

(OPEN ACCESS)

Simulation of an incompressible fluid over a porous media by using SPH method

Habibeh Sheybanifard¹, Amir Ahmad Dehghani^{*2}, Meysam Salarijazi³,
Rasoul Memarzadeh⁴, Mohammad Abdolhosseini⁵

1. Ph.D. Student of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: sheybani_h@gau.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: a.dehghani@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: meysam.salarijazi@gau.ac.ir
4. Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. E-mail: r.memarzadeh@vru.ac.ir
5. Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: abdolhosseini@gau.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: Simultaneous simulation of surface and subsurface flow over a bed is a prerequisite for modeling pollutant transport in water resources and is considered one of the most challenging and important tasks in protecting soil and water resources. Typically, the Navier–Stokes equations, along with a coupling method, are employed to simulate this process. However, due to the inherent complexity of defining the interface between water and porous media, a common strategy involves modeling fluid flow within the fluid zone separately. The results of this fluid-zone simulation are then used as essential boundary conditions for simulating flow within the porous medium. In this study, the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, a meshless approach, is utilized to address these challenges.
Article history: Received: 11.27.2023 Revised: 01.10.2024 Accepted: 02.10.2024	
Keywords: Free-surface flows, Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics method (SPH), Numerical modeling, Porous media	Materials and Methods: This article aims to improve flow modeling in both environments by proposing a modified Navier–Stokes equation with additional terms customized for each specific setting, namely the fluid and porous media. The equations were discretized using the SPH method with a semi-implicit scheme. The volume fraction of each particle was calculated during the initial and prediction steps, and the difference between volume fraction values was used to compute all variables at the current time step. To validate the model, two-dimensional flow in a cylinder and flow through a porous medium were simulated, and the results were validated against theoretical solutions.
	Results: Comparison of the estimated free-surface fluid level in the cylinder obtained using the SPH method with theoretical results showed that the standard deviation of the ratio of calculated values to observations was 0.015 for the free-surface level and 0.18 for pressure. Additionally, the average ratio of calculated values to observations was 1.04 for the free-surface level and 1.20 for pressure. To model surface and subsurface

flow in a tube containing both fluid and porous media, the Navier–Stokes equations were solved using the SPH method.

Conclusion: Simultaneous modeling of flow in both environments reduces errors introduced by multi-step modeling approaches, particularly in cases involving complex geometries where accurate interface definition is challenging. In this study, an additional comparison was conducted between two virtual particle placement modes: fixed and moving positions. Evaluation of flow velocity showed that the accuracy of calculating the vertical velocity component at the interface was nearly identical in both cases. However, for the horizontal velocity component, the moving virtual particle approach exhibited a standard deviation of the ratio of calculated values to observations closer to zero by approximately 0.2 compared to the fixed virtual particle approach.

Cite this article: Sheybanifard, Habibeh, Dehghani, Amir Ahmad, Salarijazi, Meysam, Memarzadeh, Rasoul, Abdolhosseini, Mohammad. 2025. Simulation of an incompressible fluid over a porous media by using SPH method. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (3), 137-160.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2025.22031.3702

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

مدل‌سازی سیال تراکم‌ناپذیر در محفظه بسته حاوی بستر متخلخل با روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده

حبیبه شببانی فرد¹، امیراحمد دهقانی^{2*}، میثم سالاری جزی³،
رسول معمارزاده⁴، محمد عبدالحسینی⁵

1. دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: sheybani_h@gau.ac.ir
2. نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: a.dehghani@gau.ac.ir
3. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: meysam.salarijazi@gau.ac.ir
4. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران. رایانامه: r.memarzadeh@vru.ac.ir
5. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: abdolhosseini@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: شبیه‌سازی هم‌زمان جریان سطحی و زیرسطحی روی بستر منابع آبی پیش‌نیاز مدل‌سازی روند حرکت آلودگی در منابع آب و خاک محسوب می‌شود و یکی از پرچالش‌ترین و مهم‌ترین مدل‌سازی‌ها به منظور حفاظت از منابع آبی و خاک محسوب می‌شود. برای مدل‌سازی این پدیده معمولاً جریان در محیط سیال به‌طور جداگانه مدل‌سازی و نتایج حاصل به‌عنوان شرایط مرزی برای مدل‌سازی جریان در محیط متخلخل استفاده می‌شوند. در این پژوهش تنها با استفاده از معادلات ناویر استوکس، جریان در هر دو محیط به‌طور هم‌زمان با روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH) مدل‌سازی شده است. هدف این پژوهش، مدل‌سازی حرکت سیال درون محیط متخلخل است.
واژه‌های کلیدی: جریان سطح آزاد، روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده تراکم‌ناپذیر، محیط متخلخل، مدل‌سازی عددی	مواد و روش‌ها: در این پژوهش از معادلات ناویر استوکس دارای جملات اضافی استفاده شده است که قابلیت حل در هر دو محیط سیال و متخلخل را به‌طور هم‌زمان دارند. این معادلات با روش SPH گسسته‌سازی و با الگوریتم دو گام نیمه ضمنی حل شده‌اند. این الگوریتم شامل دو گام پیش‌بینی و تصحیح است. در گام پیش‌بینی همه متغیرها برای ذرات به‌صورت صریح و در گام تصحیح به‌صورت ضمنی محاسبه می‌گردند. جهت صحت‌سنجی مدل تهیه شده، شبیه‌سازی جریان دوبعدی در یک ظرف استوانه‌ای شکل با مدل SPH انجام شده و سپس نتایج مدل‌سازی حرکت سیال داخل محیط متخلخل با نتایج حل تحلیلی آن مقایسه شده‌اند.
	یافته‌ها: پس از بررسی نتایج موقعیت سطح آزاد سیال در محفظه حاوی آب، انحراف معیار نسبت مقادیر محاسباتی بر مشاهداتی و میانگین نسبت مقادیر محاسباتی بر مشاهداتی در

محاسبه ارتفاع سطح آزاد با مدل عددی حاضر به ترتیب ۰/۰۱۵ و ۱/۰۴ و همچنین در محاسبه فشار به ترتیب ۰/۱۸ و ۱/۲ بوده است. در ادامه جریان سطحی و زیرسطحی در محفظه حاوی سیال و محیط متخلخل با حل همزمان معادلات ناویر استوکس با روش SPH مدل‌سازی شده‌اند.

نتیجه‌گیری: حل همزمان معادلات در دو محیط و همچنین مرز بین دو محیط موجب کاهش خطای ناشی از چندمرحله‌ای بودن مدل‌سازی و دقیق تنظیم نشدن شرایط در مرز بینابینی (به‌خصوص در مورد هندسه‌های پیچیده) می‌شود. در این پژوهش مقایسه‌ای نیز بین نتایج مدل‌سازی در دو حالت مختلف قرارگیری ذرات مجازی (دارای موقعیت ثابت و متحرک) انجام شده است. پس از مقایسه مقادیر سرعت جریان، مشاهده می‌شود که خطا در محاسبه مؤلفه عمودی سرعت در مرز بین سیال و محیط متخلخل، برای هر دو حالت تقریباً یکسان بوده است اما با مقایسه مقادیر مؤلفه افقی سرعت، در حالت دوم (مجازی متحرک) مقدار انحراف معیار نسبت مقادیر محاسباتی بر مشاهداتی نسبت به حالت اول (مجازی ثابت) به میزان ۰/۲ به صفر نزدیک‌تر شده است که به‌طورکلی بیانگر ارتقای نتایج در حالت ذرات مجازی متحرک به ثابت بوده است.

استناد: شیبانی‌فرد، حبیب، دهقانی، امیراحمد، سالاری‌جری، میثم، معمارزاده، رسول، عبدالحسینی، محمد (۱۴۰۴). مدل‌سازی سیال تراکم‌ناپذیر در محفظه بسته حاوی بستر متخلخل با روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۲ (۳)، ۱۶۰-۱۳۷.

DOI: 10.22069/jwsc.2025.22031.3702



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

شناخت حرکت سیال داخل محیط متخلخل به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی هیدرولیکی از دیرباز توجه‌های زیادی را به خود جلب کرده است. شناخت این پدیده و مدل‌سازی آن در مطالعات مربوط به سازه‌های متخلخل که در تماس با سیال هستند مانند سدهای خاکی، پدیده هاپریک، آب‌شستگی پایه پل‌ها استفاده می‌شود.

آلودگی زیرسطحی برای سلامت انسان و محیط‌زیست خطرناک است و درک فرآیند انتقال آلاینده (املاح) در محیط متخلخل برای ارزیابی میزان آلودگی، طراحی اقدامات کاهش آلودگی جریان زیرسطحی ضروری است. یکی از مهم‌ترین مدل‌سازی‌ها به‌منظور حفظ منابع آب‌و‌خاک، مدل‌سازی حرکت جریان در خاک، به‌عنوان نوعی محیط متخلخل است. این نوع مدل‌سازی می‌تواند در جهت پیش‌بینی و مطالعه نحوه حرکت آلودگی در خاک استفاده گردد. از آنجایی که در بیش‌تر مطالعات حل جداگانه معادلات در محیط سیال و خاک انجام می‌شود، انجام مطالعه‌ای که در آن نیاز به حل دو نوع سیستم معادلاتی در دو محیط سیال و متخلخل به‌طور مجزا نیست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در راستای اهمیت این موضوع، در این پژوهش معادلات جریان به‌طور هم‌زمان در دو محیط سیال و متخلخل با روش عددی بدون شبکه SPH حل گردیده‌اند. به‌صورت کلی تکنیک‌های مختلفی برای مدل‌سازی جریان سیالات وجود دارد از جمله مدل‌سازی تحلیلی، مدل‌سازی تجربی، مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی. هرکدام از روش‌های ذکرشده دارای محدودیت‌ها و مزایایی هستند. علی‌رغم این که بیش‌تر جریان‌های هیدرولیکی می‌توانند به‌طور تئوری فرموله شوند اما به علت پیچیدگی فقط تعداد کمی از آن‌ها می‌توانند به‌صورت تحلیلی حل شوند. هم‌چنین

رابطه‌های تجربی برای مسائل شناخته‌شده تخمین زده شده‌اند و برای مسائل جدید ممکن است که رابطه‌های تجربی موجود مناسب نباشد و در صورت وجود رابطه‌های تجربی دقت محاسباتی بالایی ندارند. در مورد مدل‌سازی فیزیکی، زمانی که فیزیک موج خیلی پیچیده می‌شود با وجود در نظر گرفتن قوانین تشابه نمی‌توان مدلی را که کاملاً خصوصیات نمونه اصلی را نشان دهد، تهیه و ساخت و این مسأله نیز محدودیت مدل‌سازی فیزیکی به شمار می‌رود (1).

مدل‌های عددی ترکیبی از نمایش ریاضی فیزیکی پدیده و تقریب عددی معادلات ریاضی است. تفاوت این روش با روش تحلیلی فقط در روش حل معادلات حاکم بر جریان سیالات است. به همین دلیل با به‌کار بردن روش‌های عددی در حل معادلات حاکم می‌توان به جواب تقریبی مناسبی از این معادلات دست یافت و در نتیجه جریان سطح آزاد را مدل‌سازی کرد (2 و 3). حرکت سیال داخل محیط متخلخل به علت ناهمگونی فیزیکی دامنه و غیرخطی بودن معادلات حاکم بر آن از پیچیدگی‌های خاصی به‌خصوص در مرز سیال و محیط متخلخل برخوردار است. مدل‌سازی این پدیده نیازمند حل سیستم‌های متفاوت معادلات دیفرانسیل جزئی در دو منطقه سیال آزاد و محیط متخلخل است که همین موضوع باعث ایجاد یک سیستم دیفرانسیل ناهمگون می‌شود و شبیه‌سازی مرز بین دو محیط با مشکل همراه می‌شود. معادلات ناویر استوکس بیش‌تر برای مدل کردن جریان سطح آزاد ارائه می‌شوند درحالی‌که مدل‌سازی جریان داخل محیط متخلخل ممکن است به مدل‌های متفاوتی بسته به ویژگی‌های محیط متخلخل نیاز داشته باشد. برای مدل‌سازی جریان داخل محیط متخلخل برای نفوذپذیری‌های کم می‌توان از مدل کلاسیکی که توسط قانون دارسی ارائه می‌شود (ساده‌ترین ارتباط خطی بین سرعت و فشار) استفاده کرد، اما در مورد

نقوذپذیری‌های زیاد معادله غیرخطی فورشه‌ایمر استفاده می‌شود. مشکل اساسی حل کردن معادلات به‌طور جداگانه در دو محیط، انتخاب شرایط کاپلینگ مناسب (شرایط در مرز دو محیط) برای توصیف جریان سیال عبوری به محیط متخلخل است. به دلیل مشکلات زیاد تنظیم کردن شرایط مرز بینایی برای حل جداگانه دو محیط، انجام پژوهشی که از یک روش کاملاً متفاوت با در نظر گرفتن معادله تغییر یافته ناویر استوکس در کل منطقه محاسباتی و حل هم‌زمان آن در هر دو محیط سیال و متخلخل استفاده نماید از اهمیت بالایی برخوردار است (4). در همین راستا، روش‌های عددی به دلیل دقت بالا، ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی این پدیده به شمار می‌روند (1).

روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده (SPH) یک روش بدون شبکه است که در ابتدا توسط لوسی (1977) و موناگان و همکاران (1992) معرفی شد (5 و 6). کاربرد روش ذکر شده ابتدا برای مسائل فیزیک نجومی بوده‌است که بعدها برای مسائل مکانیک جامدات و سیالات نیز مورد استفاده قرار گرفت. موناگان و همکاران (1999) از روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده تراکم پذیر ضعیف برای شبیه‌سازی انتشار موج تنها در طول ساحل استفاده نمودند (7). شاو و همکاران (2004) به مطالعه اندرکنش انتشار موج و تیغه شناور با در نظر گرفتن مدل آشفتگی شبیه‌ساز گردابه‌های بزرگ پرداختند (8). عطایی و همکاران (2008) روش ISPH را اصلاح کرده و برای شبیه‌سازی سطح آزاد مسائل سیال غیرقابل تراکم به‌کار بردند (9). هانگ و همکاران (2011) با در نظر گرفتن دو دسته از معادلات ناویر استوکس برای جریان داخل محیط متخلخل و بیرون آن، پخش موج را روی بستر متخلخل با روش ISPH شبیه‌سازی کردند (10). شاو (2010) به بررسی اندرکنش موج با محیط متخلخل

با به‌کارگیری مدل هیدرودینامیک ذرات هموار شده تراکم‌ناپذیر پرداخت و نشان داد که روش مذکور قابلیت استفاده در کاربردهای هیدرودینامیک سواحل دارد (11). پنگ و همکاران (2017) یک روش WSPH برای شبیه‌سازی جریان داخل محیط متخلخل بر اساس تئوری اختلاط ارائه دادند (12). خیر و همکاران (2018) یک روش پروجکشن جدید را برای بررسی اندرکنش جریان در محیط متخلخل توسعه دادند (1). کاظمی و همکاران (2020) معادلات جرم و مومنتوم را در مقیاس ماکرو توسعه داده و به گسسته‌سازی این معادلات با روش SPH در مرز سیال و محیط متخلخل، پرداختند (13). لیان و همکاران (2021) یک فرمول‌بندی قوی SPH برای تقریب مشتق مرتبه دوم در سیستم‌های ذره‌ای معیوب را پیشنهاد دادند و با استفاده از این فرمول‌بندی، نشت جریان گذرا از محیط متخلخل اشباع به غیراشباع و برعکس را مدل‌سازی کردند (14). پدیده جذب، مکانیزم رایجی که بر جریان‌های چندفازی در محیط‌های متخلخل تأثیر می‌گذارد، تأثیرات مهمی بر توسعه مخازن نفت و گاز دارد، در این راستا لی و همکاران (2022) از روش SPH با در نظر گرفتن اندرکنش بین ذرات استفاده کردند تا پدیده جذب را در محیط متخلخل مطالعه کنند (15). ماسکی و همکاران (2024) روش عددی SPH را برای مدل‌سازی جریان املاح-سیال در محیط متخلخل سه‌بعدی تغییرشکل‌ناپذیر، جهت کاهش آلودگی جریان زیرسطحی توسعه دادند (16).

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی حرکت سیال در مواجهه با محیط متخلخل با روش عددی SPH، گسسته‌سازی معادلات ارائه شده توسط خیر و همکاران (2018) بر اساس روش شاو (2003) انجام گرفته‌است و همچنین ذرات مجازی در قسمت ورودی جریان برای افزایش دقت مدل‌سازی، متحرک

در نظر گرفته شده‌اند که در ادامه به تفصیل توضیح داده شده‌است (1 و 17).

نوآوری مقاله حاضر استفاده از روش SPH برای مطالعه جریان عبوری در محیط متخلخل است. این روش که به صورت گسترده برای مدل‌سازی‌های مختلف هیدرولیکی استفاده شده است، برای مسأله جریان‌های متخلخل کم‌تر به کار گرفته شده است و از طرفی روش این مقاله که استفاده از هیدرودینامیک ذرات هموار شده تراکم‌ناپذیر (ISPH) با روش دومرحله‌ای است، (جزحجمی نیز در دو گام محاسبه می‌شود) در این زمینه نوآوری داشته است. با جمیع موارد این مقاله سعی داشته است که کلیات و مفاهیم اساسی برای مطالعات جریان‌های هیدرولیکی متخلخل با روش ISPH را بیان کرده و صحت و دقت آن را در این حیطه در بوته آزمایش بگذارد. در آینده این مدل برای به عنوان یک مدل بومی شده برای مسائل عملی‌تر در این زمینه به کار گرفته خواهد شد.

روش‌های عددی مبتنی بر شبکه‌بندی مانند روش تفاضل محدود و المان محدود، روش غالب برای مدل‌سازی پدیده‌های علمی و مهندسی هستند. به دلیل شبکه محور بودن فرمول‌بندی‌ها در روش‌های مبتنی بر شبکه‌بندی، یک فرایند وقت‌گیر و پرکار برای تولید یک شبکه باکیفیت لازم است. استفاده از شبکه می‌تواند منجر به ایجاد مشکلاتی در رویارویی با مسائل سطح آزاد، مرز قابل تغییر، ایتترفیس متحرک (برای روش تفاضل محدود) و اعوجاج‌های خیلی زیاد (برای روش المان محدود) شود. اخیراً علاقه‌مندی پژوهش‌گران به سمت نسل جدیدی از روش‌های محاسباتی یعنی روش‌های بدون شبکه معطوف شده‌است.

روش SPH به عنوان یک روش بدون شبکه، قادر است مسائل سطح آزاد، مرزهای متغیر، مرز متحرک بین دو محیط و مسائل با تغییرشکل‌های خیلی بزرگ

را مدل‌سازی کند. کاربرد روش SPH از مقیاس ریز (میکرو) تا مقیاس بزرگ (ماکرو) حتی تا مقیاس فضایی و همچنین از سیستم گسسته گرفته تا سیستم پیوسته گسترده است. همچنین در برخی کدهای تجاری از پردازشگر SPH داخل پکیج‌های نرم‌افزاری با کاربردهای عملی خیلی موفق استفاده می‌شود. این روش توانایی بالایی در بررسی آسان و دقیق تغییر شکل‌های بزرگ در سطوح آزاد سیال را دارا است. در روش ذکر شده از بیان انتگرالی برای تقریب توابع استفاده می‌شود و توابع هموار نقشی اساسی در بیان تقریب‌های انتگرالی دارند. می‌توان مدعی شد که روش هیدرودینامیک ذرات هموار شده تکنیکی قدرتمند برای شبیه‌سازی مسائل دینامیکی مختلف در هیدرولیک است (18).

روش لاگرانژی SPH در مقایسه با روش‌های اولری مزیت‌های فراوانی دارد که به صورت فهرست‌وار این مزیت‌ها و همچنین معایب این روش آورده شده‌است:

- چگالی ذرات در ناحیه‌ای که سیال وجود دارد افزایش پیدا می‌کند به طوری که بار محاسباتی به طور عمده در آن مناطق متمرکز است. بنابراین زمان با انجام محاسبات در مناطق خالی هدر نمی‌رود.
- هیچ محدودیتی نه در هندسه سیستم و نه در اعمال شرایط مرزی وجود ندارد. شرایط اولیه می‌توانند به سادگی و بدون نیاز به الگوریتم‌های شبکه‌سازی پیچیده که در روش‌های المان محدود استفاده می‌شود برنامه‌نویسی شوند.
- گنجاندن دیگر فرایندهای فیزیکی در کد ساده است.

با این حال این روش برخی محدودیت‌های ذاتی را نیز دارا می‌باشد.

- اعمال شرایط مرزی دشوار است و باید از نفوذ سیال داخل مرزها اجتناب شود.

طرف محیط متخلخل (N/m^3)، شتاب ثقل (m/s^2) و فشار (Pa) هستند.

نیروی مقاومت اعمال شده از طرف محیط متخلخل در رابطه 4 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = -\frac{\mu}{k_p} \mathbf{u} - \frac{1.75}{\sqrt{150}} \frac{\rho}{\sqrt{k_p n_w}} \frac{\|\mathbf{u}\| \mathbf{u}}{3/2} \quad (4)$$

$$k_p = -\frac{n_w D_c^2}{150(1-n_w)^2 p} \quad (5)$$

که در آن، μ ، D_c ، n_w ، k_p به ترتیب نمایانگر ویسکوزیته دینامیکی ($N.s/m^2$)، طول مشخصه (m) و برابر با قطر میانگین ذرات محیط متخلخل (d_{50})، تخلخل و نفوذپذیری محیط متخلخل هستند (1).

پس از گسسته‌سازی معادله 1، (گسسته‌سازی طبق معادله 13) و به منظور محاسبه جز حجمی ذره هدف ϕ_i ، از جز حجمی ذرات جامد محیط متخلخل ϕ_p ، که در دایره تأثیر ذره هدف (دایره‌ای به شعاع دوبرابر طول هموار) هستند، استفاده می‌شود:

$$\phi_i = 1 - \sum_{j \in \Omega_p} \phi_p w_{ij}^v; \phi_p = 1 - n_w \quad (6)$$

اندیس‌های w ، p ، j ، i به ترتیب بیانگر محیط سیال، محیط متخلخل، ذره همسایه و ذره هدف هستند.

زمانی که هیچ ذره جامدی در دامنه تأثیر ذره هدف i نباشد، مقدار ϕ_i مطابق معادله 6 برابر با 1 به دست می‌آید (ذره A) و زمانی که دامنه تأثیر ذره i کاملاً در محیط متخلخل واقع شده‌است، مقدار ϕ_i برابر با n_w است (ذره C) و جز حجمی ذره B مقداری بین n_w و 1 دارد.

- روش درونیابی استفاده شده در این روش بسیار ساده است و آن قویاً تحت تأثیر اختلال ذرات قرار نخواهد گرفت.

- این روش نتایج خیلی منطقی برای گرادیان‌های مرتبه اول ارائه می‌دهد اما برای مشتقات مرتبه بالاتر می‌تواند غیردقیق باشد. در این موارد نیاز به استفاده از تکنیک‌های خاصی است.

- این روش به طور محاسباتی معمولاً روندی آهسته در مقایسه با برخی روش‌های مدرن مبتنی بر شبکه دارد (19).

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم‌ناپذیر با سطح آزاد، معادلات بقای جرم (1) و بقای اندازه حرکت (3) می‌باشند:

$$\rho \phi \nabla \mathbf{u} = -\frac{D \rho \phi}{Dt} \quad (1)$$

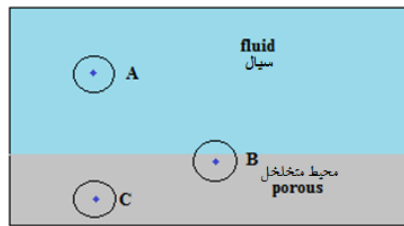
که در آن، ϕ ، ρ ، $\mathbf{u}$ ، t به ترتیب جز حجمی (بدون بعد)، چگالی (kg/m^3)، زمان (s) و سرعت (m/s) هستند. مقدار جز حجمی برابر درصد حجم اشغال شده توسط سیال (V_f) بر حجم موضعی هر ذره در ناحیه تأثیرش (V) است (رابطه 2).

$$\phi = V_f / V \quad (2)$$

معادله بقای اندازه حرکت:

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} + \frac{\mathbf{R}}{\rho} = \mathbf{0} \quad (3)$$

که در آن، ν ، $\mathbf{g}$ ، $\mathbf{R}$ ، p به ترتیب ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)، نیروی مقاومتی اعمال شده از



شکل 1- موقعیت قرارگیری ذرات نسبت به محیط سیال و محیط متخلخل.

Figure 1. Position of particles in fluid and porous media.

در شکل 1، A، B و C نمایانگر ذره‌هایی هستند که به ترتیب دامنه تأثیرشان کاملاً در منطقه سیال، در هر دو منطقه سیال و متخلخل و تنها در منطقه متخلخل واقع شده‌اند. به منظور گسسته‌سازی معادلات حاکم با روش SPH، روش‌های گوناگونی وجود دارد. شاو (2010) برای گسسته‌سازی معادلات ناویر استوکس (بدون ترم‌های اضافی) به منظور به کارگیری در روش عددی SPH از روش دو گام نیمه ضمنی بر پایه تفاوت چگالی استفاده کرده است (11). روش گسسته‌سازی شاو مبنای گسسته‌سازی معادلات 1 و 3 در این پژوهش قرار داده شده است. در این روش برای همه محاسبات از سه گام اولیه، میانی و پایانی استفاده می‌شود.

محیط به دو فاز سیال و فاز جامد تقسیم می‌شود، که در هر قسمت از محیط محاسباتی جز حجمی متفاوتی وجود دارد. در این گام مقدار جز حجمی هر ذره از رابطه 6 محاسبه و ρ_0 نامیده می‌شود (1). سپس در گام بعدی (مرحله پیش‌بینی) که با اندیس * مشخص شده است، مقادیر سرعت، مکان، چگالی و جز حجمی در مرحله پیش‌بینی از رابطه‌های 9 و 11 محاسبه می‌شود. رابطه 10، گسسته‌سازی جمله اول سمت راست رابطه 9 است.

$$Du_* = (v \nabla^2 u + g + \frac{R}{\rho}) dt \quad (9)$$

$$(\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u})_i = \sum_j \frac{4m_j (\mu_i + \mu_j) \bar{r}_{ij} \cdot \nabla_i \bar{w}_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)^2 (|\bar{r}_{ij}|^2 + \eta^2)} (\bar{u}_i - \bar{u}_j) \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Du_* &= ((\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u)_i + \frac{R_x}{\rho}) dt \\ Dv_* &= ((\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v)_i - g + \frac{R_z}{\rho}) dt \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \mathbf{u}_* &= \mathbf{u}_0 + Du_* \\ \mathbf{r}_* &= \mathbf{r}_0 + \mathbf{u}_* dt \\ \rho_{i*} &= \sum_j m_j \bar{w}(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|, h) \\ \phi_{i*} &= 1 - \sum_{j \in \Omega_p} \phi_p w_{ij} v_j; \phi_p = 1 - n_w \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

که در آن، $\mathbf{r}$ ، h ، m ، $\bar{w}$ به ترتیب بیانگر جرم، طول هموار، فاصله از ذره هدف و تابع هموار هستند. در گام اول، بعد از جانمایی ذرات در منطقه محاسباتی (اختصاص دادن مکان به هر ذره)، از رابطه 7 و 8 مقادیر جرم و چگالی ذرات با استفاده از ذرات همسایه موجود در دامنه تأثیرشان محاسبه می‌شوند. در این پژوهش با توجه به تئوری اختلاط دو فازی،

$$m_i = \frac{\rho_0}{\sum_j \bar{w}(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|, h)} \quad (7)$$

$$\rho_i = \sum_j m_j \bar{w}(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|, h) \quad (8)$$

که در آن، $\mathbf{r}$ ، h ، m ، $\bar{w}$ به ترتیب بیانگر جرم، طول هموار، فاصله از ذره هدف و تابع هموار هستند. در گام اول، بعد از جانمایی ذرات در منطقه محاسباتی (اختصاص دادن مکان به هر ذره)، از رابطه 7 و 8 مقادیر جرم و چگالی ذرات با استفاده از ذرات همسایه موجود در دامنه تأثیرشان محاسبه می‌شوند. در این پژوهش با توجه به تئوری اختلاط دو فازی،

در این پژوهش گسسته‌سازی معادله پیوستگی (رابطه 1)، طبق رابطه 13 انجام شده‌است. در این روش جز حجمی مانند چگالی ذرات در دو مرحله (ابتدای هر گام زمانی و مرحله پیش‌بینی) محاسبه شده و تفاضل این مقادیر در حل رابطه 13 استفاده شده‌است.

برای مدل‌سازی دیواره‌های صلب از یک ردیف ذره با موقعیت ثابت استفاده می‌شود که برای جلوگیری از تجمع ذرات کنار دیواره‌ها و تعادل فشار ذرات سیال، معادله فشار پواسون برای این ذرات نیز حل می‌گردد. همچنین برای در نظر گرفته نشدن ذرات دیواره به عنوان ذرات سطح آزاد، دو ردیف ذره مجازی به‌طور ثابت و عمود بر دیواره‌ها قرار داده می‌شوند (شکل 2). در این شکل ذرات قرمز، مشکی و آبی به ترتیب بیانگر ذرات مجازی، دیواره و سیال هستند (20).

در گام نهایی (مرحله اصلاح)، تمامی مقادیر کمیت‌های به‌دست آمده در گام پیش‌بینی مطابق رابطه 15 اصلاح می‌شوند و مقادیر نهایی آن‌ها در پایان گام زمانی مورد نظر محاسبه می‌شوند:

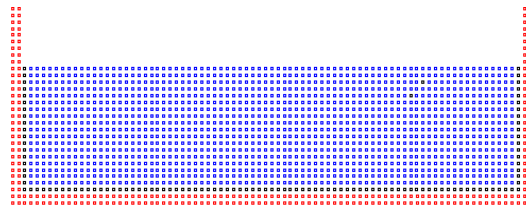
$$\Delta \left(\frac{1}{\rho_*} \nabla p_{t+1} \right) = \frac{\rho_0 - \rho_*}{\rho_0 \Delta t^2} + \frac{\phi_0 - \phi_*}{\rho_0 \Delta t^2} \quad (13)$$

$$\vec{\Delta u}^{**} = - \left(\sum_j m_j \left(\frac{p_j}{\rho_j} + \frac{p_i}{\rho_i} \right) \cdot \nabla_i \cdot \hat{w}_{ij} \right) \Delta t \quad (14)$$

$$\vec{u}^{**} = \vec{u}^* + \vec{\Delta u}^{**} \quad (15)$$

$$r_{**} = r_* + \frac{u_{**} + u_*}{2}$$

در نهایت در پایان گام اصلاح، سرعت، فشار و مکان تمامی ذرات (در گام موردنظر) به‌دست می‌آید.

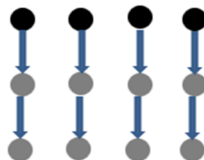


شکل 2- نمای کلی یک مدل ساده حاوی سیال.

Figure 2. Schematic view of a model, red, black and blue particles are respectively dummy, wall and water particles.

که در راستای عمود بر آن ذره قرار گرفته است برابر قرار داده می‌شود (شکل 3).

به منظور اعمال شرایط مرزی و محاسبه فشار ذرات مجازی از شرایط مرزی نیومن استفاده می‌شود، به‌طوری‌که فشار هر ذره مجازی با فشار ذره جامدی



شکل 3- نمایش ذرات دیواره (مشکی) و ذرات مجازی (خاکستری).

Figure 3. Schematic of wall (black) and dummy particles (gray).

می‌شود. اگر الگوی سرعت در اختیار داشته باشد که با استفاده از معادله سرعت، در هر ارتفاع مشخصی سرعت ذرات به دست می‌آید و به ذره اعمال می‌شود اما اگر فقط دبی و ارتفاع سیال مشخص باشند و پروفایل سرعت موجود نباشد، در آن صورت سرعت میانگین را محاسبه و مقدار میانگین به تمام ذرات ورودی جریان اعمال می‌شود. در این پژوهش پروفایل سرعت در راستای قائم موجود است (رابطه 18). در پشت ذرات ورودی دو ستون ذره مجازی قرار داده شده‌است تا چگالی ذرات سیال درست محاسبه شوند مکان این ذرات به صورت ثابت و هم متحرک در این پژوهش در نظر گرفته شده‌اند (شکل 4).



شکل 4- موقعیت قرارگیری ذرات مجازی (خاکستری) مربوط به ذرات ورودی و خروجی (مشکی).

Figure 4. Position of inflow (black), outflow (black) and dummy particles (gray).

نوشته شده‌است و مدل‌سازی‌های انجام شده با پردازنده cpu i7 8700 و 6 هسته انجام شده‌اند. مدل‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش در ادامه بیان شده‌اند.

هدف از مدل‌سازی جریان دوبعدی در یک ظرف استوانه‌ای، بررسی عملکرد مدل عددی تهیه شده برای بررسی نحوه حرکت ذرات سیال و همچنین بررسی عملکرد شرایط مرزی دیواره و سطح آزاد بوده‌است. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام شده در ابتدا یک ظرف استوانه‌ای دوبعدی در نظر گرفته شده که تا عمق 1 متر از سیال آب پر شده‌است. دیواره‌های ظرف، صلب هستند و بالای سیال در تماس با هوا است (جریان سطح آزاد). در شکل 5 نمای کلی ظرف و ابعاد آن نشان داده شده‌اند.

برای شناسایی ذرات سطح آزاد از بررسی شرط زیر برای تمامی ذرات استفاده می‌شود، به طوری که ذراتی که شرط زیر (معادله 16) برای آن‌ها صادق است به عنوان ذرات سطح آزاد در نظر گرفته می‌شوند (15). ردیابی ذرات سطح آزاد (شرط مرزی دریگله)

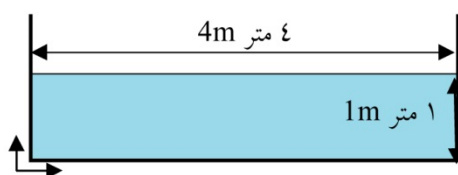
$$\text{if } \rho_* \leq 0.97 \rho_0 \Rightarrow \text{pressure} = 0 \quad (16)$$

مرز ورودی: ذرات ورودی جریان به صورت یک ستون ذرات با همان فاصله اولیه بین ذرات از هم کنار هم قرار داده می‌شوند و سرعت اولیه داده شده به ذرات بر اساس آزمایش‌های مرجع موردنظر تعیین

مرز خروجی: تمام ویژگی‌های ذرات سیال در مرز خروجی جریان گرفته می‌شوند و سپس از منطقه محاسباتی حذف می‌شوند. اگر جریان زیر بحرانی باشد به دلیل کنترل جریان از پایین دست، یک فشار هیدرواستاتیک ثابت به مرز خروجی جریان اعمال شده‌است. در مرز خروجی جریان نیز مانند مرز ورودی دو ستون ذره مجازی در نظر گرفته می‌شود (21).

در مرز بین سیال و محیط متخلخل لازم به اعمال شرط خاصی نیستیم. چرا که معادلات 1 و 2 برای هر دو محیط سیال و متخلخل به طور هم‌زمان حل می‌شوند. در هر گام زمانی تمامی کمیت‌های روی مرز برای ذرات موجود در مرز هم به مانند تمامی ذرات موجود در کل منطقه محاسباتی محاسبه می‌شوند.

مدل عددی تهیه شده در این پژوهش با زبان برنامه‌نویسی فورترون و در محیط ویژوال استودیو 2008



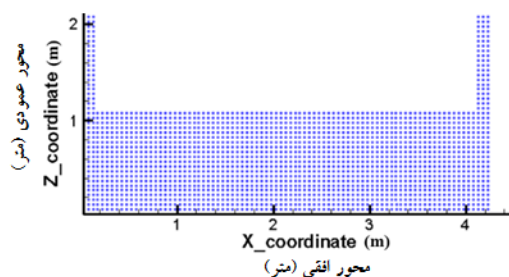
شکل 5- نمای کلی یک ظرف دو بعدی حاوی سیال آب.

Figure 5. Schematic view of a 2-D glass of water.

$$\Delta t \leq 0.1 \frac{dr}{u_{\max}} \quad (17)$$

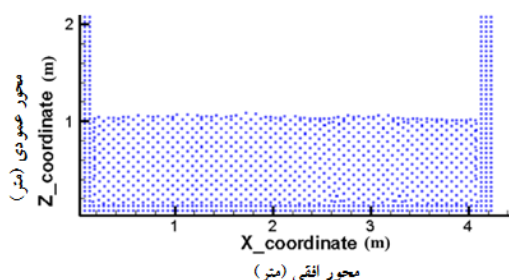
که در آن، $u_{\max}$ حداکثر سرعت ذرات در هر گام زمانی است. فاکتور 0/1 تضمین‌کننده عدم نفوذ ذرات در یکدیگر و حرکت آن‌ها به صورت بخشی از فاصله بین ذرات در هر گام زمانی است (22 و 23).
شکل 6 نشان‌دهنده چیدمان و موقعیت مدل‌سازی شده ذرات در گام زمانی صفر با روش SPH است.

در این تست ابعاد ظرف مستطیل شکل به طول 4 متر و ارتفاع آب 1 متر در نظر گرفته شد. فاصله بین ذرات (dr) برابر با 0/01 متر و گام زمانی (dt) برابر با 0/005 ثانیه در نظر گرفته شده است. تعداد کل ذرات با احتساب ذرات دیواره، مجازی و سیال 2236 است. مقادیر فاصله اولیه بین ذرات و گام زمانی از شرط کورانت (معادله 17) پیروی می‌کند. زمان انجام این مدل‌سازی 172800 ثانیه بوده است.



شکل 6- موقعیت ذرات در لحظه صفر.

Figure 6. Particles position at $t=0$.

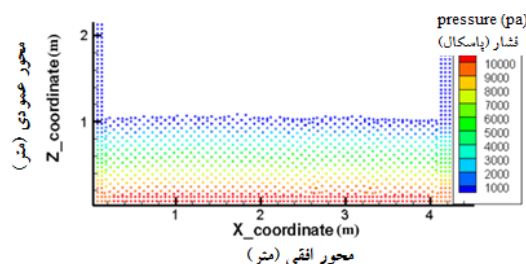


شکل 7- موقعیت ذرات در گام نهایی (گام زمانی 11940).

Figure 7. Positions of particles at final time step=11940.

می‌توان مشاهده کرد که ذرات سیال در مقابل دیواره‌ها رفتار صحیحی داشته و هیچ نفوذی در دیواره‌ها ندارند. البته مقدار بسیار ناچیزی ارتفاع آب پایین افتاده‌است که می‌توان آن را نادیده گرفت.

در شکل 7 می‌توان موقعیت ذرات را بعد از 11940 گام زمانی که ذرات به پایداری رسیده‌اند و دیگر حرکتی ندارند مشاهده کرد. مسأله عدم نفوذ ذرات در دیواره‌های نفوذناپذیر در روش SPH از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به شکل 7

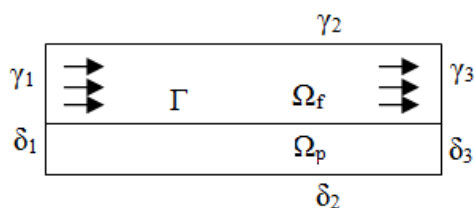


شکل 8- موقعیت و فشار ذرات در گام نهایی 11940.

Figure 8. Final position of particles & water pressure at final time step=11940.

شتاب ثقل (10) می‌باشد که می‌توان مشاهده کرد که روش SPH به خوبی این مقدار را تقریب زده‌است. مدل‌سازی بعدی حرکت سیال هوا (با فرض تراکم‌ناپذیر بودن) از روی یک محیط متخلخل را بررسی می‌کند. در شکل 9 یک نمای شماتیک از مدلی که قرار است شبیه‌سازی شود آورده شده‌است:

در شکل 8 نمودار هم فشار ذرات در گام نهایی (11940) محاسبات آورده شده‌است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، فشار ذرات از فشار هیدرواستاتیک با تقریب بسیار بالایی تبعیت می‌کنند. به عنوان مثال در کف محفظه موردنظر، فشار هیدرواستاتیک مقدار 10000 پاسکال (با احتساب



شکل 9- تصویر شماتیک مدل دوبعدی.

Figure 9. Schematic picture of 2-D model.

سهمی‌گون (معادله 18) است. به این صورت که ستونی از ذرات با داشتن سرعت واقعی‌شان طبق توزیع سرعت، در زمان مشخص در قسمت ورودی وارد می‌شوند و پس از شبیه‌سازی و حرکت ذرات، از سمت راست و انتهای فلوم خارج می‌شوند. سیال در

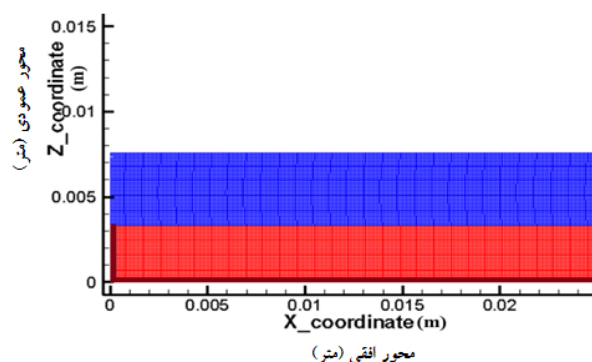
شرایط اولیه و مرزی مدل در ادامه شرح داده شده‌است. در این تست ارتفاع محیط متخلخل 0/003 متر و ارتفاع سیال 0/004 متر است. زمان انجام این مدل‌سازی 2160000 ثانیه بوده‌است. توزیع سرعت جریان برای ذرات سیال ورودی یک توزیع سرعت

نظر گرفته شده هوای غیرقابل تراکم با چگالی (ρ) $1/184$ و ویسکوزیته دینامیکی (μ) $1/855 \times 10^{-5}$ و نفوذپذیری (k) $3/71 \times 10^{-7}$ و ضریب (c_f) $0/5$ است. در این تست فاصله اولیه بین ذرات برابر $0/0001$ متر و گام زمانی $0/00002$ ثانیه در نظر گرفته شد.

$$\begin{cases} \gamma_1 u_{pois} = (y(4-y), 0) \\ u_{max} = 0.4 \text{ m/s} \end{cases} \quad (18)$$

در شکل 9، Γ مرز نفوذپذیر بین دو محیط سیال و متخلخل است. جریان از ورودی γ_1 وارد می‌شود و از هر دو خروجی γ_3 و δ_3 خارج می‌شود. همه مرزهای دیگر غیرقابل نفوذ هستند. بر مرز γ_2 شرط عدم لغزندگی اعمال و بر مرزهای δ_1 و δ_2 شرط لغزندگی

اعمال شده‌است. سرعت در مرز γ_2 صفر در نظر گرفته شده‌است، در مرز γ_3 شرط فشار هیدرواستاتیک اعمال شده‌است، گرادیان فشار در جهت عمود بر دو مرز δ_1 و δ_2 صفر در نظر گرفته شده‌است و فشار ذرات در مرز خروجی δ_3 صفر است. در این تست چندین پارامتر بدون بعد در سیولین و همکاران (2013) تعریف شده‌اند که باید در طول مدل‌سازی با روش SPH تمامی این پارامترها با مقادیر پژوهش سیمولین و همکاران (2013) یکسان در نظر گرفته شوند تا نتایج مدل‌سازی‌ها با هم قابلیت مقایسه داشته باشند (4) (Re , Gr_v , Gr_i , Gr_c , Gr_f , Gr_n).

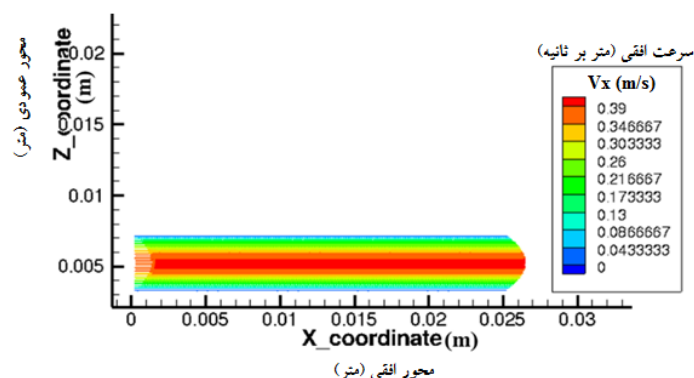


شکل 10- مختصات ذرات در زمان صفر (رنگ آبی، قرمز و قهوه‌ای به ترتیب ذرات سیال، ذرات سیال موجود در محیط متخلخل و دیواره‌های نفوذناپذیر هستند).

Figure 10. Particles position at $t=0$ (the blue particles are water, red particles are water particles in porous media and brown particles are walls).

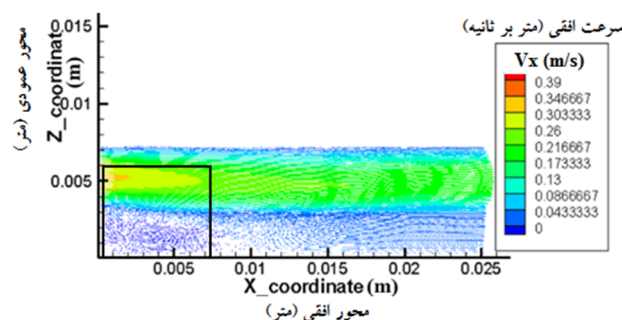
بردارهای سرعت در زمان صفر در شکل 11 نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، سرعت ذرات در مرکز محیط سیال، بیش‌ترین مقدار و حدود $0/39$ متر بر ثانیه و با دور شدن از مرکز کاهش و به صفر رسیده است. این توزیع سرعت کاملاً با شرایط اولیه مسأله (رابطه 17) مطابقت دارد.

موقعیت ذرات سیال در شکل 10 نشان داده شده‌اند. ذرات سیال، محیط متخلخل و دیواره در این شکل به تفکیک رنگ نشان داده شده‌اند. هر دیواره نفوذناپذیری از دو لایه ذره مجازی و یک لایه دیواره که شامل ذرات با مکان ثابت هستند تشکیل می‌شود.



شکل 11- بردارهای افقی سرعت در زمان صفر (سرعت سیال در محیط متخلخل صفر است که به صورت منطقه خالی و بدون رنگ نشان داده شده است).

Figure 11. Horizontal velocities at $t=0$ (velocity in porous media is zero that is shown as an empty and white zone).



شکل 12- بردار سرعت در گام نهایی 0/5955 ثانیه.

Figure 12. Horizontal velocities at $t=0.5955$ s.

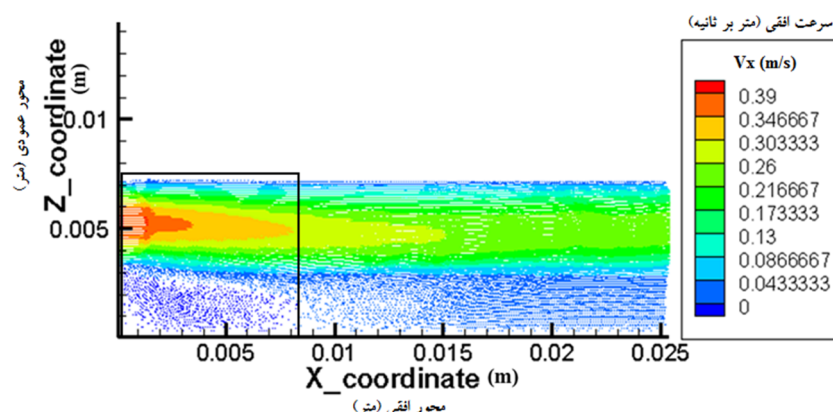
ورودی جریان، جهت بردارهای سرعت در محیط متخلخل تغییر کرده و یک جریان گردابه‌ای تشکیل شده است. این جریان چرخشی به دلیل نفوذناپذیر بودن دیواره سمت چپ موجود در محیط متخلخل ایجاد شده است.

در این پژوهش، به عنوان مطالعه‌ای دیگر، دو ستون ذرات مجازی پشت ذرات ورودی که در تست قبل دارای موقعیتی ثابت در طول محاسبات بودند متحرک فرض شده‌اند و در ادامه نتایج این تغییرات در این دو تست با هم مقایسه شده‌اند. سرعت هر یک از ذرات موجود در ستون ذرات مجازی پشت ذرات ورودی را مساوی با سرعت ذرات ورودی به منطقه محاسباتی رو به روی آن‌ها قرار می‌دهیم. یعنی هر زمان که

بردارهای سرعت بعد از 29775 گام زمانی در شکل 12 نشان داده شده‌اند. در این شکل می‌توان دید که سرعت ذرات نسبت به گام زمانی نخست کاهش داشته‌اند و حداکثر سرعت 0/39 متر بر ثانیه در مرکز سیال، به دلیل نرسیدن به پایداری کامل، هنوز به انتهای منطقه محاسباتی نرسیده است. همچنین سرعت ذرات، روند کاهشی خود را با دور شدن از مرکز سیال حفظ کرده‌اند. با مشاهده شکل 12 می‌توان دید که سرعت ذرات سیال موجود در محیط متخلخل بسیار کم‌تر از سرعت ذرات در محیط سیال تنها هستند که نشان‌دهنده عملکرد صحیح مدل عددی تهیه شده در محاسبه نیروی وارده از اسکلت جامد محیط متخلخل بر سیال است. در فاصله حدودی 0/004 متر از

در این آزمایش، کل منطقه محاسباتی اشباع در نظر گرفته شده است. سرعت اولیه تمام ذرات سیال در منطقه سیال برابر با توزیع سهمی‌گون بوده است و سرعت اولیه ذرات در قسمت متخلخل صفر در نظر گرفته شده است. اجرای کد تا گام 9150 یعنی زمان 0/183 ثانیه ادامه پیدا کرده است. آرایش ذرات در لحظه صفر در شکل 10 نشان داده شده است. بردارهای سرعت در زمان صفر همانند شکل 11 بوده است.

ذرات سیال که دارای توزیع سهمی‌گون بودند وارد منطقه محاسباتی شدند و حرکت کردند، دو ذره مجازی پشت هر ذره سیال نیز به‌طور همزمان با سرعت مشابه آن ذره حرکت می‌کنند تا زمانی که موعد ورود ذره سیال جدید برسد. در این زمان دو ذره مجازی معادل هر ذره سیال به فاصله dr پشت ذره سیال برگشته و دوباره مانند آن‌چه شرح داده شد حرکتشان ادامه پیدا می‌کند. زمان انجام این مدل‌سازی حدود 2167200 ثانیه بوده است.



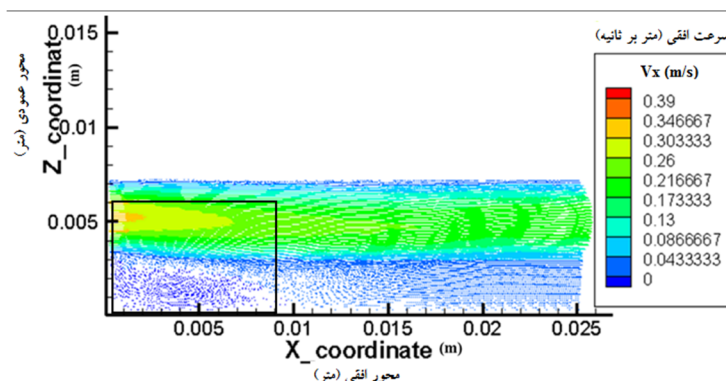
شکل 13- بردارهای افقی سرعت برای تست با دیواره متحرک در گام زمانی 9150.

Figure 13. Horizontal velocity vectors at interface, at time steps=9150 (dynamic virtual particles).

شکل 14، گام زمانی 9150 شکل 12 را نشان می‌دهد. این شکل به‌منظور مقایسه دو حالت ذرات مجازی متحرک و ثابت در گام زمانی 9150 ارائه شده است.

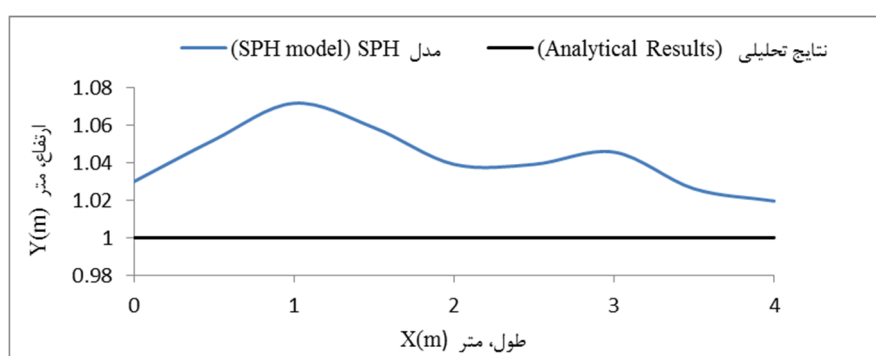
در این مقاله میانگین نسبت مقادیر محاسباتی بر مشاهداتی و انحراف معیار نسبت مقادیر محاسباتی بر مشاهداتی برای ارزیابی مدل عددی حاضر استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش این مقادیر به اختصار انحراف معیار و میانگین نوشته شده‌اند.

در این مطالعه موردی، ذرات مجازی دارای حرکتی مشابه ذرات سیال هستند. بردارهای سرعت بعد از 9150 گام زمانی در شکل 13 نمایش داده شده‌اند. در این شکل نیز می‌توان دید که سرعت ذرات نسبت به گام زمانی نخست کاهش داشته‌اند و حداکثر سرعت 0/39 متر بر ثانیه در مرکز سیال، به‌دلیل نرسیدن به پایداری کامل، هنوز به انتهای منطقه محاسباتی نرسیده است. اما با وجود گذشتن زمان کمتر، سرعت ذرات در مرکز محیط متخلخل به شرایط پایداری نهایی بیشتر نزدیک شده‌اند و این مسأله نشان‌دهنده تسریع روند مدل‌سازی با متحرک در نظر گرفتن ذرات مجازی است.



شکل 14- بردارهای افقی سرعت برای تست با دیواره ثابت در گام زمانی 9150.

Figure 14. Horizontal velocity vectors at interface, at time steps=9150 (static virtual particles).

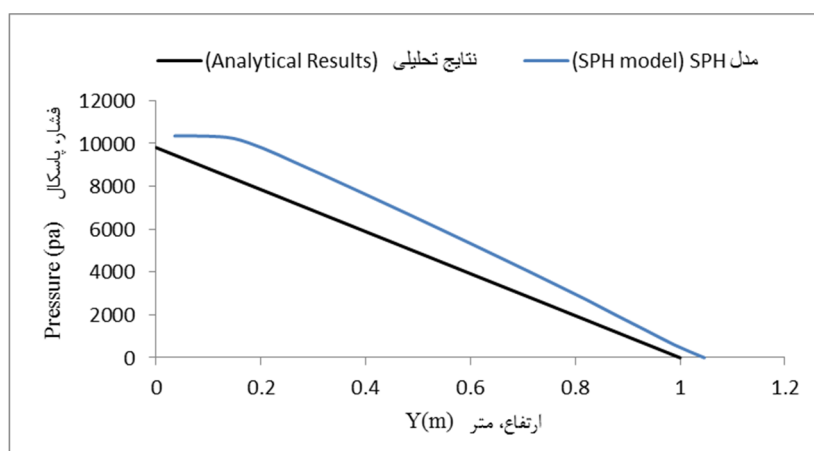


شکل 15- مقایسه ارتفاع سطح آزاد آب بین مدل SPH و نتایج تحلیلی در گام نهایی 11940.

Figure 15. A comparison of free surface between SPH and analytical model at final time step=11940.

در تست اول در نمودار شکل 15 موقعیت سطح آزاد جریان با روش SPH و تحلیلی مقایسه شده است. پس از ارزیابی نتایج، مقدار انحراف معیار در محاسبه سطح آزاد سیال با روش عددی حاضر 0/015 و مقدار میانگین در محاسبه سطح آزاد سیال با روش عددی حاضر 1/04 بوده است که تطابق مناسب بین نتایج تحلیلی و عددی را نشان می دهد.

در تست اول در نمودار شکل 15 موقعیت سطح آزاد جریان با روش SPH و تحلیلی مقایسه شده است. پس از ارزیابی نتایج، مقدار انحراف معیار در محاسبه سطح آزاد سیال با روش عددی حاضر 0/015 و مقدار میانگین در محاسبه سطح آزاد سیال با روش عددی حاضر 1/04 بوده است که تطابق مناسب بین نتایج تحلیلی و عددی را نشان می دهد.

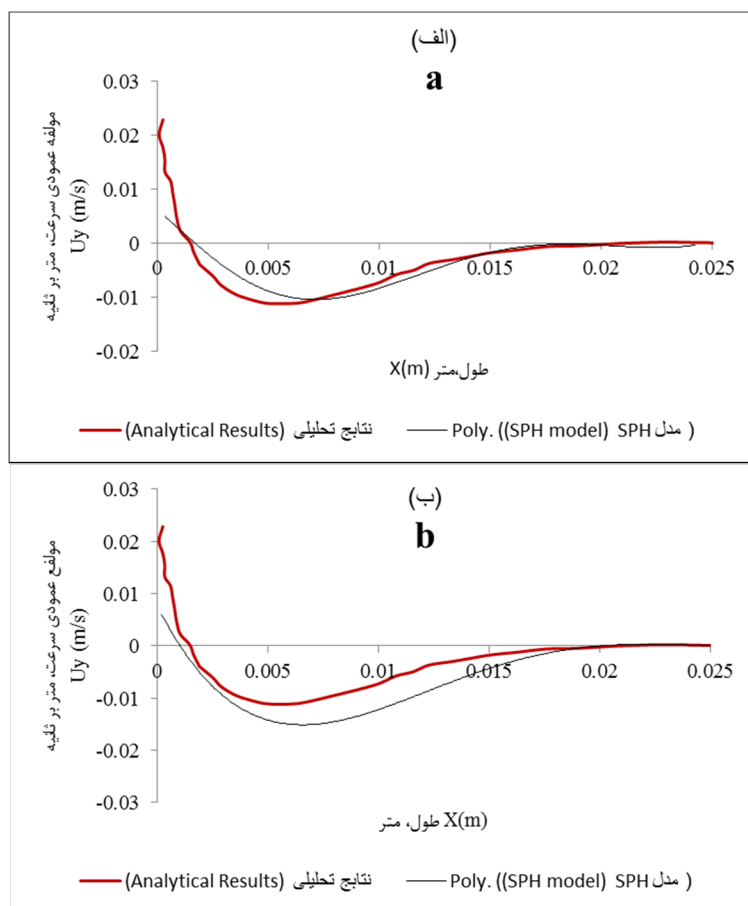


شکل 16- مقایسه مقدار فشار بین مدل SPH و نتایج تحلیلی در فاصله 2 متری.

Figure 16. Comparison of pressure at x=2m.

محاسبه فشار با روش عددی حاضر 0/18 و مقدار میانگین در محاسبه فشار با روش عددی حاضر 1/2 بوده‌است.

در ادامه تست اول، در نمودار شکل 16، مقادیر فشار مدل‌سازی شده با روش SPH و تحلیلی مقایسه شده‌اند. با بررسی نتایج، مقدار انحراف معیار در

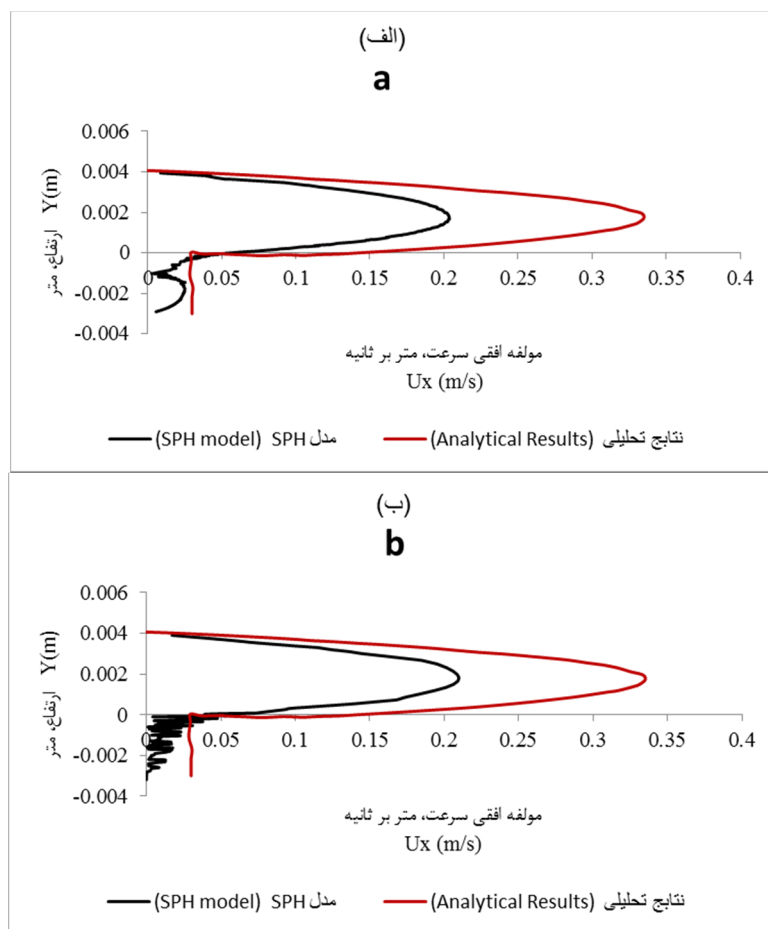


شکل 17- مؤلفه سرعت عمودی در مرز بین سیال و محیط متخلخل با مدل SPH و روش تحلیلی سیمولین و همکاران (2013) در گام زمانی 29775 شکل الف و 9150 شکل ب.

Figure 17. A comparison of vertical component of velocity (u_y) at interface between SPH model (blue line) and analytical results of Cimolin et al., (2013) (red line) at time step=29775 (a) and 9150 (b).

است. هم‌چنین مقدار میانگین در این گام‌های زمانی به ترتیب 0/9 و 1/15 محاسبه شده‌است. این دو نمودار نشان می‌دهند که با گذشت زمان نتایج سرعت‌های عمودی در مرز بین سیال و محیط متخلخل با مدل SPH و مدل تحلیلی به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند.

پس از بررسی نتایج مدل‌سازی شماره 2 در شکل 17 بر نتایج حاصل از مدل عددی یک نمودار چندجمله‌ای (منحنی مشکی) برازش داده شده‌است. با توجه به شکل 17-a و 17-b می‌توان مطابقت بالای نتایج تحلیلی و عددی را مشاهده کرد. مقدار انحراف معیار مقدار مدل‌سازی شده سرعت عمودی در گام زمانی 29775 و 9150 به ترتیب 0/27 و 0/82

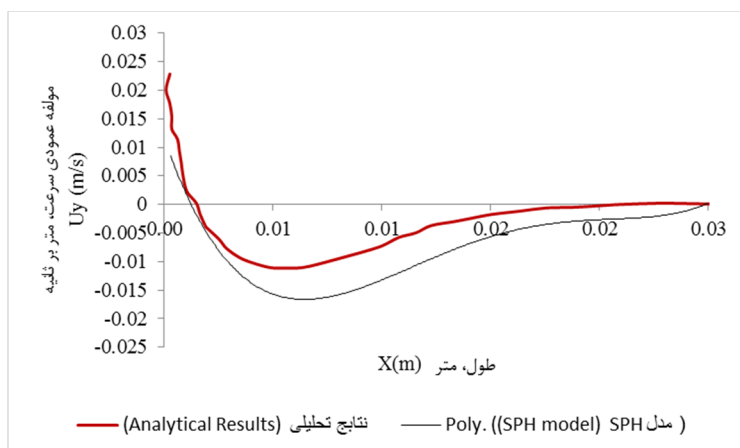


شکل 18- مؤلفه افقی سرعت در خروجی عمودی در گام زمانی 29775 (الف) و 9150 (ب) با روش SPH (خط آبی) و روش تحلیلی سیمولین و همکاران (2013) (خط قرمز).

Figure 18. Horizontal component of velocity at vertical outlet at time step=29775 (a) and 9150 (b) by SPH (blue line) and analytical results of Cimolin et al., (2013) (red line).

بدین صورت برای نتایج سرعت افقی می‌توان به نتایج در گام زمانی 9150 اتکا کرد و نیاز به ادامه دادن زمان محاسبات و هزینه محاسباتی بالاتر نیست. با توجه به نتایج این چهار نمودار نتایج مدل‌سازی عددی در گام 9150 (به منظور کاهش زمان محاسبات) را می‌توان قابل قبول دانست.

در شکل 18 نتایج سرعت‌های افقی در خروجی عمودی با مدل SPH و مدل تحلیلی مقایسه شده‌اند. انحراف معیار برای نتایج مدل عددی در شکل‌های a و b به ترتیب مقادیر 0/22 و 0/36 و میانگین به ترتیب 0/63 و 0/79 برآورد شده‌است. همان‌طور که مشخص است نتایج با گذشت زمان تغییر چندانی نکرده‌اند.

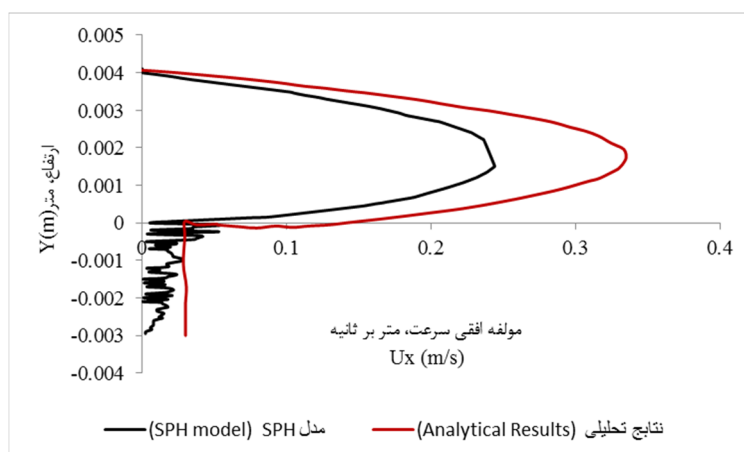


شکل 19- بردار عمودی سرعت در مرز افقی دو محیط سیال و متخلخل بعد از 9150 گام زمانی برای دیوارهای متحرک با روش SPH و روش تحلیلی سیمولین و همکاران (2013).

Figure 19. Vertical component of velocity at interface, after 9150 time steps (dynamic virtual particles) by SPH (black line) and analytical results of Cimolin et al., (2013) (red line).

SPH و تحلیلی مقایسه شده‌اند. انحراف معیار این نتایج 0/7 محاسبه شده است.

با بررسی نتایج مدل‌سازی سوم در شکل 19 بردارهای عمودی سرعت در مرز دو محیط با روش



شکل 20- مؤلفه افقی سرعت در خروجی عمودی بعد از 9150 گام زمانی برای دیوارهای متحرک با روش SPH و روش تحلیلی سیمولین و همکاران (2013).

Figure 20. Horizontal component of velocity at vertical outlet, after 9150 time steps (dynamic virtual particles) by SPH (black line) and analytical results of Cimolin et al., (2013) (red line).

(گام زمانی 9150) و هم‌چنین b-18 با 20 (گام زمانی 29775) مقایسه می‌شوند.

پس از مقایسه شکل‌های b-17 و 19 می‌توان نتیجه گرفت که متحرک در نظر گرفتن ذرات مجازی پشت ذرات ورودی تأثیر آن‌چنانی در نتایج ندارند و

در شکل 20 انحراف معیار به مقدار 0/2 نسبت به نتایج مربوط به ذرات مجازی ثابت بهبود پیدا کرده است. به‌منظور مقایسه نتایج مدل‌سازی‌ها برای دو حالت ذرات مجازی ثابت و متحرک، شکل‌های b-17 و 19

حل هم‌زمان معادلات ناویراستوکس در دو محیط سیال و محیط متخلخل را دارد، استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا به‌منظور بررسی عملکرد مدل عددی در مدل‌سازی دیواره‌های نفوذناپذیر، یک محفظه حاوی آب ساکن مدل‌سازی شده است که با بررسی نتایج، عملکرد صحیح مدل عددی تهیه‌شده در مدل‌سازی سطوح غیرقابل نفوذ مشخص شده است. در ادامه جریان هوای تراکم‌ناپذیر با ورودی و خروجی باز در یک فلوم که دارای توزیع سرعت در ورودی و همچنین بستر جریان متخلخل است، مدل‌سازی شده است. در ادامه این شبیه‌سازی، تأثیر حرکت ذرات مجازی مربوط به ورودی جریان بر دقت مدل‌سازی بررسی شده است. نتایج حاصله نشان‌دهنده افزایش دقت محاسبات وقتی ذرات مجازی متحرک هستند در مقایسه با وقتی که ذرات مجازی دارای موقعیت ثابتی در سرتاسر مدل‌سازی هستند، بوده است. به‌طوری‌که وقتی ذرات مجازی متحرک در نظر گرفته شدند، انحراف معیار نسبت مقادیر سرعت افقی محاسباتی بر مقادیر مشاهداتی در خروجی جریان، به مقدار $0/2$ نسبت به وقتی که این ذرات مجازی ثابت بوده‌اند بهبود پیدا کرده است.

به‌طورکلی نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله بیانگر دقت مناسب مدل عددی تهیه‌شده در شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد در حضور محیط متخلخل است و می‌توان از مدل حاضر جهت مدل‌سازی حرکت آلودگی و املاح در محیط خاک به‌عنوان یک نوع محیط متخلخل، با هدف حفاظت از منابع آب‌و‌خاک و مسائل تکمیلی استفاده کرد.

تقریباً یکسان هستند و در هر دو صورت نتایج قابل‌اتکا هستند و از دقت بالایی برخوردارند. در مقایسه شکل‌های 18-b با 20 می‌توان دقیق‌تر بودن نتایج شکل 20 را در برآورد سرعت افقی مشاهده کرد. با توجه به این مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که برآورد سرعت افقی در مرز خروجی جریان با متحرک در نظر گرفتن ذرات مجازی پشت ذرات ورودی بالاتر رفته است. از آنجایی که بار محاسباتی این مدل‌سازی‌ها بسیار بالا بوده است و حصول نتایج بعضاً بیش از دو ماه برای هر آزمایش زمان برده است و امکان حصول به پایداری کامل و ادامه دادن محاسبات بسیار دشوار بوده است ما به نتایج مدل‌سازی‌ها قبل از رسیدن به پایداری (گام 9150) اتکا کردیم. زیرا با ادامه دادن محاسبات و نزدیک‌تر شدن به پایداری (گام 29775) برای آزمایش دوم می‌توان مشاهده کرد که نتایج برای این دو گام زمانی، تغییرات آن‌چنانی نکرده‌اند (مقایسه نتایج دو نمودار a و b شکل 17 و همچنین مقایسه نتایج دو نمودار a و b شکل 18 و بنابراین اتکا کردن به نتایج در گام 9150 کار نادرستی نیست. البته می‌توان مشاهده کرد که در مورد نتایج سرعت عمودی در مرز دو محیط (مقایسه نمودارهای 17-a و 17-b) نتایج گام 29775 نسبت به گام 9150 به نتایج تحلیلی نزدیک‌تر بوده‌اند. در مطالعات آتی می‌توان با ارتقا کد و بازنویسی آن از بار محاسباتی کم کرده و به پایداری کامل رسید.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموارشده برای تهیه یک مدل عددی که قابلیت

داده و اطلاعات	فهرست علائم
داده‌های این پژوهش مربوط به رساله دکتری نویسنده اول می‌باشد که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشند.	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) p سرعت (ms^{-1}) u زمان (s) t قطر ذرات (m) D_c تخلخل n_w نفوذپذیری K_p عدد رینولدز Re_f علائم یونانی: چگالی (kgm^{-3}) ρ جز حجمی φ ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s) ν ویسکوزیته دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) μ زیر نویس‌ها: محیط سیال w محیط متخلخل p ذره هدف i ذره همسایه j گام ابتدایی 0 گام پیش‌بینی $*$ گام تصحیح $**$
تعارض منافع	
در این مقاله تضاد منافع وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.	
نحوه مشارکت نویسندگان	
مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است:	
نویسنده اول: آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله، نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، مشارکت در آنالیزها، نظارت تحقیق، نویسنده سوم: تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، نویسنده چهارم: بازبینی مقاله و نظارت بر تحقیق، نویسنده پنجم: مشارکت در طرح و روش تحقیق، بازبینی مقاله.	
اصول اخلاقی	
نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.	
حمایت مالی	
حمایت مالی از این پژوهش در قالب گرنت دانشجویی نویسنده اول این مطالعه بوده‌است.	
تقدیر و تشکر	
نویسندگان از جناب آقای پروفسور الرو و مؤسسه ریاضی کاربردی کشور اسپانیا جهت مشورت و همفکری و تسهیل اجرای این پژوهش تقدیر و تشکر می‌نمایند.	

منابع

1. Khayyer, A., Gotoh, H., Shimizu, Y., Gotoh, K., Falahaty, H., & Shao, S. (2018). Development of a projection-based SPH method for numerical wave flume with porous media of variable porosity. *J. of Coastal Engineering*. 140, 1-22.
2. Lin, P. (2008). Numerical Modeling of Water Waves. Taylor & Francis. New York, 504p.
3. Memarzadeh, R., & Hejazi, K. (2012). ISPH numerical modeling of nonlinear wave run-up on steep slopes. *J. of the Persian Gulf*. 3(10), 17-26.
4. Cimolin, F., & Discacciati, M. (2013). Navier–Stokes/Forchheimer models for filtration through porous media. *J. of Applied Numerical Mathematics*. 72, 205-224.
5. Lucy, L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *J. of Astronomical*. 82(12), 1013-1024.
6. Monaghan, J. J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. *Annual review of astronomy and astrophysics*. 30(1), 543-574.
7. Monaghan, J. J., & Kos, A. (1999). Solitary waves on a Cretan beach. *J. of waterway, port, coastal, and ocean engineering*. 125(3), 145-155.
8. Shao, S., & Gotoh, H. (2004). Simulating coupled motion of progressive wave and floating curtain wall by SPH-LES model. *J. of Coastal Engineering*. 46(2), 171-202.
9. Ataie-Ashtiani, B., Shobeyri, G., & Farhadi, L. 2008. Modified incompressible SPH method for simulating free surface problems. *J. of Fluid Dynamics Research*. 40(9), 637.
10. Huang, C. J., Chen, C. H., & Chang, H. H. (2011). Propagation of water waves over permeable rippled beds. *J. of Ocean engineering*. 38(4), 579-591.
11. Shao, S. (2010). Incompressible SPH flow model for wave interactions with porous media. *J. of Coastal Engineering*. 57(3), 304-316.
12. Peng, C., Xu, G., Wu, W., Yu, H.S., & Wang, C. (2017). Multiphase SPH modeling of free surface flow in porous media with variable porosity. *J. of Comput & Geotech*. 81, 239-248.
13. Kazemi, E., Tait, S., & Shao, S. (2020). SPH based numerical treatment of the interfacial interaction of flow with porous media. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 92(4), 219-245. **ISSN 0271-2091**.
14. Lian, Y., Bui, H. H., Nguyen, G. D., Tran, H. T., & Haque, A. (2021). A general SPH framework for transient seepage flows through unsaturated porous media considering anisotropic diffusion. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 387, 114169.
15. Liu, J., Zhang, T., & Sun, S. (2022). Study of the imbibition phenomenon in porous media by the smoothed particle hydrodynamic (SPH) method. *Entropy*, 24(9), 1212.
16. Mhaski, S., & Ramana, G. V. (2024). Modelling Coupled Flow-Solute Transport in Porous Media using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Computers and Geotechnics*, 167, 106097.
17. Shao, S., & Lo, E. Y. (2003). Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface. *J. of Advances in water resources*, 26(7), 787-800.
18. Liu, G. R., & Liu, M. B. (2003). Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method. World scientific, 302p.
19. Crespo, A. J. C. (2008). Application of the smoothed particle hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics, PhD Thesis, Department of physics, university of Vigo, 150p.
20. Memarzadeh, R., Sheybanifard, H., & Zounemat-Kermani, M. (2020). Numerical and Experimental Study of Abrupt Wave

- Interaction with Vertical and Inclined Rectangular Obstacles. *J. of Applied Fluid Mechanics*. 14(3), 921-933.
21. Memarzadeh, R. (2017). Multi-phase numerical simulation of sediment transport on movable bed by SPH method, PhD Thesis, Department of civil Eng., Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, 148p. [In Persian]
22. Akbari, H., & Namin, M. M. (2013). Moving particle method for modeling wave interaction with porous structures. *J. of Coastal Engineering*. 74, 59-73.
23. Sheybanifard, H. (2015). Numerical simulation of Surge irrigation by SPH method, Master Thesis, Department of Water Eng., Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, 102p. [In Persian]