is more evident in the 64-hole pounder. So that this pounder has a smaller area of holes compared to other pounders, it has more mass with smaller holes than other pounders, and despite the smaller dimensions of the holes and the increase in the life of the reticulated pounder, which is the factor that increases the resistance of the water entering the pounder floor, due to the large mass of the pounder, it overcomes the water resistance that is applied as an upward force on the bottom of the reticulated pounder, and the duration of its movement in the depth of the water is reduced from the moment it hits the free surface of the water until it reaches the model bed.

Keywords: Reticulated pounder, Matrix arrangement, Eulerian-Lagrangian couple, Water entry problem, Pinch-off Time and depth.

Cite this article as Taghizadeh Valdi, M H and Merufinia, E . (2024). Numerical investigation of the water entry problem of reticulated pounders with matrix arrangement. (e194455). Civil and Project journal, 6(4), e194455
doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2024.451993.1267>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2023 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third-party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: mh.taghizadeh@khuish.ac.ir



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

بررسی عددی مسأله ورود به آب کوبه‌های سوراخ‌دار با آرایش ماتریسی

محمد حسین تقی زاده ولدی^{۱*}، ادريس معروفی نیا^۲

^{۱*} - دکتری عمران ژئوتکنیک، مدرس دانشگاه و سازمان نظام مهندسی ساختمان استان گیلان، رشت، ایران.
^۲ - باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران و کارشناس شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی.

تاریخ دریافت: ۲۳ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۳۱ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۰۱ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ تیر ۱۴۰۳

چکیده

در این مقاله، مسأله ورود به آب کوبه‌های مشبک شامل ۴، ۹، ۱۶، ۲۵ و ۶۴ سوراخ که با آرایش ماتریسی در سطح کوبه توزیع شده است، به روش عددی بررسی و برای مدل‌سازی اندرکنش بین کوبه و سیال، یک تحلیل دینامیکی صریح با استفاده از فورمول‌بندی کوپل اویلرین لاگرانژین که در نرم‌افزار تجاری اجزای محدود آباکوس 6.14-2 موجود است، به کار گرفته شد. نتایج حل عددی از مقایسه و تطابق مناسب نتایج عددی، ثنوری و آزمایشگاهی مسیر حرکت یک پرتابه کروی در عمق آب شامل شکل حباب هوای تشکیل شده و زمان و عمق جدایش آن، صحت‌سنجی گردید که بیانگر دقت و کاربرد الگوریتم عددی مورد استفاده بود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کوبه ۹ سوراخ نسبت به سایر کوبه‌ها با آرایش و تعداد سوراخ‌های متفاوت، در زمان کمتری از لحظه برخورد با سطح آزاد آب به بستر مدل در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری می‌رسد. در کوبه‌های ۱۶ و ۲۵ سوراخ تناسب بین جرم کوبه و مساحت سوراخ‌ها دچار تزلزل شده و به علت کاهش مساحت سوراخ‌ها، تاثیر مقاومت آب بر کف کوبه در هنگام حرکت در عمق آن بیشتر می‌شود. تاثیر افزایش جرم کوبه بر کاهش مدت زمان قرق شدن آن در عمق آب، در کوبه ۶۴ سوراخ مشهودتر است. به طوری که این کوبه با مساحت سوراخ‌های کمتر نسبت به سایر کوبه‌ها، جرم بیشتری دارد و علی‌رغم ابعاد کوچکتر سوراخ‌ها و افزایش جان مشبک کوبه که عامل تشدید مقاومت بازدارنده آب وارد بر کف کوبه می‌باشد، به واسطه جرم زیاد کوبه، بر مقاومت بازدارنده آب که به صورت نیروی رو به بالا بر کف مشبک کوبه اعمال می‌گردد غلبه نموده و مدت زمان حرکت آن در عمق آب از لحظه برخورد با سطح آزاد آب تا رسیدن به بستر مدل، کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی:

کوبه مشبک، آرایش ماتریسی، مسأله ورود به آب، کوپل اویلرین - لاگرانژین، زمان و عمق جدایش.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mh.taghizadeh@khuif.ac.ir

۱- مقدمه

ورود آب یک جسم متحرک یک پدیده فیزیکی بسیار رایج در طبیعت و یک مشکل کلاسیک در هوافضا، مهندسی اقیانوس و سایر زمینه‌های نظامی است. جفت شدن بین فازهای مختلف جامد، مایع و گاز وجود دارد که منجر به تلاطم، جریان چند فاز، غیرخطی بودن سطح آزاد و حتی تراکم پذیری زمانی که جسم متحرک به آب در سطح آزاد نفوذ می‌کند، می‌شود (گیو و همکاران^۱، ۲۰۱۲). تحت ورود آب با سرعت بالا، نیروی ضربه فوق العاده ایجاد شده باعث تغییر شکل ساختاری می‌شود و ویژگی‌های هیدرودینامیکی میدان سیال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، غیرخطی بودن هیدرودینامیک، تکامل حفره ناپایدار، و جفت چند فاز پیچیدگی مسئله ورود آب را به شدت افزایش می‌دهد. بنابراین مطالعه این پدیده‌ها موضوعی بسیار پرمعنا، هرچند چالش برانگیز است (خیا و همکاران^۲، ۲۰۲۳). بسته به پدیده کاهش پسا پرتابه ابرحفره، پرتابه همچنان می‌تواند پس از طی کردن یک مسافت زیر آب، سرعت و دقت بالایی را حفظ کند. در فرآیند عملی بهره برداری و کاربرد، شرایط مشکل ورود آب موازی اجتناب ناپذیر است و هر از گاهی رخ می‌دهد (شوویلر و همکاران^۳، ۲۰۰۴). زمانی که فاصله بین پرتابه‌ها خیلی کم باشد، تشکیل حفره نامتقارن بر پایداری پرتابه‌ها تأثیر منفی می‌گذارد و باعث می‌شود که پرتابه‌ها از مسیر از پیش تعیین شده منحرف شوند (بایی و همکاران^۴، ۲۰۲۰؛ سوراج و همکاران^۵، ۲۰۲۰). هنگامی که فاصله بین پرتابه‌ها بیش از حد زیاد باشد، اثر آسیب بر هدف کمتر از حد انتظار خواهد بود. به طور خاص، برای پرتابه‌های پرسرعت، فرآیند ورود آب با ظهور تلاطم قوی، جریان چند فاز، ایجاد نیروی ضربه و پدیده‌های کاویتاسیون همراه است. تمام اثرات فوق دشواری تحقیق موازی ورود آب را نیز افزایش خواهد داد (لو و همکاران^۶، ۲۰۲۱). ویژگی‌های ورودی آب سطحی آزاد اجسام کروی برای بیش از یک قرن مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا بسیاری از مطالعات بر روی فیزیک حفره، دینامیک کره و نیروهای وارد بر کره متمرکز شدند (سان و همکاران^۷، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران^۸، ۲۰۲۰؛ آریستوف و همکاران^۹، ۲۰۱۰). تأثیر کاهش سرعت کره‌های با چگالی کم را بر دینامیک کره و تکامل حفره، همراه با تغییرات زمان بی‌بعد و عمق کره در زمان پرش کردن، ارزیابی نمودند. اییز و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۹) نشان دادند که نسبت جرم کمتر با درصد بیشتری از اینرسی که توسط نیروهای هیدرواستاتیکی از بین می‌رود، مرتبط است، که منجر به یک مسیر کم عمق می‌شود. شوالباخ و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۴) تأثیر نسبت جرم را بر روی رویدادهای پرش کردن حفره ورودی آب و نیروی ضربه بررسی نمودند. چن و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۹) یک مطالعه تجربی بر روی پایداری مسیر پرتابه‌های پرسرعت آبرسانی با انواع بار آبی، سرعت‌های ورودی و زوایای ورودی آب انجام نمودند. نتایج آنها نشان داد که فشار اوج تولید شده توسط پرتابه تخت بزرگترین و دارای ثبات مسیر خوبی است. لو و همکاران^{۱۳} (۲۰۲۲) ویژگی‌های هیدرودینامیکی پرتابه‌های موازی در فرآیند آبرسانی عمودی با سرعت بالا در بازه‌های زمانی مختلف ورودی آب از طریق محاسبه عددی مورد مطالعه قرار گرفت. آنها دریافتند که حفره پرتابه اول فشرده شده و حفره پرتابه عقب تحت شرایط ناهمزمان منبسط می‌شود. اکبری و همکاران^{۱۴} (۲۰۲۱) نوع جدیدی از پرتابه ابر حفره‌ای هوا-آب را طراحی نموده و تجزیه و تحلیل عددی مربوطه را انجام دادند. نتایج نشان داد که نوع جدید پرتابه در فرآیند ورود آب با نیروی ناپایدار شدیدی مواجه می‌شود که منجر به یک گشتاور شیب زیاد و سرعت زاویه‌ای قوی می‌شود. لی و همکاران^{۱۵} (۲۰۲۱) طراحی و شبیه سازی عددی بافر مرکب برای کاهش بار ضربه ای پرتابه در سرعت بالا. آنها دریافتند که آسیب به حائل زمانی که نسبت طول بافر به قطر پرتابه بیشتر از ۰٫۹۲ باشد،

¹ Guo et al.

² Xia et al.

³ Schouweiler et al.

⁴ Bai et al.

⁵ Sooraj et al.

⁶ Lu et al.

⁷ Sun et al.

⁸ Li et al.

⁹ Aristoff et al.

¹ Epps et al.

¹ Schwalbach et al.

¹ Chen et al.

¹ Lu et al.

¹ Akbari et al.

¹ Li et al.

قابل توجه تر است. اسپینوسا و لافراتی^۶ (۲۰۲۱) از روش‌های تجربی برای مطالعه تاثیر ورودی آب با سرعت بالا صفحات شیبدار با تمرکز بر تعامل ساختار سیال استفاده کردند. آنها دریافتند که صفحات تحت تغییر شکل دائمی قرار گرفتند که منجر به کاهش فشار اوج شد. بو و همکاران^۷ (۲۰۲۲) ورود آب پرتابه‌های پرسرعت را با مواد مختلف مورد بررسی قرار داد. آنها دریافتند که کاهش سرعت پرتابه به وضوح با افزایش چگالی پرتابه کاهش می‌یابد، و گسترش دیواره حفره می‌تواند با افزایش چگالی پرتابه تسریع شود. وانگ و همکاران^۸ (۲۰۲۲) به صورت عددی و تجربی رفتار بارگذاری یک پرتابه دماغه‌ای را مورد مطالعه قرار داد. آنها دریافتند که زاویه حمله اولیه تاثیر قابل توجهی بر بار شعاعی پس از خیس شدن دارد. یو و همکاران^۹ (۲۰۲۲) ویژگی‌های تکامل حفره و حرکت پرتابه دماغه‌شکل نامتقارن را به صورت عددی بررسی کرد. آنها دریافتند که حفره زمانی که پرتابه با شکل دماغه نامتقارن وارد آب می‌شود، خم می‌شود و با کاهش شعاع برش بدون بعد، زاویه انحراف حفره افزایش می‌یابد. عرفانیان و مقیمان (۱۳۹۴) مطالعه عددی و آزمایشگاهی مسئله ورود به آب یک پرتابه و بررسی اثر سرعت برخورد بر زمان و عمق جدایش حباب را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش مذکور مسئله ورود به آب یک پرتابه سه بعدی با دماغه نیم کره با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌های پژوهش مذکور نشان داد که تطابق خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی دقت و کاربرد الگوریتم عددی را آشکار می‌کند. همچنین مشاهده گردید که لحظه وقوع جدایش حباب تابع بسیار ضعیفی از سرعت برخورد است ولی عمق جدایش با افزایش سرعت برخورد، به صورت خطی افزایش می‌یابد. عطرچیان و همکاران (۱۳۹۸) به مطالعه عددی اثر شکل هندسی و ارتفاع سقوط پرتابه بر سرعت حرکت در آب پرداختند. در پژوهش مذکور مسئله ورود به آب پرتابه‌های سه بعدی با اشکال هندسی مختلف و ارتفاع سقوط و آرایش سوراخ‌های متفاوت تحت تاثیر پارامترهای مذکور بر سرعت حرکت پرتابه در عمق آب و زمان و عمق جدایش حباب مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های پژوهش مذکور نتایج نشان داد که عمق جدایش حباب متأثر از شکل هندسی پرتابه است و با افزایش ارتفاع سقوط آن از سطح آزاد آب، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در حالی که، زمان جدایش حباب تابع ضعیفی از پارامترهای مذکور می‌باشد. همچنین، نیروی پسا بر پرتابه‌های با سطح تماس مسطح و تیزگونه، به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را دارد. از این رو، پرتابه مکعبی که از بیشترین استهلاک سرعت در عمق آب برخوردار است. اکبری و همکاران (۱۳۹۹) مدل سازی عددی ورود به آب مایل یک پرتابه ی پر سرعت استوانه‌ای و بررسی اثر حرکت چرخش محوری بر رفتار دینامیکی آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، در فرآیند ورود به آب مایل، وجود حرکت چرخش محوری، تاثیر بسزایی بر رفتار دینامیکی و سینماتیکی پرتابه‌ی استوانه‌ای نخواهد داشت. بنابراین نتایج این پژوهش نشان داد، در فرآیند ورود به آب مایل پرتابه‌های چرخش پایدار سوپرکاویتاسیونی، با تقریب دقیقی فرض حرکت صفحه‌ای پرتابه برقرار است. رضانی و محمدی (۱۴۰۰) به بررسی عددی و تجربی خیز چندلایه‌های کامپوزیتی ناشی از ضربه سقوط آزاد پرتابه‌های مختلف پرداختند. خضرییان و دشتیان گرامی (۱۳۹۴) به شبیه سازی عددی برخورد پرتابه‌های سرعت پایین با سطح آب پرداختند. یافته‌های پژوهش فوق نشان داد که نتایج حاصل از شبیه سازی برای استوانه با نتایج آزمایشگاهی موجود تطابق خوبی نشان می‌دهد و نتایج حاصله برای دیگر پرتابه‌ها دارای روند منطقی هستند. خداحمی و همکاران (۱۳۸۴) به تحلیل عددی و تجربی شکل گیری و نفوذ پرتابه‌های شکل یافته از انفجاری پرداختند. نتایج بدست آمده از شبیه سازی با یافته‌های تجربی مقایسه گردیده و تطابق خوبی را نشان می‌دهد. به علاوه، مقایسه سرعت و قابلیت نفوذ پرتابه‌های بدست آمده نشان می‌دهد که لاینر با پروفیل چند جمله‌ای نسبت به لاینر کروی برتری کاملی دارد. در این تحقیق مطالعه عددی و آزمایشگاهی مسئله ورود به آب پرتابه کروی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مکانیزم حرکت اجسام در آب

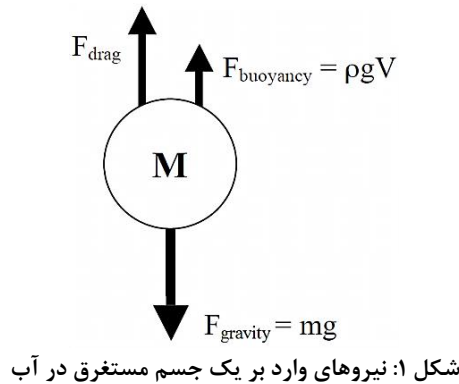
یک جسم صلب که از حالت سکون بالای سطح آزاد آب با سرعت اولیه صفر متر بر ثانیه رها می‌شود، تحت اثر نیروی ثقل زمین، سرعتش در بازه زمان افزایش می‌یابد و بر طبق معادله مستقل از زمان سقوط آزاد اجسام، در لحظه برخورد با سطح آب به سرعت ثانویه می‌رسد. پس از ورود به داخل آب، جسم تحت تاثیر نیروهای ثقلی، شناوری و درگ قرار می‌گیرد. نیروی ثقلی در اثر جرم جسم و شتاب ثقل زمین منجر به حرکت رو به پایین جسم و استغراق آن می‌شود. اما نیروهای شناوری و درگ که در جهت خلاف حرکت جسم بر آن اعمال می‌گردد با استهلاک سرعت جسم، تمایل به بازگرداندن آن به سطح آزاد آب دارند. حال اگر نیروی شناوری از نیروی ثقلی بیشتر باشد جسم روی سطح

¹ Spinosa, & Iafrati.	6
¹ Bo et al.	7
¹ Wang et al.	8
¹ Yu et al.	9

آزاد آب شناور می‌شود و اگر نیروی ثقلی بر نیروی شناوری غلبه نماید جسم در آب غرق خواهد شد. اثر نیروهای وارد بر جسم مستغرق در آب مطابق رابطه (۱) است:

$$F_{gravity} = F_{buoyancy} + F_{drag} \quad (1)$$

که در آن $F_{gravity}$ نیروی ثقلی، $F_{buoyancy}$ نیروی شناوری و F_{drag} نیروی درگ یا پسار آب، وارد بر جسم است. در شکل (۱) تصویر شماتیک از یک جسم مستغرق در آب تحت تاثیر نیروهای مذکور نشان داده شده است.



۱-۲- نیروی ثقلی

وقتی یک جسم صلب به درون سیال وارد می‌شود تحت اثر وزن خود و شتاب ثقل زمین تمایل به حرکت رو به پایین در عمق آب دارد. این نیرو که همواره به طور قائم و رو به پایین بر جسم اثر می‌کند و وابسته به جرم جسم و شتاب ثقل زمین است، نیروی ثقلی نامیده شده که در آن m جرم جسم و g شتاب ثقل زمین برابر 9.8 m/s^2 است و از رابطه (۲) تعیین می‌گردد:

$$F_g = m \cdot g \quad (2)$$

۲-۲- نیروی شناوری

به نیروی برآیند وارد از طرف یک سیال بر جسمی است که در آن فرو رفته یا شناور است، نیروی شناوری گفته می‌شود. اگر چگالی جرمی جسم کوچکتر از چگالی جرمی سیال ($\rho_s < \rho_l$) باشد نیروی ثقلی کوچکتر از نیروی شناوری ($F_g < F_{buoyancy}$) می‌شود؛ لذا جسم در سطح سیال شناور خواهد شد. اگر چگالی جرمی جسم بزرگتر از چگالی جرمی سیال ($\rho_s > \rho_l$) باشد نیروی ثقلی بزرگتر از نیروی شناوری ($F_g > F_{buoyancy}$) می‌شود؛ لذا جسم در سیال رو به پایین رفته و غرق خواهد شد. بنابراین نیروی شناوری همواره به طور قائم و رو به بالا بر جسم اثر می‌کند و مطابق رابطه (۳) تعیین می‌گردد که در آن، ρ چگالی جرمی آب، V سرعت حرکت جسم در آب و g شتاب ثقل زمین است.

$$F_{buoyancy} = \rho V g \quad (3)$$

۲-۳- نیروی درگ

زمانی که جسمی درون سیال حرکت می‌کند برهم کنشی بین جسم و سیال رخ می‌دهد. تنش برشی به علت اثرات گرانروی و تنش‌های عمودی به علت فشار بر جسم وارد می‌شوند. به برآیند این نیروها در جهت سرعت جریان بالاسری، نیروی درگ یا پسار گفته می‌شود. این نیرو در جهت خلاف حرکت جسم در سیال بر آن وارد می‌شود و مطابق رابطه (۴) تعیین می‌گردد:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_d \quad (4)$$

که در آن ρ چگالی جرمی آب، V سرعت حرکت جسم در آب، A سطح مقطع جسم و C_d ضریب درگ جسم است. ضریب درگ (C_d) کمیتی بی بعد است که تابعی از عدد رینولدز و شکل هندسی و زبری جسم می‌باشد.

۳- حل مسائل زمان مند صریح

برای حل دینامیکی، دو الگوریتم کلی زمان مند به صورت ضمنی و صریح موجود است. هر دو روش ضمنی و صریح از روش تفاضل محدود بهره می گیرند. در روش ضمنی که از روش نیومارک استفاده می شود، لازم است ماتریس ها معکوس شوند. لذا برای اجرا زمان بیشتری مورد نیاز است. اما این روش دقت بالایی داشته و افزون بر آن همگرایی این روش در مسائل خطی تضمین شده است. در روش صریح نیازی به معکوس کردن ماتریس ها نیست، بنابراین سرعت تحلیل به مراتب بالاتر خواهد بود. افزون بر آن برای مسائلی که مش بندی و دامنه مسئله بزرگتر باشد و یا هدف، محاسبه مسئله در زمان های خیلی کوچک باشد، هزینه محاسباتی روش نیومارک به مراتب بالاتر خواهد بود. همگرایی در روش صریح در صورتی حاصل می شود که گام زمانی از اندازه کوچکترین المان تقسیم بر سرعت صوت در ماده کمتر باشد (فروزانی و همکاران، ۲۰۱۶). روش تفاضل مرکزی، یک روش حل صریح در حوزه زمانی است. این روش، بر اساس تقریب تفاضل محدود استوار است. به این نحو که محاسبه مشتق زمانی یک تابع به صورت رابطه (۵) تعریف می شود.

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{f(t+\frac{1}{2}\Delta t) - f(t-\frac{1}{2}\Delta t)}{\Delta t} \quad (5)$$

که در آن Δt گام زمانی است.

در زمان t می توان شتاب را به صورت رابطه (۶) محاسبه کرد.

$$\ddot{x}_t = \frac{F_t}{M_B} \quad (6)$$

اکنون با استفاده از رابطه (۵) برای سرعت - شتاب، سرعت در زمان $t + \frac{1}{2}\Delta t$ به صورت رابطه (۷) به دست می آید:

$$\dot{x}_{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \dot{x}_{t-\frac{1}{2}\Delta t} + \ddot{x}_t \Delta t \quad (7)$$

سپس با استفاده از رابطه (۵) برای سرعت - جابه جایی، جابه جایی در زمان $t + \Delta t$ به صورت رابطه (۸) به دست می آید:

$$x_{t+\Delta t} = x_t + \dot{x}_{t+\Delta t} \Delta t \quad (8)$$

پایداری این روش به مقدار گام زمانی و کوچکترین اندازه المان مربوط می شود و در صورتی پایداری حاصل می شود که رابطه (۹) برقرار باشد:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \quad (9)$$

در این رابطه c سرعت صوت و l کوچکترین طول المان است.

۴- مدل سازی جنس سیال

۴-۱- معادله انرژی و منحنی هوگونیوت

معادله بقای انرژی برابر افزایش در انرژی داخلی بر واحد جرم E_m به نرخ کار ایجاد شده با تنش ها و نرخ افزایش دما است. در غیاب هدایت گرمایی رسانایی معادله انرژی را می توان به شکل رابطه (۱۰) نوشت:

$$\rho \frac{\partial E_m}{\partial t} = (p - p_{bv}) \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + s : \dot{e} + \rho \dot{Q} \quad (10)$$

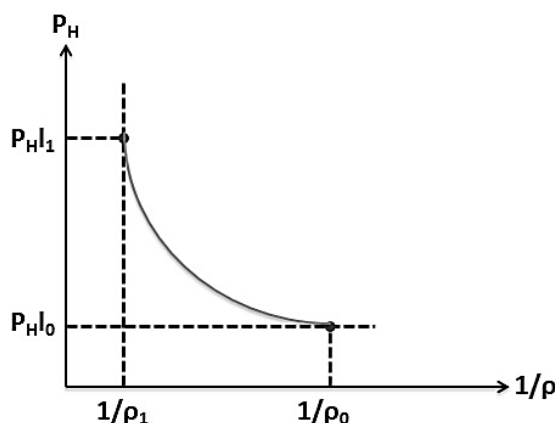
که در آن p تنش فشاری است که در جهت تراکم، مثبت فرض می شود. E_m انرژی بر واحد جرم، ρ چگالی، p_{bv} تنش فشاری مربوط به لزجت حجمی، $\dot{Q}$ نرخ گرما بر واحد حجم و s تانسور تنش می باشد که به صورت عددی در تانسور نرخ کرنش ($\dot{e}$) ضرب شده است. فرض می شود که معادله حالت برای فشار به عنوان تابعی از چگالی و انرژی داخلی بر واحد جرم باشد. لذا مطابق رابطه (۱۱) خواهیم داشت:

$$p = f(\rho, E_m) \quad (11)$$

انرژی داخلی را می‌توان از معادله (۳۶) حذف کرد تا رابطه‌ای بین فشار p و حجم V (که V حجم اولیه است) یا عکس چگالی حاصل شود یا به صورت معادل رابطه‌ای بین p و $1/\rho$ به دست آید. معادله مذکور به جنسی که با معادله مدل حالت تعریف شده است، به صورت یکتا وابسته است. این رابطه یکتا به نام منحنی هوگونیوت شناخته می‌شود و بیانگر مکان هندسی حالت‌های فشار - حجم قابل حصول در پشت یک شوک می‌باشد. فشار هوگونیوت p_H ، تنها تابعی از چگالی می‌باشد و عموماً از ترسیم داده‌های تجربی حاصل می‌شود. معادله حالت به صورت خطی در نظر گرفته شده و می‌تواند به شکل رابطه (۱۲) نوشته شود:

$$p = f + gE_m \quad (12)$$

$f(\rho)$ و $g(\rho)$ تنها تابعی از چگالی هستند و وابسته به معادله خاصی از مدل حالت هستند. در شکل (۲) بیان شماتیکی از منحنی هوگونیوت ارائه شده است (یاؤ و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۲: بیان شماتیکی از منحنی هوگونیوت

۲-۴- معادله می - گرانزین

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد برای بیان رفتار ماده اوپلری از یک معادله حالت استفاده شده است. معادله حالت می - گرانزین برای انرژی خطی و شکل معمول آن به شکل رابطه (۱۳) است (یاؤ و همکاران، ۲۰۱۴):

$$p - p_H = \Gamma \rho (E_m - E_H) \quad (13)$$

که در آن p_H و E_H به ترتیب فشار هوگونیوت و انرژی مخصوص بر واحد جرم بوده و تنها تابع وابسته به چگالی می‌باشند. Γ نسبت گرانزین است که طبق رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{\rho_0}{\rho} \quad (14)$$

که در آن Γ_0 ثابت ماده و ρ_0 دانسیته مرجع می‌باشد. انرژی هوگونیوت با فشار از طریق رابطه (۱۵) به هم وابسته‌اند:

$$E_H = \frac{p_H \eta}{2\rho_0} \quad (15)$$

که در آن η کرنش تراکمی حجمی است و به صورت رابطه (۱۶) تعریف می‌شود:

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (16)$$

با حذف E_H و Γ رابطه (۱۷) حاصل می‌شود:

(۱۷)

$$p = p_H \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m$$

۴-۳- فرم هوگونیوت خطی $U_s - U_p$

معادله حالت و معادله انرژی، معادلات کوپل شده‌ای برای فشار و انرژی داخلی ارائه می‌دهند. نرم‌افزار آباکوس به طور همزمان هر یک از این معادلات را در هر نقطه از جسم با روش صریح حل می‌کند. رابطه معمول برای داده‌های هوگونیوت به صورت رابطه (۱۸) است:

$$p_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \quad (18)$$

C_0 و s رابطه خطی بین سرعت خطی شوک، U_s و سرعت مخصوص، U_p را با رابطه (۱۹) تعریف می‌کنند:

$$U_s = C_0 + s U_p \quad (19)$$

با فرضیات فوق، فرم هوگونیوت خطی $U_s - U_p$ طبق رابطه (۲۰) نوشته می‌شود:

$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (20)$$

که $\rho_0 C_0^2$ معادل ضریب حجمی الاستیک، تحت یک کرنش اسمی کوچک است. مخرج معادله نباید صفر شود؛ بنابراین یک مقدار حدی برای ρ و η به صورت روابط (۲۱) و (۲۲) تعریف می‌شود.

$$\eta_{lim} = \frac{1}{s} \quad (21)$$

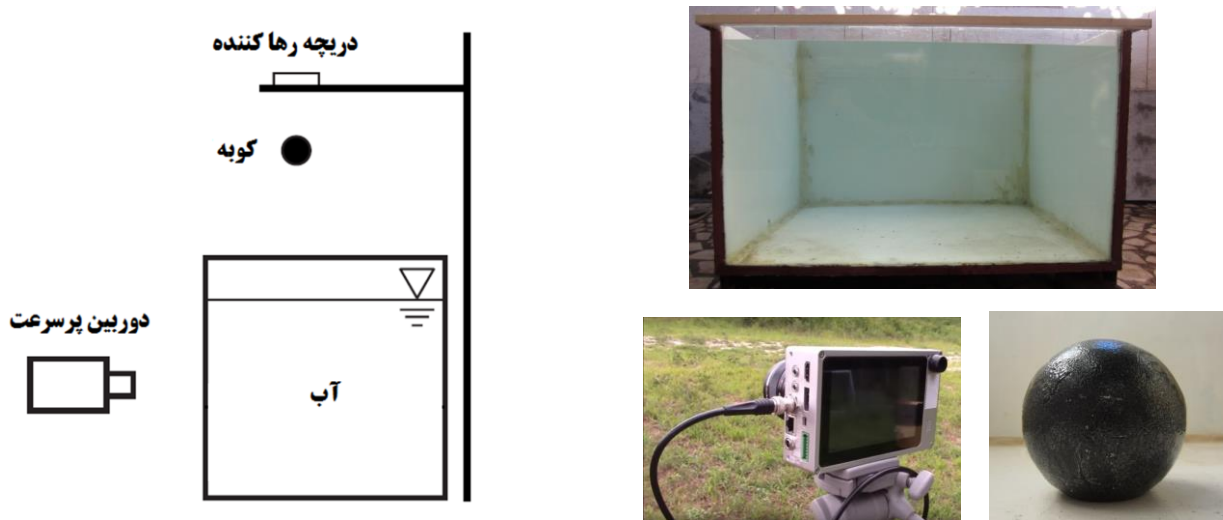
$$\rho_{lim} = \frac{s\rho_0}{s-1} \quad (22)$$

در این محدوده یک حداقل کشش وجود دارد که سبب می‌شود سرعت‌های منفی برای ماده محاسبه شود. معادله حالت خطی $U_s - U_p$ می‌تواند برای مدل‌سازی جریان‌های آرام غیر قابل تراکم لزج و غیر لزج با معادلات حرکت ناویر - استوکس استفاده شود. پاسخ حجمی زمانی که مدول حجمی به عنوان یک پارامتر جریمه برای قید غیر قابل تراکم عمل می‌کند، توسط معادله حالت کنترل می‌شود (بائو و همکاران، ۲۰۱۴).

۵- مدل آزمایشگاهی و پردازش داده‌ها

تجهیزات آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده که شامل یک مخزن فلزی مکعبی به ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 1$ متر، پرتابه کروی فولادی و دوربین فیلم‌برداری پرسرعت می‌باشد. جداره‌های طرفین و کف مخزن آزمایش از ورق فولادی ۲ میلی‌متری با جوشکاری دوطرفه و جدار پیشانی آن از شیشه ۱۰ میلی‌متری تشکیل و ابعاد آن طوری اختیار شده که اثر جداره مخزن بر نتایج نامحسوس باشد. به منظور آب‌بندی محل جوشکاری و اتصال شیشه پیشانی مخزن، این نواحی توسط چسب مخصوص به طور مناسب پوشش داده شده و جهت خروج آب درون مخزن در مواقع ضروری، یک شیر تخلیه نیز در جداره آن در نظر گرفته شده است. یک گره فولادی توپر به قطر ۱۰ سانتی‌متر و وزن ۴/۱۱ کیلوگرم جهت شبیه‌سازی آزمایشگاهی مسئله ورود به آب پرتابه کروی و یک دوربین فیلم‌برداری پرسرعت از نوع Chronos 1.4 با ۱۰۵۰ فریم بر ثانیه و وضوح تصویر 1280×1024 پیکسل جهت تهیه تصاویر حاصل از ورود پرتابه به آب و حرکت در عمق آن تا لحظه برخورد با بستر تانک و تعیین زمان و عمق جدایش حباب از انتهای پرتابه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تانک آزمایش تا ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر از آب پر شده و پرتابه در ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متری بالای سطح آزاد آب قرار داده می‌شود. دوربین فیلم‌برداری پرسرعت در فاصله مناسب از جداره شیشه‌ای تانک قرار گرفته و حالت ضبط فیلم فعال می‌گردد. پس از برطرف شدن تلاطم آب داخل تانک و رسیدن به حالت ساکن، پرتابه کروی از دریچه رها کننده با سرعت اولیه صفر متر بر ثانیه سقوط می‌نماید. بر طبق رابطه سقوط آزاد اجسام، پرتابه در هنگام برخورد با سطح آزاد آب به سرعت $4/43 \text{ m/s}$ می‌رسد. لحظه ورود پرتابه به داخل آب و حرکت در عمق آن تا رسیدن به بستر تانک آزمایش، توسط دوربین فیلم‌برداری ضبط می‌گردد و پس از اتمام آزمایش، تصاویر ضبط شده جهت پردازش به کامپیوتر منتقل می‌گردد. سپس فریم‌های مربوط به گسترش و تشکیل حباب هوا در داخل آب، انقباض حباب پشت پرتابه و در نهایت فروپاشی آن، به صورت تصاویر جداگانه تهیه شده و زمان و عمق جدایش حباب هوا در این شبیه‌سازی آزمایشگاهی با مدل‌سازی عددی پرتابه کروی مقایسه می‌گردد.

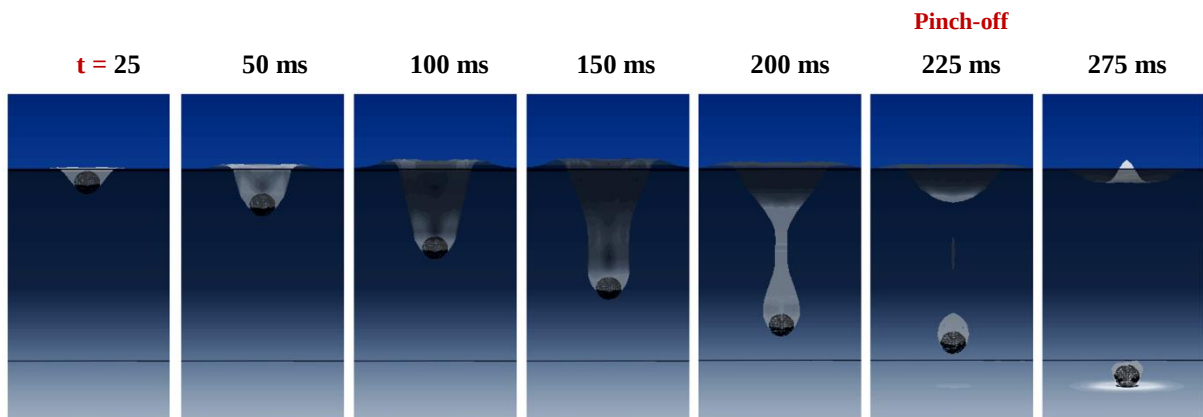


شکل ۳: مخزن آزمایش، پرتابه کروی و دوربین فیلم برداری پرسرعت

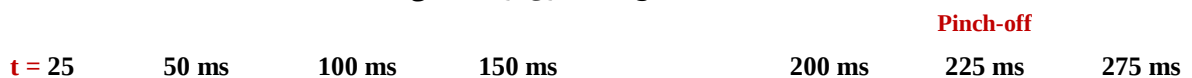
۶- کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل عددی

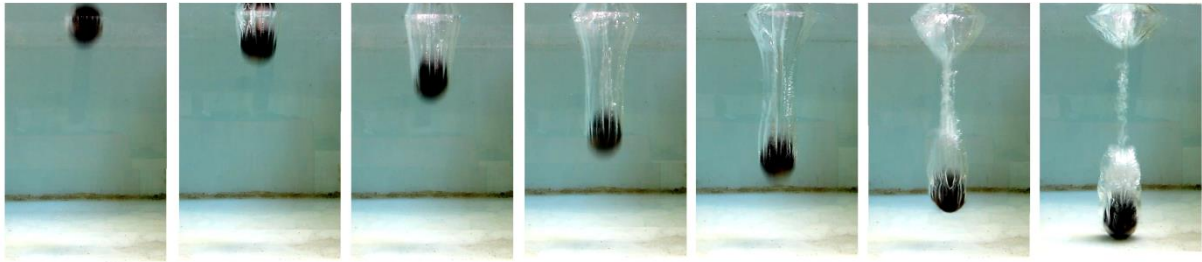
پس از ورود پرتابه کروی به داخل آب، یک حباب هوای متقارن در پشت آن شکل می گیرد. شکل گیری حباب هوا شامل چند مرحله است: گسترش و تشکیل حباب، انقباض حباب پشت پرتابه و در نهایت فروپاشی حباب. همان طور که پرتابه در عمق آب پایین می رود به سیال پیرامون خود در جهت شعاعی نیرو وارد کرده و مومنتوم خود را به آن منتقل می کند. اما این انبساط با مقاومت فشار هیدرواستاتیکی سیال روبه رو می شود. سپس جهت جریان شعاعی معکوس شده و سبب انقباض و در نهایت فروپاشی حباب می گردد. فروپاشی تا لحظه جدایش حباب شتاب می گیرد و سرانجام در این لحظه (۲۲۵ میلی ثانیه) حباب به دو قسمت مجزا تقسیم می شود. حباب جدا شده بالایی همچنان منقبض شده و به سمت سطح آب پیش می رود. اما حباب پایینی به پرتابه چسبیده و با آن حرکت می کند. در شکل (۴)، از مقایسه نتایج مدل سازی عددی با نتایج شبیه سازی آزمایشگاهی ملاحظه می گردد که نحوه شکل گیری حباب، رشد و جدایش آن (انبساط و انقباض) در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

نتایج مدل سازی عددی



نتایج شبیه سازی آزمایشگاهی





شکل ۴: مقایسه شکل‌گیری حباب هوا و زمان جدایش آن در مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی آزمایشگاهی

برای تعیین جابه‌جایی و سرعت حرکت پرتابه کروی در عمق آب در زمان‌های مختلف، ثابت واپاشی β پرتابه بر اساس شکل هندسی آن مطابق رابطه (۲۳) تعیین می‌گردد:

$$\beta = \frac{\pi \rho_w R_0^2 C_d}{2m_p} \quad (23)$$

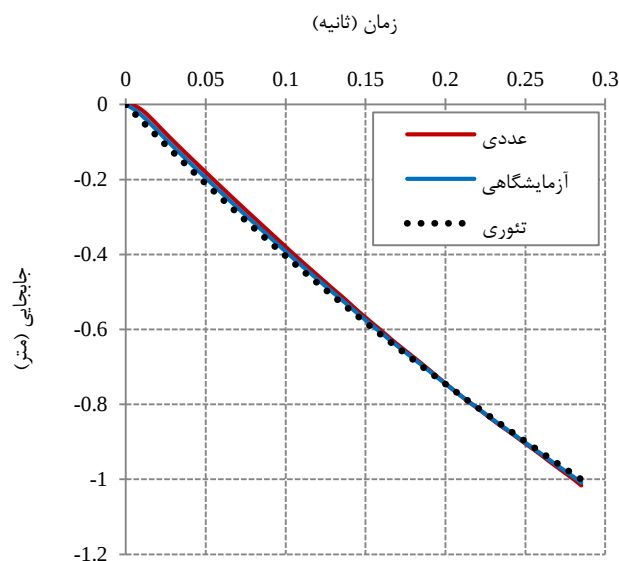
که در آن ρ_w چگالی جرمی آب، R_0 شعاع پرتابه، C_d ضریب درگ آب و m_p جرم پرتابه است. با صرف نظر کردن از شتاب گرانش زمین و در نظر گرفتن ضریب درگ آب برای پرتابه کروی برابر ۰/۴۷، چگالی جرمی آب برابر 1000 kg/m^3 ، شعاع و جرم پرتابه به ترتیب برابر ۵ cm و $4/11 \text{ kg}$ ، جابه‌جایی پرتابه (Z_p) در عمق آب در زمان‌های مختلف مطابق رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$Z_p = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta v_0 t) \quad (24)$$

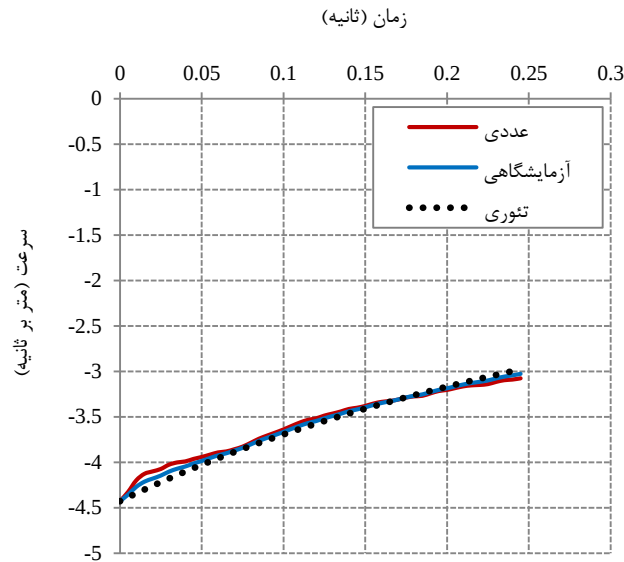
که در آن v_0 سرعت پرتابه در لحظه برخورد با سطح آب برابر $4/43 \text{ m/s}$ است. همچنین سرعت پرتابه (v_p) در عمق آب در زمان‌های مختلف مطابق رابطه (۲۵) تعیین می‌گردد:

$$\frac{v_p}{v_0} = \frac{1}{1 + \beta v_0 t} \quad (25)$$

در شکل‌های (۵) و (۶)، نتایج مدل‌سازی عددی مربوط به تغییرات جابه‌جایی و سرعت پرتابه کروی در عمق آب بر حسب زمان، با نتایج تئوری مقایسه گردیده است. همان‌طور که در این نمودار ملاحظه می‌شود، نتایج حل عددی همخوانی مناسبی با نتایج تئوری و آزمایشگاهی دارد.



شکل ۵: مقایسه نمودار جابه‌جایی - زمان پرتابه کروی در عمق آب حاصل از نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی با نتایج تئوری



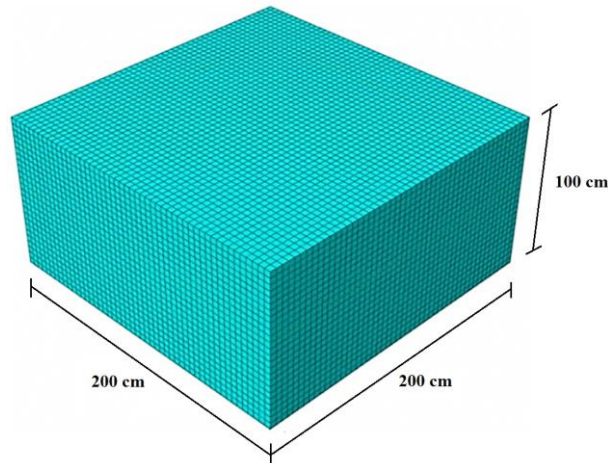
شکل ۶: مقایسه نمودار سرعت - زمان پرتابه کروی در عمق آب حاصل از نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی با نتایج تئوری

۷- مواد و روش‌ها

جهت کاهش استهلاک سرعت کوبه توسط آب در هنگام حرکت در عمق آن و به عبارتی کاهش مقاومت آب در برابر قرق شدن کوبه که به صورت نیروی بازدارنده در جهت خلاف حرکت کوبه به کف آن اعمال می‌گردد استفاده از کوبه مشبک با تعداد و ابعاد مناسب سوراخ توصیه می‌شود. این سوراخ‌ها از لحاظ تعداد و ابعاد باید طوری طراحی شوند که اولاً مقاومت آب را در برابر حرکت کوبه در هنگام برخورد با سطح آزاد آب و قرق شدن در عمق آن کاهش داده و ثانیاً فواصل بین سوراخ‌ها به اندازه‌ای باشد که پس از برخورد با بستر دریا و اعمال ضربه، انرژی لازم را جهت تراکم خاک بستر دریا به آن منتقل نماید.

۷-۱- تعریف مدل اوپلری

در شکل (۷)، تصویر شماتیک از دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و مش‌بندی محیط حل مسأله ورود کوبه‌ها به آب نشان داده شده است. در زمان صفر، ناحیه اوپلری به دو قسمت بالا و پایین تقسیم شده است. قسمت بالایی به عنوان فضای خالی و قسمت پایینی به عنوان آب ساکن در نظر گرفته شده است. ابعاد دامنه محاسباتی به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده است که با افزایش آن، نتایج عددی تغییر چندانی ندارند. در مدل‌سازی برخورد جسم صلب با سطح آزاد آب، ابعاد مدل المان محدود آب باید حداقل هشت برابر ابعاد جسم برخوردکننده باشد. لذا در مطالعه حاضر، دامنه اوپلری به صورت مکعب مستطیل با ابعاد $2 \times 2 \times 1$ متر مدل‌سازی شده است. در تمامی مدل‌های عددی، کوبه‌ها دقیقاً مماس بر سطح آب قرار داده شده و سرعت کوبه‌ها در لحظه برخورد با سطح آب، بر طبق معادله سقوط آزاد اجسام به آنها اعمال می‌گردد. کوبه‌ها می‌تواند آزادانه در تمام جهات با شش درجه آزادی حرکت نماید. برای تعریف ماده آب در روش کوپل اوپلری - لاگرانژی از معادله حالت Us-Up استفاده شده است. این معادله حالت برای شبیه‌سازی جریان ناویر - استوکس، زمانی که آشفتگی جریان ناچیز باشد کارایی دارد. در مسائلی که اثر برخورد ضربه ناشی از جسم صلب بر آب بررسی می‌گردد، عمده نیروی وارد بر جسم به صورت فشاری است. لذا با تقریب مناسب می‌توان این معادله حالت را جهت بررسی اثر ضربه اجسام بر آب، مورد استفاده قرار داد. مشخصات هندسی و خواص فیزیکی محیط آبی از قبیل ابعاد و هندسه مدل، چگالی جرمی آب، سرعت صوت در آب، ویسکوزیته دینامیکی آب و اندازه المان‌های مش‌بندی در کلیه مدل‌ها یکسان فرض شده و پارامترهای مذکور مطابق جدول (۱) می‌باشد. اندازه المان‌های مش‌بندی اوپلری برای محیط آبی مدل‌سازی شده جهت تسریع زمان آنالیز برابر $2/5$ سانتی‌متر فرض شده است که با این ابعاد، تعداد 41600 المان برای مش‌بندی محیط آبی حاصل شده است.



شکل ۷: مشخصات هندسی و ابعاد مش بندی محیط آبی مدل سازی شده از شرایط دریا

جدول ۱: مشخصات هندسی و خواص فیزیکی مدل اوپلری

نوع سیال	ابعاد مدل (m)	دما سیال (C°)	چگالی جرمی (γ) (Kg/m ³)	سرعت صوت (C ₀) (m/sec)	ویسکوزیته دینامیکی (ηw) (Kgs/m ²)	ثابت ماده در معادله حالت گرانزین (r)	ضریب ثابت در معادله سرعت شوک (S)
آب	۲×۲×۱	۲۰	۱۰۰۰	۱۴۵۰	۰/۰۰۱	۰	۰

۷-۲- شرایط مرزی

مرزهای طرفین مدل سه بعدی اوپلری از نوع مرزهای جاذب موج انتخاب شد تا موج انتشار یافته در اثر برخورد کوبه با سطح آب، پس از رسیدن به این مرزها مجدداً به دامنه محاسباتی برگشت نکرده و توسط این مرزها جذب شود. این شرط مرزی، توسط روابط (۲۶) و (۲۷) بیان می گردد (فروزانی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$dp - pcdu = 0 \quad (26)$$

$$\frac{dx}{dt} = -c \quad (27)$$

در این روابط ρ چگالی، c سرعت صوت در سیال، p فشار، u سرعت عمود بر موج و x راستای عمود بر مرز است.

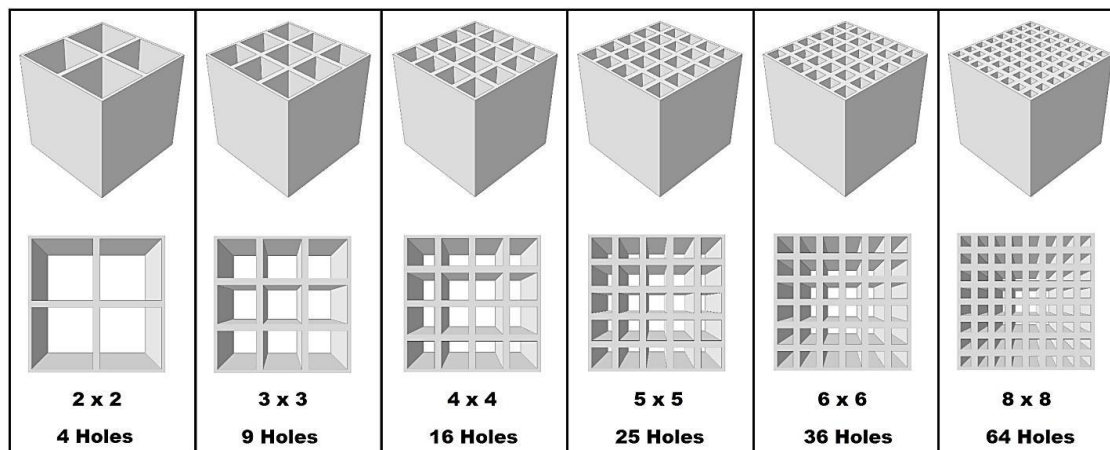
۷-۳- تعریف مدل لاگرانژی

به منظور بررسی تاثیر ابعاد و تعداد سوراخ ها در کوبه مشبک بر سرعت حرکت آن در عمق آب، یک کوبه مکعبی شکل به ابعاد بیرونی $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر را طوری در نظر می گیریم که از ارتفاع ۱ متری بالای سطح آزاد آب با سرعت اولیه صفر متر بر ثانیه رها شده و در لحظه برخورد با سطح آب به سرعت ثانویه برابر $4/43 \text{ m/s}$ دست یابد. این کوبه با تعداد سوراخ های متغیر شامل ۴، ۹، ۱۶، ۲۵، ۳۶ و ۶۴ سوراخ طراحی شده است که هر کوبه بسته به تعداد سوراخ های آن دارای جرم و ممان اینرسی متفاوتی می باشد. فواصل بین سوراخ ها در تمامی کوبه های مشبک برابر $0/5$ سانتی متر و ضخامت جداره پیرامونی آنها $0/25$ سانتی متر در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح کوبه ها از قبیل نوع مصالح، چگالی جرمی، مدول یانگ، نسبت پواسون در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات مصالح کوبه های مشبک سوراخ دار

نوع مصالح	چگالی جرمی (γ) (Kg/m ³)	مدول یانگ (E) (Kg/m ²)	نسبت پواسون (ν)
فولاد	۷۸۵۰	$2/1 \times 10^{10}$	۰/۳

در شکل ۸، آرایش سوراخ‌های کوبه‌های مکعبی مشبک مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. مشخصات هندسی هر یک از این کوبه‌ها شامل ابعاد بیرونی، تعداد، آرایش و ابعاد سوراخ‌ها، ضخامت و فواصل بین سوراخ‌ها و جرم و ممان اینرسی کوبه مطابق جدول (۳) می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش ابعاد سوراخ‌ها، مساحت سطح برخورد کوبه با سطح آزاد آب و مجموع مساحت جداره سوراخ‌ها کاهش می‌یابد. جهت کاهش زمان تحلیل و تسریع در عملیات و همچنین به علت تاثیر ناچیز افزایش تعداد المان‌های مش‌بندی بر نتایج حاصل، این اندازه برای تمامی کوبه‌ها برابر ۰/۰۵ متر در نظر گرفته شده است که با توجه به تفاوت اشکال کوبه‌ها تعداد المان‌های مش‌بندی هر کوبه متفاوت می‌باشد.



شکل ۸: آرایش سوراخ‌های کوبه‌های مکعبی مشبک

جدول ۳: مشخصات هندسی کوبه‌های مکعبی مشبک سوراخ‌دار

ابعاد بیرونی کوبه (cm)	تعداد سوراخ‌ها	آرایش سوراخ‌ها	جرم کوبه (Kg)	مساحت جان (cm ²)	ضخامت جدار (cm)	ابعاد سوراخ‌ها (cm)	فاصله بین سوراخ‌ها (cm)	مجموع مساحت سوراخ‌ها (cm ²)	مجموع مساحت جداره داخلی سوراخ‌ها (cm ²)	ممان اینرسی (cm ⁴)
۱۰×۱۰×۱۰	۴	۲×۲	۱/۴۹۱۵	۱۹	۰/۲۵	۴/۵	۰/۵	۸۱	۷۲۰	۱۹۰/۳۹۵۸
	۹	۳×۳	۲/۱۸	۲۷/۷۵		۲/۸۳۳		۷۲/۲۵	۱۰۲۰	۲۴۹/۴۲۷۷
	۱۶	۴×۴	۲/۸۲۶	۳۶		۲		۶۴	۱۲۸۰	۳۱۲
	۲۵	۵×۵	۳/۴۳۴۳	۴۳/۷۵		۱/۵		۵۶/۲۵	۱۵۰۰	۳۷۲/۸۷۶۵
	۳۶	۶×۶	۴/۰۰۳۵	۵۱		۱/۱۶۷		۴۹	۱۶۸۰	۴۴۰/۸۱۲۷
	۶۴	۸×۸	۵/۰۲۴	۶۴		۰/۷۵		۳۶	۱۹۲۰	۵۳۶/۳۳۳۳

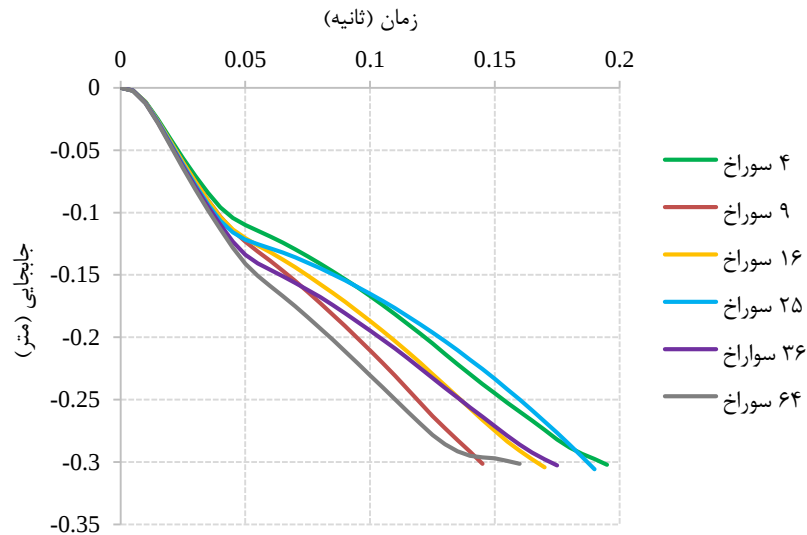
۸- نتایج و بحث

۸-۱- تاثیر تعداد و ابعاد سوراخ‌های کوبه بر جابجایی و سرعت آن در عمق آب

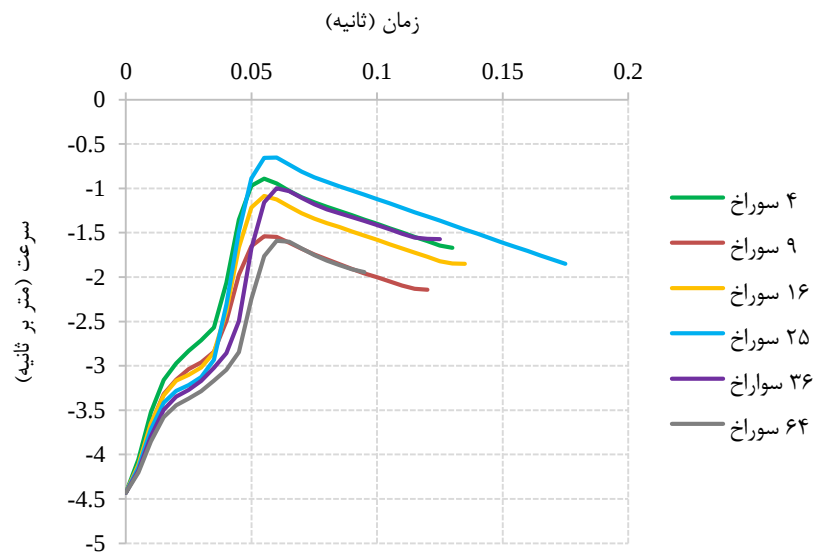
عوامل متعددی از قبیل شکل و هندسه کوبه، جرم، ممان اینرسی و سرعت برخورد کوبه با سطح آزاد آب و همچنین مقاومت آب و اصطکاک بین آب و جداره‌های کوبه، بر حرکت آن در عمق آب تاثیرگذار است. همان‌طور که می‌دانیم وقتی جسمی وارد آب می‌شود از جرم آن به اندازه آب هم حجمش کاسته خواهد شد. لذا در طراحی کوبه‌ها باید جرم کوبه را طوری در نظر بگیریم که بر مقاومت آب غلبه نماید. مقاومت آب معمولاً به دو حالت بر کوبه در حال حرکت در عمق آن اعمال می‌گردد. حالت اول به صورت نیروی اصطکاکی بین آب و جداره‌های کوبه بروز می‌نماید و حالت دوم به صورت نیروی بازدارنده و رو به بالا بر کف کوبه اعمال می‌شود. ممان اینرسی کوبه متاثر از شکل هندسی و جرم آن می‌باشد. بنابراین اشکال مختلف کوبه، ممان اینرسی‌های متفاوتی دارند. از طرفی هر چه جرم کوبه بیشتر باشد ممان اینرسی آن بیشتر خواهد بود. لذا به طور کلی دو عامل

جرم کوبه و مقاومت آب، از مهمترین عوامل حرکت کوبه‌ها در عمق آب به شمار می‌روند که عامل اول باید متناسب با سرعت مورد نظر و انرژی لازم در هنگام برخورد با بستر دریا در نظر گرفته شود و عامل دوم باید تا حد امکان به حداقل مقدار ممکن کاهش پیدا کند.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودار جابه‌جایی - زمان و سرعت - زمان کوبه‌های مشبک با آرایش سوراخ متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد این نمودار برای کوبه متشکل از ۹ سوراخ با آرایش 3×3 تقریباً به صورت خطی بوده و این کوبه نسبت به سایر کوبه‌ها با آرایش و تعداد سوراخ‌های متفاوت، در زمان کمتری از لحظه برخورد با سطح آزاد آب به بستر مدل در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری می‌رسد. این در حالی است که نمودار جابه‌جایی - زمان برای سایر کوبه‌ها با آرایش و تعداد سوراخ‌های متفاوت، به صورت منحنی بوده و به همین دلیل مدت زمان لازم جهت حرکت در عمق آب از لحظه برخورد با سطح آزاد آن تا رسیدن به بستر مدل، در این کوبه‌ها بیشتر می‌باشد. کوبه ۴ سوراخ با آرایش 2×2 علی‌رغم داشتن بزرگترین ابعاد سوراخ نسبت به سایر کوبه‌ها، بیشترین زمان را از لحظه برخورد با سطح آزاد آب تا رسیدن به بستر مدل صرف می‌نماید. این در حالی است که به نظر می‌رسد ابعاد بزرگتر سوراخ منجر به کاهش مقاومت آب در برابر حرکت کوبه خواهد شد و به علت عبور آب از سوراخ‌های کوبه و کاهش سطح تماس بین آب و کف مشبک آن، این کوبه می‌بایست با سرعت بیشتری در عمق آب حرکت نموده و در زمان کمتری به بستر مدل برسد. همان‌طور که می‌دانیم افزایش ابعاد سوراخ‌ها منجر به کاهش جرم کوبه می‌شود و در داخل آب باید کاهش جرم ناشی از شناوری کوبه را نیز اضافه نماییم که معادل آب هم حجم کوبه است. در کوبه ۴ سوراخ با آرایش 2×2 به علت حجم زیاد فضاهای توخالی ناشی از سوراخ‌های با ابعاد بزرگ، جرم کوبه برابر با $1/4915$ کیلوگرم می‌باشد که از جرم این کوبه پس از ورود به داخل آب معادل آب هم حجم آن نیز کاسته خواهد شد. لذا جرم کوبه در هنگام قرق شدن در عمق آب نمی‌تواند بر مقاومت آب غلبه نماید. از این رو کوبه مذکور علی‌رغم داشتن بزرگترین ابعاد سوراخ نسبت به سایر کوبه‌ها، زمان بیشتری را از لحظه برخورد با سطح آزاد آب تا رسیدن به بستر مدل صرف می‌نماید. در کوبه ۹ سوراخ با آرایش 3×3 و جرم $2/18$ کیلوگرم، به علت تناسب بین جرم کوبه و مساحت سوراخ‌ها، مقاومت بازدارنده آب که به صورت نیروی رو به بالا بر کف کوبه اعمال می‌گردد، به حداقل مقدار ممکن رسیده و کوبه با طی زمان کمتری نسبت به سایر کوبه‌ها به بستر مدل می‌رسد که در این امر جرم مناسب کوبه نقش تعیین‌کننده‌ای در سرعت قرق شدن آن دارد. در کوبه ۱۶ سوراخ با آرایش 4×4 تناسب بین جرم کوبه و مساحت سوراخ‌ها دچار تزلزل شده و به علت کاهش مساحت سوراخ‌ها، تاثیر مقاومت آب بر کف کوبه در هنگام حرکت در عمق آن بیشتر می‌شود. این در حالی است که کاهش مساحت سوراخ‌ها منجر به افزایش جرم کوبه برابر $2/826$ کیلوگرم شده است؛ اما در کوبه مذکور این افزایش جرم نمی‌تواند بر مقاومت آب غلبه نماید. از این رو زمان قرق شدن کوبه ۱۶ سوراخ با آرایش 4×4 نسبت به کوبه ۹ سوراخ با آرایش 3×3 افزایش می‌یابد. در کوبه ۲۵ سوراخ با آرایش 5×5 و جرم $3/4343$ کیلوگرم، تاثیر مقاومت آب بر حرکت کوبه در عمق آن همچنان ادامه دارد و افزایش جرم کوبه به علت کاهش مساحت سوراخ‌ها، باز هم نمی‌تواند بر مقاومت بازدارنده آب که به صورت نیروی رو به بالا بر کف کوبه اعمال می‌شود غلبه نماید. از این رو با افزایش جان مشبک کوبه، تاثیر نیروی بازدارنده آب بر کف کوبه در هنگام حرکت در عمق آب افزایش می‌یابد و با استهلاک سرعت کوبه در هنگام برخورد با سطح آزاد آب و حرکت در عمق آن، این کوبه با طی زمان بیشتری به بستر مدل برخورد می‌نماید. در کوبه ۳۶ سوراخ با آرایش 6×6 علی‌رغم کاهش مساحت سوراخ‌های کوبه و افزایش جان مشبک آن، تاثیر نیروی بازدارنده آب بر کف کوبه در هنگام حرکت در عمق آب کاهش می‌یابد و جرم کوبه برابر $4/035$ کیلوگرم که به واسطه کاهش مساحت سوراخ‌ها افزایش یافته است با غلبه بر مقاومت آب منجر به کاهش مدت زمان قرق شدن کوبه در عمق آب از لحظه برخورد با سطح آزاد آب تا رسیدن به بستر مدل می‌شود. تاثیر افزایش جرم کوبه بر کاهش مدت زمان قرق شدن آن در عمق آب، در کوبه ۶۴ سوراخ با آرایش 8×8 مشهودتر است. به طوری که این کوبه با مساحت سوراخ‌های کمتر نسبت به سایر کوبه‌ها با تعداد و آرایش سوراخ مذکور، جرمی برابر با $5/024$ کیلوگرم دارد و علی‌رغم ابعاد کوچکتر سوراخ‌ها و افزایش جان مشبک کوبه که عامل تشدید مقاومت بازدارنده آب وارد بر کف کوبه می‌باشد. به واسطه جرم زیاد کوبه که بر مقاومت بازدارنده آب که به صورت نیروی رو به بالا بر کف مشبک کوبه اعمال می‌گردد غلبه نموده است، مدت زمان حرکت آن در عمق آب از لحظه برخورد با سطح آزاد آب تا رسیدن به بستر مدل، کاهش می‌یابد.



شکل ۹: نمودار جابه‌جایی - زمان کوبه‌های مشبک با آرایش سوراخ متفاوت



شکل ۱۰: نمودار سرعت - زمان کوبه‌های مشبک با آرایش سوراخ متفاوت در عمق آب

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، در این مقاله، ورود کوبه‌های مشبک ۴، ۹، ۱۶، ۲۵، ۳۶ و ۶۴ سوراخ به ترتیب با آرایش ماتریسی ۳×۳، ۴×۴ و ۵×۵ به آب و تاثیر تعداد، ابعاد و آرایش سوراخ‌های کوبه بر سرعت برخورد آن با بستر مدل به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مدل‌سازی عددی حرکت پرتابه در آب و نحوه تغییر الگوی جریان در سطح آب از الگوریتم کوپل اویلرین - لاگرانژین استفاده شده است و با شبیه‌سازی تماس اویلرین - لاگرانژین در نرم‌افزار آباکوس، جسم لاگرانژی (پرتابه) با ماده اویلری (آب) برهم‌کنش می‌نماید. به منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های عددی، ابتدا مسئله ورود به آب یک پرتابه کرومی به صورت عددی مدل‌سازی و سپس به مقایسه مکانیزم حرکت پرتابه در عمق آب و نحوه تشکیل حباب هوا در پشت آن و همچنین زمان و عمق جدایش حباب از انتهای پرتابه با نتایج آزمایشگاهی و تئوری پرداخته شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کوبه ۹ سوراخ نسبت به سایر کوبه‌ها با آرایش و تعداد سوراخ‌های متفاوت، در زمان کمتری از لحظه برخورد با سطح آزاد آب به بستر مدل در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری می‌رسد. در کوبه‌های ۱۶ و ۲۵ سوراخ تناسب بین جرم کوبه و مساحت سوراخ‌ها دچار تزلزل شده و به علت کاهش مساحت سوراخ‌ها، تاثیر مقاومت آب بر کف کوبه در هنگام حرکت در عمق آن بیشتر می‌شود.

تاثیر افزایش جرم کوبه بر کاهش مدت زمان قرق شدن آن در عمق آب، در کوبه ۶۴ سوراخ مشهودتر است. به طوری که این کوبه با مساحت سوراخ‌های کمتر نسبت به سایر کوبه‌ها، جرم بیشتری دارد و علی‌رغم ابعاد کوچکتر سوراخ‌ها و افزایش جان مشبک کوبه که عامل تشدید مقاومت بازدارنده آب وارد بر کف کوبه می‌باشد، به واسطه جرم زیاد کوبه، بر مقاومت بازدارنده آب که به صورت نیروی رو به بالا بر کف مشبک کوبه اعمال می‌گردد غلبه نموده و مدت زمان حرکت آن در عمق آب از لحظه برخورد با سطح آزاد آب تا رسیدن به بستر مدل، کاهش می‌یابد.

۱۰- سپاسگزاری

نویسندگان این پژوهش مراتب قدردانی و سپاس خود را از سازمان نظام مهندسی ساختمان استان گیلان و شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی بابت حمایت‌های معنوی خود اعلام می‌دارند. در نهایت از تمامی اشخاص حقیقی و حقوقی که ما در انجام این پژوهش یاری نمودند، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

منابع

- محمدرضا عرفانیان، محمد مقیمان، (۱۳۹۴). مطالعه عددی و آزمایشگاهی مسئله ورود به آب یک پرتابه و بررسی اثر سرعت برخورد بر زمان و عمق جدایش حباب، ماهنامه مهندسی مکانیک مدرس، ۱۵(۲)، ۵۳-۶۰.
- محمدحسین تقی زاده ولدی، محمدرضا عطرچیان، عطا جعفری شالکوهی، الهام چاوشی، (۱۳۹۹). مطالعه عددی اثر شکل هندسی و ارتفاع سقوط پرتابه بر سرعت حرکت در آب به روش کوپل اوپلری-لاگرانژی، مجله مکانیک سیالات و آیرودینامیک، ۸(۱)، ۲۵-۴۲.
- محمدامین اکبری، جلال محمدی، جلیل فریدونی، (۱۴۰۰). مدل سازی عددی ورود به آب مایل یک پرتابه ی پر سرعت استوانه ای و بررسی اثر حرکت چرخش محوری بر رفتار دینامیکی آن، نشریه هیدروفیزیک، ۶(۲)، ۱۳۹-۱۲۷.
- محمدجواد رمضانی، میثم محمدی، (۱۴۰۱). بررسی عددی و تجربی خیز چندلایه های کامپوزیتی ناشی از ضربه سقوط آزاد پرتابه های مختلف، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۳۳(۲)، ۴۱-۵۴.
- نجمه خضراییان، ناصر دشتیان گرامی، (۱۳۹۴). شبیه سازی عددی برخورد پرتابه های سرعت پایین با سطح آب، نشریه شبیه سازی و تحلیل تکنولوژی های نوین در مهندسی مکانیک، ۸(۲)، ۱۳۶-۱۱۷.
- حسین خدارحمی، حمیدرضا خلجی، رضا محسنی، (۱۳۸۴). تحلیل عددی و تجربی شکل گیری و نفوذ پرتابه های شکل یافته از انفجاری، فصلنامه مکانیک هوافضا، ۱(۲)، ۹۵.
- Akbari, M. A., Mohammadi, J., & Fereidooni, J. (2021). A dynamic study of the high-speed oblique water entry of a stepped cylindrical-cone projectile. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43, 1-15.
- Aristoff, J. M., Truscott, T. T., Techet, A. H., & Bush, J. W. (2010). The water entry of decelerating spheres. *Physics of fluids*, 22(3).
- Bai, X. D., Zhang, W., & Wang, Y. (2020). Deflected oscillatory wake pattern behind two side-by-side circular cylinders. *Ocean Engineering*, 197, 106847.
- Bo, H., Yang, B., Du, C. J., Dai, H., & Liu, L. W. (2022). Influence rule of projectile density on the characteristics of high-speed water-entry cavity. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 15(6), 1901-1912.
- Chen, T., Huang, W., Zhang, W., Qi, Y., & Guo, Z. (2019). Experimental investigation on trajectory stability of high-speed water entry projectiles. *Ocean Engineering*, 175, 16-24.
- Epps, B. P., Truscott, T. T., Lafoy, R. R., & Techet, A. H. (2009, November). Resolving the unsteady deceleration and forces after water entry by low mass-ratio spheres. In *APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts* (Vol. 62, pp. AG-001).
- Forouzani, H., Saranjam, B., Kamali, R. and Abdollahi-far, A., (2016), Elasto-plastic time dependent impact analysis of high speed projectile on water surface, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 3, p. 281-298.

- Guo, Z. T., Zhang, W., & Wang, C. (2012). Experimental and theoretical study on the high-speed horizontal water entry behaviors of cylindrical projectiles. *Journal of Hydrodynamics*, 24(2), 217-225.
- Li, D., Zhao, X., Kong, D., Shentu, J., Wang, G., & Huang, B. (2020). Numerical investigation of the water entry of a hydrophobic sphere with spin. *International Journal of Multiphase Flow*, 126, 103234.
- Li, Y., Zong, Z., & Sun, T. (2021). Crushing behavior and load-reducing performance of a composite structural buffer during water entry at high vertical velocity. *Composite Structures*, 255, 112883.
- Lu, L., Wang, C., Li, Q., & Sahoo, P. K. (2021). Numerical investigation of water-entry characteristics of high-speed parallel projectiles. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 450-465.
- Lu, L., Wang, C., Li, Q., & Sahoo, P. K. (2021). Numerical investigation of water-entry characteristics of high-speed parallel projectiles. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 450-465.
- Schouveiler, L., Brydon, A., Leweke, T., & Thompson, M. C. (2004). Interactions of the wakes of two spheres placed side by side. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 23(1), 137-145.
- Schwalbach, D. S., Shepard, T., Kane, S., Siglin, D., Harrington, T., & Abraham, J. P. (2014). Effect of impact velocity and mass ratio during vertical sphere water entry. *Dev. Appl. Oceanic Eng.*, 3, 55-62.
- Sooraj, P., Khan, M. H., Sharma, A., & Agrawal, A. (2019). Wake analysis and regimes for flow around three side-by-side cylinders. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 104, 76-88.
- Spinosa, E., & Iafrati, A. (2021). Experimental investigation of the fluid-structure interaction during the water impact of thin aluminium plates at high horizontal speed. *International Journal of Impact Engineering*, 147, 103673.
- Sun, T., Wang, H., Zou, L., Zong, Z., & Li, H. (2019). Experimental study on the cavity dynamics of oblique impact of sphere on a viscous liquid floating on water. *Ocean Engineering*, 194, 106597.
- Wang, Z., Feng, P., Liu, G., Zhao, X., & Qin, X. (2022). Load and motion behaviors of ogive-nosed projectile during high-speed water entry with angle of attack. *Ocean Engineering*, 266, 112937.
- Xia, S., Wei, Y., Wang, C., Cao, W., & Hu, X. (2023). Numerical investigation of the high-speed vertical water entry of a cylindrical shell. *Physics of Fluids*, 35(3).
- Yao E., Wang H., Long Pan., Wang X. and Woding R., (2014), Vertical Water-Entry of Bullet-Shaped Projectiles, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol. 2, p. 323-334.
- Yu, Y., Shi, Y., Pan, G., Chen, X., & Gao, S. (2022). Effect of asymmetric nose shape on the cavity and mechanics of projectile during high-speed water entry. *Ocean Engineering*, 266, 112983.