

# A review study of numerical modeling of the impulse wave caused by the sliding of masses into still waters and parameters affecting it

Fateme Maleki\*

Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

Jalal Bazargan

Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

Zahra Maleki

Master of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Parsian University, Qazvin, Iran

\*Corresponding author's email address:

f.maleki@znu.ac.ir, ORCID: 0000-0002-9970-4811

## How to cite this article:

Fateme Maleki, Jalal Bazargan, Zahra Maleki, A review study of numerical modeling of the impulse wave caused by the sliding of masses into still waters and parameters affecting it, *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)*, 2024; 9(1):66-76.

## Abstract

The phenomenon of impulse waves caused by soil mass sliding into water is one of the important issues in geotechnical and hydrodynamic engineering, which can have destructive consequences on the environment and coastal structures. These waves are widely observed in nature and engineering environments and have multiple effects on the surrounding structures and environments. These waves are caused by the sudden entry of the soil mass into the water, and their investigation is of great importance, especially using numerical methods. In this study, a comprehensive review of the numerical researches conducted in the field of impulse waves caused by landslides is presented. This article examines different numerical models, key parameters affecting wave generation and validation of numerical results compared to experimental data. Also, the challenges in the numerical simulation of this phenomenon and the proposed solutions to improve the accuracy of the modeling have been investigated. The results of this study can help to improve the understanding of this phenomenon and develop new simulation methods.

## Keywords

Impulse wave, Sliding mass, Dam reservoir, numerical models

محیط‌های ساحلی و دریایی، می‌توانند خطرات جدی برای مناطق مسکونی و سازه‌های مهندسی در مجاورت دریاها و دریاچه‌ها ایجاد کنند. این پدیده، که اغلب در نتیجه زمین‌لغزش‌ها یا فروپاشی ناگهانی مواد در دامنه‌های شیب‌دار رخ می‌دهد، منجر به تولید امواج بزرگ و با انرژی بالا می‌شود که پیامدهای فاجعه‌باری همچون

# مطالعه مروری مدلسازی عددی موج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده‌های عظیم به درون آب‌های ساکن و پارامترهای موثر بر آن

فاطمه ملکی\*

دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

جلال بازرگان

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

زهرا ملکی

کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پارسیان، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

## ارجاع به مقاله:

فاطمه ملکی، جلال بازرگان، زهرا ملکی، مطالعه مروری مدلسازی عددی موج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده‌های عظیم به درون آب‌های ساکن و پارامترهای موثر بر آن، مهندسی و مدیریت ساخت، ۱۴۰۳؛ ۹(۱): ۶۶-۷۶.

## چکیده

پدیده امواج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده خاک به درون آب، یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک و هیدرودینامیک است که می‌تواند پیامدهای مخربی بر محیط‌زیست و سازه‌های ساحلی داشته باشد. این امواج به طور گسترده‌ای در طبیعت و محیط‌های مهندسی مشاهده می‌شوند و تأثیرات متعددی بر روی ساختارها و محیط‌های اطراف خود دارند. این امواج در اثر ورود ناگهانی توده خاک به آب ایجاد می‌شوند و بررسی آن‌ها به‌ویژه با استفاده از روش‌های عددی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، مروری جامع بر پژوهش‌های عددی صورت گرفته در زمینه امواج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده خاک ارائه می‌شود. این مقاله به بررسی مدل‌های عددی مختلف، پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر تولید امواج و اعتبارسنجی نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی می‌پردازد. همچنین، چالش‌های موجود در شبیه‌سازی عددی این پدیده و راهکارهای پیشنهادی برای بهبود دقت مدل‌سازی بررسی شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند به بهبود فهم از این پدیده و توسعه روش‌های نوین شبیه‌سازی کمک کند.

## کلمات کلیدی

موج ضربه‌ای، توده لغزنده، مخزن سد، مدل‌های عددی

## ۱- مقدمه

برای آماده‌سازی مقاله خود از همین قالب استفاده نمایید. نوع صفحه امواج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده‌های خاک به درون آب ساکن، به عنوان یکی از پدیده‌های طبیعی مخاطره‌آمیز در



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



### ۳- متغیرهای مورد بررسی در این پدیده

زمین لغزه معمولاً بصورت یک جسم صلب یا تغییر شکل پذیر با رئولوژی‌های مختلف تعریف می‌شود. هم‌چنین هر جا که دانه‌ها و برهم‌کنش بین آن‌ها در یک زمین لغزه دانه‌ای شکل مشخص باشد می‌توان از روش المان گسسته برای مدلسازی آن استفاده کرد [۱]. چندین رویکرد عددی برای پیش‌بینی تولید امواج ضربه‌ای ناشی از لغزش زمین وجود دارند که شامل نرم افزارهای متن باز برای مثال [2-3] DualSPHysics و [4-5] OpenFOAM و [6] THETIS و کدهای تجاری مانند ANSYS Fluent یا Flow-3D است [۷]. این روش‌های محاسباتی گران قیمت برای پیش‌بینی انتشار موج در حالتی که بدنه آب به اندازه کافی کوچک باشد نیز مناسب هستند. یک شبیه‌سازی دقیق از انتشار و حرکت موج در ابعاد آبی بزرگتر معمولاً بر اساس معادلات غیرخطی و چندلایه آب سطحی مثلاً: [8] SWASH، معادلات بوسینسک مثلاً در مطالعه [9] FUNWAVE-TVD یا حتی معادلات ناویر-استوکس کامل مانند [10] NHWAVE انجام می‌شود. هر رویکردی که انتخاب شد باید با دقت کالیبره شود تا پیش‌بینی‌های دقیقی به ما بدهد.

دقیق‌ترین نتایج برای ابعاد آبی بزرگ را می‌توان با کوپل کردن یک روش عددی جامع‌تر و هم‌چنین از لحاظ محاسباتی گران‌تر برای فرایند انتشار موج متلاطم (مانند شبیه‌سازی‌های عددی مستقیم [۱۱]، معادلات رینولدز متوسط ناویر-استوکس [۱۲]، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ [۱۳]، هیدرودینامیک ذرات هموار [۱۴-۱۶] با یک روش محاسباتی ارزان‌تر برای انتشار موج (مانند مدل‌های غیرخطی چند لایه‌ای آب سطحی [۸]، مدل‌های بوسینسک [۱۷]، روش‌های حجم محدود دوفازی [۱۸] بدست آورد.

این مدل انتخابی انتشار موج باید بتواند فرایندهای فیزیکی کلیدی نظیر غیرخطی بودن موج، پراکندگی فرکانس، انتشار، انکسار و شکست موج را مدلسازی کند [۱۹-۲۰]. میرایی انرژی بدلیل اصطکاک کف معمولاً کمتر مطرح می‌شود ولی ممکن است باعث زوال قابل توجه موج در امواج نزدیک به رژیم آب سطحی شود. چنین روش‌های ترکیبی توسط [۲۱] برای امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش فوق سطحی استفاده شده‌اند. این افراد مدل THETIS را با مدل بوسینسک FUNWAVE-TVD بصورت سه بعدی کوپل کردند. هم‌چنین [۲۲] روش DualSPHysics مبتنی بر دینامیک ذرات هموار را با معادلات آب سطحی غیرخطی و چندلایه‌ی SWASH کوپل کردند. [۲۳] نیز روش SPHysics را با Gerris برای انتشار موج دو بعدی کوپل کردند که یک روش حجم محدود دوفازی است.

برای ابعاد آبی کوچکتر می‌توان از یک مدل انتشار موج که از لحاظ محاسباتی گران است برای کل فرایند استفاده کرد. در گذشته بعضی مواقع از معادلات آب سطحی (معادلات سنت-نانت) حتی برای تولید موج نیز استفاده شده است [۲۴]. چون مدل‌های پیچیده‌تر در دهه گذشته معمولاً از لحاظ محاسباتی پرهزینه بودند. اگرچه معادلات آب سطحی ممکن است برخی مواقع نتایج قابل قبولی را برای کاربردهای مهندسی ارائه دهند ولی فرایندهای فیزیکی مهم (پراکندگی فرکانس، توزیع دقیق سرعت عمودی) را

سیلاب‌ها و تخریب سازه‌ها را به همراه دارد. بررسی دقیق این پدیده و درک سازوکار تولید و انتشار امواج ناشی از آن، از جمله نیازهای اساسی در حوزه مهندسی سواحل و مدیریت ریسک‌های طبیعی است. روش‌های عددی به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده، به ابزاری مؤثر برای مطالعه امواج ضربه‌ای تبدیل شده‌اند. این روش‌ها امکان تحلیل دقیق تأثیرات پارامترهای مختلف از جمله هندسه توده خاک، سرعت لغزش و شرایط مرزی را فراهم می‌کنند. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به منظور بهبود دقت و کارایی این مدل‌ها انجام شده است، اما هنوز چالش‌های بسیاری در این حوزه وجود دارد.

هدف از این مطالعه مروری، جمع‌بندی دستاوردهای اخیر در حوزه شبیه‌سازی عددی امواج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده خاک به درون آب ساکن و شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌رو در این زمینه است. این مطالعه به بررسی روش‌های مختلف عددی و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها پرداخته و به‌ویژه به اهمیت تطابق نتایج عددی با داده‌های تجربی و مشاهدات اشاره می‌کند.

### ۲- روش شناسی

در روش‌های مطالعه این پدیده یک روند محاسباتی بر اساس معادلات مورد قبول عموم برای ارزیابی امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش ارائه می‌شود. ابتدا برای درک بهتر مزایا و معایب این روند، روش‌های موجود برای بررسی امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزه بررسی می‌شوند. اساساً برای این کار پنج روش زیر وجود دارند: معادلات عمومی بدست آمده از تست مدل فیزیکی، آزمایش‌های انجام شده روی مدل نمونه اولیه، شبیه‌سازی‌های عددی، معادلات تجربی بدست آمده از داده‌های میدانی و بررسی‌های تحلیلی. مزایای عمده‌ای روش عددی نسبت به سایر روش‌ها دارد این روش می‌تواند امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش فوق سطحی را با در نظر گرفتن شرایط جغرافیایی و عمق آب پیش‌بینی کند. این روش پارامترهای موج را در هر مکان دلخواه مشخص می‌کند و اثرات مقیاس را نیز حذف می‌کند. و معایب آن شامل مواردی است. کالیبراسیون و اعتبارسنجی این روش کلید اصلی برای پیش‌بینی این امواج است که این کار معمولاً بر اساس مدل‌های هیدرولیکی انجام می‌شود. برای جلوگیری از نتایج غلط باید تجربه کار با این مساله را داشته باشیم و تفسیر نتایج را نیز بدانیم.

از روش‌های رایج در شبیه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی، استفاده از روش‌های عددی است. پایه و اساس این روش‌ها که عمدتاً مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است، به کاربر این امکان را می‌دهد تا ضمن به‌کارگیری معادلات حاکم بر میدان جریان، جریان سیال در محیط را بررسی کند. باتوجه به توانمندی‌های روش‌های عددی و همچنین نرم‌افزارهای پیشرفته می‌توان به بررسی حالت‌های پیچیده و متنوع اقدام نمود. اجرا و ساخت مدل‌سازی عددی بسیار کم هزینه‌تر از مدل فیزیکی و آزمایشگاهی می‌باشد و کاربرد آن محدود به یک نمونه خاص نمی‌باشد. علاوه بر این در مدل عددی قدرت مانور بر هندسه‌ی مسئله بسیار بالاست و می‌توان هم‌زمان تمام خصوصیات هیدرولیکی را بررسی نمود.



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱  
تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



در بر نمی‌گیرد که می‌تواند باعث پیش‌بینی‌های غلط خصوصاً در بدنه‌های آبی بزرگ شود. اما مدل‌های مبتنی بر معادلات غیرخطی غیرهیدرواستاتیک آب‌های سطحی مانند SWASH می‌توانند پراکندگی فرکانس را نیز در نظر بگیرند و انتشار موج را با دقت پیش‌بینی کنند. ظرفیت رو به افزایش کامپیوترها و دسترسی به GPU باعث شده تا سناریوهای دنیای واقعی از جمله موقعیت جغرافیایی خاص مکان و عمق‌سنجی را در مقیاس‌های زمانی قابل قبول و روی یک کامپیوتر مجهز به کارت GPU قوی شبیه‌سازی کنیم. بنابراین با در نظر داشتن رشد تصاعدی توان کامپیوترها، منابع محدود کامپیوتری یک عامل منفی برای در نظر گرفتن فرایندهای فیزیکی مهم در شبیه‌سازی امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزه در آینده است.

امروزه علاقه به تحقیق بروی پدیده سونامی و امواج ضربه‌ای به شدت افزایش پیدا کرده است به نحوی که روش‌های کاملاً جدید و ابزارهای محاسباتی پیشرفته برای این پدیده ظهور کرده‌اند. برای مثال استفاده از معادلات ناویر-استوکس سه بعدی برای حل مسائل سونامی به شدت رو به افزایش بوده است زیرا ابزارهای محاسباتی پیشرفته‌تر شده‌اند (مثلاً کامپیوترهای شخصی با چندین هسته CPU و GPU های قوی). با استفاده از این دستگاه‌های مدرن می‌توانیم خطرات احتمالی امواج ناشی از لغزش زمین در اماکن ساحلی را بهتر شبیه‌سازی و درک کنیم. اولین مرحله مهم، شناسایی مشخصات منبع لغزش زمین، ناحیه اثرگذاری موج حاصل و اثرات آن از نظر طغیان آب است. این کار معمولاً توسط شبیه‌سازی‌های عددی و بر اساس تسونامی‌های اخیر، بررسی ژئومورفولوژی شیب سطح لغزنده در حوادث گذشته یا چک کردن سرعت ته نشینی رسوب و انجام آنالیز پایداری سطح شیب‌دار برای حوادث احتمالی در آینده انجام می‌شود. در نواحی که مکانیزم سونامی و امواج ضربه‌ای و بزرگی زمین لغزش معلوم نیستند، مقادیر بحرانی سونامی نظیر ماکزیمم ارتفاع موج، سرعت آب و بالاروی آن را می‌توان با استفاده از ارزیابی خطر احتمالی به صورت ریاضی مدلسازی کرد تا احتمال وقوع این مقادیر مشخص شوند. در هر کدام از این روش‌ها برای اطمینان از پیش‌بینی درست اثرات موج باید ابزارهای عددی را در هر مرحله (فاز سینماتیک زمین لغزش، فاز تولید موج و فازهای انتشار و بالاروی موج) تست کنیم.

[25] چندین آزمایش را با جسم‌های لغزنده تغییر شکل‌پذیر انجام دادند تا معادلات پیش‌بینی خصوصیات کلیدی موج از قبیل نوسانت موج و تندی آن را بدست آورند. پژوهش‌های عددی زیادی روی امواج ناشی از زمین لغزه انجام شده است که از مدل‌های مختلف با فرضیات گوناگون درباره حفظ انرژی، فیزیک سیال، حرکت و هندسه آن استفاده کرده‌اند. [۲۶-۲۷] یک شبیه‌سازی عددی را برای مطالعه توده لغزش تغییر شکل‌پذیر (سیال مانند) انجام دادند که در آن امواج سطحی را با به‌کارگیری معادلات آب سطحی غیرخطی برای امواج آب و ماده لغزنده بررسی کردند. همین رویکرد توسط نویسندگان دیگر [۲۸-۳۱] برای شبیه‌سازی امواج ناشی از رانش زمین در زیر دریا استفاده شد.

اگرچه رویکرد آب سطحی برای شبیه‌سازی سونامی‌های عملی مانند سونامی هملرز نسبتاً دقیق است ولی کاربرد آن برای شبیه‌سازی سونامی ناشی از لغزش زمین و امواج ضربه‌ای مناسب نیست چون شتاب عمودی را در بر نمی‌گیرد. این پارامتر فیزیکی حین مرحله اولیه جابجایی توده لغزش یا ایجاد موج بسیار مهم و حیاتی است [۳۲-۳۴]. در بسیاری از آزمایش‌های عددی بر روی لغزش زمین زیر سطحی [۳۵] به این نتیجه رسیدیم که به محض خروج امواج ایجاد شده از ناحیه کم عمق و ورود آن‌ها به ناحیه عمیق شاهد این هستیم که امواج در رژیم موج میانی قرار می‌گیرند که در آن سرعت عمودی سیال و شتاب آن از اهمیت بالایی برخوردارند. [۳۶] نیز یک پژوهش دقیق را با اصلاح مدل NASA-VOF2D [37] انجام داد تا امواج سونامی تولید شده توسط اجسام صلب لغزنده (فرورفته در آب یا رو سطحی) روی یک صفحه شیب دار را شبیه‌سازی کنند. مدل عددی آن‌ها بر اساس معادلات ناویر-استوکس برای سیالات تراکم‌ناپذیر و روش حجم سیال (VOF) بود تا بتوانند سطح آزاد آب را ردیابی کنند. سپس این مدل عددی برای آزمایش‌های سه بعدی نیز توسعه یافت که در آن زمین لغزه‌های رو سطحی یا زیر سطحی و یا تغییر شکل کف دریا را داشتیم. [۳۶] نیز از یک مدل عددی آب سطحی استفاده کرد تا راندمان تولید سونامی با ریزش کوه به درون آب عمیق را بررسی کند. [۳۸] یک زمین لغزه زیر دریایی را با استفاده از یک مدل مکانیک سیالات دو بعدی بر اساس معادلات ناویر-استوکس شبیه‌سازی کردند. حرکت سطح آزاد آب توسط یک مدل VOF بیان شد و رسوب نیز یک سیال ویسکوپلاستیک با پارامترهای رئولوژیکی مانند ضرایب ویسکوزیته و نفوذ، تنش تسلیم بینگهام و اصطکاک بین لایه‌های در نظر گرفته شد. این مدل با یک جواب تجربی و آزمایش‌های انجام شده روی یک جریان سیال ویسکوز بینگهام در آزمایشگاه بررسی شد و برای یک توده لغزنده دانه‌ای شکل و جسم صلب لغزنده تست گردید [۳۶]. آن‌ها روی اهمیت رئولوژی رسوب و پارامتر نفوذ تأکید داشتند.

[39] از یک مدل عددی دوبعدی به نام هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) استفاده کردند که در مقاله [۴۰] توضیح داده شده بود. آن‌ها از این مدل برای شناسایی فرمولاسیون موج و دینامیک جسم لغزنده جعبه مانند استفاده کردند که با مولد موج اسکات راسل ایجاد شده بود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با غرق شدن این جسم جعبه مانند، فواره آب از پایین به سمت بالا حرکت می‌کند تا یک موج سقوط معکوس ایجاد شود که امواج و حباب‌های هوای به دام افتاده در آن تشکیل می‌شوند. نتایج عددی مدل SPH با توجه به عمق اولیه آب بین ۳ تا ۱۸ درصد بیشتر از نتایج آزمایشگاهی بودند. [۴۱] یک مدل عددی را برای بررسی امواج ایجاد شده توسط رانش زمین در زیر سطح آب استفاده کردند و نتایج آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. در این پژوهش از مدل متوسط‌گیری عمق یا معادله غیرخطی آب سطحی (NSWE) برای شبیه‌سازی نحوه انتشار موج سونامی استفاده شد که نتایج آن برای نوسان موج کمتر از حد معمول تخمین زده شده بود. جسم لغزنده نیز بصورت یک قطعه شبه بیضوی بود. [۴۲] نیز انتشار سونامی را با استفاده



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱  
تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



از GEOWAVE و با ادغام مدل بوسینسک غیرخطی FUNWAVE شبیه‌سازی کردند. آن‌ها ادعا کردند که برای مدل‌سازی سونامی ناشی از ریزش مواد در زیر سطح آب به مدل‌های انتشار غیرخطی سونامی پراکنده نیاز داریم. اخیراً نیز [۱۶] یک مدل عددی را بر اساس معادلات آب سطحی غیرهیدرواستاتیک ارائه دادند که می‌توانست تأثیر هندسه بدنه آب در انتشار سونامی در نقاط دور را مشخص کند. آن‌ها از معادلات شبه نظری برای پیش‌بینی بزرگی امواج ایده‌آل (امواج منفرد، کنویدال، استوکس و غیره) در آب استفاده کردند و سونامی ایجاد شده توسط زمین لغزه را بصورت دو بعدی و در آزمایشگاه شبیه‌سازی کردند تا اثر توزیع فرکانس را مشخص کنند. آن‌ها فهمیدند که می‌توان از فرایند پراکنده شدن موج‌های منفرد و کنویدال برای ارزیابی خطر سونامی ناشی از زمین لغزه صرف‌نظر کرد ولی این فرایند برای امواج استوکس مانند در آب‌های عمیق‌تر مهم است.

در زمینه‌ی مدل‌سازی عددی جریان پتانسیل، [۴۳-۴۴] از جریان‌های پتانسیل دوبعدی و سه بعدی غیرخطی یا روش المان مرزی برای شبیه‌سازی رانش زمین در زیر آب و انتشار موج حاصل استفاده کردند. آن‌ها زمین لغزه‌ها را از لحاظ هندسی ایده‌آل در نظر گرفتند. یعنی برای آزمایش‌های دو بعدی از یک جسم شبه بیضی استفاده کردند و در آزمایش سه بعدی نیز یک جسم بشقاب مانند استفاده شد. جابجایی مرکز توده لغزنده روی سطح شیبدار بر اساس معادله تعادل نیروی دینامیک و با استفاده از قوانین نیوتن و برخی ضرایب تجربی پیش‌بینی شد. اما نیروهای برشی که در امتداد جسم لغزنده و سطح مشترک آب هستند در این پژوهش در نظر گرفته نشده بودند.

هیدروکد SAGE چندفازی یکی دیگر از مدل‌های عددی معروف است. این مدل توسط محققان زیادی برای شبیه‌سازی سونامی‌های ناشی از زمین لغزه استفاده شده است و [۴۵-۴۷] شماری از این افراداند. این کد در ابتدا توسط [۴۸] برای آزمایشگاه ملی Los Alamos توسعه یافت که عمدتاً برای شبیه‌سازی مواد تراکم‌پذیر مانند اصابت شهاب سنگ استفاده می‌شود. این کد در واقع مجموعه کامل معادلات ناویر-استوکس برای سیالات تراکم‌پذیر را حل می‌کند که شامل معادلات حالت و مدل‌های مختلف تشکیل برای مقاومت مصالح هستند. اصلاح شبکه بندی تطبیقی اویلری خودکار با یک الگوی تقاضا گودنوف با رزولوشن بالا بکار گرفته شد. شبکه بندی تطبیقی را می‌توان بر اساس ضوابط مختلف نظیر گرادیان متغیرهای فیزیکی و خواص فاز ماده (در حالت مدل‌سازی زمین لغزه‌ها و سطح مشترک آب-هوا-جسم لغزنده) بهبود بخشید. [49] یک مدل عددی را برای بازسازی امواج و بالاروی و پایین رفت آب استفاده کردند که بر اساس شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) بود و امواج نیز با لغزش یک جسم صلب تولید شده بودند. این مدل عددی قابلیت حل معادلات ناویر-استوکس سه بعدی را دارد و از مدل زیرشبکه اسمگورینسکی برای پراکندگی تلاطم استفاده می‌کند و روش VOF نیز برای ردیابی سطح آزاد آب و جابجایی خط ساحلی استفاده شد. آن‌ها فهمیدند برای حالتی که جسم صلب

لغزنده درون آب غوطه ور شده است، با فرو رفتن جسم در آب بالاروی آب از کنار آن کاهش می‌یابد و نهایتاً به صفر می‌رسد. [۵۱ و ۵۰] نیز از یک مدل ناویر-استوکس دوبعدی برای تولید موج توسط اجسام صلب و تغییرشکل پذیر استفاده کردند. روش VOF نیز برای ردیابی سطح آزاد آب و تغییرات خط ساحلی استفاده شد. این مدل عددی قابلیت بیان مرزهای منحنی‌وار پیچیده در یک سیستم شبکه بندی کارترین را دارد و می‌تواند با مرزهای متحرک تغییرشکل یافته نیز کار کند. این مدل با استفاده از راه حل‌های تحلیلی ارائه شده در مقاله [۵۲] برای تولید و بالاروی امواج به یک ساحل مسطح و هموار دوبعدی مورد تایید قرار گرفت. نتایج مدل با جواب‌های مدل آب سطحی مقایسه شد تا تفاوت‌های دو مدل مشخص شوند. از آنجایی که جواب معادله ناویر-استوکس شامل مولفه عمودی سرعت/شتاب است، زمانی که اثرات غیرهیدرواستاتیک بزرگ بودند شاهد تفاوت زیادی بین نتایج دو مدل بودیم. بعدها، [۵۳] این مدل عددی را برای آزمایش‌های زمین لغزه سطحی اشاره شده در مقاله [۳۶] تست کرد. این آزمایش نشان دهنده هیدرودینامیک موج پیچیده بود و بدلیل غیر خطی بودن امواج، چالشی برای مدل‌سازی با دینامیک سیالات محاسباتی پیشرفته است. بر خلاف مدل VOF، [54] از یک هیدروکد لاگرانژی بدون شبکه و بر اساس SPH استفاده کردند تا تأثیر پراکندگی خطی موج را کاهش دهند و ردیابی سطح مشترک مواد بهتر انجام شود. این مدل عددی برای بازسازی حادثه ریزش کوه در خلیج لیتویا در سال ۱۹۵۸ استفاده شد.

[۵۵] کاربرد یک مدل ناویر-استوکس چند سیالی برای تولید امواج ناشی از اجسام لغزنده ایده‌آل یا تغییرشکل پذیر را گزارش کردند. این مدل عددی تمامی نواحی محاسباتی یعنی آب، هوا و جسم لغزنده را بصورت سیال نیوتنی در نظر می‌گرفت. هم‌چنین این مدل با استفاده از یک راه حل تحلیلی و چندین آزمایش از پژوهش‌های قبلی مورد تایید قرار گرفت. طبق یافته‌های این مقاله، در زمین لغزه‌های رو سطحی، جریان آب یا هوای اطراف جسم لغزنده تأثیر بسزایی بر جابجایی جسم لغزنده دارند که طبق مقاله [۵۶]، نیروی درگ ناشی از به دام افتادن هوا در حین حرکت جسم لغزنده باعث جابجایی آن می‌شود. این مدل عددی در مقاله [۵۷-۵۸] با موفقیت برای آزمایش‌های زمین لغزش سه بعدی استفاده شد. اخیراً نیز [۵۹] یک پژوهش عددی روی SMF انجام دادند تا تأثیر رتولوژی زمین لغزه و سینماتیک آن روی نواحی ساحلی را مشخص کنند. آن‌ها اعتبار یک مدل عددی دو لایه‌ای را برای آزمایش‌های انجام شده روی یک موج کوچک بررسی کردند. این مدل دو لایه‌ای (NHWAVE) از یک مختصات  $\sigma$  سه بعدی برای لایه بالایی جریان (آب) استفاده کرد. لایه زیرین (توده لغزنده) یکپارچه است و توسط یک سیال نیوتنی متراکم یا یک جریان دانه‌ای تعریف می‌شود که در آن، اصطکاک کولمب بر تنش‌های بین ذره-ای حاکم است. این مدل عددی از شتاب عمودی صرف نظر می‌کند و به همین دلیل برای شب‌های متوسط تا پایین کف دریا دقیق‌تر است. این پژوهش نشان داد که اجسام تغییرشکل‌پذیر در مقایسه با یک جسم لغزنده صلب امواج سونامی کوچکتری را تولید می‌کنند.



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱  
تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



بنابراین آن‌ها نتیجه گرفتند که یک جسم صلب، تخمین متوسطی از خطر سونامی SMF را از لحاظ ماکزیمم مقدار بالاروی آب در ساحل فراهم می‌کند.

#### ۴- نتایج بررسی متغیرهای حاکم

در جدول ۱ مروری بر فرضیات و پارامترهای مدل‌های عددی جهت بررسی اجمالی آورده شده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

بطور کلی بررسی این پدیده بصورت مدل عددی به دو صورت دوبعدی در یک کانال و سه بعدی در یک مخزن یا حوضچه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که

مطالعه امواج ضربه‌ای بصورت عددی با فرضیات ساده کننده همراه است و در نظر گرفتن مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی توده لغزش همراه با انواع امواج منفرد و منظم نامنظم امکانپذیر است. اخیراً با پیشرفت ابزار مهندسی و ظهور کامپیوترهای قوی، می‌توان فرضیات مطالعه این پدیده را واقعی‌تر و گسترده‌تر بررسی کرد. با در نظر گرفتن انتشار موج در حالت سه بعدی با مقیاس بزرگ و مطالعه پدیده روگذری از تاج سدها و بررسی فرسایش و استخراج هیدروگراف خروجی ناشی از این موج جهت بهبود پیشبینی خطرات احتمالی، می‌توان از فجاجع انسانی و اقتصادی ناشی از این رخداد جلوگیری کرد.

جدول ۱ فرضیات در مدل‌های عددی

| ردیف | محقق                             | معادلات حاکم | بُعد  | روش عددی | فاز | ملاحظات   |
|------|----------------------------------|--------------|-------|----------|-----|---|
| 1    | Savage and Hutter (1989)         | DAE          | 1D    | FDM      | SPM | دو طرح متفاوت محدود عددی، یکی لاگرانژی و دیگری از نوع اویلری ارائه شده است. در حالی که تکنیک اویلری قادر است موج را بازتولید کند، به نظر می‌رسد نتایج کاذب برای شرایط اولیه کلی تر است و تکنیک لاگرانژی برای شبیه سازی مصالح دانه‌ای مناسب‌تر است. [۶۰] |
| 2    | Hutter and Greve (1993)          | DAE          | 2D    | FDM      | SPM | شبیه سازی سقوط بهمین با استفاده از مصالح دانه‌ای. بررسی تاثیر شکل و هندسه‌ی مصالح و زاویه‌ی لغزش. [۶۱]  |
| 3    | Hungr (1995)                     | DAE          | 1D    | FDM      | SPM | توسعه‌ی یک مدل برای بررسی لغزش سریع بهمین و توده‌های سنگی و جریان‌های واریزه‌ای [۶۲]  |
| 4    | O'Brien et al. (1993)            | DAE          | 2D    | FDM      | MM  | توسعه مدل دوبعدی برای مطالعه و شبیه‌سازی حرکت گل و لای در جریان سیل و برخورد به حجم آب. [۶۳]  |
| 5    | Iverson (1997b)                  | DAE          | 1D    | FDM      | MM  | مدلسازی هیدرولیکی خیزاب جریان‌های چگال با اندرکنش سیال- مصالح صلب [۶۴]  |
| 6    | Laigle and Coussot (1997)        | DAE          | 1D    | FVM      | SPM | [۶۵]-   |
| 7    | Wieland et al. (1999)            | DAE          | 2D    | M FV-FD  | SPM | بررسی سطح آزاد جریان ریزش بهمین با مصالح دانه‌ای در یک شوت با منحنی جانبی سطحی. [۶۶]  |
| 8    | Gray et al. (1999)               | DAE          | 2D    | FDM      | SPM | مطالعه‌ی جریان سطح آزاد گرانش بهمین‌های دانه‌ای بر روی توپوگرافی بستر پیچیده. [۶۷]  |
| 9    | Brufau et al. (2000)             | DAE          | 1D    | FVM      | MM  | مدلسازی جریان واریزه‌ای [۶۸]  |
| 10   | Imran et al. (2001)              | PSFA         | 1D    | FDM      | SPM | مدلسازی حرکت جریانهای گل آلود زیر آب و رو سطحی [۶۹]   |
| 11   | Denlinger and Iverson (2001)     | DAE          | 3D    | FVM      | MM  | جریان توده‌های دانه‌ای متغیر سیال در ناحیه سه بعدی سیال [۷۰]  |
| 12   | Frenette et al. (2002)           | NSE          | 1D    | FEM      | MPM | مدل سازی یکپارچه جریان سیال و مصالح دانه‌ای در پدیده‌ی شکست سد [۷۱]   |
| 13   | Sailer et al. (2002)             | DAE          | 2D    | FEM      | SPM | محاسبه مجدد بهمین مصنوعی با SAMOS و تأیید اعتبار با اندازه‌گیری امواج رادار داپلر   |
|      |                                  |              | 3D    | FVM      | MM  | مدل سه بعدی نتایج قابل قبولی ارائه کرد. [۷۲]  |
| 14   | Aranson and Tsimring (2002)      | DAE          | 1D 2D | FDM      | MM  | بررسی نظریه پیوستگی جریانهای دانه‌ای تا حدی سیال شده (جاری شدن مصالح جامد) [۷۳]   |
| 15   | Pitman et al. (2003a, b)         | DAE          | 2D    | FVM      | SPM | شبیه سازی لغزش مصالح دانه‌ای و حرکت بهمین. [۷۴]   |
| 16   | Mangeney-Castelnau et al. (2003) | DAE          | 1D    | FVM      | SPM | مدل سازی بهمین ها بر اساس معادلات سنت ونانت با استفاده از یک طرح جنبشی. این مدل از تقریب موج بلند بر اساس نسبت ابعاد کوچک ریزش بهمین در مدل کلاسیک سنت ونانت آب سطحی استفاده می‌کند. [۷۵]   |



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱  
تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



|  |     |       |          |     |                               |    |
|--|-----|-------|----------|-----|-------------------------------|----|
| پیشنهاد مدل دینامیکی برای بررسی رانش زمین ناشی از بارندگی در دامنه‌های طبیعی [۷۶]  | SPM | L FEM | 3D       | DAE | Chen and Lee (2003)           | 17 |
| بررسی امواج ضربه‌ای و مناطق عاری از ذرات در جریانهای سریع دانه‌ای در سطح آزاد سیال [۷۷]  | SPM | FVM   | 2D       | DAE | Gray et al. (2003)            | 18 |
| بررسی توسعه‌ی موج ناشی از جریان چگال با استفاده از معادله‌ی یک بهدی آب‌های سطحی. تجزیه و تحلیل آماری از امواج چگال نشان می‌دهد که یک نمایش خوب از آمار موج را می‌توان با کالیبراسیون مناسب پارامترهای رئولوژیکی بدست آورد. [۷۸]                                | SPM | FVM   | 1D       | DAE | Zanuttigh and Lamberti (2004) | 19 |
| توسعه‌ی مدل برای بررسی حرکت سریع توده‌ی لغزش در طول زمین [۷۹]  | SPM | SPH   | 3D       | DAE | McDougall and Hungr (2004)    | 20 |
| بررسی نظریه و محاسبات بهمن‌های دانه‌ای نامنظم در محیط سه بعدی [۸۰]   | MM  | FVM   | 3D       | DAE | Denlinger and Iverson (2004)  | 21 |
| بررسی اندرکنش بین زمین لغزش زیر آبی و سیال مخزن [۸۱]   | MM  | FVM   | 2D       | DAE | Pudasaini et al. (2005)       | 22 |
| بررسی دینامیک بهمن‌های دانه‌ای [۸۲]  | SPM | FDM   | 2D       | DAE | Toni and Scotton (2005)       | 23 |
| ارائه کد المان محدود برای مقایسه‌ی روابط حاکم بر جریان چگال. تحلیل حساسیت نشان داد که شکل هیدروگراف ورودی بالادست تأثیر چندانی بر شرایط جریان در قسمت پایین مسیر جریان ندارد، در حالی که حجم رویداد بسیار مهمتر است. [۸۳]                                      | SPM | FEM   | 1D       | DAE | Naef et al. (2006)            | 24 |
| مدلسازی جریان‌های مشابه لغزش. [۸۴]   | SPM | FEM   | 2D 3D    | NSE | Crosta et al. (2006)          | 25 |
| معرفی مدل‌های ساده شده جریان پخش مواد دانه‌ای خشک. مدل جدید با نتایج تجربی، هم برای بهمن‌های سطحی و هم جریانهای گسترده، سازگاری خوبی دارد. این وسیله ابزاری برای گسترش قابل ملاحظه کاربرد مدل‌های جریان سطحی در پدیده زمین لغزش واقعی حاوی پخش جریان است. [۸۵] | SPM | FDM   | 1D       | DAE | Hungr (2008)                  | 26 |
| FLATMODEL در چندین رویداد واقعی رخ داده مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج شبیه سازی نشان داد که مدل می‌تواند ویژگی‌های مختلف مشاهده شده در این زمینه را به خوبی نشان دهد [۸۶]  | SPM | FVM   | 2D       | DAE | Medina et al. (2008a, 2008b)  | 27 |
| برآورد نیروی ضربه ایجاد شده توسط جریان دانه‌ای بر یک انسداد صلب. روش مدلسازی انجام شده در این مطالعه برای برآورد نیروی شبه استاتیکی تولید شده توسط رسوب در هنگام قرار گرفتن روی دیوار پس از برخورد استفاده می‌شود. [۸۷]  | MPM | FDM   | 2D       | NSE | Moriguchi et al. (2009)       | 28 |
| شبیه سازی جریان چگال در کانال‌های فرسایش پذیر. دو برنامه کاربردی واقعی کارایی کد و نحوه استفاده از آن را در شرایط پیش بینی کننده مانند ارزیابی کار دفاعی و تأیید یا نقشه برداری از خطرات نشان می‌دهد. [۸۸]   | MM  | FVM   | 2D       | DAE | Armanini et al. (2009)        | 29 |
| مدلسازی با SAMOS-AT و مقایسه‌ی نتایج با رویداد واقعی در آلاسکا. [۸۹]   | SPM | FVM   | 2D       | DAE | Sampl and Granig (2009)       | 30 |
| استفاده از معادلات ناویر-استوکس دقت و سازگاری بیشتری داشت. ارائه‌ی معادلات دیفرانسیل حاکم و برخی از ویژگی‌های ورودی و خروجی RAMMS، سپس مدل‌ها را با دقت برای شبیه سازی دو رویداد بهمن ثبت شده در محل آزمایش Vallée de la Sionne به کار می‌بریم. [۹۰]           | SPM | FVM   | 3D       | DAE | Christen et al. (2010)        | 31 |
| مدلسازی فشار حفره‌های سیال در جریان‌های واریزه‌ای. پیش بینی‌های عددی از این فرایند به خوبی با داده‌های تجربی مطابقت دارد، اما با در نظر گرفتن اثرات تفکیک اندازه دانه‌ها (دانه بندی)، پیش بینی‌ها ممکن است بهبود یابد. [۹۱]                                    | MPM | FVM   | 1D       | DAE | George and Iverson (2011)     | 32 |
| ارائه مدل جدید جریان آواری دو مرحله‌ای شامل بسیاری پدیده‌ی فیزیکی ضروری، این مدل می‌تواند دینامیک پیچیده جریانهای آوار رو سطحی دو فازی، جریانهای پراکنده و پراز ذرات، انتقال رسوبات و جریانهای آوار زیر آبی و پدیده‌های مرتبط را توصیف کند. [۹۲]               | MPM | FVM   | 1D 2D 3D | DAE | Pudasaini (2012)              | 33 |
| بررسی جریانهای پرسرعت دو بعدی کامل از مواد دانه‌ای ویسکوپلاستی ساده با سرعت لغزش دینامیک وابسته به فشار. نتایج نشان داد برش قابل مشاهده عمدتاً در نزدیکی سطح لغزش مطابق با مشاهدات صورت می‌گیرد اما برخلاف شرایط مرزی بدون لغزش است. [۹۳]                      | SPM | FVM   | 2D       | DAE | Domnik and Pudasaini (2012)   | 34 |



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



|  |     |         |    |      |                               |    |
|--|-----|---------|----|------|-------------------------------|----|
| هدف نهایی این تحقیق دستیابی به ابزارهای بهتر محاسبه سونامی برای کاربردهای واقعی مدل‌های سه بعدی در سونامی‌های ناشی از زمین لغزش است که برای ساختن نقشه‌های سیلاب در خلیج مکزیک و مناطق کارائیب ضروری است. [۹۴]   | MPM | CFD     | 3D | NSE  | Kim (2012)                    | 35 |
| بررسی جریان دانه‌ای بر روی شیب نامنظم. مقایسه بین نتایج ارائه شده هنگام استفاده از سیستم مختصات جهانی و محلی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که از سیستم مختصات جهانی و محلی می‌توان برای پیش بینی درست رفتار کلی پدیده‌های در نظر گرفته شده در این کار استفاده کرد. [۹۵]   | SPM | FVM     | 2D | DAE  | Juez et al. (2013)            | 36 |
| بررسی جریانهای سطحی دو مولفه‌ای با تغییرات عمودی. معادله جدید در این مدل برای مرکز عمودی ذرات از جرم با گرفتن اولین لحظه با توجه به مختصات عمودی، از معادله پیوستگی جرم ذرات بدست می‌آید. این رویکرد تقریب بوسینیسک را ایجاد نمی‌کند و منجر به شرایط اضافی می‌شود که شار مومنتوم را به مرکز عمودی جرم متصل می‌کند. [۹۶]                          | MPM | -       | 1D | DAE  | Kowalski and McElwaine (2013) | 37 |
| مطالعه جریان سطح آزاد مخلوط آب-کائولینیت با استفاده از روش نیمه ضمنی ذرات متحرک. روش پیشنهادی برای مشکل فروپاشی مخلوط آب و کائولینیت استفاده می‌شود و ثابت شده است که می‌تواند ویژگیهای قابل توجه جریان را که در آزمایشات آزمایشگاهی مشاهده شده است، بازتولید کند. [۹۷]  | MM  | MPS     | 1D | NSE  | Xie et al. (2013)             | 38 |
| طرح های عددی کارآمد برای بهمن های ویسکوپلاستیک. در زمینه بهمن‌ها، این بدان معناست که پس از پایین آمدن از شیب، مواد می‌توانند متوقف شوند و سطح آزاد آن بر خلاف مورد آب، شکل غیر پیش پا افتاده ای دارد. [۹۸]   | SPM | FVM     | 1D | DAE  | Fernández-Nieto et al. (2014) | 39 |
| یک مدل عددی سه بعدی برای جریانهای گرانول متراکم بر اساس رئولوژی $\mu$ . اجرای سه بعدی اصطلاحاً رئولوژی را برای محاسبه دقیق و کارآمد جریانهای دانه‌ای متراکم حالت پایدار ارائه می‌دهد. [۹۹]   | SPM | FEM     | 3D | DAE  | Chauchat and Medale (2014)    | 40 |
| ارائه‌ی یک قانون جدید (رئولوژی و معادله حالت) برای رژیم اصطکاکی. مجموعه معادلات در شرایط جریان یکنواخت یکپارچه شده است. مکانیسم های انتقال انرژی توضیح داده شده است. داده های تجربی نتایج مدل را تأیید می‌کند. [۱۰۰]   | MM  | FEM     | 1D | DAE  | Armanini et al. (2014)        | 41 |
| تاثیرات کسر حجمی بر حرکت جریان آواری مورد بحث قرار گرفته و مقایسه بین مدل حاضر و مدل پیتمن ارائه شده است. نتایج آزمایشات عددی نشان می‌دهد که تنش ویسکوز فاز سیال، تأثیر بسزایی در روند حرکت جریان آواری دارد و کسر حجمی فاز جامد بطور قابل توجهی بر پویایی جریان آواری تأثیر می‌گذارد. [۱۰۱]   | MPM | FVM     | 2D | DAE  | He et al. (2014)              | 42 |
| نتایج مدل نشان دهنده بهبود خواص و استحکام ساختار حجم محدود پیشنهادی است. علاوه بر این، خواص جریان دانه ای با خطای محاسباتی کمتر از ۵ برآورد می‌شود. این خطاها به طور مداوم کمتر از خطاهایی است که با استفاده از طرح های حجم محدود مشابه بدون تغییرات پیشنهادی به دست آمده است که می‌تواند تا ۳۰ درصد برآورد بیش از حد را در پی داشته باشد. [۱۰۲] | MM  | FVM     | 1D | DAE  | Yavari Ramshe et al. (2015)   | 43 |
| از رابطه‌ی پیشنهادی آن‌ها برای پیش بینی حداکثر بالاروی موج بر روی یک سد در معرض تحریک زلزله استفاده کرد. از این رابطه می‌توان برای برآورد ارتفاع آزاد سدها در برابر امواج سطحی ناشی از زلزله استفاده کرد. [۱۰۳]  | -   | VOF     | 2D | NSE  | Demirel & Aydin (2015)        | 44 |
| مقایسه داده‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برای تاریخچه تراز سطحی، مشخصات سطح و توزیع سرعت عمودی انجام شد و سازگاری منطقی را نشان داد. پس از اعتبار سنجی مدل، از آن برای نشان دادن ویژگی های انرژی جنبشی سرعت و تلاطم در طول تولید موج و فرایندهای افزایش استفاده شد. [۱۰۴]  | -   | VOF     | 2D | RANS | Xiao & Lin (2016)             | 45 |
| یک استراتژی تولید مش پیشنهاد شده و اعتبارسنجی شده است و با پیش بینی دقیق تقریباً ۲۲ برابر کاهش هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، این استراتژی تولید مش برای شبیه سازی موج زمین لغزش مخزن لاکسیوا اعمال شد و نتایج سازگاری حاصل شد. [۱۰۵]  | SPM | CFD     | 3D | RANS | Li et al. (2019)              | 46 |
| رویکرد پیشنهادی میدان سیال را با وضوح بالا محاسبه کرده و اندرکنش متقابل را دقیقاً منعکس می‌کند. پس از تأیید عملکرد کلی توسط دو   | MPM | CFD-DEM | 2D | NSE  | Mao et al. (2019)             | 47 |

مورد معیار، از روش CFD-DEM حل شده برای شبیه سازی حرکت زمین لغزش و امواج ایجاد شده ناشی از آن در خلیج لیتویا استفاده شد. [۱۰۶]

نشان دادند که سازگاری خوبی برای طیف وسیعی از امواج رانش زمین با استفاده از تعداد بسیار کمی از لایه های افقی (به عنوان مثال سه یا پنج لایه) حاصل شده است و مدل پیشنهادی را می توان به عنوان جایگزینی مناسب برای شبیه سازی رانش زمین زیر سطحی و انتشار امواج حاصل در نظر گرفت. [۱۰۷]

MPM CFD 3D NSE Ai et al. 48 (2021)

[13] Mangeney-Castelnau A, Vilotte JP, Bristeau MO, Perthame B, Bouchet F, Siomeoni C, Yerneni S (2003) Numerical modeling of avalanches based on Saint Venant equations using a kinetic scheme. *J Geophys Res* 108(B11):2527. doi:10.1029/2002JB002024

[14] Medina V, Bateman A, Hürlimann M (2008a) A 2D finite volume model for debris flow and its application to events occurred in the Eastern Pyrenees. *Int J Sediment Res* 23(4):348-360. doi:10.1016/S1001-6279(09)60006-8

[15] Medina V, Hürlimann M, Bateman A (2008b) Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides* 5:127-142. doi:10.1007/s10346-007-0102-3

[16] Ruffini, G., Heller, V., Briganti, R. (2020). Numerical characterisation and efficient prediction of land-slide-tsunami propagation over a wide range of idealised bathymetries. *Coastal Engineering* (in preparation).

[17] O'Brien JS, Julien PY, Fullerton WT (1993) Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *J Hydraul Eng* 119:244. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244)

[18] Pudasaini SP (2012) A general two-phase debris flow model. *J Geophys Res* 117:F03010. doi:10.1029/2011JF002186

[19] Sampl P, Granig M (2009) Avalanche simulation with SAMOS-AT. *Proc Int Snow Science Workshops, Davos*, pp. 519-523

[20] Harbitz CB, Lovholt F, Bungum H (2014b) Submarine landslide tsunamis: how extreme and how likely? *Nat Hazards* 72:1341-1374. doi:10.1007/s11069-013-0681-3

[21] Abadie S, Harris J, Grilli S, Fabre R (2012) Numerical modeling of tsunami waves generated by the flank collapse of the Cumbre Volcano (La Palma, Canary Islands): tsunami source and near field effects. *J Geophys Res* 117(C05030). doi:10.1029/2011JC007646

[22] Demirel, E. & Aydin, I. (2016). Numerical Simulation and Formulation of Wave Run-Up on Dam Face due to Ground Oscillations Using Major Earthquake Acceleration Records. *Journal of Engineering Mechanics* Vol. 142, Issue 6.

[23] Li, G., Chen, G., Li, P., & Jing, H. (2019). Efficient and accurate 3-D numerical modelling of landslide tsunami. *Water*, 11(10), 2033.

[24] Zhang, Y., Li, D., Chen, L., Yin, K., Xiao, L., Fu, X., ... & Leo, C. (2020). Numerical analysis of landslide-generated impulse waves affected by the reservoir geometry. *Engineering Geology*, 266, 105390.

[25] Wang, X., Shi, C., Liu, Q., & An, Y. (2021). Numerical study on near-field characteristics of landslide-generated impulse waves in channel reservoirs. *Journal of Hydrology*, 595, 126012.

[26] Gittings ML (1992) 1992 SAIC's Adaptive Grid Eulerian Code. *Defense Nuclear Agency Numerical Methods Symposium*, pp 28-30.

[27] Jiang Z, Haff PK (1993) Multiparticle simulation methods applied to the micromechanics of bed load transport. *Water Resour Res* 29(2):399-412. doi:10.1029/92WR02063

## ۶- تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافی ندارند.

## ۷- حمایت مالی

این تحقیق از هیچگونه حمایت مالی ای برخوردار نبوده است.

## ۸- مراجع

[1] Mao, J., Zhao, L., Di, Y., Liu, X., & Xu, W. (2020) A resolved CFD-DEM approach for the simulation of landslides and impulse waves. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 359, 112750.

[2] Heller V, Bruggemann M, Spinneken J, Rogers BD (2016) Composite modelling of subaerial landslide-tsunamis in different water body geometries and novel insight into slide and wave kinematics. *Coast Eng* 109:20-41. doi:10.1016/j.coastaleng.2015.12.004

[3] Cheng, Z., Hsu, T. J., & Calantoni, J. (2017). SedFoam: A multi-dimensional Eulerian two phase model for sediment transport and its application to momentary bed failure. *Coastal Engineering*, 119, 32-50.

[4] Rettenmaier, D., Deising, D., Ouedraogo, Y., Gjonaj, E., De Gerssem, H., Bothe, D. & Marschall, H. (2019). Load balanced 2D and 3D adaptive mesh refinement in OpenFOAM. *SoftwareX*, 10, 100317.

[5] Rauter, M., HoBe, L., Mulligan, R. P., Take, W. A., & Løvholt, F. (2021). Numerical simulation of impulse wave generation by idealized landslides with OpenFOAM. *Coastal Engineering*, 165, 103815.

[6] Clous, L., Abadie, S. (2019). Simulation of energy transfers in waves generated by granular slides. *Landslides* 16(9):1663-1679.

[7] Ersoy, H., Karahan, M., Gelisli, K., Akgun, A., Anilan, T., Sunnetci, M.O., Yahsi, B.K. (2019). Modeling of the landslide-induced impulse waves in the Artvin Dam reservoir by empirical approach and 3D numerical simulation. *Engineering Geology* 249(1):112-128.

[8] Ruffini, G., Heller, V., Briganti, R. (2020). Numerical characterisation and efficient prediction of land-slide-tsunami propagation over a wide range of idealised bathymetries. *Coastal Engineering* (in preparation).

[9] Iverson RM, Denlinger RP (2001) Flow of variably fluidized granular masses across three dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory. *J Geophys Res* 106(B1):537-552. doi:10.1029/2000JB900329

[10] Juez C, Murillo J, García-Navarro P (2013) 2D simulation of granular flow over irregular steep slopes using global and local coordinates. *J Comput Phys* 255:166-204. doi:10.1016/j.jcp.2013.08.002

[11] Kafle J, Kattel P, Pokhrel P, Khattri KB, Gurung DB, Pudasaini SP (2013) Dynamic interaction between a two-phase submarine landslide and a fluid reservoir. *Int J LslidEnv* 1(1):35-36

[12] Laigle D, Coussot P (1997) Numerical modeling of mudflows. *J Hydraul Eng* 123:617-623. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:7(617)



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱  
تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



مطالعه مروری مدلسازی عددی موج ضربه ای ناشی از لغزش توده های عظیم به درون آب های ساکن و پارامترهای موثر بر آن

- [45] Mader CL, Gittings ML (2002) Modeling the 1958 Lituya Bay mega-tsunami II. *Sci Tsunami Hazards* 20(5):241-250
- [46] Mader CL, Gittings ML (2003) Dynamics of water cavity generation. *Sci Tsunami Hazards* 21(2):91-101
- [47] Gisler G, Weaver R, Gittings ML (2006) SAGE calculations of the tsunami threat from LaPalma. *Sci Tsunami Haz* 24(4):288-301
- [48] Gittings ML (1992) 1992 SAIC's Adaptive Grid Eulerian Code. Defense Nuclear Agency Numerical Methods Symposium, pp 28-30.
- [49] Liu J, Koshizuka S, Oka Y (2005a) A hybrid particle-mesh method for viscous, incompressible, multiphase flows. *J Comput Phys* 202:65-93. doi:10.1016/j.jcp.2004.07.002
- [50] Xue, H., Ma, Q., Diao, M., Jiang, L. (2019). Propagation characteristics of subaerial landslide-generated impulse waves. *Environmental Fluid Mechanics* 19(1):203-230.
- [51] Yavari-Ramshe, S., Ataie-Ashtiani, B. (2019). On the effects of landslide deformability and initial submergence on landslide-generated waves. *Landslides* 16(1):37-53.
- [52] Zhang, Y., Li, D., Yin, K., Xiao, L., Fu, X., Glade, T., Leo, C. (2020). Numerical analysis of landslide-generated impulse waves affected by the reservoir geometry. *Engineering Geology* 266(3):105390.
- [53] Romano, A., Bellotti, G., Di Risio, M. (2013). Wavenumber-frequency analysis of the landslide-generated tsunamis at a conical island. *Coastal Engineering* 81:32-43.128 .
- [54] Mulligan, R.P., Take, W.A., Bullard, G.K. (2019). Non-hydrostatic modeling of waves generated by landslides with different mobility. *Journal of Marine Science and Engineering* 7(8):266.
- [55] Abadie S, Morichon D, Grilli S, Glockner S (2010) Numerical simulation of waves generated by landslide using a multiple-fluid Navier-Stokes model. *Coast Eng* 57:779-794. doi:10.1016/j.coastaleng.2010.03.003
- [56] Frey, H., Huggel, C., Chisolm, R.E., Baer, P., McArdell, B., Cochachin, A., Portocarrero, C. (2018). Multi-source glacial lake outburst flood hazard assessment and mapping for Huaraz, Cordillera Blanca, Peru. *Frontiers in Earth Science* 6:201
- [57] Liu PLF, Wu TR, Raichlen F, Synolakis CE, Borrero JC (2005b) Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses. *J Fluid Mech* 536:107-144. doi:10.1017/S0022112005004799
- [58] Battaglia, D., Strozzi, T., Bezzi, A. (2015). Landslide hazard: Risk zonation and impact wave analysis for the Bumbuma Dam-Sierra Leone. *Geology for Society and Territory-Volume 2*:1129-1134, G. Lollino et al. (eds.), Springer, Basel.
- [59] Heller, V., Hager, W. H., & Minor, H. E. (2009). Landslide generated impulse waves in reservoirs: Basics and computation. *VAW-Mitteilungen*, 211.
- [60] Savage SB, Hutter K (1989) The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J Fluid Mech* 199:177-215. doi:10.1017/S0022112089000340
- [61] Hutter K, Greve R (1993) Two-dimensional similarity solutions for finite-mass granular avalanches with Coulomb- and viscous-type frictional resistance. *J Glaucoma* 39:357-372. doi:10.3198/1993JOG39-132-357-372
- [62] Hungr O (1995) A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Can Geotech J* 32:610-623. doi:10.1139/t95-063
- [63] O'Brien JS, Julien PY, Fullerton WT (1993) Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *J Hydraul Eng* 119:244. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244)
- [64] Iverson RM (1997b) Hydraulic modeling of unsteady debris-flow surges with solid-fluid interactions.
- [28] Harbitz CB, Pedersen G, Gjevik B (1993) Numerical simulations of large water waves due to landslides. *J Hydraul Eng* 119:1325-1342. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:12(1325)
- [29] Imamura F, Imteaz MA (1995) Long waves in two-layers: governing equations and numerical model. *Sci Tsunami Hazards* 13(1):3-24
- [30] Imran J, Parker G, Locat J, Lee H (2001) 1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows. *J Hydraul Eng* 127:959-968. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:11(959)
- [31] Heinrich P, Piatanesi A, Hébert H (2001) Numerical modelling of tsunami generation and propagation from submarine slumps: the 1998 Papua New Guinea event. *Geophys J Int* 145:97-111. doi:10.1111/j.1365-246X.2001.00336.x
- [32] [۲۲]Fritz HM (2002a) Initial phase of landslide generated impulse waves. Thesis Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Swiss ETH No 14'871, Swiss Federal Inst Techn, Zürich, ISSN 0374-0056.
- [33] Grilli ST, Vogelmann S, Watts P (2002) Development of a 3D numerical wave tank for modeling tsunami generation by underwater landslides. *Eng Anal Bound Elem* 26(4):301-313. doi:10.1016/S0955-7997(01)00113-8
- [34] Kafle, J. E. E. V. A. N. (2019). Advanced Dynamic Simulations of Landslide Generated Tsunami, Submarine Mass Movement and Obstacle Interaction (Doctoral dissertation, Ph.D. thesis, School of Science, Kathmandu University, Kavre, Nepal.)
- [35] Horrillo J, Wood A, Kim GB, Parambath A (2013) A simplified 3-D Navier-Stokes numerical model for landslide-tsunami: application to the Gulf of Mexico. *J Geophys Res: Oceans* 118:6934-6950. doi:10.1002/2012JC008689
- [36] Heinrich P (1992) Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides. *J Wtrwy Port Coast Oc Eng ASCE* 118(3):249-266. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:3(249)
- [37] Hirt CW, Nichols BD (1981) Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J Comput Phys* 39:201-225. doi:10.1016/0021-9991(81)90145-5
- [38] Gyeong-Bo, K. Numerical simulation of three dimensional tsunami generation by subaerial landslides (Doctoral dissertation, Thesis December 2012.)
- [39] Monaghan JJ, Kos A (2000) Scott Russell's wave generator. *Phys Fluids* 12(3):622-630
- [40] Xiao, H., & Lin, P. (2016). Numerical modeling and experimentation of the dam-overtopping process of landslide-generated waves in an idealized mountainous reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(12), 04016059.
- [41] Watts P (2000) Tsunami features of solid block underwater landslides. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 126(3):144-152. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:3(144)
- [42] Watts P, Grilli ST (2003) Underwater landslide shape, motion, deformation, and tsunami generation. *Proc the 13th Int Offshore and Polar Eng Conf, Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30*, pp 364-371.
- [43] Grilli ST, Watts P (1999) Modeling of waves generated by a moving submerged body, Applications to underwater landslides. *Eng Anal Bound Elem* 23:645-656. doi:10.1016/S0955-7997(99)00021-1
- [44] Grilli ST, Watts P (2005) Tsunami generation by submarine mass failure. Part I: modeling, experimental validation, and sensitivity analysis. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 131(6):628(3) doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:6(283)



9 (1) , 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



- [83] Naef D, Rickenmann D, Rutschmann P, McArdell BW (2006) Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6:155-165. doi:10.5194/nhess-6-155-2006
- [84] Imran J, Parker G, Locat J, Lee H (2001) 1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows. *J Hydraul Eng* 127:959-968. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:11(959)
- [85] Hungr O (2008) Simplified models of spreading flow of dry granular material. *Can Geotech J* 45:1156-1168. doi:10.1139/T08-059
- [86] Medina V, Hürlimann M, Bateman A (2008b) Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides* 5:127-142. doi:10.1007/s10346-007-0102-3
- [87] Moriguchi S, Borja RI, Yashima A (2009) Sawada K. Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction. *Acta Geotech* 4:57-71. doi:10.1007/s11440-009-0084-5
- [88] Armanini A, Fraccarollo L, Rosatti G (2009) Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels. *Comput Geosci* 35:993-1006. doi:10.1016/j.cageo.2007.11.008
- [89] Sampl P, Granig M (2009) Avalanche simulation with SAMOS-AT. *Proc Int Snow Science Workshops, Davos*, pp. 519-523
- [90] Christen M, Kowalski J, Bartelt P (2010) Ramms: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Reg Sci Technol* 63(1-2):1-14. doi:10.1016/j.coldregions.2010.04.005
- [91] George DL, Iverson RM (2011) A two-phase debris-flow model that includes coupled evolution of volume fractions, granular dilatancy, and pore-fluid pressure. *Italy J Eng Geol Environ*. doi:10.4408/IJEGE.2011-03.B-047
- [92] Pudasaini SP (2012) A general two-phase debris flow model. *J Geophys Res* 117:F03010. doi:10.1029/2011JF002186
- [93] Domnik B, Pudasaini SP (2012) Full two-dimensional rapid chute flows of simple viscoplastic granular materials with a pressure-dependent dynamic slip-velocity and their numerical simulations. *J Non-Newtonian Fluid Mech* 173:72-86. doi:10.1016/j.jnnfm.2012.03.001
- [94] Grilli ST, Watts P (2007) Modeling of waves generated by a moving submerged body, Applications to underwater landslides. *Eng Anal Bound Elem* 23:645-656. doi:10.1016/S0955-7997(99)00021-1
- [95] Juez C, Murillo J, García-Navarro P (2013) 2D simulation of granular flow over irregular steep slopes using global and local coordinates. *J Comput Phys* 255:166-204. doi:10.1016/j.jcp.2013.08.002
- [96] Kowalski J, McElwaine JN (2013) Shallow two-component gravity-driven flows with vertical variation. *J Fluid Mech* 714:434-462. doi:10.1017/jfm.2012.489
- [97] Xie J, Tai YC, Jin YC (2013) Study of the free surface flow of water-kaolinite mixture by moving particle semi-implicit (MPS) method. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 38:811-827. doi:10.1002/nag.2234
- [98] Fernández-Nieto ED, Gallardo JM, Vigneau P (2014) Efficient numerical schemes for viscoplastic avalanches. Part 1: the 1D case. *J Comput Phys* 264:55-90. doi:10.1016/j.jcp.2014.01.026
- [99] Chauchat J, Medale M (2014) A three-dimensional numerical model for dense granular flows based on the  $\mu(1)$  rheology. *J Comput Phys* 256:696-712. doi:10.1016/j.jcp.2013.09.004
- [100] Armanini A, Larcher M, Nucci E, Dumbser M (2014) Submerged granular channel flows driven by Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment. *ASCE, NY*, pp 550-560.
- [65] Laigle D, Coussot P (1997) Numerical modeling of mudflows. *J Hydraul Eng* 123:617-623. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:7(617)
- [66] Wieland M, Gray MNT, Hutter K (1999) Channelized free-surface flow of cohesionless granular avalanches in chute with shallow lateral curvature. *J Fluid Mech* 392:73-100. doi:10.1017/S0022112099005467
- [67] Gray JMNT, Wieland M, Hutter K (1999) Gravity-driven free surface flow of granular avalanches over complex basal topography. *Proc R Soc Lond A* 455:1841-1874. doi:10.1098/rspa.1999.0383
- [68] Brufau P, Garcia-Navarro P, Ghilardi P, Natale L, Savi F (2000) 1D mathematical modeling of debris flow. *J Hydraul Res* 38:435. doi:10.1080/00221680009498297
- [69] Imran J, Parker G, Locat J, Lee H (2001) 1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows. *J Hydraul Eng* 127:959-968. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:11(959)
- [70] Denlinger RP, Iverson RM (2001) Flow of variably fluidized granular masses across three dimensional terrain. 2. Numerical predictions and experimental tests. *J Geophys Res* 106(B1):537-552. doi:10.1029/2000JB900329
- [71] Frenette R, Zimmermann T, Eyheramendy D (2002) Unified modeling of fluid or granular flows on dam-break case. *J Hydraul Eng* 128:299-305. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:3(299)
- [72] Sailer R, Rammer L, Sampl P (2002) Recalculation of an artificially released avalanche with SAMOS and validation with measurements from a pulsed Doppler radar. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 2:211-216. doi:10.5194/nhess-2-211-2002
- [73] Aranson IS, Tsimring S (2002) Continuum theory of partially fluidized granular flows. *Phys Rev E* 65(061303):1-20. doi:10.1103/physRevE.65.061303
- [74] Pitman EB, Nichita CC, Patra A, Bauer AC, Bursik M, Webb A (2003a) A model of granular flows over an erodible surface. *Discrete Continuous Dyn Syst-Ser B* 3(4):589-599.
- [75] Wang, X., Shi, C., Liu, Q., & An, Y. (2021). Numerical study on near-field characteristics of landslide-generated impulse waves in channel reservoirs. *Journal of Hydrology*, 595, 126012.
- [76] Chen H, Lee CF (2003) A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes. *Geomorphology* 51(4):269-288. doi:10.1016/S0169-555X(02)00224-6
- [77] Gray JMNT, Tai YC, Noelle S (2003) Shock waves, dead-zones and particle-free regions in rapid granular free-surface flows. *J Fluid Mech* 491:161-181. doi:10.1017/S0022112003005317
- [78] Zanuttigh B, Lamberti A (2004) Analysis of debris wave development using 1D shallow water equations. *J Hydraul Eng* 130:293-304. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:4(293)
- [79] McDougall S, Hungr O (2004) A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. *Can Geotech J* 41:1084-1097. doi:10.1139/T04-052
- [80] Denlinger RP, Iverson RM (2004) Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 1. theory and computation. *J Geophys Res* 109(F01014). doi: 10.1029/2003JF000085
- [81] He S, Liu W, Ouyang C, Li X (2014) A two-phase model for numerical simulation of debris flows. *Nat Hazard Earth Syst Sci Discuss* 2:2151-2183. doi:10.5194/nhessd-2-2151-2014
- [82] Toni SD, Scotton P (2005) Two-dimensional mathematical and numerical model for the dynamics of granular avalanches. *Cold Reg Sci Technol* 43:36-48. doi:10.1016/j.coldregions.2005.05.002



9 (1) , 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



مطالعه مروری سندسازی عددی موج ضربه‌ای ناشی از انفجار توده‌های عظیم  
به درون آب‌های ساکن و پارامترهای مؤثر بر آن

gravity. *Adv Water Resour* 63:1-10. doi:10.1016/j.advwatres.2013.10.007

- [101] He S, Liu W, Ouyang C, Li X (2014) A two-phase model for numerical simulation of debris flows. *Nat Hazard Earth Syst Sci Discuss* 2:2151-2183. doi:10.5194/nhessd-2-2151-2014
- [102] Yavari-Ramshe S, Ataie-Ashtiani B (2015) A rigorous finite volume model to simulate subaerial and submarine landslide generated waves. *Landslides*. doi:10.1007/s10346-015-0662-6
- [103] Romano, A., Lara, J. L., Barajas, G., Di Paolo, B., Bellotti, G., Di Risio, M., ... & De Girolamo, P. (2020). Tsunamis Generated by Submerged Landslides: Numerical Analysis of the Near-Field Wave Characteristics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(7), e2020JC016157.
- [104] Xiao, H., & Lin, P. (2016). Numerical modeling and experimentation of the dam overtopping process of landslide-generated waves in an idealized mountainous reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(12), 04016059.
- [105] Li, G., Chen, G., Li, P., & Jing, H. (2019). Efficient and accurate 3-D numerical modelling of landslide tsunami. *Water*, 11(10), 2033.
- [106] Reeve, D. E., Soliman, A., & Lin, P. Z. (2008). Numerical study of combined overflow and wave overtopping over a smooth impermeable seawall. *Coastal Engineering*, 55(2), 155-166.
- [107] Ai, C., Ma, Y., Yuan, C., Xie, Z., & Dong, G. (2021). A three-dimensional non-hydrostatic model for tsunami waves generated by submarine landslides. *Applied Mathematical Modelling*, 96, 1-19.



9 (1) , 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



مطالعه مروری عدسی موج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده‌های عظیم  
به درون آب‌های ساکن و پارامترهای مؤثر بر آن

#### COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by **Journal of Engineering & Construction Management (JECM)**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)