

بررسی عددی موج اسکات راسل با استفاده از روش حجم محدود و شبکه بندی روی هم رونده

قاسم مختار زاده^۱، شمس بصیرت^{۲*}، جلال بازرگان^۳ و احسان دلاوری^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۹	<p>در این تحقیق، تأثیر پارامترهای مختلف بر یک سیستم، شامل سقوط آزاد یک جعبه داخل آب مطالعه شده است؛ مسئله کلاسیکی که توسط اسکات راسل در سال ۱۸۴۴ با استفاده از سقوط آزاد جسم سنگین داخل آب و تشکیل و انتشار تک موج در راستای طول محفظه شرح داده شده است. برای حل مسئله، از روش حجم محدود استفاده شد. جهت بررسی پروفیل سطح آب از روش حجم سیال (VOF) و جهت حرکت جسم صلب داخل آب و هوا از شبکه روی هم رونده برای توصیف جزئیات تشکیل موج و گردابه استفاده شده است. با سقوط آزاد جسم داخل آب، موج و گردابه‌ای در زیر آن تشکیل می‌گردد. گردابه‌ی به وجود آمده به همراه موج، در راستای طول کانال منتشر می‌شود و سپس با مرور زمان از بین می‌رود. تأثیر پارامترهایی مانند چگالی جعبه، ارتفاع سقوط جعبه و عمق آب بر ارتفاع موج تشکیل شده موثر هستند، پروفیل موج به دست آمده در زمان ۰/۷ ثانیه مطابقت بسیار خوبی با نتایج تجربی مطالعات پیشین نشان داد و بیشترین درصد خطای به دست آمده ۴ درصد گزارش گردید. طبق نتایج به دست آمده، با افزایش چگالی از ۱۸۰۰ تا ۳۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ارتفاع سقوط جعبه از ۰/۴ الی ۰/۵۵ متر، ارتفاع موج به ترتیب ۵/۳ و ۱۰/۲ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، با افزایش عمق آب از ۰/۱۸ الی ۰/۳۶ متر، ارتفاع موج ۲ درصد کاهش یافت و قطر گردابه ایجاد شده در نیز ۳/۴ درصد کاهش یافت. لذا اهمیت موج‌های ضربه‌ای در مخازن سد، با عمق پایین و تپه‌های مشرف با ارتفاع نسبتاً بالا، دو چندان می‌باشد و می‌بایست این نکات توسط طراحان مد نظر قرار گیرد.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴	
<p>واژگان کلیدی: موج اسکات راسل، OverSet Mesh، اندرکنش سازه و سیال، زمین لغزش.</p>	

۱- مقدمه

در سال ۱۸۴۴ توسط اسکات راسل صورت گرفته است. هنگام توقف ناگهانی قایق، تک موج‌هایی تشکیل می‌شود. اسکات راسل با الهام گرفتن از این پدیده به ارائه جزئیاتی در رابطه با نحوه‌ی تشکیل این نوع از موج‌ها پرداخت. کار تجربی وی، شامل یک محفظه‌ی مستطیلی بود که جعبه‌ی سنگینی در یک انتهای آن قابلیت افتادن به صورت عمودی را داشت. تمرکز اصلی وی روی تشکیل و انتشار تک موج ناشی از سقوط یک جسم سنگین به داخل آب بود [۱].

پدیده لغزش و سقوط توده‌های سنگی به داخل مخازن سدها و رودخانه‌ها باعث به وجود آمدن موج بالارونده می‌گردد که به مراتب، اثرات تخریبی بالاتری نسبت به سایر امواج دارد. با گذشت زمان، این امواج در تخریب اسکلت سدها نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند. در گذشته، مطالعات عددی و آزمایشگاهی در زمینه‌ی تشکیل امواج ضربه‌ای انجام شده است. نمونه‌ای از این مطالعات پایه‌ای

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: basirat.sh@pci.iaun.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- نویسنده پاسخگو، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

یکدیگر و تداخل سازه‌ها و امواج^۲ با در نظر گرفتن جریان موج به صورت جریان پتانسیل دارد. ویژگی بارز روش سلول هارمونیک چند جمله‌ای، این می‌باشد که جریان آزاد سیال و مرزهای ثابت، در یک شبکه بندی ثابت غوطه ور^۳ شده‌اند و مشکلات تعریف مرز جامد را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهند. رایب سالو و همکاران [۱۱] به مدل‌سازی تولید موج سونامی با استفاده از روش قطعات سنگی (گرانولار^۴) پرداختند. کار آنها به لحاظ فیزیکی با واقعیت همخوانی بیشتری دارد. متلاشی شدن قطعات سنگی به خاطر وزن-شان به همراه افتادن آنها داخل کانال، باعث به وجود آمدن موج با پروفیل‌های متفاوت نسبت به موج اسکات راسل می-گردد.

لی و همکاران [۱۲] نیز به بررسی تجربی اتلاف انرژی گردابه ایجاد شده به هنگام تشکیل تک‌موج پرداختند. آنها توانستند نشان دهند که انرژی موج منتشر شده کاملاً وابسته به انرژی گردابه‌ی ایجاد شده در زیر موج است. خیه و همکاران [۱۳] نیز به شبیه سازی عددی گردابه‌های بزرگ^۵ شکست^۶ تک‌موج پرداختند. با توجه به ماهیت پیچیده‌ی شکست موج و از بین رفتن آن در طول کانال، آنها توانستند نشان دهند که روش مورد استفاده‌ی دوفازی برای تخمین زمان از بین رفتن موج بسیار مناسب تر از سایر روش‌هاست.

وانگ و همکاران [۸] به تولید تک موج و انتشار آن در شرایط فوق گرانس^۷ پرداختند. شتاب‌های گرانس در کار آنها عبارت بودند از: g ، $30g$ ، $50g$ و $100g$. آنها برای حل مشکل همخوانی زمان انتشار در مدل‌های نمونه‌کار و به کارگیری مقیاس مناسب و کامل در کار تجربی، از این روش استفاده نمودند.

وو و همکاران [۱۵] به مطالعه‌ی تولید تک موج ضربه‌ای حاصل از حرکت پیستونی تولید کننده‌ی موج پرداختند. آنها مدل بهبود یافته‌ای از حرکت پیستونی تولید کننده‌ی موج را پیشنهاد دادند که نقاط ضعف در کارهای گذشته را به طور کامل پوشش می‌داد [۱۶].

دانش فراز و کایا [۱۷] با استفاده از روش ماتریس انتقال^۸ به حل انتشار موج در کانال روباز پرداختند. نتایج کار آنها بیانگر این مطلب بود که با استفاده از روش پیشنهادی

کارهای تجربی وینگر [۲] زمینه‌ی مطالعاتی گسترده‌ای در رابطه با پروفیل موج‌ها پایه‌ریزی نمود. در کار وی نیز تک-موج حاصل از سقوط جسم به داخل آب مطالعه شد. اما جزئیاتی از حرکت و تشکیل موج در لحظات اولیه ارائه نداده بود.

نودا [۳] با استفاده از تئوری خطی به بررسی نحوه‌ی شکل-گیری موج تولید شده به وسیله سقوط عمودی جسم سنگین پرداخت. نتایج وی نشان داد که در نزدیکی‌های جسم سقوط کننده، استفاده از تئوری خطی معقول می‌باشد، ولی با افزایش ارتفاع موج تولیدی می‌بایست از روش‌هایی به غیر از این تئوری استفاده شود. علاوه بر تشکیل تک‌موج بر اثر سقوط اجسام و اثرات مخرب آن بر سدها، مطالعاتی نیز در رابطه با افزایش ایمنی در سدها صورت گرفته است. از جمله‌ی این کارها می‌توان به تحقیق اژدری مقدم و همکاران [۴] و شریعتمدار و میرحاج [۵] نیز اشاره نمود.

این تک‌موج‌های ایجاد شده جزو امواج ضربه‌ای به حساب می‌آیند. امواج ضربه‌ای می‌توانند در اثر عوامل دیگر مانند سقوط بهممن، فوران آتشفشان، ریزش آواری از تنه و شاخ و برگ درختان و نیز سقوط اجسامی چون شهاب سنگ شکل گیرند. این امواج به علت ماهیت رفت و برگشتی، قدرت تخریبی تدریجی و فزاینده‌ی دارند و به مرور زمان تأثیر خود را می‌گذارند. هنریچ [۶] به مدل‌سازی لغزش جسم و ورود آن به داخل آب پرداخت. در تحقیق وی، جسم با سطح مقطع مستطیلی روی سطح لغزیده و با ورود به داخل آب، باعث تولید موج می‌شد. نتایج کار وی با سایر کارهای تجربی مشابه، تطابق بسیار خوبی داشت و توانست نشان دهد که در این حالت، پروفیل موج با حالت سقوط آزاد جسم تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. از دیگر کارهایی که در رابطه با لغزش جسم و ورود به داخل آب انجام گرفته است می‌توان به مطالعات عطایی آشتیانی و شبیری [۷]، فریتز و همکاران [۸] و وانگ و همکاران [۹] اشاره کرد. همچنین تانگ و همکاران [۱۰] نیز به بررسی عددی تولید تک‌موج با استفاده از روش سلول هارمونیک چند جمله‌ای^۱ پرداختند. آنها توانستند اثبات کنند که روش پیشنهادی، دقت بالایی در مدل‌سازی انواع تک موج‌ها، تداخل امواج با

⁵ Large eddy simulation

⁶ Breaking

⁷ Hyper-gravity

⁸ Transfer matrix method

¹ Harmonic Polynomial Cell (HPC)

² FSI

³ immersed

⁴ granular

حائز اهمیت است که نوع هر دو شبکه بندی باید یکسان باشند. بر فرض مثال می‌بایست دو نوع شبکه بندی سازمان یافته با سلول‌های مستطیلی شکل اعمال گردند. همچنین اندازه‌ی سلول‌ها می‌توانند هر مقدار دلخواه باشند، به نحوی که کیفیت شبکه‌بندی کلی حفظ گردد. نوآوری اصلی کار فعلی، معرفی روش جدید شبکه‌بندی برهم‌رونده و حجم سیال برای شبیه‌سازی موج اسکات راسل می‌باشد. بعد از صحت سنجی با کارهای تجربی، تاثیر پارامترهای اثرگذار در فرآیند با استفاده از این روش مطالعه و بررسی گردیده‌اند.

۲- معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی سقوط جسم به داخل آب، از ترکیب دو روش دوفازی حجم سیال و مش روی هم‌رونده در نرم‌افزار OpenFOAM استفاده شده است. در روش دوفازی حجم سیال، هر دو فاز به صورت مخلوط در نظر گرفته شده و از معادلات ناویر-استوکس متشکل از یک معادله پیوستگی و یک معادله مومنتم استفاده گردیده است. برای تعقیب سطح مشترک دو فاز از یک معادله اضافی که همان معادله انتشار کسر حجمی است، استفاده می‌شود. این معادله با نام معادله‌ی نفوذ به صورت رابطه‌ی (۱) ارائه می‌شود. در معادله (۱)، مقدار α برای نشان دادن موقعیت سیال به کار رفته است و عددی بین صفر و یک دارد. برای آب، عدد یک و برای هوا نیز عدد صفر در نظر گرفته شده است. در حالت مخلوطی از آب و هوا نیز مقدار α بین صفر و یک قرار دارد [۲۵].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (1)$$

تابع کسر حجمی برای محاسبه خواص سیال در نقاط شبکه به صورت روابط (۲) و (۳) استفاده می‌شود.

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \quad (2)$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \quad (3)$$

شبکه‌بندی روی هم‌رونده این قابلیت را دارد تا با استفاده از درون‌یابی، خواص به دست آمده در نقاط شبکه را به طور هم‌زمان حل و به هم مرتبط نماید. در رابطه با روش شبکه‌بندی روی هم‌رونده در بخش ۲-۳ به طور مفصل بحث شده است. روابط (۴) و (۵) نیز به ترتیب معادلات پیوستگی جرم و مومنتم را نشان می‌دهند که در آن‌ها بردار U سرعت با

می‌توان به آسانی معادلات سنت و نانت^۱ مرتبط با امواج طولی را حل نمود.

پانیزو و همکاران [۱۸] به بررسی تجربی موج‌های ضربه‌ای ناشی از سقوط و لغزش اجسام به داخل آب پرداختند. آنها توانستند روابط بین قدرت موج و برخی ویژگی‌های سطح شیب‌دار را با فرمول‌هایی تجربی بیان کنند. در سالیان اخیر، روش‌های عددی مختلفی مانند SPH^۲ برای شبیه‌سازی موج‌های ضربه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله‌ی این کارها می‌توان به مطالعات عطایی آشتیانی و شبیری [۷] و آلی و آسای [۱۹] اشاره کرد. در این روش، از شبکه بندی استفاده نمی‌شود و تنظیم شرایط مرزی نظیر ورودی-ها [۲۰] و دیواره‌ها [۲۱] نسبت به سایر روش‌های عددی دارای شبکه‌بندی بسیار دشوار می‌باشد و همچنین هزینه‌های محاسباتی بسیار بالایی نیز دارد [۲۲]. لذا در این تحقیق، برای پوشش این خلأ، یک روش عددی جدید ارائه شده است.

نرم افزار OpenFOAM قابلیت ایجاد موج را دارد [۲۳]. ولی کتابخانه‌های مورد استفاده در آنها، هیچ‌کدام قابلیت تشکیل موج اسکات راسل را ندارند و اغلب از شرط مرزی تولید موج استفاده می‌شود همچنین در این کتابخانه‌ها از شبکه بندی متحرک استفاده نمی‌گردد [۲۴].

با بررسی پیشینه پژوهش تحقیق می‌توان دریافت که مطالعه‌ای در رابطه با تأثیر پارامترهای وزن و ارتفاع سقوط جسم در تولید موج اسکات راسل صورت پذیرفته است. لذا، در این تحقیق، به بررسی این موضوع پرداخته شده است. برای حل معادلات حاکم بر مسئله، از نرم‌افزار متن باز OpenFOAM استفاده شده است. در این نرم‌افزار، با استفاده از روش حجم سیال و شبکه‌بندی برهم‌رونده، به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در تشکیل موج در لحظات اولیه پرداخته شده است. روش شبکه بندی برهم‌رونده در نسخه‌های استاندارد OpenFOAM وجود ندارد. اما در نسخه‌های ESI این روش شبکه بندی وجود دارد. در این نوع از شبکه‌بندی، دو مش متفاوت با ابعاد مختلف، می‌توانند بر روی یک دیگر بلغزند و پدیده‌های فیزیکی مختلف با تعریف مرز دیواره در آنها، مشاهده نمود. خواصی مانند چگالی، ویسکوزیته و غیره با استفاده از روش درون-یابی^۳ بین این دو نوع شبکه محاسبه می‌گردد. ذکر این نکته

³ Interpolation

¹ Saint-Venant

² Smoothed-particle hydrodynamics

جنبشی آشفتگی (k) به واسطه ی وجود نیروهای لزجی در مسیر سقوط جسم صلب است. ε و S به ترتیب بیانگر نرخ اتلاف اغتشاشات و نرخ کرنش می باشند. $C_{1\varepsilon}$ و $C_{2\varepsilon}$ نیز ضرایب ثابت مربوط به این مدل آشفتگی هستند. عمده تفاوت بین مدل های آشفتگی، در تعریف این ضرایب ثابت می باشد.

۲-۱- هندسه و شرایط مرزی

در این تحقیق، از هندسه ای مشابه با هندسه ی موناگان و کاس [۱] استفاده شده است. برای ایجاد هندسه ی دوبعدی محفظه ی آب و جسم سقوط کننده، برای ایجاد مش، از ابزار بلاک مش^۱ استفاده شده است. در شکل (۱) مرزهای مدل عددی نشان داده شده است. جسم از حالت سکون به داخل آب ساکن رها می شود. محفظه ی مورد مطالعه دارای طول ۲ متر و ارتفاع آب ۰/۲۱ متر است. جعبه مستطیلی شکل به ابعاد ۰/۳ در ۰/۴ متر در گوشه ی سمت چپ آن قرار داده شده است و این قابلیت را دارد تا به طور عمودی وارد آب شود. با توجه به اینکه هدف این تحقیق سقوط و برخورد جسم صلب به کف محفظه می باشد، بنابراین ضروری است که در کف محفظه با ریز شدن شبکه به منظور دستیابی به گرادیان های زیاد، دقت محاسبات افزایش یابد. با این عمل، علاوه بر افزایش دقت، زمان محاسباتی نیز به طور چشمگیر بهبود می یابد. در جدول ۱ خواص هوا و آب نشان داده شده است.

واحد متر برثانیه (m/s)، فشار با واحد پاسکال (Pa)، نیروهای حجمی، ρ چگالی با واحد کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3)، زمان با واحد ثانیه (s) و ویسکوزیته دینامیک بر حسب پاسکال ثانیه ($Pa.s$) می باشد [۲۶].

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \rho f - \nabla P + \mu \nabla^2 U \quad (5)$$

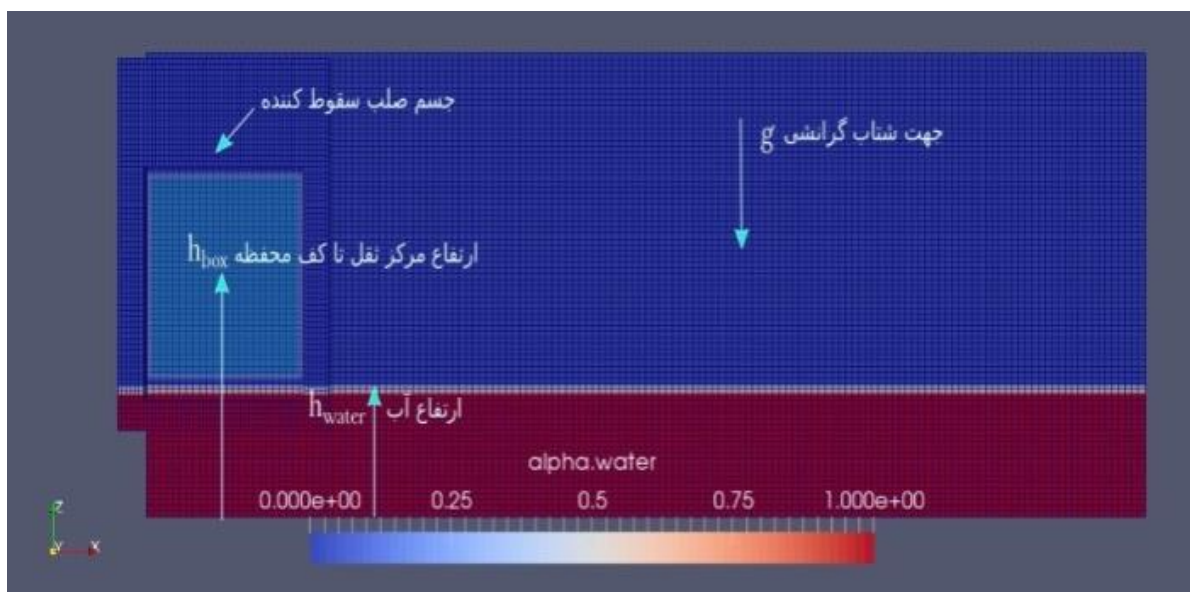
با توجه به ماهیت اغتشاشی (آشفته) سقوط جسم صلب به داخل آب و اهمیت انرژی جنبشی اغتشاشی، می بایست از یک مدل اغتشاشی مناسب استفاده نمود. انتخاب مدل اغتشاشی مناسب در این شبیه سازی می تواند تأثیر به سزایی بر دقت نتایج حل داشته باشد. مخصوصاً در هنگام ایجاد گردابه و انتشار آن، این مدل آشفتگی تأثیر بسیار زیادی در اندازه ی آن دارد. معادلات انتقال متغیرهای اغتشاشی در مدل $k-\varepsilon$ استاندارد به صورت روابط (۶) و (۷) می باشد [۲۶، ۲۷].

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

که G_k برابر با $\mu_t S^2$ و μ_t نیز دارای مقدار $\frac{k^2}{\varepsilon} \rho C_\mu$ می باشد. در روابط (۶) و (۷)، G_k بیانگر تولید انرژی



شکل ۱- شماتیک دوبعدی میدان محاسباتی و شرایط مرزی برای مسئله تولیدکننده ی موج اسکات راسل

¹ Blockmesh

شبکه‌بندی‌های متفاوت قابلیت حرکت روی یکدیگر را با الگویی تعریف شده دارند. در هنگام لغزش این دو شبکه‌بندی، مقادیر مشترک بین آنها، با استفاده از درون‌یابی^۲ حل و جایگذاری می‌شود. روش‌های مختلف شبکه متحرک در OpenFOAM وجود دارد مانند، تطابقی^۳، اصلاحی^۴ و جسم صلب^۵ که هر کدام بسته به کاربرد مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۶، ۲۸]. در این تحقیق، برای کنترل نحوه‌ی رفتار جسم در حال سقوط عمودی، از روش شش درجه آزادی^۶ استفاده شده است. و مسیری که قرار است جسم صلب برای برخورد به آب طی کند به یک درجه آزادی اعمال شده است. شبکه‌بندی روی هم‌رونده توسط شرکت ESI توسعه داده شده است و از جمله مزایای آن حفظ کیفیت شبکه‌بندی و دقت بالا نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد [۲۸].

۲-۴- صحت‌سنجی

بررسی دقت نتایج این تحقیق در دو بخش صورت پذیرفته است. در بخش اول، به صحت‌سنجی اندازه گردابه تشکیل شده در سه زمان مختلف و مقایسه نتایج عددی فعلی با تحقیق عطایی آشتیانی و شبیری [۷] پرداخته شده است. در شکل (۳)، این مقایسه به خوبی نشان داده شده است. در تکمیل صحت‌سنجی این تحقیق، از نتایج تجربی موناگان و کاس [۱] استفاده شده است. بدین منظور، در زمان ۰/۷ ثانیه، پروفیل موج پیش‌رونده در شکل (۴) به همراه پروفیل موج کار تجربی نشان داده شده‌اند. بیشترین درصد خطای گزارش شده با استفاده از حداقل مربعات با کار عطایی آشتیانی و شبیری [۷] و موناگان و کاس [۱] به ترتیب ۳/۸۹ و ۴/۳ درصد می‌باشد. برای استخراج نتایج در این تحقیق از ابزار پس‌پردازش پایتون^۷ استفاده شده است.

۳- نتایج

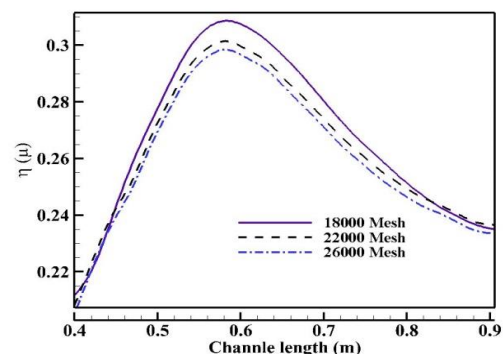
در قسمت نتایج این تحقیق، به بررسی تأثیر سه پارامتر مهم در مسئله کلاسیک موج اسکات راسل پرداخته شده است. تمام بررسی‌ها در لحظات اولیه تشکیل موج و گردابه انجام گرفته‌اند. تأثیر پارامترهایی مانند وزن جسم سقوط کننده، ارتفاع مرکز ثقل جسم از کف محفظه و عمق آب محفظه بر ارتفاع موج منتشر شده بررسی شده‌اند. بیشتر

جدول ۱- خواص فیزیکی آب و هوا

نام ماده	کشش سطحی N/m ²	ویسکوزیته دینامیک cP	چگالی kg/m ³
هوا	۰/۰۷	۰/۰۱۸	۱/۰۳۵
آب	۰/۰۷	۱	۱۰۰۰

۲-۲- استقلال نتایج از شبکه و گام زمانی

تشکیل موج و انتشار آن داخل محفظه در این تحقیق با استفاده از شبکه‌بندی سازمان یافته صورت پذیرفته و می‌بایست از مستقل بودن نتایج از تعداد شبکه‌ها نیز اطمینان حاصل کرد. برای این کار، ابتدا یک شبکه‌بندی نسبتاً درشت (مش ۱۸۰۰۰) را انتخاب کرده و سپس تعداد مش‌ها را در حدود ۱/۵ الی ۲ برابر کرده و سپس به بررسی پروفیل موج در زمان ۰/۷ ثانیه پرداخته شده است. از شکل (۲) می‌توان دریافت که از مش‌بندی ۲۲۰۰۰ به بعد تغییری در نحوه‌ی رفتار پروفیل موج دیده نمی‌شود. لذا این شبکه‌بندی برای نتایج کار ما مناسب و بهینه می‌باشد.



شکل ۲- استقلال نتایج از شبکه برای پروفیل موج در زمان ۰/۷ ثانیه

برای به دست آوردن مناسب‌ترین گام زمانی نیز در ابتدا گام زمانی ۱۰^{-۴} در نظر گرفته شده و سپس با کاهش آن مشاهده شد که از گام زمانی ۱۰^{-۶} به بعد تغییری در پروفیل موج به طور محسوس ایجاد نمی‌شود. لذا این گام زمانی برای شبیه‌سازی انتخاب شده است.

۲-۳- روش حل عددی

در این تحقیق، از شبکه‌بندی روی هم‌رونده^۱ استفاده شده است. در این نوع از شبکه‌بندی، دو میدان محاسباتی با

^۵ Solid body mesh

^۶ 6DOF

^۷ Python

^۱ Overset mesh

^۲ Interpolation

^۳ Adapting mesh

^۴ Refinement mesh

توجه به فرمول ۶، ضریب درگ (C_D) وابسته به هندسه جسم می‌باشد. مسلماً به هر میزان نیروی درگ کمتر باشد، نیروی مقاوم در برابر سقوط نیز کمتر می‌باشد و جسم با سرعت بیشتری به سطح آب برخورد می‌کند (معادله ۱۰).

$$W = m \cdot g \quad (8)$$

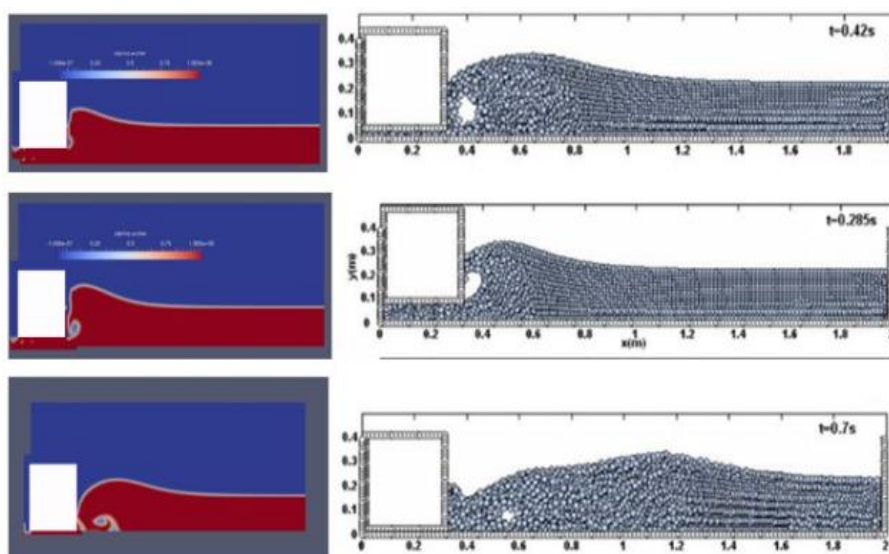
$$F_D = C_D \frac{\rho A V^2}{2} \quad (9)$$

$$W - F_D = m \cdot a \quad (10)$$

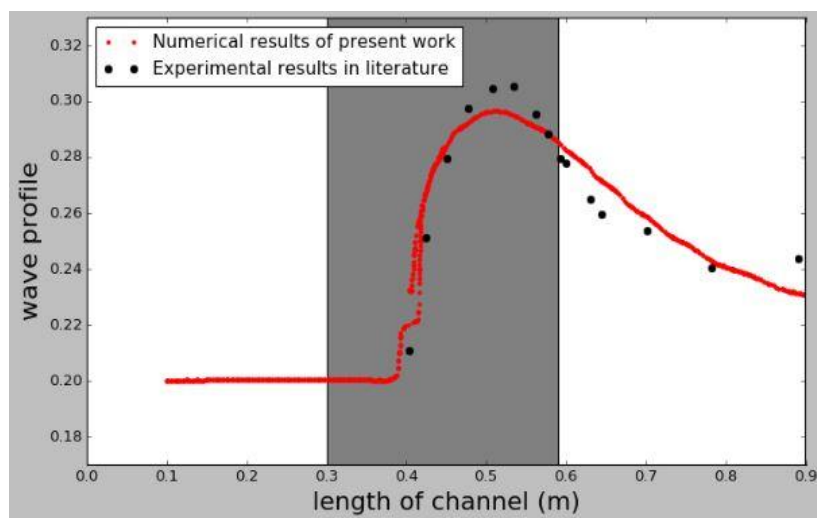
بودن ارتفاع موج، به منزله بالا بودن قدرت آن است که این خود می‌تواند تأثیر مخربی داشته باشد.

۳-۱- تأثیر چگالی جسم سقوط کننده

با افزایش جرم جسم صلب سقوط کننده، نیروی ثقل (معادله ۸) آن افزایش می‌یابد و این نیرو با غلبه بر نیروی درگ (معادله ۹) آب منجر به سقوط آن داخل آب می‌شود. سرعت جسم هنگام برخورد با سطح آب کاملاً وابسته به جرم جسم سقوط کننده می‌باشد. از طرفی با



شکل ۳- مقایسه بین نتایج کار فعلی شامل تغییرات زمانی قطر گردابه با کار عطایی آشتیانی و شبیری [۷].



شکل ۴- مقایسه بین نتایج کار فعلی در مورد پروفیل موج در زمان ۰/۷ ثانیه با نتایج موناگان و کاس [۱].

می‌شود. این گردابه در زیر موج در راستای طولی محفظه منتشر می‌گردد و به مرور زمان داخل آب از بین می‌رود. ارتفاع موج بیانگر قدرت آن است و هر چه قدر این ارتفاع بیشتر باشد، قطر گردابه نیز بزرگ‌تر می‌باشد.

به هر میزان سرعت برخورد بیشتر باشد، مومنوم انتقالی نیز زیاد می‌شود. این مومنوم، سیال پیرامون را در جهت شعاعی به اطراف می‌راند و با ادامه‌ی سقوط جسم داخل آب و برگشت سیال به سمت جعبه، گردابه تشکیل

۲-۳- تأثیر ارتفاع جسم سقوط کننده

سرعت جسم صلب پس از رها شدن از ارتفاع Δh بالای سطح آب، در لحظه برخورد با سطح آب با استفاده از رابطه (۱۱) تعیین می‌گردد.

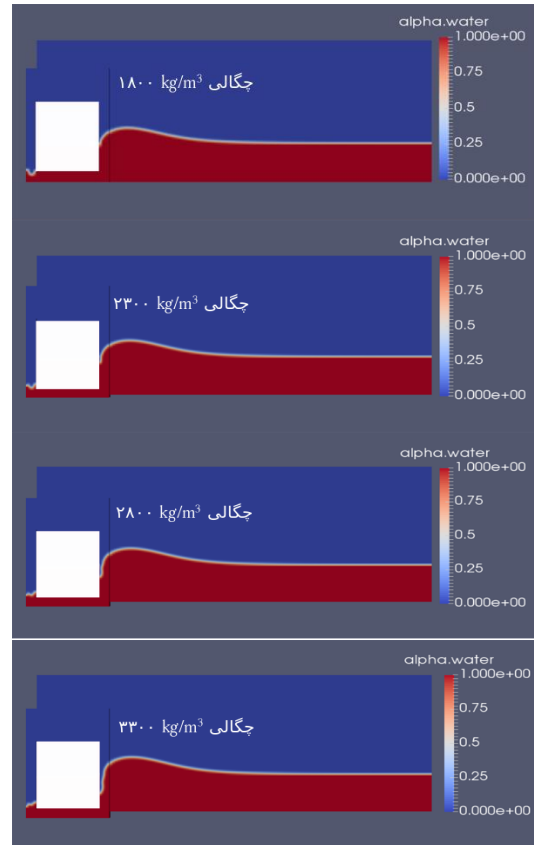
$$V^2 - V_0^2 = 2g\Delta h \quad (11)$$

که در این معادله V_0 سرعت اولیه جسم صلب در لحظه‌ی رها شدن از بالای سطح آزاد سیال به ارتفاع Δh می‌باشد. مقدار Δh برابر است با $h_{\text{box}} - h_{\text{water}}$. در معادله (۱۱)، V برابر با سرعت برخورد جسم صلب به سطح آب و g شتاب گرانشی زمین برابر مقدار $9/81$ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. معادله (۱۱) بیانگر معادله مستقل از زمان حرکت سقوط آزاد اجسام است؛ سرعت اولیه و سرعت نهایی جسم، ارتفاع سقوط و شتاب ثقل زمین در غیاب زمان به هم مرتبط می‌شود. در این شبیه‌سازی عددی، به علت اینکه جسم صلب از حالت سکون در بالای سطح آزاد سیال رها می‌شود، مقدار V_0 برابر با صفر می‌باشد. لذا با اعمال این تغییر، معادله (۱۲) به دست می‌آید.

$$v = \sqrt{2g\Delta h} \quad (12)$$

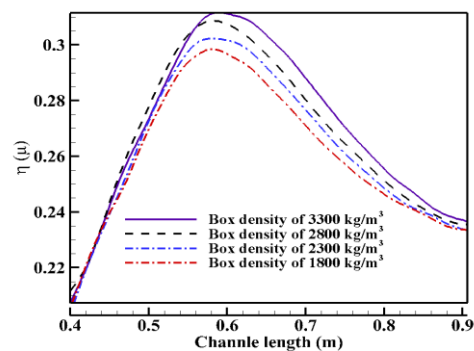
به منظور بررسی اثر سرعت برخورد جسم صلب با سطح آزاد، مسئله برای ارتفاع جعبه از کف محفظه‌ی $0/4$ (شکل (۷) می‌توان دریافت که با افزایش این ارتفاع سرعت برخورد جسم صلب به سطح آزاد آب نیز افزایش می‌یابد. بالا بودن سرعت برخورد به این منزله می‌باشد که تکانه منتقل شده از جسم صلب به آب بیشتر می‌باشد و این تکانه بالا باعث فرورفتن بیشتر آب در زمان مشابه می‌شود. شکل (۷) بیانگر این مطلب می‌باشد.

پس از برخورد جسم صلب به سطح آب و نفوذ آن به داخل آب، به تدریج از سرعت جسم صلب کاسته می‌شود، دلیل فیزیکی آن نیروی درگی می‌باشد که توسط آب به جسم صلب در حال سقوط تحمیل می‌شود. شکل (۸) نیز تغییرات موج بالادست را بر اساس انواع ارتفاعهای جعبه نشان می‌دهد. از رفتار این نمودار نیز میتوان دریافت که با افزایش ارتفاع رها شدن جعبه، پرفیل‌های موج بیشتر در راستای عمودی پخش می‌گردند و یا به اصطلاح Plumper می‌گردند. از شکل (۸) میتوان دریافت که در فاصله‌ی $0/6$ متر از کانال، موج در زمان $0/7$ ثانیه دارای بیشترین مقدار خود است. قله ی موج با افزایش ارتفاع جعبه، اندکی به



شکل ۵- تصاویر حجم سیال در مرحله‌ی ظاهر شدن تک موج با تغییرات چگالی جعبه

از شکل (۵) می‌توان دریافت که هر چقدر چگالی جعبه بیشتر باشد، سیال بیشتری به اطراف جعبه رانده می‌شود [۲۹]. با افزایش مقدار سیال به اطراف رانده شده، گردابه‌ی بزرگ‌تری تولید می‌شود. از شکل (۶) نیز می‌توان مشاهده کرد که با افزایش چگالی جسم سقوط کننده، ارتفاع پروفیل موج در زمان $0/7$ ثانیه نیز بیشتر می‌باشد. از بررسی و مقایسه‌ی بین این دو شکل می‌توان به ارتباط مستقیم قطر گردابه و ارتفاع تک موج منتشر شده پی‌برد.

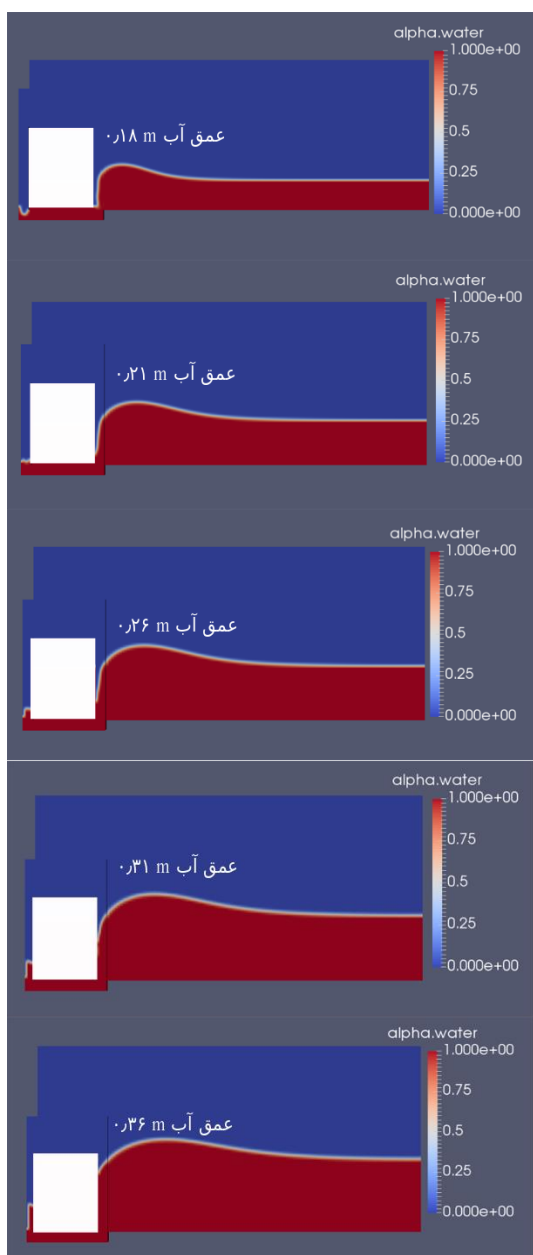


شکل ۶- منحنی‌های پروفیل موج در چگالی‌های ۱۸۰۰، ۲۳۰۰، ۲۸۰۰ و ۳۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

داخل آب، با استفاده از فرمول (۱۳) قابل بیان است:

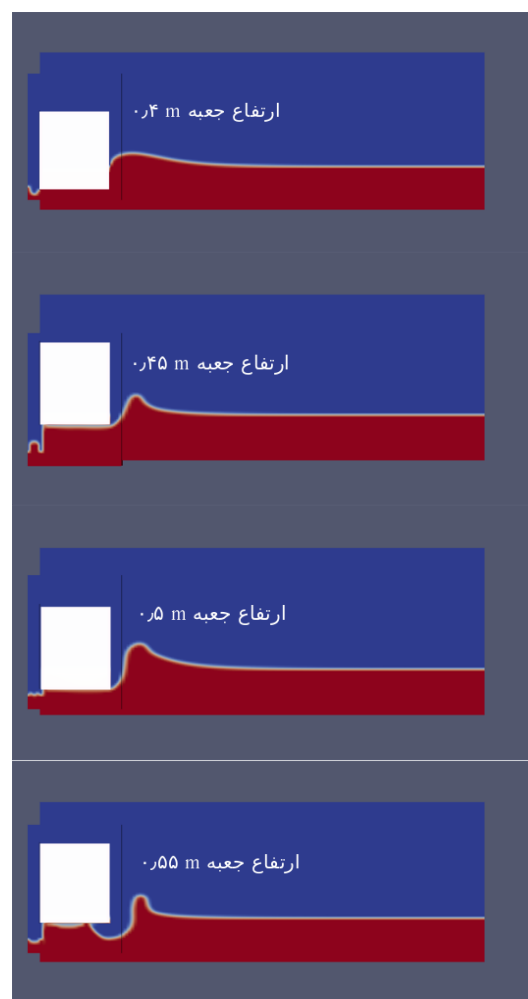
$$H(x, t) = a \sec^2 \left[\sqrt{\frac{3a}{4d^3}} (x - ct) \right] \quad (13)$$

که H ارتفاع سطح آب، a دامنه موج، d عمق آب و $c = \sqrt{g(d+a)}$ سرعت قله موج است. از فرمول (۱۳) می توان دریافت که عمق آب رابطه ی معکوسی با ارتفاع سطح آزاد سیال H دارد. به عبارت دیگر، با افزایش عمق آب، همانقدر ارتفاع موج ناشی از سقوط هر جسم به آب نیز کاهش می یابد، شکل (۹) نیز بیانگر این موضوع است.

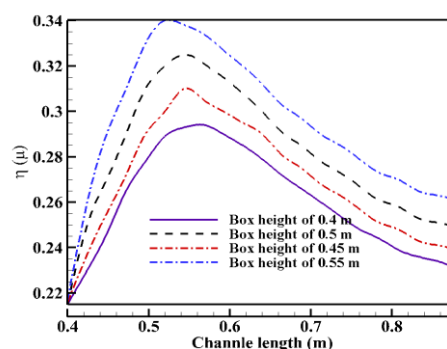


شکل ۹- تصاویر حجم سیال در مرحله ی ظاهر شدن تک موج با تغییرات عمق آب

سمت جعبه متمایل می گردد و یا به اصطلاح اندکی دیرتر منتشر میگردد. دلیل فیزیکی این پدیده تاخیر به وجود آمده در اندرکنش بین جعبه و سطح آزاد سیال می باشد.



شکل ۷- تصاویر حجم سیال در مرحله ی ظاهر شدن تک موج با تغییرات ارتفاع جعبه



شکل ۸- منحنی های پروفیل موج در ارتفاع جعبه های ۰/۴، ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ متر

۳-۳- تأثیر عمق آب در محفظه

پروفیل تک موج تولید شده به وسیله ی افتادن جعبه به

پیرامون آن در جهت شعاعی نیرو وارد شده و جسم صلب، مومنتوم خود را به سیال منتقل می‌کند. از مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی، تطابق خوب این نتایج با یکدیگر و دقت و کاربرد روش عددی مورد استفاده، ملاحظه شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع سقوط جسم صلب از سطح آب، ارتفاع موج (قدرت موج) افزایش یافت. همچنین، جرم پرتابه تأثیر محسوسی بر موج تولیدی دارد و با افزایش جرم جسم صلب، افزایشی در ارتفاع موج تولیدی مشاهده می‌شود. همچنین، نتایج بیانگر این مطلب بود که با افزایش عمق آب، گردابه تشکیل شده دارای قطر کمتری است.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان اصالت و نوآوری محتوای مقاله را تأیید می‌کنند.
تعارض منافع: این مقاله مستخرج از رساله دکتری آقای قاسم مختارزاده با عنوان "مدل‌سازی عددی امواج ضربه‌ای ناشی از رخداد لغزش ناگهانی دیواره (مواد صلب و دانه‌ای) در مخازن سدها" به راهنمایی خانم دکتر شمسا بصیرت و آقای دکتر جلال بازرگان است.

۵- فهرست علائم

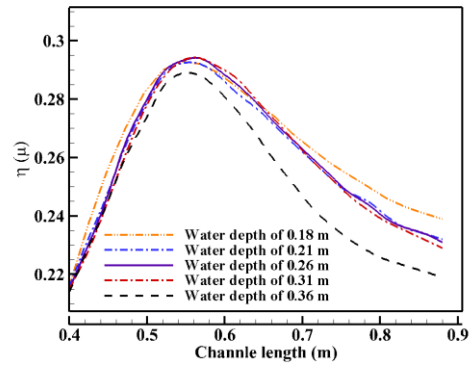
g	شتاب گرانش (m/s^2)
H	تغییرات سطح آزاد سیال (m)
t	زمان (s)
h_{box}	ارتفاع آب از کف محفظه (m)
h_{water}	عمق آب محفظه (m)
U	سرعت (m/s)
p	فشار (pa)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kg/m^3)
μ	لزجت دینامیک ($kg/m.s$)
ν	لزجت سینماتیک (m^2/s)

زیرنویس‌ها

l	مایع
g	گاز



شکل ۱۰- منحنی‌های پروفیل موج در عمق‌های ۰/۱۸، ۰/۲۱، ۰/۲۶، ۰/۳۱ و ۰/۳۶ متر

در شکل (۱۰) نیز پروفیل موج تولیدی در زمان ۰/۷ ثانیه برای ارتفاعات مختلف آب نشان داده شده است. در این شکل، در ارتفاع‌های ۰/۳۱، ۰/۲۶ و ۰/۲۱ متر، تغییر ارتفاع تأثیر محسوسی بر پروفیل موج ندارد. ولی در کل، با افزایش عمق آب، قدرت موج کاهش می‌یابد [۲۹]. از نظر فیزیکی می‌توان به این صورت استنباط کرد که با افزایش عمق آب، اثر کف محفظه بر ایجاد موج و گردابه کم‌رنگ‌تر می‌شود. یا به عبارتی، مغروق شدگی جسم افزایش می‌یابد و قادر به تولید گردابه قوی‌تر نیست.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با شبیه‌سازی عددی مسئله سقوط یک جسم صلب در آب، نحوه تشکیل تک موج و گردابه در زیر آن مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مدل‌سازی عددی انتشار موج در آب و نحوه تغییر الگوی گردابه در زیر موج آب از روش‌های حجم سیال و شبکه‌ی روی هم‌رونده استفاده شده است و با شبیه‌سازی در نرم‌افزار متن باز OpenFOAM، جسم صلب سقوط کننده با سیال ساکن آب برهم‌کنش می‌نماید. نتایج نشان داد که پس از ورود جسم صلب به داخل آب، یک گردابه در زیر موج شکل می‌گیرد. با حرکت جسم صلب در عمق آب، به سیال

مراجع

- [1] J. J. Monaghan, and A. Kos, " Scott Russell's wave generator", Physics of Fluids, Vol. 12, February 2000, pp. 622-630.
- [2] R. L. Wiegel, " Laboratory studies of gravity waves generated by the movement of a submerged body", Eos, Transactions American Geophysical Union, Vol .36, October 1955 pp. 759-774.

[3] E. Noda, "Water waves generated by landslides", *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, Vol. 96, July 1970, pp. 835-855.

[۴] مهدی اژدری مقدم، نصرت‌اله امانیان و احسان جعفری ندوشن، "بهینه‌یابی هندسه سرریز کنگره‌ای مثلثی با استفاده از مدل فازی-عصبی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی سد Hyrum در ایالت یوتای آمریکا)", نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۷، شماره ۱۹، زمستان ۱۳۸۸، صفحه ۵۷-۶۷.

[۵] هاشم شریعتمدار و عادل میر حاج، "مدل‌سازی اندرکنش برج آبگیر- مخزن- پی تحت اثر زلزله"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۷، شماره ۱۹، تابستان ۱۳۸۸، صفحه ۶۷-۸۰.

[6] P. Heinrich, "Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 118, May 1992, pp. 249-266.

[7] B. Ataie-Ashtiani, and G. Shobeyri, "Numerical simulation of landslide impulsive waves by incompressible smoothed particle hydrodynamics", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 56, May 2007, pp. 209-232.

[8] H. M. Fritz, W. H. Hager, and H. E. Minor, "Landslide generated impulse waves", *Experiments in Fluids*, Vol. 35, September 2003, pp. 505-519.

[9] B. Wang, L. Yao, H. Zhao, and C. Zhang, "The maximum height and attenuation of impulse waves generated by subaerial landslides", *Shock and Vibration*, Vol. 31, Jan. 2018, pp. 47-98.

[10] C. Tong, Y. Shao, F. C. W. Hanssen, Y. Li, B. Xie, and Z. Lin, "Numerical analysis on the generation, propagation and interaction of solitary waves by a Harmonic Polynomial Cell Method", *Wave Motion*, Vol. 88, 2019, pp. 34-56.

[11] M. Robbe-Saule, C. Morize, R. Henaff, Y. Bertho, A. Sauret, and P. Gondret, "Experimental investigation of tsunami waves generated by granular collapse into water", *arXiv preprint arXiv:2010.2020*, pp. 12308

[12] C. Y. Li, R. S. Shih, and W. K. Weng, "Visualization Investigation of Energy Dissipation Induced by Eddy Currents for a Solitary-like Wave Passing over Submerged Breakwater Sets" *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 11, 2020, pp. 834.

[13] Z. Xie, and T. Stoesser, "Two-phase flow simulation of breaking solitary waves over surface-piercing and submerged conical structures", *Ocean Engineering*, Vol. 213, 2020, pp. 107-679.

[14] Q. S. Wang, M. H. Li, and D. W. Li, "Solitary Wave Generation and Propagation under Hypergravity Fields", *Water*, Vol. 10, V, pp. 1381.

[15] N. J. Wu, S. C. Hsiao, H. H. Chen, and R. Y. Yang, "The study on solitary waves generated by a piston-type wave maker", *Ocean Engineering*, Vol. 117, 2016, pp. 114-129.

[16] N. J. Wu, T. K. Tsay, and Y. Y. Chen, "Generation of stable solitary waves by a piston-type wave maker", *Wave Motion*, Vol. 2, 2014, pp. 240-255.

[17] R. Daneshfaraz, and B. Kaya, "Solution of the propagation of the waves in open channels by the transfer matrix method", *Ocean engineering*, Vol. 11, No. 12, 2008, pp. 1075-1079.

[18] A. Panizzo, G. Bellotti, and P. De Girolamo, "Application of wavelet transform analysis to landslide generated waves", *Coastal Engineering*, Vol. 44, February 2002, pp. 321-338.

[19] A. M. Aly, and M. Asai, "Incompressible smoothed particle hydrodynamics simulations of fluid-structure interaction on free surface flows", *International Journal of Fluid Mechanics Research*, Vol. 41, Jan 2014, pp. 14-35.

[20] E. Napoli, M. De Marchis, C. Gianguzzi, B. Milici, and A. A. Monteleone, "coupled Finite Volume-Smoothed Particle Hydrodynamics method for incompressible flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 310, 2016, pp. 674-693.

[21] E. Napoli, M. De Marchis, C. Gianguzzi, B. Milici, and A. A. Monteleone, "coupled Finite Volume-Smoothed Particle Hydrodynamics method for incompressible flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 310, 2016, pp. 674-693.

[22] M. S. Shadloo, G. Oger, and D. Le Touzé, "Smoothed particle hydrodynamics method for fluid flows, towards industrial applications: Motivations, current state, and challenges", *Computers and Fluids*, Vol. 136, 2016, pp. 11-34.

[23] N. G. Jacobsen, D. R. Fuhrman, and J. A. Fredsøe, "wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®", *International Journal for numerical methods in fluids*, Vol. 9, 2012, pp. 1073-1088.

[24] M. A. Afshar, "Numerical wave generation in OpenFOAM®", 2010.

- [25] J. R. Pedersen, B. E. Larsen, H. Bredmose, and H. Jasak, "A new volume-of-fluid method in OpenFOAM", VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, May 2017, pp. 266-278.
- [26] OpenFOAM Foundation Ltd., "OpenFOAM — the open source CFD toolbox — Programmers' guide", May 2016
- [۲۷] سجاد اسلامی و مهدی محسنی، "اثر مدل توربولانس بر شبیه‌سازی عددی جریان آشفته نانوسیال در یک لوله افقی"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۸، ۱۳۹۸، صفحه ۲۷۹-۲۹۳.
- [28] C. Windt, J. Davidson, B. Akram, and J. V. Ringwood, "Performance assessment of the overset grid method for numerical wave tank experiments in the OpenFOAM environment", 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, July 2018.
- [29] A. Aleman, and A. Constantin, "On the decrease of kinetic energy with depth in wave-current interactions", Mathematische Annalen, September 2019, pp. 1-20.