

## شبیه‌سازی جریان ماسه به وسیله روش هیدرودینامیک ذرات هموار با تراکم‌پذیری جزئی

امیره نوربخش\*

فردین روزبهانی

مجید کوهینی تفرشی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

## چکیده

در این تحقیق با استفاده از یک روش کاملاً لاگرانژی مبتنی بر ذرات و آزاد از شبکه به نام روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)، شبیه‌سازی رفتار ماسه در تغییر شکل بستر سواحل ماسه‌ای انجام شده است. در این پژوهش از شرط تراکم‌پذیری جزئی برای الگوریتم هیدرودینامیک ذرات هموار استفاده شده است. مبنای این الگوریتم استفاده از معادله حالت تیت بجای استفاده از معادله پواسون برای محاسبه فشار می‌باشد. در این پژوهش رفتار ماسه به‌عنوان یک سیال غیر نیوتنی ارزیابی شده است. در فرایند اعتبارسنجی، جریان خروجی از زیر دریچه‌ی غوطه‌ور، مسأله کلاسیک شکست شد و پدیده‌ی انتقال رسوب به‌صورت یک سیال دوفازی آب-رسوب مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج با داده‌های آزمایشگاهی و کارهای عددی مقایسه شد و تطابق خوبی مشاهده گردید. تغییرات ظاهر یک بستر ساحل ماسه‌ای با مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی مشخص، تحت تأثیر یک پدال موج‌ساز سینوسی، تحت تأثیر تنش تسلیم  $\tau_y = 200 \text{ Pa}$  و  $\tau_y = 1000 \text{ Pa}$  در زمان‌های مختلف مدل‌سازی شد. ظاهر بستر شبیه‌سازی شده تحت تأثیر تنش تسلیم  $\tau_y = 200 \text{ Pa}$  به سرعت تغییر کرده و بعد از گذشت دو الی چهار ثانیه، شکل ریب‌های به وجود آمده به ثبات نسبی می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: هیدرودینامیک ذرات هموار، تراکم‌پذیری جزئی، سیال غیر نیوتنی، بستر ساحل ماسه‌ای، معادله حالت تیت.

## Simulation of sand particles flow with weakly compressible smoothed particle hydrodynamics method

A. Nourbaksh

F. Rouzbahani

M. Kouhini Tafreshi

Department of Mechanical Engineering, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Islamic Azad, Hamedan, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran

## Abstract

In this research, using a mesh free particle method based on Lagrangian formulation called smoothed particle hydrodynamics (SPH), sand behaviour on the transformation of sandy beaches was simulated. In this paper, weakly compressibility condition was used for SPH algorithm. This algorithm is based on the application of Tait equation of state rather than Poisson's equation for pressure calculation. In this research, sand behaviour was evaluated as a non-Newtonian fluid. In the validation process, flow under a gate, a dam break and sedimentation problem as a water-sediment two-phase flow were investigated. The results were validated with experimental data and numerical values and a good agreement was observed. The appearance of sandy beaches with given physical and rheological characteristics under the effect of a sinusoidal wave generator pedal was modeled under yield stress values of  $\tau_y = 200 \text{ Pa}$  and  $\tau_y = 1000 \text{ Pa}$  at different times. The shape of the simulated bed changed rapidly under the yield stress of  $\tau_y = 200 \text{ Pa}$ , so that the form of the bed ripples reached a relative stability after 2-4 seconds.

**Keywords:** Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), Weakly compressibility, Non-Newtonian fluid, Sandy beach, Tait equation of state.

## ۱- مقدمه

خود حمل می‌کنند، جابجایی به‌صورت خودکار در حل مسأله ملاحظه می‌شود و حرکت سیال به‌آسانی توسط حرکت این ذرات نمایش داده می‌شود. این مزیت، خود را در شبیه‌سازی جریان دوفازی با اختصاص هر ذره به فاز مخصوص خود، به‌طور واضح نمایان می‌سازد. در اینجا با توجه به اینکه سطح مشترک دو فاز به‌صورت ضمنی توسط مکان ذرات مشخص می‌شود، هیچ نیازی به ردیابی صریح مرز میانی نیست.

در دو دهه اخیر تلاش‌های زیادی برای شبیه‌سازی مسائل مختلف با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار صورت گرفته است که از جمله اولین آن‌ها می‌توان به جریانات تراکم‌پذیر، جریان تراکم‌ناپذیر با سطح آزاد (موناهان [۳])، جریان لزج (تاکدا و همکاران

روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار که به اختصار SPH نامیده می‌شود، قدیمی‌ترین روش لاگرانژی آزاد از شبکه است که همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش هیدرودینامیک ذرات هموار در سال ۱۹۷۷ برای حل عددی مسائل دینامیک گازی در فضای آزاد (جریان‌های سماوی)، توسط لوسی [۱]، گینگلد و موناهان [۲] ابداع شد. هیدرودینامیک ذرات هموار روشی لاگرانژی است که در آن سیال به ذرات زیادی، که با سرعت جریان حرکت می‌کنند، گسسته می‌شود. روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار مزایای متعددی نسبت به روش‌های شبکه مبنا دارد. به دلیل اینکه ذرات مشخصه‌های خود را با

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: nourbaksh@basu.ac.ir

جریان‌های چند فاز با نسبت چگالی زیاد معرفی کردند. آن‌ها همچنین نشان دادند که روش فوق جواب‌های دقیق‌تری نسبت به رویکرد هیدرودینامیک ذرات هموار شبه تراکم‌پذیر می‌دهد و در عین حال، سریع‌تر هم می‌باشد. لروی و همکاران [۱۸] بر پایه روشی نیمه‌تحلیلی، به اصلاح شرط مرزی جامد در روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر پرداختند. مزیت این روش بر روش‌های پیشین، اعمال دقیق‌تر شرط مرزی نیومن برای حل میدان فشار با استفاده از معادله پواسون فشار و شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان با هندسه‌های پیچیده، نسبت به مدل‌های پیشین می‌باشد. دیلی و همکاران [۱۹] برای یافتن روش بهینه در هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر، انواع روش‌های متداول در این زمینه را مورد بحث قرار دادند و نشان دادند که روش‌های تراکم‌پذیر ضمنی معمول به دلیل حجم محاسباتی بالا و سرعت پایینی که در مقایسه با روش‌های تراکم‌پذیر ضعیف دارند، نا کارآمد بوده که برای حل این مشکل روش تراکم‌ناپذیر صریح پیشنهاد شده است. بررسی روش جدید نشان می‌دهد که این روش سرعت محاسباتی بالاتر و نمودار توزیع فشار هموارتری در مقایسه با روش‌های تراکم‌پذیر ضعیف داشته اما در مقابل خطاهایی در محاسبه دیورژانس سرعت دارد. تحقیقات بیشتری بر روی روش‌های هیدرودینامیک ذرات هموار و هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر انجام شده است [۲۰-۲۱].

با توجه به اینکه اکثر تحقیقات قبلی با روش‌های هیدرودینامیک ذرات هموار و هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر انجام شده است، پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد، به‌طور مشخص، بررسی عددی تغییر شکل بستر سواحل ماسه‌ای با استفاده از روش WCSPH تعریف‌شده است. برای نائل شدن به این هدف، الگوریتمی با شرط تراکم‌پذیری اندک به‌عنوان روش پایه معرفی شده است. مبنای این الگوریتم استفاده از معادله حالت تیت بجای استفاده از معادله پواسون برای محاسبه فشار می‌باشد. در بخش ۲، مبانی روش هیدرودینامیک ذرات هموار به صورت خلاصه بیان شده است. در بخش ۳، روابط حاکم بر مسئله معرفی شده و سپس در بخش ۴، ابتدا به بررسی صحت‌سنجی الگوریتم و کد کامپیوتری پرداخته می‌شود و به عنوان اولین مسئله، جریان خروجی از زیر دریچه‌ی غوطه‌ور بررسی می‌شود. سپس فرایند صحت‌سنجی برای پدیده‌ی شکست سد و شبیه‌سازی یک مدل رسوب در حالت غیرنیوتنی تکرار می‌شود. در بخش ۵، فرایند حل مسئله و شبیه‌سازی هندسه‌ی بستر ساحلی تشریح می‌گردد.

## ۲- مفاهیم اصلی

### ۲-۱- درون‌یابی

گام کلیدی برای یافتن مقادیر کمیت‌های فیزیکی در هر الگوریتم محاسباتی دینامیک سیال، تقریب این کمیت‌ها با استفاده از اطلاعات تعداد محدودی از نقاط می‌باشد. در روش‌های تفاضل محدود این نقاط، رئوس گره‌های شبکه (مش‌ها) می‌باشند. درحالی‌که در روش هیدرودینامیک ذرات هموار، نقاط درون‌یابی، ذراتی هستند که همراه با جریان حرکت کرده و خواص سیال را با خود حمل می‌کنند. روش SPH در واقع یک روش میانگین‌گیری وزنی برای برآورد کمیت یک پارامتر است. این روش در مراجع به‌طور مفصل توضیح داده شده و در

[۴] و جریان با عدد رینولدز پایین (مورس و همکاران [۵]) اشاره نمود. البرو و همکاران [۶] مدل دیگری را برای جریان تراکم‌ناپذیر معرفی نمودند. در این مدل تراکم‌ناپذیری با ایجاد یک محدودیت سینماتیک، ثابت بودن حجم ذرات سیال، به دست می‌آید. خایر و همکاران [۷] با استفاده از ارائه روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر اصلاح‌شده خود، شبیه‌سازی دقیقی از شکست موج در ساحل و پیش‌بینی تراز سطح آب در هنگام عبور موج ارائه نمودند. پایداری یکی از مهم‌ترین جنبه‌های همه روش‌های عددی می‌باشد. یکی از دردسرسازترین ناپایداری‌ها در روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار ناپایداری کششی است که عموماً در موقعیت‌هایی اتفاق می‌افتد که ذرات تحت یک تنش کششی هستند. ناپایداری کششی ممکن است، منجر به نتایج غیر فیزیکی گردد. با انجام یک آنالیز پایداری فون نیومن، سویگل و همکاران [۸] نشان دادند که این ناپایداری از یک تنش مؤثر که از یک ضریب غیر فیزیکی منفی پدیدار می‌شود، نتیجه شده است.

تلاش‌های زیادی برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار صورت گرفته است که از جمله اولین آن‌ها می‌توان به تحقیقات ولتون [۹] اشاره کرد. واگنر و لیو [۱۰] نیز روش ذره کرنل باز تولید شده را به‌عنوان یک فیلتر در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در جریان آشفته استفاده نمودند. ویولیو و ایسا [۱۱] مدل‌های آشفته ارتقا یافته در روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار را از ساده‌ترین دیدگاه تا مدل‌های پیچیده همانند مدل تنش رینولدزهای جبری ضمنی مطالعه نمودند.

لی و همکاران [۱۲] بالاروی موج را با روش هیدرودینامیک ذرات هموار بر روی یک سازه ساحلی مورد بررسی قرار دادند. مقصودی و همکاران [۱۳] مدل‌سازی شکست سد با بستر فرسایش‌پذیر را با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار بررسی کردند. در تحقیق آنها، با توسعه کد دو بعدی سریال SPHysics به یک مدل دو فازی غیرنیوتنی با مدل بینگهام، مسأله شکست سد با بستر متحرک ناشی از رسوبات مدل‌سازی شده است. تانگ و همکاران [۱۴] مدلی را برای شبیه‌سازی جریان موئینگی گرمایی در حالت دو بعدی به‌کار گرفتند. این مدل که برای جریان‌های چند فازی متعدد به‌کار گرفته شده، به دلیل توصیف مناسب آنتالپی و انتقال گرما، برای شبیه‌سازی تغییر فاز (انجماد، ذوب و...) مناسب می‌باشد. روش هیدرودینامیک ذرات هموار شبه تراکم‌پذیر (WCSPH)، معمولاً در عدد ماخ پایین به دلیل نوسانات کم در متغیر چگالی بکار می‌روند. این روش برای شبیه‌سازی جریان‌ات سطح آزاد مختلفی هم‌چون، موج در ساحل، شکستگی امواج و شکستگی ستون‌ها در سواحل دریا به‌کار رفته است. یک روش جالب برای اجبار در تراکم‌ناپذیری سیال این است که مشابه روش نیمه ضمنی ذرات متحرک، روش تصویر دو مرحله‌ای به‌کار رود. بر پایه این رویه، کومینز و رودمان [۱۵] یک روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر (ISPH) که در آن یک میدان سرعت میانگین در نظر گرفته شده و معادله فشار پواسون حل می‌شود را معرفی کردند. حسینی و همکاران [۱۶] یک نسخه از روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر را پیشنهاد کردند که در آن معادله فشار به‌صورت تقریبی حل شده و نیازی به حل دستگاه معادلات ندارد. نسخه اصلاح‌شده دیگری از این روش را، هو و آدامز [۱۷] برای حل

شبکه-مینا با سختی بیشتری همراه است. روش به کار رفته در اینجا، استفاده از شرط مرزی دافعه است. در این روش، هدف اصلی، ممانعت از خروج ذرات از مرز دیواره می‌باشد. به این ترتیب که یک ردیف ذرات مجازی جامد در اطراف ناحیه سیال چیده می‌شوند. ذرات مجازی دارای یک نیروی ضربه‌ای قوی هستند که با عکس فاصله دو ذره متناسب می‌باشد و هنگامی که یک ذره سیال وارد ناحیه تأثیر یک ذره مجازی می‌شود، با توجه به فاصله دو ذره، این نیرو در راستای خط المکزین دو ذره به ذره سیال وارد می‌شود [۲۴].

### ۳- معادلات حاکم

#### ۳-۱- معادلات بقا

معادلات بقای جرم و بقای مومنتم که معادلات حاکم بر جریان سیالات می‌باشند، به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{D\bar{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \bar{\tau} + \bar{g} \quad (7)$$

#### ۳-۲- الگوریتم حل معادلات حاکم

در این پژوهش، یک الگوریتم برای حل معادلات به کار گرفته شده است. در گام اول این الگوریتم، معادله ممنوم در حضور نیروهای حجمی و در غیاب سایر نیروها حل می‌شود. در نتیجه یک سرعت میانی محاسبه می‌گردد. در گام دوم، سرعت‌های میانی محاسبه شده در گام اول برای محاسبه  $|D|$  (پایای دوم اصلی نرخ کرنش) توسط دیورژانس تانسور تنش به کار گرفته می‌شوند. در انتهای گام دوم، مؤلفه‌های سرعت هر ذره به روز شده و موقعیت هر ذره طبق سرعت-های میانی حرکت می‌کند. تا پایان این مرحله، هیچ شرطی برای تراکم‌ناپذیری سیال اعمال نشده است و سرعت‌های میانی به دست آمده معادله بقای جرم را ارضا نمی‌کنند. حال با اعمال معادله حالت تیت، فشار برحسب چگالی به دست آمده در مرحله قبل محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه سرعت اصلاحی، سرعت نهایی ذرات و موقعیت نهایی هر ذره در پایان گام زمانی محاسبه می‌شود.

#### ۳-۳- تشریح معادله موقعیت ذرات

معادله حرکت ذره در هر گام زمانی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{d\bar{r}_a}{dt} = \bar{u}_a \quad (8)$$

زمانی که روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای شبیه‌سازی حرکت سیالات استفاده می‌شود، اصلاحات بیشتری نیز می‌تواند صورت بگیرد. مثلاً به جای حرکت ذره بر اساس معادله (۸) حرکت ذرات بر طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{d\bar{r}_a}{dt} = \bar{u}_a + \varepsilon \sum_b m_b \frac{\bar{u}_{ba}}{\rho_{ab}} W_{ab} \quad (9)$$

که در اینجا  $\bar{\rho}_{ab} = (\rho_a + \rho_b)/2$  و  $\bar{u}_{ba} = \bar{u}_b - \bar{u}_a$  در این معادله،

اینجا به صورت مختصر آورده شده است.

### ۲-۲- انتگرال درون‌یابی

بیان انتگرالی یک کمیت A که تابعی از مختصات فضایی باشد، به شکل زیر ارائه می‌شود:

$$A(r) = \int A(r') \delta(r - r') dr' \quad (1)$$

که در اینجا  $\delta(r-r')$  تابع دلتای دیراک است و  $dr'$  المان دیفرانسیلی حجم می‌باشد.

در روش هیدرودینامیک ذرات هموار، کمیت A که تابعی از مختصات فضایی می‌باشد، بر اساس درون‌یابی انتگرالی زیر معین می‌شود [۵]:

$$A(r) \approx \int A(r') W(r-r', h) dr' \quad (2)$$

که در آن W تابع درون‌یابی می‌باشد. در صورتی که این درون‌یابی برای یک سیال به کار گرفته شود، محیط سیال به مجموعه‌ای از المان-های جرمی کوچک تقسیم می‌شود. المان a به جرم  $m_a$ ، چگالی  $\rho_a$  و موقعیت  $r_a$  خواهد داشت. مقدار کمیت A برای ذره‌ی a به صورت  $A_a$  نمایش داده می‌شود. انتگرال درون‌یابی را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\int \frac{A(r')}{\rho(r')} \rho(r') dr' \quad (3)$$

که  $\rho(r') dr'$  یک المان جرم می‌باشد. این انتگرال را با استفاده از عملگر مجموع بر روی المان‌های جرمی می‌توان تقریب زد:

$$A_a(r) \approx \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W(r_a - r_b, h) \quad (4)$$

علامت مجموع بر روی تمامی ذرات می‌باشد. اما در عمل، تنها ذرات همسایه نزدیک ذره a مؤثر می‌باشند. پارامتر h (طول هموارسازی) متناسب با اندازه فاصله‌ی بین ذرات انتخاب می‌شود [۲۲].

### ۳-۲- توابع میان‌یاب

توابع درون‌یابی در روش هیدرودینامیک ذرات هموار، نقش کلیدی دارند. این توابع که در واقع نوعی تابع وزن می‌باشند، چگونگی تقریب زدن مقدار یک کمیت و همچنین اندازه ناحیه تحت تأثیر هر ذره را بیان می‌کنند. تابع میان‌یاب بکار رفته در اینجا، تابع میان‌یاب اسپیلاین مکعبی می‌باشد [۲۳]:

$$W(r, h) = \alpha_D \times \begin{cases} \left(1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3\right) & q < 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 < q < 2 \\ 0 & q > 2 \end{cases} \quad (5)$$

### ۴-۲- شرط مرزی جامد

یکی از مشکلات رایج در روش‌های لاگرانژی و ذره-مینا، در اعمال شرایط مرزی است. معمولاً این کار نسبت به روش‌های اولیری و

تسلیم ساختمان داخلی آن به هم ریخته و امکان حرکت برشی بوجود می‌آید. در صورتی که تنش برشی به مقدار کمتر از تنش تسلیم برسد، ساختمان داخلی دوباره شکل می‌گیرد. در سیالات غیرنیوتنی مانند سیال بینگهام برخلاف سیالات نیوتنی، ضریب لزجت بر اساس نرخ کرنش تغییر می‌کند. رابطه تنش در این مدل بصورت زیر است [۱۶]:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_B + \frac{\tau_B}{\dot{\gamma}} \quad (12)$$

که  $\mu_B$  ضریب لزجت و  $\tau_B$  تنش تسلیم بینگهام است.  $\dot{\gamma}$  نیز که معرف نرخ تغییر شکل برشی می‌باشد، به صورت زیر بیان می‌شود: (که در آن مؤلفه های  $u$  و  $v$  بردارهای سرعت هستند).

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2} \quad (13)$$

#### ۴- صحت‌سنجی

برای اعتبارسنجی و اطمینان از الگوریتم حل بکار رفته، از روش حل فعلی برای شبهه‌سازی سه مسئله‌ی متفاوت استفاده شده است.

#### ۴-۱- جریان از زیر دریچه‌ی غوطه‌ور

به عنوان شبهه‌سازی نخست، با استفاده از روش عددی حاضر جریان خروجی از زیر دریچه‌ی غوطه‌ور مدل‌سازی می‌شود و برای صحت‌سنجی آن از روش VOF مطابق با مرجع [۲۶] استفاده شده است. هندسه‌ی اولیه‌ی مسئله به صورت طول مخزن و ارتفاع اولیه‌ی آب، هر دو برابر با ۰/۱۵ متر و ارتفاع دریچه برابر با ۰/۳۵ متر در نظر گرفته شده است. در لحظه‌ی آغازین فرض می‌شود که دریچه‌ی موجود به طور ناگهانی باز شود. مقدار گام زمانی با استفاده از معیارهای همگرایی برابر با ۰/۰۰۱ ثانیه و گام مکانی برابر با ۰/۰۰۵ متر در نظر گرفته شده است. مشخصات محاسباتی در روش حاضر در جدول ۱ نشان داده شده است. وضعیت سطح آزاد مخزن و جریان خروجی دریچه در لحظه‌های زمانی مختلف بر اساس روش‌های ذکر شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات محاسباتی در مسئله عبور جریان از زیر دریچه‌ی

غوطه‌ور				
تعداد ذرات آب	تعداد ذرات دیواره	تعداد ذرات کل	گام مکانی	گام زمانی
۹۰۰	۳۳۶	۱۲۳۶	۰/۰۰۵m	۰/۰۰۱s

با توجه به شکل ۱ تطابق بسیار مناسبی بین دو روش، در تعیین وضعیت سطح آب در مخزن و خروجی از دریچه به چشم می‌خورد.

به عنوان آخرین مسئله‌ی این بخش، جریان خروجی از اوریفیس مدل‌سازی و صحت‌سنجی شده است. بر مبنای مرجع [۲۶] برای این هندسه، بازشدگی اوریفیس در ارتفاع ۰/۰۵۵m از سطح زمین و به میزان ۰/۰۴۵m می‌باشد که تغییرات سطح آزاد سیال در ۰/۱۴ ثانیه پس از باز شدن دریچه در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، تطابق قابل قبولی

$\varepsilon$  یک ضریب ثابت است و معمولاً  $0 \leq \varepsilon \leq 0.5$ . معادله (۹) به‌عنوان متغیر XSPH شناخته می‌شود و موناهان برای اولین بار آن را معرفی نمود. اعمال متغیر XSPH و عبارت تصحیح سرعت با هدف جلوگیری از تداخل ذرات، زمانی که روش‌های ذره‌ای برای شبهه‌سازی جریان‌های سیال که در تماس با یکدیگر هستند، استفاده می‌شود. به‌علاوه، معادله (۹) تضمین می‌کند که یک ذره با سرعتی نزدیک به سرعت میانگین ذرات همسایه‌اش حرکت می‌کند و برای سیالات نسبتاً تراکم‌ناپذیر مانند آب، در غیاب لزجت، ذرات را به‌طور منظم در کنار هم نگه می‌دارد [۲۵].

#### ۳-۴- تشریح معادله حالت فشار

یک سیال مثل آب اندکی تراکم‌پذیر است؛ اما در بسیاری از مسائل دینامیک سیالات، آن را با یک سیال تراکم‌ناپذیر تقریب می‌زنند. یک دیدگاه دیگر که سازگاری بیشتری با روش هیدرودینامیک ذرات هموار دارد، این است که سیال، اندکی تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. این روش که هیدرودینامیک ذرات هموار با تراکم‌پذیری ضعیف نامیده می‌شود، با اعمال شرط تراکم‌پذیری ضعیف با استفاده از یک معادله حالت صورت می‌گیرد. این رویکرد، تقلیدی از یک سیال واقعی است، اما سرعت صوت پایینی دارد و در مقابل، به اندازه کافی بزرگ است تا عدد ماخ تقریباً برابر یک را تضمین سازد؛ بنابراین نوسانات چگالی  $\Delta\rho$  کوچک‌تر از  $0.01\rho$  خواهد شد. متداول‌ترین معادله حالتی که در شبهه‌سازی‌های هیدرودینامیک ذرات هموار استاندارد با شرط تراکم‌پذیری جزئی استفاده می‌شود، به شکل زیر است:

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (10)$$

در معادله بالا  $\rho_0$  چگالی مرجع است که برای سیال آب  $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$  و  $\gamma = 7$ . تنها اصلاحی که معادله حالت احتیاج دارد این است که مقدار ثابت  $B$  تغییر کند. سرعت صوت در چگالی مرجع عبارت است از [۲۶]:

$$c^2 = \frac{\gamma B}{\rho_0} \quad (11)$$

بنابراین اگر  $B = 100\rho_0 u^2 / \gamma$  انتخاب شود، نوسان چگالی موردنظر کمتر از ۰/۰۱ خواهد شد. در اینجا  $u$  سرعت سیال است. در نتیجه در هر مسئله جدیدی برای یافتن  $B$  سرعت بیشینه جریان باید تخمین زده شود. یک مثال ساده، مسئله فروریزش ستون آب به ارتفاع  $H$  است. یک تقریب مناسب برای سرعت بیشینه آب،  $u^2 = 2gH$  هست که  $g$  شتاب جاذبه زمین است. بر مبنای این رابطه، سرعت صوت به‌صورت  $c^2 = 20gH$  حاصل می‌شود.

#### ۳-۵- تشریح مدل غیرنیوتنی

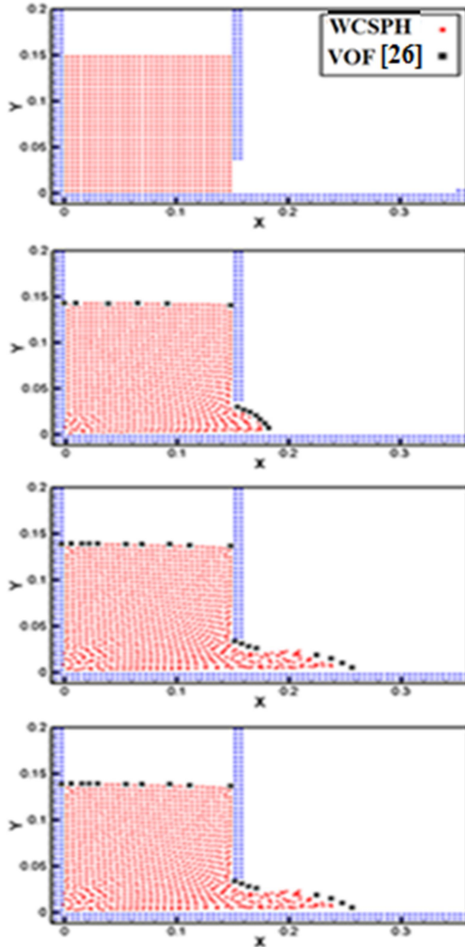
برای شبهه‌سازی رفتار آب، از یک سیال نیوتنی و برای رفتار ماسه به عنوان یک سیال غیر نیوتنی، از یک مدل رئولوژیکی استفاده شده است. به عبارت دیگر ماسه به عنوان یک سیال بینگهام پلاستیک در نظر گرفته شده است. سیال بینگهام در تنش‌های پایین تر از تنش تسلیم تغییر شکلی از خود نشان نمی‌دهد؛ ولی در مقادیر بالاتر از تنش

بین نتایج روش عددی VOF و روش WCSPH وجود دارد.

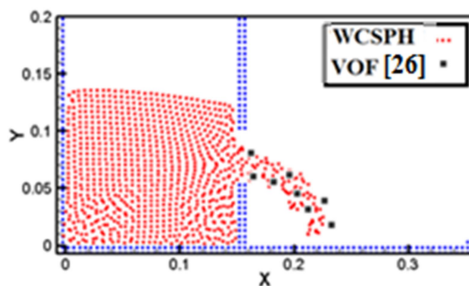
#### ۴-۲- شبیه‌سازی مسأله کلاسیک شکست سد

یکی دیگر از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته که به منظور صحت‌سنجی الگوریتم محاسباتی به کار رفته است، مدل کلاسیک مسأله‌ی شکست سد می‌باشد که در طی آن، نتایج شبیه‌سازی فعلی با نتایج آزمایشگاهی کاکامن و ازین مقایسه شده است [۲۷]. در این فرایند صحت‌سنجی با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی انجام شده است. در محاسبات عددی مرز بالادست به واسطه‌ی نبود جریان به داخل مخزن و طول ثابت مخزن دیوار است. مرز پایین‌دست برای آزمایش بستر خشک، به صورت خروجی جریان لحاظ شده است؛ اما در آزمایش با کف تر، به علت بسته بودن با صفحه‌ی فلزی عمودی (انتهای مخزن) به صورت دیوار اعمال شده است. مرز زیر (کف) هم به صورت بسته و مرز بالا (در سطح آب) به صورت متقارن برای مقادیر فشار اتمسفری روی سطح لحاظ شده است.

در جدول ۲، می‌توان مشخصات مربوط به ابعاد اولیه و پارامترهای محاسباتی را در مسأله‌ی شکست سد جهت شبیه‌سازی و مقایسه با مدل آزمایشگاهی مشاهده نمود. براساس این مدل، هندسه‌ی اولیه‌ی شکست سد در شکل ۳ ترسیم شده است که در آن عمق اولیه‌ی مربوط به آب بالادست  $h_0=25\text{cm}$  متر بوده و عمق اولیه آب پایین‌دست متغیر می‌باشد. در این مدل، طول مخزن  $d=9\text{m}$  و ارتفاع مخزن  $H=26\text{cm}$  می‌باشد. طول بالادست و پایین‌دست نیز مطابق با مدل آزمایشگاهی به ترتیب  $4/65\text{m}$  و  $4/35\text{m}$  می‌باشد.

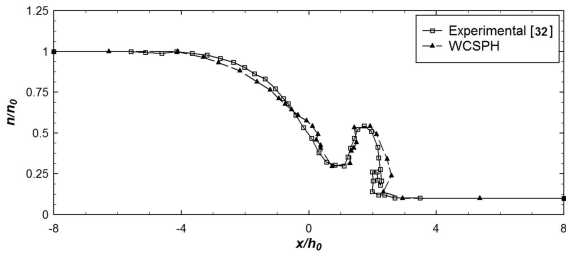


شکل ۱- پروفیل سطح آب در مخزن و خروجی دریچه با استفاده از روش‌های WCSPH و VOF [26] در لحظه‌های الف) ۰، ب) ۰/۰۴، ج) ۰/۱، د) ۰/۱۴ ثانیه

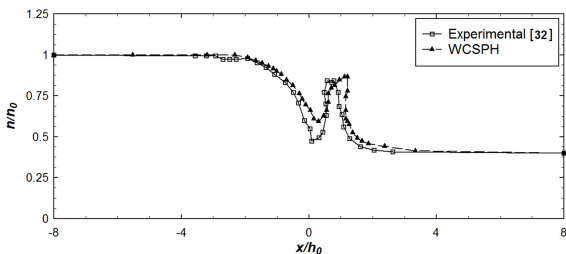


شکل ۲- تغییرات سطح آب در ۰/۱۴ ثانیه پس از باز شدن اورفیس

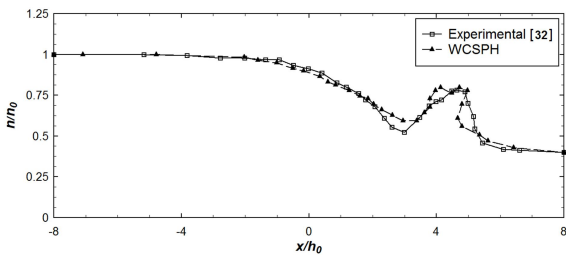
در شکل‌های ۴ تا ۹، عمق جریان ( $h$ ) و طول افقی ( $x$ ) به وسیله‌ی مقدار عمق اولیه بالادست ( $h_0$ )، بی‌بعد شده است. زمان ( $t$ ) هم به صورت پارامتر بی‌بعد  $T=t(g/h_0)^{0.5}$  لحاظ شده است. پارامتر  $\alpha$  بیانگر نسبت ارتفاع پایین‌دست به بالادست می‌باشد که نسبت آن برای سه شبیه‌سازی مختلف، به ترتیب برابر ۰، ۰/۱ و ۰/۴ لحاظ شده است.



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی مدل WCSPH و مدل آزمایشگاهی [۲۷] پروفیل سطح آزاد در طول حالت‌های اولیه‌ی شکست سد در زمان بی بعد  $T=2.38$  برای بستر خیس با  $\alpha=0.1$



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی مدل WCSPH و مدل آزمایشگاهی [۲۷] پروفیل سطح آزاد در طول حالت‌های اولیه‌ی شکست سد در زمان بی بعد  $T=1.5$  برای بستر خیس با  $\alpha=0.4$



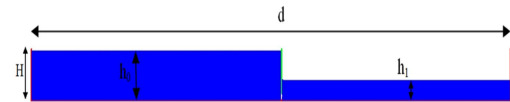
شکل ۹- نتایج شبیه‌سازی مدل WCSPH و مدل آزمایشگاهی [۲۷] پروفیل سطح آزاد در طول حالت‌های اولیه‌ی شکست سد در زمان بی بعد  $T=2.38$  برای بستر خیس با  $\alpha=0.4$

در این شکل‌ها تغییرات کیفی در تراز سطح آب و موج ایجاد می‌شود. اثر شکست سد، با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مرجع [۲۷] مقایسه و اعتبارسنجی شده است.

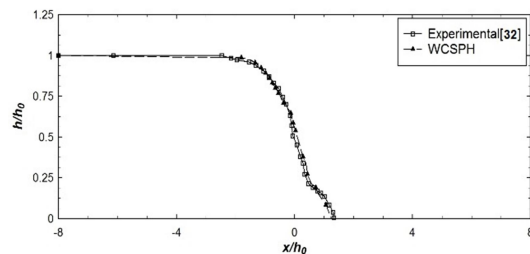
باتوجه به نتایج بدست آمده، تغییرات پروفیل سطح آزاد و پیش‌روی موج شکل گرفته در اثر شکست سد با گذشت زمان قابل مشاهده است. نتایج حاصل، نشان‌دهنده مطابقت کیفی خوب بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. به طوری که برای مدل مربوط به پایین دست خشک، نتایج مدل WCSPH و مدل آزمایشگاهی، به حدی به یکدیگر نزدیک هستند که تشخیص آن‌ها از یکدیگر دشوار است. علت این رفتار را می‌توان ماهیت دینامیکی ذرات در روش هیدرودینامیک ذرات هموار برشمرده که با توجه به این ماهیت، ذرات آشفتنگی را به صورت مستتر در خود حفظ می‌کنند.

جدول ۲- پارامترهای محاسباتی در مسأله‌ی شکست سد

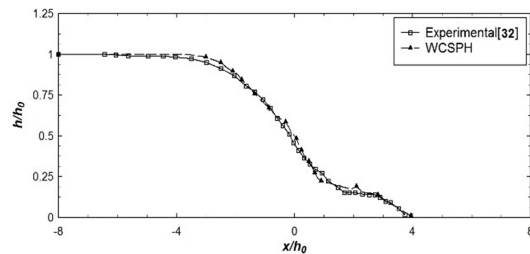
$\Delta t$ گام زمانی	$0.0001s$
فاصله‌ی اولیه‌ی ذرات $L_0$	$0.125m$
تعداد ذرات آب	۷۷۴۰
تعداد ذرات دیواره	۲۰۸۸
تعداد کل ذرات	۹۵۲۸
طول هموارسازی $h$	$1/5 L_0$
ضریب XSPH	$0.1$
ارتفاع آب بالادست $h_0$	$0.25m$



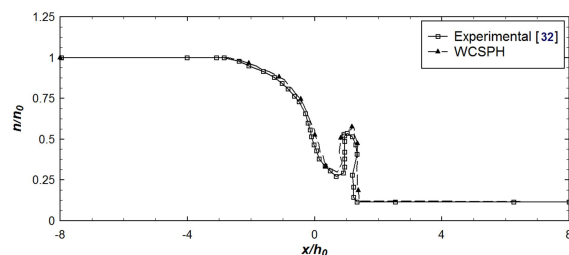
شکل ۳- ابعاد و مشخصات مدل شکست سد



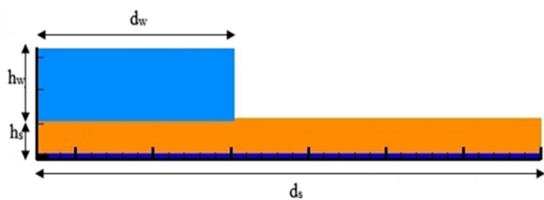
شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی مدل WCSPH و مدل آزمایشگاهی [۲۷] پروفیل سطح آزاد در طول حالت‌های اولیه‌ی شکست سد در زمان بی بعد  $T=1.13$  برای بستر خشک با  $\alpha=0$



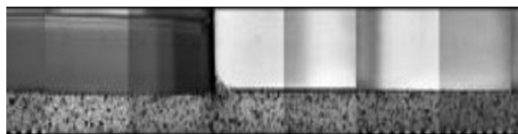
شکل ۵- نتایج شبیه‌سازی مدل WCSPH و مدل آزمایشگاهی [۲۷] پروفیل سطح آزاد در طول حالت‌های اولیه‌ی شکست سد در زمان بی بعد  $T=2.76$  برای بستر خشک با  $\alpha=0$



شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی مدل WCSPH و مدل آزمایشگاهی [۲۷] پروفیل سطح آزاد در طول حالت‌های اولیه‌ی شکست سد در زمان بی بعد  $T=1.57$  برای بستر خیس با  $\alpha=0.1$

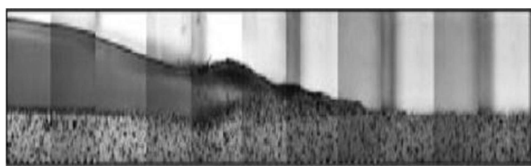
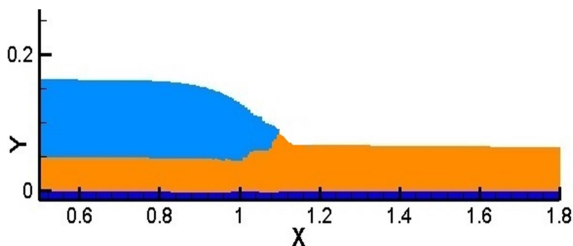
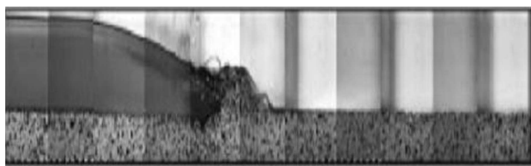


شکل ۱۰- هندسه‌ی اولیه‌ی نمونه‌ی شبیه‌سازی شده‌ی مدل آب-رسوب



شکل ۱۱- هندسه‌ی اولیه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی مدل آب-رسوب [۲۸]

در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نتایج شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد مدل مورد بررسی با استفاده از روش حاضر در زمان‌های متفاوت ارائه شده است. در این شکل‌ها، نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از روش حاضر نشان داده شده است. با توجه به عدم وجود ابعاد و اندازه‌های دقیق در نتایج آزمایشگاهی و نیز وجود برداشته‌های متفاوت، در این قسمت مقایسه به‌طور کیفی صورت می‌گیرد. با مشاهده‌ی نتایج، روند پیشروی سیل در اثر شکست سد، حاکی از آن است که در ابتدای این فرایند، یک موج به شدت غلیظ به سمت پایین دست توسعه می‌یابد که سبب افزایش ناگهانی عمق آب می‌گردد. انرژی اولیه‌ی موج، فرسایش قابل ملاحظه‌ای در ابتدای بستر ایجاد می‌کند. به مرور زمان، موج اولیه، ذرات شسته شده‌ی بستر را به فاصله‌ای در پایین دست انتقال داده است. بنابراین با کاهش انرژی موج و افزایش تغییر شکل بستر، پدیده رسوب‌گذاری ذرات صورت می‌گیرد. این موج همچنان که به پایین دست منتشر می‌شود، به تدریج فرود می‌یابد. پیشروی موج تشکیل شده‌ی ابتدایی در قسمت بالادست نیز سبب کاهش سطح آب می‌شود.



### ۳-۴- جریان دوفازی آب-رسوب ناشی از شکست سد

#### بر بستر فرسایش پذیر

شکست سد روی بستر فرسایش‌پذیر، سبب انتقال رسوب پشت مخزن سد و تغییرات سریع بستر می‌شود. ماهیت و رفتار جریان‌های دوفازی جامد-مایع با جریان‌های تک‌فازی متفاوت است. بررسی سرعت و رفتار این جریان‌ها به دلیل وجود ذرات معلق و قابل ته‌نشینی پیچیده بوده و به دلیل کاربرد وسیع‌شان در صنعت همواره مورد توجه محققان قرار دارد. یکی از دشوارترین مسائل در شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی، وجود اختلاف چگالی زیاد بین فازهای موجود است. در این قسمت، مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی جریان شکست سد بر بستر فرسایش‌پذیر و بررسی مکانیزم فرآیندهای ساختارشناسی تشریح می‌شود. به این منظور مدل فیزیکی مرجع [۲۸] مورد شبیه‌سازی و تحلیل قرار می‌گیرد. تعیین دقیق پارامترهای مختلف تأثیرگذار روی خواص جریان‌های دوفازی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای شبیه‌سازی رسوب، از مدل غیرنیوتنی بینگهام پلاستیک استفاده شده است که علت به‌کارگیری آن برای تقریب رسوب پیشتر بررسی شد. از جمله پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی، تنش تسلیم و لزجت مؤثر بینگهام است. در این مدل‌سازی، تنش تسلیم بینگهام با استفاده از روابط آزمایشگاهی،  $\tau_B = 0.447 \text{ Pa}$  در نظر گرفته شده است [۲۹]. همچنین لزجت پلاستیک بینگهام برابر  $\mu = 0.04 \text{ Pa.s}$  قرار داده شده است. مشخصات هندسی و رئولوژیکی مقادیر مورد استفاده برای مدل‌سازی مسأله حاضر در جداول ۳ و ۴ گزارش شده است.

جدول ۳- مشخصات هندسی مدل شبیه‌سازی شده‌ی آب-رسوب

۰/۰۵ m	فاصله اولیه ذرات ( $L_0$ )
۰/۰۰۰۰۳ s	گام زمانی ( $dt$ )
۰/۰۷ m	ضریب XSPH ( $\epsilon$ )
۱ m	عرض ستون آب ( $d_w$ )
۲/۵ m	عرض ستون رسوب ( $d_s$ )
۰/۰۵ m	ارتفاع ستون آب ( $h_w$ )
۰/۱ m	ارتفاع ستون رسوب ( $h_s$ )

جدول ۴- مشخصات رئولوژیکی مدل شبیه‌سازی شده‌ی آب-رسوب

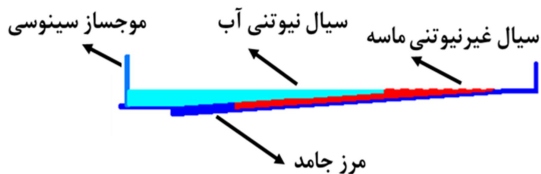
۰/۴۴۷ Pa	تنش تسلیم ( $\tau_B$ )
۰/۰۰۱ Pa.s	ویسکوزیته آب ( $\mu_w$ )
۰/۰۴ Pa.s	ویسکوزیته رسوب ( $\mu_s$ )
۱۰۰۰ kg/m <sup>3</sup>	چگالی آب ( $\rho_w$ )
۱۵۴۰ kg/m <sup>3</sup>	چگالی رسوب ( $\rho_s$ )

در شکل ۱۰ هندسه‌ی اولیه‌ی شبیه‌سازی شده و شکل ۱۱ مدل آزمایشگاهی جریان دوفازی آب-رسوب ناشی از شکست سد بر بستر فرسایش‌پذیر را نشان می‌دهند که در آنها سیال بالایی معرف آب و سیال زیرین معرف رسوب می‌باشند.

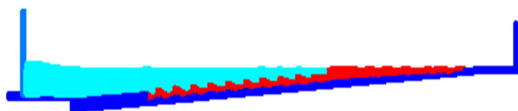
در صورت تأثیر شکست بر تغییر شکل بستر، اثرات آن دیده شود. ظاهر بستر شبیه‌سازی شده تحت تأثیر تنش تسلیم محدود  $\tau_B = 200 \text{ Pa}$  به سرعت تغییر کرده و بعد از گذشت ۲ الی ۴ ثانیه (متناسب با شرایط شبیه‌سازی)، شکل ریپل‌های به وجود آمده به ثبات نسبی می‌رسد.

جدول ۵- پارامترهای محاسباتی بکار رفته در شبیه‌سازی مسأله

گام زمانی	فاصله اولیه ذرات	تعداد ذرات کل	چگالی آب	چگالی ماسه
۰/۰۰۰۰۳ s	۰/۰۴ m	۶۴۷۱	۱۰۰۰	۱۹۵۰



شکل ۱۵- هندسه‌ی اولیه‌ی بستر ساحل ماسه‌ای نوع اول



شکل ۱۶- تغییرات بستر ساحل ماسه‌ای نوع اول در  $t=0.7 \text{ s}$



شکل ۱۷- تغییرات بستر ساحل ماسه‌ای نوع اول در  $t=2 \text{ s}$

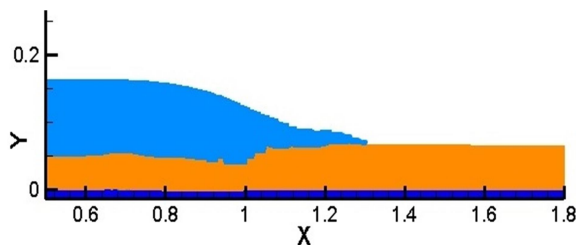


شکل ۱۸- تغییرات بستر ساحل ماسه‌ای نوع اول در  $t=4 \text{ s}$

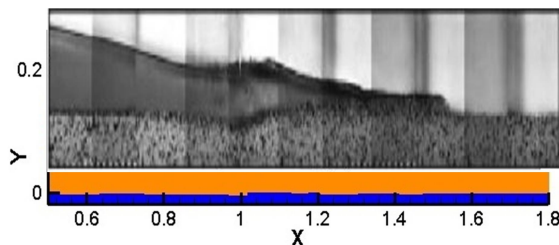


شکل ۱۹- تغییرات بستر ساحل ماسه‌ای نوع اول در  $t=8 \text{ s}$

دو نوع بستر ساحلی معرفی شده که به دلیل تفاوت در مقادیر تنش تسلیم از یکدیگر متمایز شده‌اند، در شکل ۲۰ نشان داده شده است. شبیه‌سازی اثر موج در این دو بستر (در سمت چپ) و تصاویر بسترهای واقعی مشابه با این شبیه‌سازی‌ها (در سمت راست) مشخص است. با توجه به اینکه بستر نوع ۲ ریزدانه‌تر است، تغییر شکل محسوسی قابل مشاهده نیست؛ اما در مقابل، برای بستر ۱ با در نظر داشتن مقدار محدودتر تنش تسلیم، تغییر شکل به وجود آمده مشهود است. ظاهر دندانه‌ای شکل این نوع بسترها، از مهم‌ترین و معمول‌ترین تغییر شکل‌های بسترهای ماسه‌ای، یعنی به شکل ریپل می‌باشد.



شکل ۱۳- ارزیابی پیشروی پیشانی موج، انتقال رسوب و سطح آزاد در لحظه  $t=0.5 \text{ s}$  بین مدل آزمایشگاهی (شکل بالا) [۲۸] و کار حاضر (شکل پایین)



شکل ۱۴- ارزیابی پیشروی پیشانی موج، انتقال رسوب و سطح آزاد در لحظه  $t=0.75 \text{ s}$  بین مدل آزمایشگاهی (شکل بالا) [۲۸] و کار حاضر (شکل پایین)

## ۵- ارائه نتایج

ابتدا باید مشخصات بستر ساحلی که شبیه‌سازی می‌شود را در نظر گرفت. با توجه به شبیه‌سازی‌های مرجع [۳۰] که شیب معمول را بین ۰/۰۲ تا ۰/۱ معرفی می‌کنند، شیب متعادل ۰/۰۶٪ انتخاب شده است. عمق نسبی که نسبت عمق به طول موج می‌باشد به صورت  $d/L \approx 0.13$  در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه‌ی  $0.05 \leq d/L \leq 0.5$  برای آب‌های نیمه عمیق، مدل حاضر در دسته آب‌های نیمه عمیق قرار می‌گیرد و با این شرایط برهم‌کنش موج و ساحل وجود داشته و با پیشروی موج به سمت ساحل و آب کم‌عمق این برهم‌کنش افزایش می‌یابد. پارامترهای محاسباتی بکار گرفته شده برای شبیه‌سازی جریان ساحلی که شامل خواص مربوط به آب (سیال نیوتنی لزج) و ماسه (سیال غیر نیوتنی مدل بینگهام) می‌شود، در جدول ۵ آورده شده است.

مقادیر تنش تسلیم و ضریب لزجت سیال بینگهام برای مدل‌سازی ماسه، مطابق مرجع [۱۶] می‌باشد که با سعی و خطا، مناسب‌ترین مقادیر را برای ماسه مورد مطالعه خود اختیار کرده‌اند. با توجه به مورد مطالعه قرار دادن دو نوع ماسه، مقادیر متفاوت تنش تسلیم  $\tau_B = 200 \text{ Pa}$  و  $\tau_B = 1000 \text{ Pa}$  و با  $\mu_B = 0.1 \text{ N.s/m}^2$  و  $\rho_{sand} = 1950 \text{ kg/m}^3$  یکسان برای دو نوع بستر در نظر گرفته شده است که مشخصات فیزیکی این بسترها مطابق با آزمایشات ژادکیویکس [۳۱] می‌باشد.

نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام شده برای سیال غیر نیوتنی ماسه با  $\tau_B = 200 \text{ Pa}$  و  $\mu_B = 0.1 \text{ N.s/m}^2$  در فواصل زمانی مختلف در شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ قابل مشاهده است. محدوده‌ی نشان داده شده از نیمرخ ساحلی، ناحیه قبل و بعد از شکست موج را شامل می‌شود که



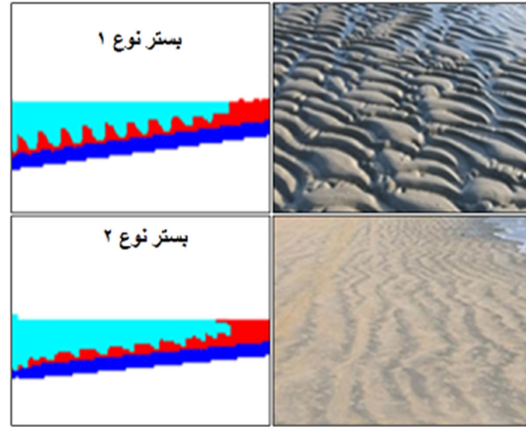
شد و روند تغییرات بستر ماسه‌ای در گذر زمان مورد بررسی قرار گرفت. در این شبیه‌سازی، بستر هموار اولیه‌ی ماسه در اثر موج‌های ایجاد شده تغییر شکل داده و به مرور، ظاهر ریبیل شکل به خود می‌گیرد. در ادامه ظاهر ریبیل‌های ایجاد شده به نظم مشخصی رسیده و پس از مدت زمان معینی به شکل پایداری می‌رسند. در مرحله‌ی آخر این شبیه‌سازی، تاثیر تنش تسلیم در بستر ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. این مدل‌سازی، بر اساس هندسه‌ی مرحله-ی قبل و برای دو بستر با تنش‌های تسلیم متفاوت انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده، بستری که تنش تسلیم بزرگتری دارد، دیرتر به شکل ریبیل در آمده و نمی‌توان انتظار تغییر شکل محسوسی را برای این گونه بسترها داشت. در بخش ۴ نیز، به منظور صحت‌سنجی روش هیدرودینامیک ذرات هموار شبه تراکم‌پذیر، فرایند شبیه‌سازی برای چند پدیده‌ی مختلف سیالاتی انجام شد. در طی این مرحله، مسائل جریان خروجی از زیر دریچه و پدیده‌ی شکست سد در دو حالت بستر خیس و خشک به عنوان پدیده‌های نیوتنی و مسئله‌ی جریان دوفازی آب-رسوب به عنوان یک پدیده سیالاتی غیرنیوتنی مورد شبیه‌سازی و صحت‌سنجی قرار گرفت که بررسی‌های انجام شده حاکی از صحت مدل‌سازی و دقت مطلوب روش حاضر دارد.

#### ۷- نمادها

h	طول هموارسازی (m)
P	فشار (Pa)
$L_0$	فاصله اولیه ذرات (m)
m	جرم (kg)
r	برداری موقعیت (m)
$\epsilon$	ضریب ثابت XSPH
$\tau$	تنش برشی (Pa)
$\tau_B$	تنش برشی تسلیم (Pa)
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $N.s/m^2$ )
$\mu_{eff}$	لزجت مؤثر ( $N.s/m^2$ )
$\dot{\gamma}$	نرخ تغییر شکل برشی ( $s^{-1}$ )
D	ثابت نیروی دافعه
T	زمان بی بعد شده
$\alpha$	نسبت ارتفاع پایین دست به ارتفاع بالادست
g	شتاب گرانشی ( $m/s^2$ )

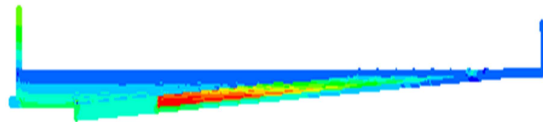
#### ۸- مراجع

- [1] Lucy, L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The astronomical journal*, Vol. 82, pp. 1013-1024, 1977.
- [2] Gingold, R. A., Monaghan, J. J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly notices of the royal astronomical society*, Vol. 181, pp. 375-389, 1977.
- [3] Monaghan, J. J. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, Vol. 110, pp. 399-406, 1994.
- [4] Takeda, H., Miyama, S. M., Sekiya, M. Numerical simulation of viscous flow by smoothed particle hydrodynamics. *Progress of Theoretical Physics*, Vol. 92, pp. 939-960, 1994.

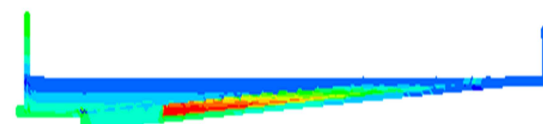


شکل ۲۰- دو نوع بستر شبیه‌سازی شده با تنش‌های تسلیم متفاوت (در سمت چپ) و مقایسه این دو نوع مدل با بسترهای واقعی ماسه‌ای (سمت راست)

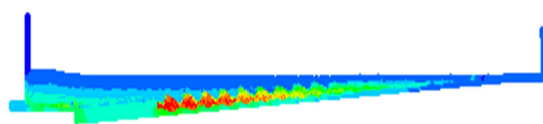
کانتورهای تغییرات فشار برای بستر ساحل ماسه‌ای در شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ به نمایش درآمده است. با توجه به آن که تنها نیروی مؤثر در لحظات ابتدایی، نیروی گرانش وارد بر ذرات می‌باشد، توزیع فشار به عمل آمده از نوع فشار هیدرواستاتیک است. در ادامه با پیش روی موج و تغییرات بستر ماسه‌ای، نوع توزیع فشار از حالت هیدرواستاتیک خارج شده و به صورت لایه‌های فشار دندان‌مانند ای شکل در خواهد آمد.



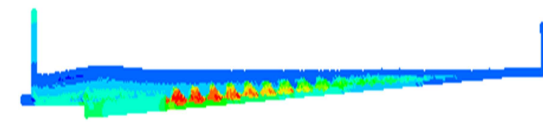
شکل ۲۱- تغییرات فشار بستر ساحل ماسه‌ای نوع اول در  $t=0.7$  s



شکل ۲۲- تغییرات فشار بستر ساحل ماسه‌ای نوع اول در  $t=2$  s



شکل ۲۳- تغییرات فشار بستر ساحل ماسه‌ای نوع اول در  $t=4$  s



شکل ۲۴- تغییرات فشار بستر ساحل ماسه‌ای نوع اول در  $t=8$  s

#### ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به عنوان مدل اصلی، بستر ساحل ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در طی این فرایند، تغییرات ظاهر یک بستر ساحل ماسه‌ای با مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی مشخص، تحت تأثیر یک پدال موج‌ساز سینوسی در زمان‌های مختلف مدل‌سازی

- Journal of Computational Physics*, Vol. 228, pp. 8380-8393, 2009.
- [23] Monaghan, J. J. Extrapolating B splines for interpolation. *Journal of Computational Physics*, Vol. 60, pp. 253-262, 1985.
- [24] Hirt, C. W., Amsden, A. A., Cook, J. L. An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds. *Journal of Computational Physics*, Vol. 14, pp. 227-253, 1974.
- [25] Molteni, D., Colagrossi, A. A simple procedure to improve the pressure evaluation in hydrodynamic context using the SPH. *Computer Physics Communications*, Vol. 180, pp. 861-872, 2009.
- [26] Girolamo, P., Wu, T., Liu, P., Panizzo, A., Bellotti, G., Risio, M. Numerical simulation of three dimensional tsunamis water waves generated by landslides: comparison between physical model results, VOF, SPH, *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 2007.
- [27] Ozmen-Cagatay, H., Kocaman, S. Dam-break flows during initial stage using SWE and RANS approaches. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, pp. 603-611, 2010.
- [28] Fraccarollo, L., Capart, H. Riemann wave description of erosional dam-break flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 461, pp. 183-228, 2002.
- [29] Ken-Ichi, K. A plasticity theory for the kinematics of ideal granular materials. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 20, pp. 1-13, 1982.
- [30] Neshaei, M. L., Holmes, P., Salimi, M. G. A semi-empirical model for beach profile evolution in the vicinity of reflective structures. *Ocean Engineering*, Vol. 36, pp. 1303-1315, 2009.
- [31] Rzadkiewicz, S. A., Mariotti, C., Heinrich, P. Numerical simulation of submarine landslides and their hydraulic effects. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 123, pp. 149-157, 1997.
- [5] Morris, J. P., Fox, P. J., Zhu, Y. Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH. *Journal of computational physics*, Vol. 136. pp. 214-226, 1997.
- [6] Ellero, M., Serrano, M., Espanol, P. Incompressible smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, Vol. 226, pp. 1731-1752, 2007.
- [7] Khayyer, A., Gotoh, H., Shao, S. Corrected incompressible SPH method for accurate water-surface tracking in breaking waves. *Coastal Engineering*, Vol. 55, pp. 236-250, 2008.
- [8] Sweigle, J., Hicks, D., Attaway, S. Smoothed particle hydrodynamics stability analysis. *Journal of computational physics*, Vol. 116, pp. 123-134, 1995.
- [9] Welton, W. C. Two-dimensional PDF/SPH simulations of compressible turbulent flows. *Journal of Computational Physics*, Vol. 139, pp. 410-443, 1998. Ozmen-Cagatay, H., Kocaman, S. Dam-break flows during initial stage using SWE and RANS approaches. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48: 603-611, 2010.
- [10] Wagner, G. J., Liu, W. K. Turbulence simulation and multiple scale subgrid models. *Computational Mechanics*, Vol. 25, pp. 117-136, 2000.
- [11] Violeau, D., Issa, R. Numerical modelling of complex turbulent free-surface flows with the SPH method: an overview. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 53, pp. 277-304, 2007.
- [12] Lee, E., Violeau, D., Benoit, M., Issa, R., Laurence, D., Stansby, P., Prediction of wave overtopping on coastal structures by using extended Boussinesq and SPH models, *Proceeding of Coastal Engineering*, 2007.
- [۱۳] مقصودی، ش. شفيعی فر. م. مدل سازی شکست سد با بستر فرسایش پذیر با استفاده از روش SPH، مجله علمی-پژوهشی هیدرولیک، شماره ۱۰ (۳)، ص. ۴۱-۵۲، ۱۳۹۴.
- [14] Tong, M., Browne, D. J. An incompressible multi-phase smoothed particle hydrodynamics (SPH) method for modelling thermocapillary flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 284-292, 2014.
- [15] Cummins, S. J., Rudman, M. An SPH projection method. *Journal of computational physics*, Vol. 152, pp. 584-607, 1999.
- [16] Hosseini, S., Manzari, M., Hannani, S. A fully explicit three-step SPH algorithm for simulation of non-Newtonian fluid flow. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 17, pp. 715-735, 2007.
- [17] Hu, X., Adams, N. A. An incompressible multi-phase SPH method. *Journal of computational physics*, Vol. 227, pp. 264-278, 2007.
- [18] Leroy, A., Violeau, D., Ferrand, M., Kassiotis, C. Unified semi-analytical wall boundary conditions applied to 2-D incompressible SPH. *Journal of Computational Physics*, Vol. 261, pp. 106-129, 2014.
- [19] Daly, E., Grimaldi, S., Bui, H. H. Explicit incompressible SPH algorithm for free-surface flow modelling: A comparison with weakly compressible schemes. *Advances in Water Resources*, Vol. 97, pp. 156-167, 2016.
- [20] Ghadampour, Z., Talebbeydokhti, N., Hashemi, M. R., Nikseresht, A. H., Neilli, S. P. Numerical simulation of free surface mudflow using incompressible sph. *IJST, Transactions of Civil Engineering*, Vol. 37, No. C1, pp. 77-95, 2013.
- [21] Omidvar, P., Nikeghbali, P. Simulation of violent water flows over a movable bed using smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 22, Issue 2, pp. 270-287, 2017.
- [22] Grenier, N., Antuono, M., Colagrossi, A., Le Touzé, D., Alessandrini, B. An Hamiltonian interface SPH formulation for multi-fluid and free surface flows.