



Review Article

A review on the development of smooth particle hydrodynamic method and its application in marine structures

Omid Karbasi^{1*}

1-* master graduated in Coastal engineering of ports and marine structures, Faculty of Civil Engineering and Environment, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 04 April 2024; Revised: 06 May 2024; Accepted: 06 May 2024; Published: 22 August 2024

Abstract

Numerical studies provide researchers with favorable facilities for research to investigate various cases. In conventional modeling, there are two approaches, Lagrangian and Eulerian. In the Eulerian approach with fixed meshing of the environment, the fluid flow enters the environment and then various variables are investigated, but in the Lagrangian approach, the mesh is placed on the fluid particles and this causes the movement of the mesh along with the fluid. Smooth particle hydrodynamics (SPH) is a Lagrangian approach that has been favored by researchers in various engineering fields in recent years. This approach, which is based on kernel function interpolation, can consider compressible and incompressible fluid. The development of this method has accelerated more than before in view of removing the limitations and errors in its modeling in the past years. In this process, improved solvers and methods have been presented, including SPHysics and DualSPHysics. In the field of marine structures engineering, the investigation of the hydraulic response of breakwaters such as the overtopping and reflection coefficient and the force acting on breakwaters and pipelines is one of the application cases of smooth particle hydrodynamics. By improving the performance of this method, it is now possible to simulate porous environments, which creates a powerful tool in the hands of researchers. In this article, in order to better understand the limitations and possibilities of this method, its development in recent years has been examined and its applications in the fields related to marine structures have been reviewed in order to identify its weaknesses and strengths and its uses, other researches To be carried out in the continuation of research processes.

Keywords: Smooth particle hydrodynamics, breakwater, floating breakwaters, modified smooth particle hydrodynamics, overtopping, reflection coefficient

Cite this article as Karbasi, O . (2024). A review on the development of smooth particle hydrodynamic method and its application in marine structures. Civil and Project journal, 6(6), 32-42. doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2024.455814.1285>

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: karbasiomid@modares.ac.ir



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

مروری بر توسعه روش هیدرودینامیک ذرات هموار و کاربرد آن در سازه‌های دریایی امید کرباسی^{*}

^{*}۱- کارشناس ارشد مهندسی سواحل بندر و سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۶ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ شهریور ۱۴۰۳

چکیده

مطالعات عددی امکانات مطلوبی را جهت پژوهش در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد تا به وسیله‌ی آن به بررسی موارد مختلف بپردازند. در مدل‌سازی‌های مرسوم دو رویکرد لاگرانژی و اویلری وجود دارد. در رویکرد اویلری با شبکه‌بندی ثابت محیط، جریان سیال به محیط وارد شده و سپس متغیرهای مختلف را مورد بررسی قرار می‌گیرد اما در رویکردی لاگرانژی شبکه بر روی ذرات سیال قرار می‌گیرد و این موضوع باعث حرکت شبکه به همراه سیال می‌شود. هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) رویکردی لاگرانژی است که در سال‌های گذشته مورد اقبال پژوهش‌گران حوزه‌های مختلف مهندسی قرار گرفته است. این رویکرد که بر مبنای درون‌یابی تابع کرنل بنیان گذاشته شده است، می‌تواند سیال تراکم‌ناپذیر و تراکم‌ناپذیر را در نظر بگیرد. توسعه‌ی این روش با نظر بر رفع محدودیت‌ها و خطاهای موجود در مدل‌سازی‌های آن در سال‌های گذشته شتاب بیش‌تری نسبت به قبل گرفته است. در این روند حل‌گرها و روش‌های بهبودیافته‌ای ارائه شده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به SPHysics و DualSPHysics اشاره کرد. در گرایش مهندسی سازه‌های دریایی نیز بررسی پاسخ هیدرولیکی موج‌شکن‌ها مانند روگذری و ضریب انعکاس و نیروی وارد بر موج‌شکن و خطوط لوله از جمله موارد کاربرد هیدرودینامیک ذرات هموار است. با بهبود عملکرد این روش، اکنون با استفاده از آن می‌توان محیط‌های متخلخل را نیز شبیه‌سازی کرد که باعث به وجود آمدن ابزاری قدرتمند در دست پژوهشگران می‌شود. در این مقاله به منظور فهم بهتر از محدودیت‌ها و امکانات این روش، توسعه‌ی آن در سال‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفته و موارد کاربرد آن در حوزه‌های مرتبط با سازه‌های دریایی مرور شده است تا با شناسایی نقاط ضعف و قوت و موارد استفاده آن، پژوهش‌های دیگری در ادامه‌ی روندهای پژوهشی صورت بگیرد.

کلمات کلیدی: هیدرودینامیک ذرات هموار، موج‌شکن، موج‌شکن‌های شناور، هیدرودینامیک ذرات هموار
اصلاح‌شده، روگذری، ضریب انعکاس

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: karbasiomid@modares.ac.ir

۱- مقدمه

شبیه‌سازی عددی جریان سیالات باعث گسترده‌تر شدن پژوهش‌ها در حوزه‌هایی مانند سازه‌های دریایی، سازه‌های هیدرولیکی و مواردی که در آن‌ها سیال حضور مهمی دارد، می‌شود. مدل‌های عددی موجود بر دو رویکرد اوپلری و لاگرانژی مبتنی هستند. رویکرد اوپلری با شبکه‌بندی ثابت محیط، جریان سیال را به آن وارد کرده و سپس متغیرهای مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهد. در رویکرد لاگرانژی اما شبکه بر روی ذرات سیال قرار می‌گیرد و این موضوع باعث حرکت شبکه به همراه سیال می‌شود. نرم‌افزارهای تجاری متداول در حل عددی جریان مانند FLOW-3D بر پایه‌ی رویکردی اوپلری توسعه داده شده‌اند. هر کدام از این رویکردها نقاط ضعف و قوتی دارند. به عنوان مثال در رویکرد اوپلری می‌بایست به منظور پوشش تغییرات صورت گرفته، محیط وسیع‌تری را شبکه‌بندی کرد در صورتی که در رویکرد لاگرانژی با توجه به قرار گرفتن شبکه بر روی ذرات سیال عملاً چنین نیازی مرتفع می‌گردد. از طرف دیگر در روش اوپلری به واسطه‌ی نوع شبکه‌بندی و حل معادلات حاکم برای هر سلول از شبکه‌بندی، پایداری و دقت به ابعاد شبکه وابسته است. در رویکرد لاگرانژی با توجه به وابستگی روابط شکل گرفته به سیال، تغییر شکل‌های بزرگ می‌تواند خطای زیادی در پاسخ‌ها ایجاد کند. در رویکرد لاگرانژی دامنه‌ی محاسباتی به ذراتی تقسیم شده و در هر گام زمانی با حل معادلات حاکم متغیرهای مختلفی چون سرعت محاسبه می‌شود. روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۱ (SPH)، یک روش حل عددی با رویکرد لاگرانژی و بدون نیاز به شبکه است که در سال‌های گذشته با اقبال پژوهش‌گران مواجه شده است. (Poullak et al., 2023) دسته‌بندی توسعه‌ی روش SPH را به این صورت انجام داده‌اند. مدل اول توسعه‌یافته‌ی SPH عبارت است از CSPH و WSPH. در این روش‌ها سیال به صورت تراکم‌پذیر و یا با تراکم‌پذیری کم در نظر گرفته می‌شود. مدل دوم توسعه‌یافته‌ی SPH نیز عبارت است از ISPH^۴ که در آن سیال به صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. روش هیدرودینامیک ذرات هموار بر مبنای درون‌یابی تابع کرنل بنیان گذارده شده است. معادلات گسسته شده ناویر-استوکس برای هر ذره در مکان خاص خود بر اساس مشخصات فیزیکی ذرات هم‌جوار، به صورت محلی، انتگرال‌گیری می‌شود. مشخص کردن هم‌جواری ذرات به وسیله‌ی تابع وزنی هموارساز، کرنل، صورت می‌پذیرد. کارکرد روش SPH به گزینش و ویژگی‌های تابع کرنل وابسته است. SPH ابتدا توسط (Gingold and Monaghan, 1977) ارائه شد. سپس (Monaghan, 1994) به شبیه‌سازی سطح آزاد به وسیله‌ی روش SPH پرداخت. در ادامه (Monaghan, 2005) تئوری و کاربرد روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) از زمان آغاز آن در سال ۱۹۷۷ را مورد بحث قرار داد. همچنین در این بررسی نقاط ضعف و قوت SPH مورد بررسی قرار گرفت. این فرآیند سپس در فعالیت پژوهشی سایر پژوهش‌گران ادامه داده شد. لازم به ذکر است که روش SPH با توجه به مزیت‌های شمرده شده برای آن در شاخه‌های مختلف علوم مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله‌ی آن می‌توان به گرایش سازه‌های دریایی از رشته‌ی مهندسی عمران اشاره کرد. در ادامه به مطالعات اخیر صورت گرفته بر روی این روش که منجر به توسعه و اصلاح آن شده، اشاره می‌شود.

۲- مطالعات انجام شده

در این بخش به پژوهش‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر که در آن از روش SPH استفاده شده و یا این روش را توسعه داده است، پرداخته می‌شود. روگذری امواج از عرشه‌ی سکوها و شناورها باعث آسیب به این سازه‌ها می‌شوند. این موضوع توسط (Gómez-Gesteira et al., 2004) مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش ابتدا صحت عملکرد روش SPH سنجیده شده و تفاوت رفتاری در بالا و پایین عرشه‌ی سکوها نشان داده شده است. (Touze et al., 2010) با استفاده از روش SPH برخورد امواج بر جسم شناور در آب را بررسی کردند و در نهایت پیش‌بینی‌های قابل قبولی از برخورد امواج را ارائه کردند. در ادامه‌ی این

¹ Smoothed-Particle Hydrodynamics

² Compressible SPH

³ Weekly Compressible SPH

⁴ Incompressible SPH

روند (Gómez-Gesteira et al., 2012) یک حل گر سطح آزاد سیال به نام SPHysics ارائه کردند. همچنین در این پژوهش طرح‌های مرحله‌ای مرتبه دوم همراه با شرایط مرزی به کار گرفته شده، ارائه شده که می‌توانند اجسام شناور را برای مطالعه برهمکنش سیال-سازه کنترل کنند. در پژوهش دوم (Gómez-Gesteira et al., 2012) به بررسی قابلیت‌های طرح ارائه شده‌شان پرداخته‌اند. در این پژوهش چندین مورد به صورت آزمایشی تست شده‌اند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به امواج ایجاد شده توسط زمین‌لغزش، شکست سد و تعامل ساختار-سازه اشاره کرد. (Skillen et al., 2013) تا مشکلات به وجود آمده برای برخورد موج با جسم را برای فشار مورد بررسی قرار داده و با ارائه پیشنهاد خود این مشکل را مرتفع سازند. (Domínguez et al., 2013) یک طرح SPH موازی انبوه را با استفاده از خوشه‌های ناهمگن واحدهای پردازش مرکزی (CPU) و واحدهای پردازش گرافیکی (GPU) توسعه دادند. در ادامه (Crespo et al., 2015) روش DualSPHysics را به عنوان یک برنامه‌ی هیدرودینامیک ذرات هموار شده برای حل مشکلات جریان سطح آزاد توسعه دادند. به منظور شبیه‌سازی تلاطم ناشی از حرکت مایعات (Gotoh et al., 2015) طرح‌های بهبود یافته مبتنی بر SPH تراکم‌پذیر را ارائه کرده‌اند. (Valizadeh et al., 2011) یک مدل لاگرانژی مبتنی بر حرکت ذرات که براساس روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده تراکم پذیر (SPH) تهیه شده است، ارائه کرده‌اند. این مدل قادر به شبیه‌سازی جریانهای سطح آزاد با تغییرات شدید در سطح آزاد است. مدل عددی ارائه شده به جای حل معادله پواسون برای به دست آوردن فشار، از معادله حالت و با در نظر گرفتن مقدار تراکم پذیری فشار را محاسبه می‌کند. در ادامه‌ی پژوهش‌های انجام شده (Akbari and Namin, 2013) یک مدل عددی برای شبیه‌سازی برهمکنش موج با ساختارهای متخلخل ارائه کرده‌اند. روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر در محیط متخلخل (ISPH) در این مطالعه به عنوان یک رویکرد ذرات بدون مش معرفی شده است که قادر به ردیابی موثر تغییر شکل بزرگ سطوح آزاد در یک سیستم مختصات لاگرانژی است. مدل توسعه‌یافته دو جریان سیال متخلخل و خالص را به‌طور همزمان با استفاده از یک معادله حل می‌کند که مشابه معادلات ناپایدار دو بعدی نایر-استوکس برای جریان‌های خارج از محیط متخلخل و معادله Forchheimer توسعه‌یافته برای جریان‌های داخل محیط متخلخل است. مرز رابط بین سیال خالص و محیط متخلخل به‌طور موثر با تکنیک ادغام SPH مدل‌سازی شده است. یک طرح نیمه‌ضمنی دو مرحله‌ای نیز برای حل فشار سیال که معیار تراکم‌ناپذیری سیال را برآورده کرده، استفاده شده است. مطابق نتایج ارائه شده در این پژوهش تطابق خوبی بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی از نظر جابه‌جایی سطح آزاد، نرخ روگذری و توزیع فشار وجود دارد. بر اساس این مطالعه، مدل ISPH روشی کارآمد برای شبیه‌سازی کاربردهای ساحلی با سازه‌های متخلخل است. (Akbari, 2014) روش ذرات متحرک اصلاح شده در محیط متخلخل (MMPP) را به منظور شبیه‌سازی برهمکنش جریان با ساختارهای متخلخل معرفی کرد. در این مطالعه با استفاده از مدل آشفتگی مقیاس ذرات فرعی (SPS)، مجموعه‌ای از معادلات برای کل حوزه محاسباتی معرفی شده و یک رفتار مرزی مناسب در بخش‌های رابط بین سیال و محیط متخلخل پیشنهاد شده است. مشابه روش هیدرودینامیکی ذرات هموار تراکم‌ناپذیر (ISPH)، یک طرح نیمه‌ضمنی دو مرحله‌ای قوی برای برآورده کردن معیار تراکم‌ناپذیری استفاده شده است. با استفاده از مدل معرفی شده می‌توان رژیم‌های جریان مختلف را از طریق سازه‌های متخلخل چند لایه با اشکال دلخواه شبیه‌سازی کرد و نیازی به اصلاح ضریب‌های کالیبراسیون نیست. بر اساس مطالعات انجام شده نتیجه‌گیری شده است که جریان آشفته به‌ویژه در فصل مشترک بین سیال آزاد و محیط متخلخل موضوع مهمی است و در نتیجه دقت مدل‌های لاگرانژی قبلی که مبتنی بر نادیده گرفتن اثر اغتشاش بودند را می‌توان با استفاده از مدل حاضر به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید. به علاوه ارضای معیارهای تداوم در مدل‌های SPH، لازم است چگالی ذرات مطابق با تخلخل آنها اصلاح شود.

در ادامه‌ی پژوهش‌های صورت گرفته (Meringolo et al., 2015) یک مدل هیدرودینامیک ذرات هموار با تراکم ضعیف دو بعدی را برای شبیه‌سازی بارهای موج و ویژگی‌های هیدرولیکی در موج شکن‌های حفره‌دار پیشنهاد می‌کنند. مدل‌سازی پیشنهادی با ارتباط گره‌های درون‌یابی بیشتر به یک ذره جامد به منظور امکان تعامل با ذرات سیال واقع در موقعیت‌های مختلف در حوزه محاسباتی تعریف می‌شود. اجرای حاضر با هدف غلبه بر معایب از نظر زمان CPU برای شبیه‌سازی SPH سنگین معرفی شده است. (Akbari, 2017) به منظور اصلاح مشکل خطای شتاب جریان در محاسبه‌ی روگذری امواج با روش SPH یک روش بهبودیافته ارائه کرده است. با استفاده از اصلاح معرفی شده، نوسانات غیرواقعی ذرات در مرز سطح آزاد را می‌توان به‌طور قابل توجهی کاهش داد و در عین حال دقت مدل را حفظ کرد. این بهبود می‌تواند برای هر دو روش SPH تراکم‌ناپذیر و کم‌تراکم‌پذیر

استفاده شود و اجرای آن آسان و از نظر محاسباتی نیز کارآمد است. موارد مختلف از جمله شکستن سد و روگذری موج در دیواره‌های دریایی عمودی به وسیله‌ی مدل اصلاح شده شبیه‌سازی شده است. بر اساس این مطالعه، مرز سطح آزاد را می‌توان با استفاده از اصلاح معرفی شده با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرد و در نتیجه مقادیر پیش‌بینی شده، به‌ویژه میزان محاسبه‌شده سرعت روگذری موج، قابل اعتمادتر می‌شوند. (Wen et al., 2018) یک مدل جریان متخلخل هیدرودینامیکی ذرات هموار سه‌بعدی برای برهم‌کنش موج با ساختارهای نفوذپذیر برای ارزیابی اثرات سه بعدی در اطراف ساختارهای ساحلی با مرزهای هندسی پیچیده توسعه دادند. به منظور مطالعه‌ی همزمان یک صفحه‌ی افقی غوطه‌ور در آب به صورت یک مبدل انرژی و یک موج‌شکن از نوع باز، (He et al., 2019) یک مدل عددی دوبعدی حل برهم‌کنش موج را با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر ضعیف (WCSPH) ساختند. (Akbari, 2019) برای حذف فاکتورهای کالیبراسیون در روش SPH، ضریب جابه‌جایی جدید را به صورت نظری بر اساس موقعیت ذرات قبل و بعد از جابجایی، بدون توجه به سایر متغیرها مانند سرعت، فشار، فواصل گام‌های زمانی و غیره استخراج کرده است. تنها ورودی مورد نیاز در این حالت موقعیت ذرات است. در این شرایط مسئله اصلی حفظ چگالی ذرات در موقعیت‌های به‌روزرشته آن‌هاست که به منظور حل این مسئله علاوه بر PST پیشنهادی، یک شاخص توزیع جدید (DI) برای اندازه‌گیری یکنواختی فضایی ذرات معرفی شده است. در ادامه تحقیقات، برخی از راهکارهای جدید نیز برای بهبود حرکات ذرات در نزدیکی مرز سطح آزاد مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در همه‌ی موارد بررسی شده، آرایش ذرات با استفاده از روش تغییر تغییر یافته بهبود یافته است. سپس (Akbari and Taherkhani, 2019) پاسخ یک موج‌شکن مرکب را در برابر امواج به صورت عددی با استفاده از مدل هیدرودینامیکی ذرات هموار (SPH) بررسی کردند. نفوذپذیری لایه سنگ زیر کیسون در مدل پیاده‌سازی شده و یک طرح جدید بدون نیاز به پارامتر تنظیمی برای تخمین نیروهای اصطکاک دینامیکی اعمال شده بر روی کیسون متحرک معرفی شده است. توانایی مدل معرفی شده در شبیه‌سازی جریان سیال عبوری از محیط متخلخل با مدل‌سازی جریان شکست سد از طریق یک بلوک متخلخل تایید شده است. علاوه بر این، موج شکن کیسون با بستر نفوذ ناپذیر مدل‌سازی شده و نتایج با نتایج تجربی و عددی دیگر مقایسه شده تا عملکرد ضریب اصطکاک معرفی شده تایید شود. در نهایت تطابق خوبی با داده‌های تجربی وجود دارد که عملکرد قابل قبول مدل توسعه‌یافته نشان داده شده است. بر اساس نتایج، نادیده گرفتن جریان از طریق بستر متخلخل کیسون ممکن است منجر به بیش از حد تخمین زدن نیروی موج شود و لغزش کیسون دست پایین گرفته شود. (Wen et al., 2018) یک مدل هیدرودینامیکی ذرات هموار بهبود یافته (SPH) برای مطالعه رفتار هیدرودینامیکی پیچیده یک محفظه آب در حال نوسان در خشکی معرفی کردند. بهبودهای صورت گرفته شامل افزودن یک عبارت انتشاری به معادله تداوم و ترکیب روش ذرات هموار شده اصلاحی (CSPM) است. همچنین یک شرط مرزی اصلاح شده برای شبیه‌سازی بهتر میدان فشار در نزدیکی مرز جامد اجرا شده است. مدل SPH ابتدا با مقایسه نتایج عددی با راه‌حل‌های تحلیلی و داده‌های تجربی موجود صحت‌سنجی شده است. سپس مدل تأیید شده برای مطالعه رفتار هیدرودینامیکی یک محفظه آب در حال نوسان در خشکی اعمال می‌شود. ارتفاعات سطح آزاد در داخل محفظه آب و مجموع نیروهای وارد بر دیواره جلوی محفظه آب برای شرایط موج‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین توزیع انرژی اغتشاش و پدیده اسلوشینگ در محفظه‌ی آب نیز مورد بررسی قرار گرفته است. (Wen et al., 2019) عملکرد موج بر روی یک صخره مرجانی با شیب جلویی تند با استفاده از هر دو آزمایش آزمایشگاهی و مدل‌سازی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه‌ی روند پژوهش‌ها (Wen et al., 2020) توانایی مدل متخلخل هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) را برای تولید گروه‌های موج در آب با عمق دلخواه افزایش داده‌اند. نتایج گزارش شده در این پژوهش نشان می‌دهد که مدل SPH می‌تواند به درستی انتشار و تبدیل گروه‌های موج را بر روی صخره مرجانی پیچیده پیش‌بینی کند. این مدل در نهایت برای پیش‌بینی پاسخ‌های هیدرودینامیکی می‌تواند به کار برده شود.

(Akbari and Taherkhani, 2020) یک مدل عددی مبتنی بر روش WCSPH را برای شبیه‌سازی انتشار موج روی یک خط لوله استفاده کرده‌اند. در این پژوهش یک رویکرد ترکیبی برای جذب امواج خروجی بر اساس کاهش تدریجی سرعت سیال در یک لایه‌ی جاذب و استفاده‌ی همزمان از بسترهای شیب‌دار معرفی شده است. تعامل امواج منظم و نامنظم با خطوط لوله واقع در بستر متخلخل و نفوذناپذیر دریا مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر فاصله‌ی خط لوله تا بستر دریا بر الگوی جریان و نیروی اعمال شده برای هندسه‌های مختلف حفاظت خط لوله توسط محیط متخلخل و شیب‌های جانبی بررسی شده است. مدل

توسعه‌یافته، تعامل امواج و خط لوله‌ای را که روی بستر دریا متخلخل یا غیرقابل نفوذ قرار می‌گیرند را شبیه‌سازی کرده و نشان داده‌اند که نیروهای وارد بر خطوط لوله در بستر دریاهای نفوذپذیر کاملاً متفاوت از بسترهای غیرقابل نفوذ هستند. موج‌شکن‌های جعبه‌ای شناور از جمله موارد مورد بررسی پژوهش‌گران در سال‌های گذشته بوده است. به منظور رفع محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی و بهینه‌سازی این نوع از موج‌شکن‌ها (Liu and wang, 2020) به کمک روش SPH بررسی‌هایی را صورت دادند. در این مطالعه چهار موج‌شکن شناور نوع جعبه‌ای که عبارت‌اند از مستطیلی دوتایی، مستطیلی تک، دایره‌ای دوتایی و دایره‌ای تک برای انجام تحقیقات گسترده با استفاده از SPH انتخاب شدند. در مجموع ۸۸ مدل‌سازی انجام شده و اثرات متغیرهای هندسه بر عملکرد میرایی موج موج‌شکن‌ها شفاف شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که عملکرد موج‌شکن‌ها به عمق غوطه‌وری بسیار حساس است. به طور کلی، هر چه موج‌شکن بزرگ‌تر و سبک‌تر باشد، عملکرد بهتری خواهد داشت. در این میان موج‌شکن مستطیلی دوتایی بهترین عملکرد را در تضعیف امواج دارد و حرکات و نیروهای آن کم‌تر از موج‌شکن‌های منفرد است. (Liu and wang, 2020) در پژوهشی دیگر عملکرد میرایی موج و هیدرودینامیک موج‌شکن‌های شناور جعبه‌ای لنگردار با وزن یکسان، ضخامت دیواره یکسان و شش مقطع مختلف دایره‌ای، مثلثی رو به پایین، مثلثی رو به بالا، مستطیلی، دوزنقه‌ای رو به پایین و دوزنقه‌ای رو به بالا، به صورت عددی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد موج‌شکن‌های شناور به‌طور قابل توجهی تحت‌تاثیر عمق غوطه‌وری و شرایط موج قرار می‌گیرد. (Dang et al., 2021) در پژوهش خود با بهره‌گیری از روش هیدرودینامیک ذرات صاف (SPH) به نام DualSPHysics، اشکال مختلف دیواره‌های دریایی را از نظر نیروی وارد بر سازه‌ها و روگذری به صورت عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در صورت وجود دیوار پلکانی و به دنبال آن یک دیوار منحنی، یک دیوار شیبدار و یک دیوار عمودی، روگذری موج به بیشترین میزان کاهش یافته است. (Cui et al., 2021) برای ارزیابی عملکرد هیدرودینامیک یک سیستم موج‌شکن شناور، یک مدل جفت بین هیدرودینامیک ذرات هموار و یک روش شبه‌استاتیک چند بخشی توسعه دادند که این روش پیش‌بینی قابل اطمینان‌تر از عملکرد موج‌شکن‌های شناور را در اختیار قرار می‌دهد. به منظور بررسی عملکرد موج‌شکن‌های بدون تغییر شکل و تغییر شکل‌پذیر (Akbari and Torabbeigi, 2021) یک مدل عددی بر پایه‌ی SPH را استفاده کرده‌اند. در این پژوهش با مدل‌سازی موج‌شکن‌های تغییر شکل‌یافته و بدون تغییر شکل با تخلخل‌های مختلف، پاسخ‌های هیدرولیکی متفاوتی مانند بازتاب موج، اتلاف، انتقال و بالاروی امواج محاسبه شده و نشان داده شده است که عملکرد هیدرولیکی یک موج‌شکن برم‌به‌وضعیت تغییر شکل آن و نفوذپذیری لایه زره بستگی دارد. در ادامه‌ی روند پژوهش‌ها (Wen et al., 2020) اثرات نفوذپذیری صخره بر توزیع فضایی جریان ناشی از موج در داخل و خارج از بدنه صخره‌های مرجانی ناهمگن را با استفاده از یک مدل هیدرودینامیکی ذرات هموار تراکم‌پذیر ضعیف (WCSFH) مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش یک مطالعه پارامتری برای بررسی اثرات انواع مختلف توزیع تخلخل بر جریان‌های ناشی از موج انجام شده است.

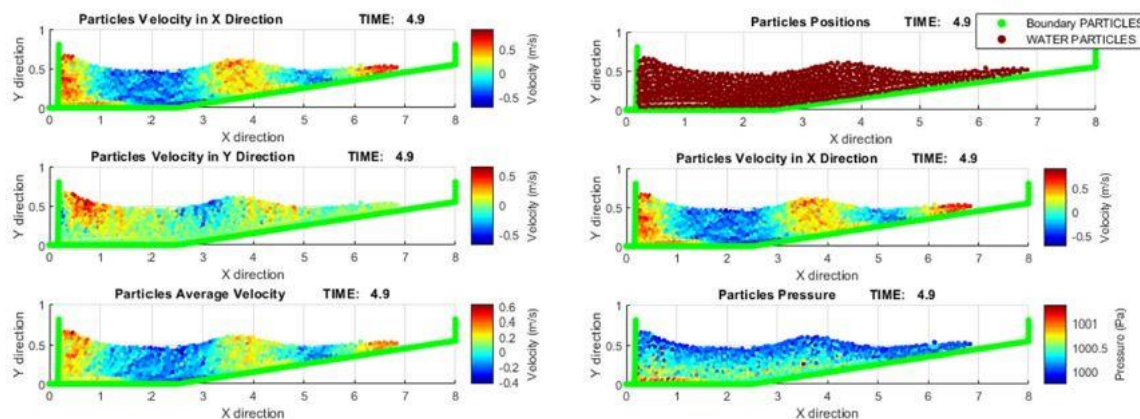
در ادامه‌ی پژوهش‌های صورت گرفته (Cui et al., 2022) رفتار هیدرودینامیکی چندین موج‌شکن شناور را با روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش برای هر مدل پاسخ‌های حرکتی و عملکرد هیدرودینامیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. (Guo et al., 2022) به مقایسه‌ی عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور با سیستم‌های پهلویی ثابت، غیرثابت و ترکیبی با روش مدل‌سازی SPH پرداختند. (Han and Dong, 2022) برهمکنش بین امواج منظم و موج‌شکن عمودی را از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) بررسی کردند. در این پژوهش چهار مدل SPH، که با استفاده از شرایط انتشار مختلف و مدل‌های آشفتگی ایجاد شده‌اند، مقایسه شدند و در نتیجه، فرمول جدیدی برای توصیف رابطه بین نیروی موج و دوره موج پیشنهاد شد. (Chen et al., 2022) یک مطالعه عددی با مدل δ -SPH دو بعدی برای مقایسه ویژگی‌های هیدرودینامیکی یک موج‌شکن شناور یک پانتون و یک موج‌شکن شناور دو پانتون انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که وقتی کشش‌های پانتون بزرگ‌تر است، موج‌شکن شناور دو پانتون در میرایی موج در مقایسه با موج‌شکن شناور تک پانتون بهتر عمل می‌کند. در ادامه (Yamamoto et al., 2022) مطالعه‌ای برای شبیه‌سازی عددی فرآیند پراکندگی بلوک‌های لایه‌ی آرمور روی تپه آوار پشت موج‌شکن در طول سرریز سونامی با استفاده از

DualSPHysics انجام دادند. (Altomare et al., 2023) شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) از شکستن امواج تک بر روی یک پروفیل ساحلی صلب را ارائه کرده‌اند. این مطالعه از این نظر جدید است که هیدرودینامیک شکست موج را در مقیاسی نزدیک به شرایط طبیعی تجزیه و تحلیل می‌کند. به طور کلی، ارتفاع سطح آب به خوبی توسط SPH بازتولید می‌شود، اما اختلافات با آزمایشات در منطقه شکست بسته به نحوه اندازه‌گیری، مشاهده می‌شود. (Chen et al., 2023) بر روی موج‌شکن شناور دو قلو که از دو موج‌شکن شناور پانتونی یکسان با سیستم‌های پهلویی مستقل تشکیل شده است، مطالعه کرده و گزارش خود را ارائه کرده‌اند. بر اساس نتایج عددی، عملکرد میرایی موج برای موج‌شکن شناور دو قلو و موج‌شکن شناور تک پانتون مقایسه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که موج‌شکن شناور دو قلو نسبت به موج‌شکن شناور تک پانتونی در عملکرد میرایی موج برتری دارد. (Han and Dong, 2023) با روش هیدرودینامیک ذرات هموار یک فلووم موج برای امواج با دوره‌ی تناوب متوسط درست مدل‌سازی کرده‌اند. در این پژوهش با مقایسه با نتایج پژوهش‌های پیشین، رابطه‌ی جدیدی برای ارتباط میان تعداد پیک‌های موج و دوره‌ی تناوب موج ارائه شده است.

(Han and Dong, 2023) تحقیقات آزمایشگاهی و عددی به وسیله‌ی هیدرودینامیک ذرات هموار در طول تعامل بین امواج منظم و موج شکن شناور انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که ضرایب بازتاب و اتلاف با افزایش طول صفحه افزایش می‌یابد. تحت امواج با دوره‌ی تناوب متوسط، تضعیف موج توسط موج‌شکن شناور با صفحات بیرون‌زده ضعیف است. صفحات بیرون‌زده‌ی افقی نسبت به صفحات عمودی توانایی بیشتری در مهار نوسان دارند. (Liu et al., 2023) یک الگوریتم جفت کردن برای شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد غیرقابل تراکم در میدان‌های دور و نزدیک را با حل معادلات ناویر-استوکس ارائه کرده‌اند. این روش، هیدرودینامیک ذرات صاف (SPH) را با روش تفاضل محدود (FD) که بر روی شبکه‌های اولیه‌ی ساخت‌یافته اجرا شده است، ترکیب می‌کند. بر اساس تجزیه دامنه SPH برای مدل‌سازی با دقت بالا، تغییر شکل شدید سطح آزاد و حتی تکه تکه شدن جریان، در ناحیه هسته میدان نزدیک اعمال می‌شود. همچنین از روش FD برای حل کردن ناحیه میدان دور استفاده می‌شود. هدف اصلی رویکرد ترکیبی، کاهش بار محاسباتی برنامه‌های کاربردی SPH از طریق ترکیب با روش اولیه مبتنی بر مش و در عین حال حفظ دقت بالا برای شبیه‌سازی‌های میدان نزدیک و دور است. جفت شدن دو طرفه بین مدل‌های FD و SPH در ناحیه همپوشانی بین زیر دامنه‌های محاسباتی به دست می‌آید، که در آن راه‌حل‌های اولیه‌ی و راه‌حل‌های لاگرانژی از طریق درون‌یابی در منطقه همپوشانی برای انتقال سیال و حرکت سطح آزاد، بین مناطق میدان نزدیک و میدان دور، با یکدیگر جفت می‌شوند. الگوریتم پیشنهادی توسط چندین مورد آزمایشی تایید می‌شود که دقت، همگرایی و کاربرد مطلوبی را در شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های موج با عمق‌سنجی و ساختارهای پیچیده نشان می‌دهد. (Sun et al., 2024) یک روش جفت‌شده‌ی جدید میان روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و روش عنصر گسسته (DEM) را برای افزایش درک از تأثیر جریان سطح آزاد بر ساختارهای موج شکن معرفی کرده‌اند. SPH برای شبیه‌سازی سیالات تراکم‌ناپذیر استفاده شده، در صورتی که DEM برای ردیابی مسیر ذرات جامد استفاده می‌شود. این پژوهش نشان می‌دهد که مدل جفت شده به طور موثر اطلاعات گسترده‌ای در مورد میدان جریان و پاسخ دینامیکی ارائه می‌دهد. (Chen et al., 2024) یک مدل هیدرودینامیک ذرات صاف (SPH) را برای شبیه‌سازی برهم‌کنش موج با ساختارهای نازک الاستیک توسعه داده‌اند. این امر با جفت کردن مدل‌های δ -SPH و TL-SPH به ترتیب برای حل فازهای سیال و ساختار به دست می‌آید. (Pourelak et al., 2023) در این پژوهش شش توزیع مربعی، مثلثی، توزیع بر اساس الگوریتم WVT، توزیع بر اساس الگوریتم Greedy، شش ضلعی و توزیع بر اساس الگوریتم فیبوناچی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از بررسی فشار، سرعت و تراز سطح آزاد سیال مدل در محل گنج‌های مرجع مدل آزمایشگاهی، مشخص گردید که چیدمان‌های مربعی، مثلثی، Greedy، Hexagonal و Fibonacci به ترتیب دارای خطای مدل‌سازی معادل با ۱۳٫۸۵٪، ۱۳٫۷۵٪، ۱۲٫۶۳٪، ۱۳٫۲۴٪، ۹٫۰۷٪ و ۹٫۳۷٪ هستند. با این حساب دو توزیع اولیه شش ضلعی و فیبوناچی دارای خطای مدل‌سازی کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت این دو مدل بهترین عملکرد را در به کارگیری روش SPH در راستای بهبود کارایی مدل عددی دارند.

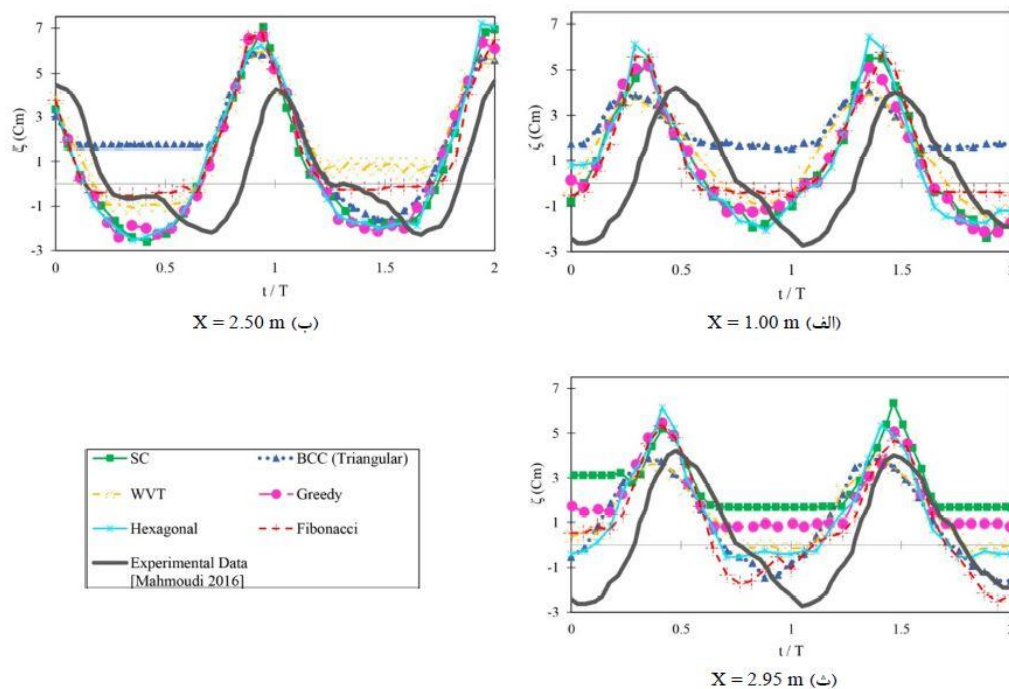
۳- کاربرد روش SPH در پژوهش‌های سازه‌های دریایی

در این بخش دو نمونه از پژوهش‌های پیشین، که در حوزه‌ی سازه‌های دریایی به کمک روش SPH انجام شده است، به صورت دقیق‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد. اولین پژوهش مربوط به (Pourolak et al., 2023) که در آن تاثیر چیدمان اولیه‌ی ذرات در مدل‌سازی موج بررسی شده است. در این پژوهش شش توزیع مختلف مربعی، مثلثی، توزیع بر اساس الگوریتم WVT، توزیع براساس الگوریتم Greedy، شش ضلعی و توزیع بر اساس الگوریتم فیبوناچی مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب توزیع مناسب می‌تواند در نتایج تاثیرگذار باشد. در شکل شماره ۱ نتایج حاصل از مدل‌سازی با چیدمان اولیه فیبوناچی نشان داده شده است.



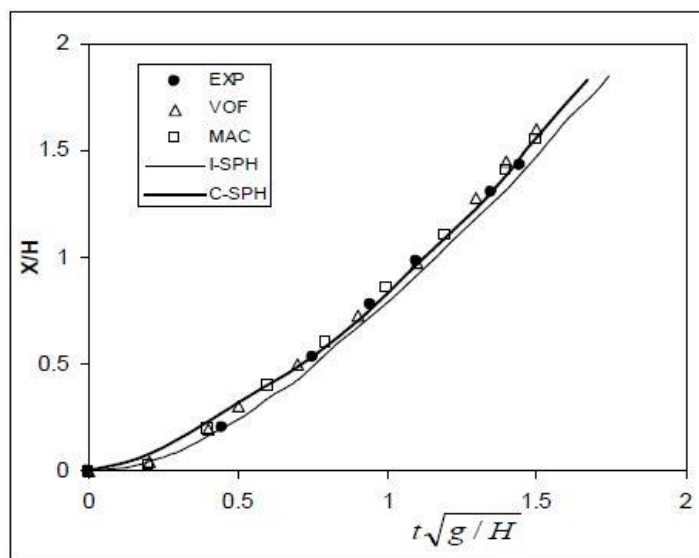
شکل ۱- نتایج حاصل از مدل‌سازی تولید-شکست موج با چیدمان اولیه فیبوناچی در زمان $T=4.9s$ شامل موقعیت ذرات، سرعت ذرات در جهت x و y ، اندازه سرعت و فشار ذرات (Pourolak et al., 2023)

با انجام مدل‌سازی‌ها با انواع توزیع‌ها نتایج مشابه نتایج ارائه شده در شکل ۱ به دست آمد. به منظور انتخاب روش بهتر خروجی‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج برای تغییرات سطح آب در ۶ نقطه با یکدیگر مقایسه شدند که در شکل شماره ۲ این مقایسه نمایش داده شده است. خط تو پر نماینده‌ی مطالعات آزمایشگاهی و خطوط دیگر هر کدام به یکی از توزیع‌های موجود مربوط است. همان‌طور که از این شکل مشخص است هر کدام از مدل‌سازی‌های عددی با مقداری خطا نسبت به مدل آزمایشگاهی همراه هستند. با بررسی نتایج مشخص شد که چیدمان‌های توزیع شش ضلعی و فیبوناچی به ترتیب با خطای ۹,۰۷٪ و ۹,۳۷٪ کمترین خطا را دارند و به گزینه‌های مطلوب‌تر نسبت به سایر چیدمان‌ها هستند. ۴ چیدمان مربعی، مثلثی، مبتنی بر الگوریتم WVT و مبتنی بر الگوریتم Greedy نیز با خطاهای ۱۳,۸۵٪، ۱۳,۷۵٪، ۱۲,۶۳٪ و ۱۳,۲۴٪ خطا نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارند. با این حساب می‌توان نتیجه گرفت که دو مدل شش ضلعی و فیبوناچی بهترین عملکرد را در به کارگیری روش SPH در راستای بهبود کارایی مدل عددی دارند.



شکل ۲- میزان تغییرات سطح آب بر حسب زمان در سه نقطه مختلف برای توزیع‌های موجود (Pourlak et al., 2023)

در پژوهش (Valizadeh et al., 2011) طرحی ارائه شده است که قابلیت شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد با تغییرات شدید را دارد. در این مدل از حل معادله‌ی حالت برای به دست آوردن فشار استفاده شده است. در شکل شماره ۳ مقایسه نتایج به دست آمده از مدل پیشنهادی با مدل‌های دیگر است که این موضوع نشان‌دهنده‌ی کارایی این روش است.



شکل ۳- مقایسه نتایج سطح جریان آزاد با مدل SPH و تحقیقات پیشین (Valizadeh et al., 2011)

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مدل‌سازی‌های عددی امکانات زیادی را در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهند تا بتوانند به وسیله‌ی آن‌ها پژوهش‌های خود را در حوزه‌های مختلفی، که مطالعات آزمایشگاهی در آن‌ها سخت و هزینه‌بر است، گسترش دهند. روش‌های جدید می‌توانند این امکانات را گسترش دهند و نواقص مدل‌های پیشین را برطرف نمایند. روش هیدرودینامیک ذرات هموار که به اختصار SPH نامیده شده است یک رویکرد لاگرانژی در حل عددی جریان است که در سال‌های اخیر با پژوهش‌های صورت گرفته توانسته است امکانات بیش‌تری در حل عددی جریان در اختیار پژوهش‌گران قرار دهد. SPH یک روش بدون نیاز به شبکه‌بندی مرسوم است که می‌تواند تغییرات صورت گرفته بر روی سطح سیالات را بهینه‌تر مدل کند. به گونه‌ای که در مدل‌های توسعه داده شده با رویکرد اویلری به منظور به دست آوردن تغییرات سطح آزاد سیال نیاز به حل‌های عددی بسیار سنگین‌تری نسبت به روش SPH داریم. در سال‌های اخیر مشکلات مختلف موجود در روش SPH با انجام پژوهش‌های مختلف مرتفع شده است. به عنوان مثال جفت کردن این روش با روش‌های دیگر امکانات آن را توسعه بخشیده است حل‌گرهایی مانند SPHysics و روش‌هایی مانند DualSPHysics نتیجه‌ی این پژوهش‌های بوده است. نمونه حل‌گر SPHysics برهمکنش سازه-جریان را به خوبی مدل می‌کند و DualSPHysics مشکلات مدل‌سازی جریان سطح آزاد را حل کرده است.

با توجه به مطالعات صورت گرفته می‌توان کارآیی این روش در مطالعات مختلفی از جمله محیط متخلخل، برآورد روگذری امواج از موج‌شکن‌ها، نیروی وارده بر موج‌شکن‌ها مشاهده شده است. مشخص شده است که روش SPH توانایی قابل قبولی در مدل‌سازی موج دارد و همین‌طور روش‌های توسعه یافته باعث کارآیی این روش در مسائلی می‌شود که در آن‌ها برهمکنش سازه و جریان وجود دارد. به همین دلیل می‌توان از مدل‌سازی به این روش در مسائلی مانند روگذری از موج‌شکن و نیروی وارده بر آن استفاده کرد. با پژوهش‌های صورت گرفته توانایی روش SPH در محیط‌های متخلخل نیز افزایش یافته است. به همین دلیل می‌توان از شبیه‌سازی‌ها در مسائلی که فیلتر، هسته و آرمور موج‌شکن را مدل می‌کنند، استفاده کرد. برای دقت بالاتر در مدل‌سازی موج‌شکن‌ها نیاز است تا تخلخل موجود در سازه‌ی آن‌ها لحاظ شود و با توسعه‌ی روش SPH این امکان در حال حاضر موجود است و عملکرد مناسبی را نیز از خود نشان داده است.

علی‌رغم تمام این مطالعات با توجه به جدید بودن استفاده از این روش در رشته‌ی سازه‌های دریایی می‌توان بسیاری از تحقیقات صورت گرفته را به وسیله‌ی این روش انجام داد تا علاوه بر صحت‌سنجی آن در مباحث جدید بتوان تحقیقات گسترده‌تری را به صورت بهینه انجام داد. به این منظور می‌توان موارد ذیل را به منظور توسعه تحقیقات مدنظر قرار داد.

- محاسبه میزان روگذری و ضریب انعکاس موج در موج‌شکن‌های کیسونی مرکب
- بررسی عملکرد هیدرولیکی موج‌شکن‌های توده سنگی و مقایسه‌ی پاسخ‌ها با پژوهش‌های پیشین
- بررسی مدل‌سازی حفرات در موج‌شکن‌های حفره‌دار

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

- Altomare, C., Scandura, P., Cáceres, I., & Viccione, G. (2023). Large-scale wave breaking over a barred beach: SPH numerical simulation and comparison with experiments. *Coastal Engineering*, 185, 104362. doi: 10.1016/j.coastaleng.2023.104362
- Akbari, H., & Namin, M. M. (2013). Moving particle method for modeling wave interaction with porous structures. *Coastal engineering*, 74, 59-73. doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.12.002
- Akbari, H. (2017). Simulation of wave overtopping using an improved SPH method. *Coastal Engineering*, 126, 51-68. doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.04.010
- Akbari, H., & Torabbeigi, M. (2021). SPH modeling of wave interaction with reshaped and non-reshaped berm breakwaters with permeable layers. *Applied Ocean Research*, 112, 102714. doi: 10.1016/j.apor.2021.102714
- Akbari, H. (2014). Modified moving particle method for modeling wave interaction with multi layered porous structures. *Coastal engineering*, 89, 1-19. doi: 10.1016/j.coastaleng.2014.03.004
- Akbari, H. (2019). An improved particle shifting technique for incompressible smoothed particle hydrodynamics methods. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 90(12), 603-631. doi: 10.1002/fld.4737
- Akbari, H., & Taherkhani, A. (2019). Numerical study of wave interaction with a composite breakwater located on permeable bed. *Coastal Engineering*, 146, 1-13. doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.12.006
- Akbari, H., & Pooyarad, A. (2020). Wave force on protected submarine pipelines over porous and impermeable beds using SPH numerical model. *Applied Ocean Research*, 98, 102118. doi: 10.1016/j.apor.2020.102118
- Crespo, A. J., Domínguez, J. M., Rogers, B. D., Gómez-Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R. J. F. B., ... & García-Feal, O. (2015). DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Computer Physics Communications*, 187, 204-216. doi: 10.1016/j.cpc.2014.10.004
- Cui, J., Chen, X., & Sun, P. (2021). Numerical investigation on the hydrodynamic performance of a new designed breakwater using smoothed particle hydrodynamic method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 130, 379-403. doi: 10.1016/j.enganabound.2021.05.007
- Cui, J., Chen, X., Sun, P. N., & Li, M. Y. (2022). Numerical investigation on the hydrodynamic behavior of a floating breakwater with moon pool through a coupling SPH model. *Ocean Engineering*, 248, 110849. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110849
- Chen, Y. K., Liu, Y., & Meringolo, D. D. (2022). Comparison of hydrodynamic performances between single pontoon and double pontoon floating breakwaters through the SPH method. *China Ocean Engineering*, 36(6), 894-910.
- Chen, Y. K., Liu, Y., Meringolo, D. D., & Hu, J. M. (2023). Study on the hydrodynamics of a twin floating breakwater by using SPH method. *Coastal Engineering*, 179, 104230. doi: 10.1016/j.coastaleng.2022.104230.
- Chen, Y. K., Meringolo, D. D., & Liu, Y. (2024). SPH numerical model of wave interaction with elastic thin structures and its application to elastic horizontal plate breakwater. *Marine Structures*, 93, 103531. doi: 10.1016/j.marstruc.2023.103531.
- Domínguez, J. M., Crespo, A. J., Valdez-Balderas, D., Rogers, B. D., & Gómez-Gesteira, M. (2013). New multi-GPU implementation for smoothed particle hydrodynamics on heterogeneous clusters. *Computer Physics Communications*, 184(8), 1848-1860. doi: 10.1016/j.cpc.2013.03.008
- Dang, B. L., Nguyen-Xuan, H., & Wahab, M. A. (2021). Numerical study on wave forces and overtopping over various seawall structures using advanced SPH-based method. *Engineering structures*, 226, 111349. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111349
- Gómez-Gesteira, M., Cerqueiro, D., Crespo, C., & Dalrymple, R. A. (2005). Green water overtopping analyzed with a SPH model. *Ocean Engineering*, 32(2), 223-238. doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.08.003

- Gomez-Gesteira, M., Rogers, B. D., Crespo, A. J., Dalrymple, R. A., Narayanaswamy, M., & Dominguez, J. M. (2012). SPHysics—development of a free-surface fluid solver—Part 1: Theory and formulations. *Computers & Geosciences*, 48, 289-299. doi: 10.1016/j.cageo.2012.02.029
- Gómez-Gesteira, M., Crespo, A. J., Rogers, B. D., Dalrymple, R. A., Dominguez, J. M., & Barreiro, A. (2012). SPHysics—development of a free-surface fluid solver—Part 2: Efficiency and test cases. *Computers & Geosciences*, 48, 300-307. doi: 10.1016/j.cageo.2012.02.028
- Gingold, R. A., & Monaghan, J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 181(3), 375-389. doi: 10.1093/mnras/181.3.375.
- Guo, W., Zou, J., He, M., Mao, H., & Liu, Y. (2022). Comparison of hydrodynamic performance of floating breakwater with taut, slack, and hybrid mooring systems: An SPH-based preliminary investigation. *Ocean Engineering*, 258, 111818. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111818
- Gotoh, H., Khayyer, A., Ikari, H., Arikawa, T., & Shimosako, K. (2014). On enhancement of Incompressible SPH method for simulation of violent sloshing flows. *Applied Ocean Research*, 46, 104-115. doi: 10.1016/j.apor.2014.02.005.
- Han, X., & Dong, S. (2022). Experimental investigation and SPH simulation on interaction between regular waves and vertical breakwater under medium-long period waves. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14, 100467. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2022.100467
- Han, X., & Dong, S. (2023). Interaction between medium-long period waves and smoothed mound breakwater: Physical model tests and SPH simulations. *Ocean Engineering*, 268, 113442. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113442
- Han, X., & Dong, S. (2023). Interaction between regular waves and floating breakwater with protruding plates: Laboratory experiments and SPH simulations. *Ocean Engineering*, 287, 115906. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115906.
- He, M., Gao, X., Xu, W., Ren, B., & Wang, H. (2019). Potential application of submerged horizontal plate as a wave energy breakwater: A 2D study using the WCSPH method. *Ocean Engineering*, 185, 27-46. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.05.034.
- Le Touzé, D., Marsh, A., Oger, G., Guilcher, P. M., Khaddaj-Mallat, C., Alessandrini, B., & Ferrant, P. (2010). SPH simulation of green water and ship flooding scenarios. *Journal of Hydrodynamics*, 22(1), 231-236. doi: 10.1016/S1001-6058(09)60199-2.
- Liu, Z., & Wang, Y. (2020). Numerical investigations and optimizations of typical submerged box-type floating breakwaters using SPH. *Ocean Engineering*, 209, 107475. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107475.
- Liu, Z., & Wang, Y. (2020). Numerical studies of submerged moored box-type floating breakwaters with different shapes of cross-sections using SPH. *Coastal Engineering*, 158, 103687. doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103687.
- Liu, K., Liu, Y., Li, S., Chen, H., Chen, S., Arikawa, T., & Shi, Y. (2023). Coupling SPH with a mesh-based Eulerian approach for simulation of incompressible free-surface flows. *Applied Ocean Research*, 138, 103673. doi: 10.1016/j.apor.2023.103673
- Monaghan, J. J. (2005). Smoothed particle hydrodynamics. *Reports on progress in physics*, 68(8), 1703.
- Monaghan, J. J. (1994). Simulating free surface flows with SPH. *Journal of computational physics*, 110(2), 399-406. doi: 10.1006/jcph.1994.1034
- Meringolo, D. D., Aristodemo, F., & Veltri, P. (2015). SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction. *Coastal Engineering*, 101, 48-68. doi: 10.1016/j.coastaleng.2015.04.004.
- Pourlak, M., Jabbari, E., & Akbari, H. (2023). The Effect of Initial Particles Distribution by in Smoothed Particle Hydrodynamic Method in Wave Generation Modeling Based on Laboratory Model. *Civil Infrastructure Researches*, 9(2), 35-50. Persian.
- Skillen, A., Lind, S., Stansby, P. K., & Rogers, B. D. (2013). Incompressible smoothed particle hydrodynamics (SPH) with reduced temporal noise and generalised Fickian smoothing applied to body–water slam and efficient wave–body interaction. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 265, 163-173. doi: 10.1016/j.cma.2013.05.017.

Sun, J. Z., Zou, L., Govender, N., Sun, Z., Yu, Z. B., & Jin, G. Q. (2024). Coupling SPH-DEM method for simulating the dynamic response of breakwater structures under severe free surface flow. *Powder Technology*, 119805. doi: 10.1016/j.powtec.2024.119805.

Valizadeh, A. , Shafieefar, M. Salehi Neyshabouri, A.A. (2011). Developing a Standard Smoothed Particle Hydrodynamic Model for Free Surface Flows. *Journal of Iran-Water Resources Research*. Volume 7, No. 3, Fall 2011 (IR-WRR). Persian.

Wen, H., Ren, B., Dong, P., & Zhu, G. (2020). Numerical analysis of wave-induced current within the inhomogeneous coral reef using a refined SPH model. *Coastal Engineering*, 156, 103616. doi: 10.1016/j.coastaleng.2019.103616

Wen, H., Ren, B., & Wang, G. (2018). 3D SPH porous flow model for wave interaction with permeable structures. *Applied ocean research*, 75, 223-233. doi: 10.1016/j.apor.2018.04.003.

Wen, H., Ren, B., & Yu, X. (2018). An improved SPH model for turbulent hydrodynamics of a 2D oscillating water chamber. *Ocean Engineering*, 150, 152-166. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.047.

Wen, H., Ren, B., Zhang, X., & Yu, X. (2019). SPH modeling of wave transformation over a coral reef with seawall. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 145(1), 04018026. doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000479.

Wen, H., Ren, B., Zhu, G., & Wang, G. (2020). SPH evaluation of the hydrodynamic consequences induced by reef degradation. *Wave Motion*, 96, 102579. doi: 10.1016/j.wavemoti.2020.102579.

Yamamoto, T., Yasuda, T., Oguma, K., & Matsushita, H. (2021). Numerical simulation of scattering process of armour blocks on additional rubble mound behind breakwater during tsunami overflow using SPH method. *Computational Particle Mechanics*, 1-16. doi: