

بررسی اثر پارامترهای هندسی و سیال عامل بر رفتار انبساطی بسترهای سیالی مایع-جامد سیال غیرنیوتنی

احسان مهربانی گوهری* استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، e.mehrabi@pnu.ac.ir
محمد سفید استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران، mhsefid@yahoo.com
علیرضا ملوزه کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران، mehrabi.gohari@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، با بکارگیری روش ترکیبی شبکه بولتزمن و نمایه هموار، برای بستر با سیال غیرنیوتنی قانون توانی، اثر تغییر پارامترهای هندسی و سیال بر رفتار انبساطی بستر مطالعه شده است. بررسی‌ها برای ۷ هندسه متفاوت و ۴ سیال نیوتنی و غیرنیوتنی با اندیس قاعده توانی ۰.۸ تا ۱ انجام شده است. نتایج بستر با سیال نیوتنی تخلخل بیشتری نسبت به بستر با سیال غیرنیوتنی نشان می‌دهند. همچنین افزایش اندیس قاعده توانی سبب افزایش تخلخل بستر شده و تخلخل بستر غیرنیوتنی با افزایش چگالی ذرات جامد و ارتفاع اولیه بستر کاهش یافته است. بررسی نسبت تخلخل در بستر غیر نیوتنی نشان داد که با افزایش قطر ذرات جامد این نسبت کاهش و با افزایش قطر بستر سیالی، افزایش می‌یابد. علاوه بر این مقایسه نتایج بستر با محلول کربوکسی متیل سلولز ۰.۱٪ به عنوان سیال نشان داد که تاثیر کاهش قطر ذرات در بستر برای افزایش نسبت تخلخل ۲ برابر بیشتر از تاثیر افزایش قطر بستر است. در نهایت خروجی‌های مدل نشان دادند نسبت تخلخل برای بستر شامل ذرات جامد با قطرهای مختلف، کمتر از بستر حاوی ذرات با قطرهای برابر است.

واژه‌های کلیدی: بستر سیالی مایع-جامد، روش شبکه بولتزمن، روش نمایه هموار، سیال غیرنیوتنی قانون توانی، تخلخل بستر سیالی، حداقل سرعت سیالیت.

Investigating the effect of geometrical parameters and working fluid on the expansion behavior of non-Newtonian Liquid-solid fluidized beds

E. Mehrabi Gohari Department of Mechanical Engineering, Payam noor University, Tehran, Iran
M. Sefid Department of Mechanical Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran
A. R. Maloozeh Department of Mechanical Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran

Abstract

In this research, by using the combined lattice Boltzmann and smooth profile method, for power law non-Newtonian fluidized bed, the effect of changing the geometric and fluid on the expansion behavior of the bed has been studied. Investigations have been carried out for 7 different geometries and 4 Newtonian and non-Newtonian fluids with a power law index of 0.8 to 1. The results of the bed with Newtonian fluid show more porosity than the bed with non-Newtonian fluid. Also, increasing the index of the power law caused an increase in the porosity of the bed, and the porosity of the non-Newtonian bed decreased with an increase in the density of solid particles and the initial height of the bed. Investigating the porosity ratio in the non-Newtonian bed showed that with the increase in the diameter of the solid particles, this ratio decreases and increases with the increase in the diameter of the fluid bed. In addition, comparing the results of the bed with carboxymethyl cellulose 0.1% solution as fluid showed that the effect of reducing the particle diameter in the bed, to increase the porosity ratio is 2 times more than the effect of increasing the diameter of the bed. Finally, the output of the model showed that the porosity ratio for the bed containing solid particles with different diameters is lower than the bed containing particles with equal diameters.

Keywords: Liquid-solid fluidized bed, Lattice Boltzmann method, smoothed profile method, Power-law non-Newtonian liquid, fluidized bed porosity, minimum fluidization velocity.

مایع-جامد را با سیال غیرنیوتنی به صورت تجربی مطالعه کردند. آنها همگی از سیال قانون توانی پیژوپلاستیک در مطالعه خود استفاده کرده و مشخصه انبساط بستر را به صورت تابعی از رئولوژی سیال ارائه کردند. پندیک [۹] در یک مطالعه تجربی بستر سیالی مایع-جامد معکوس را با یک سیال غیرنیوتنی مورد بررسی قرار داد. ذرات جامد از جنس پلی اتیلن کم چگالی و پلی پروپیل با قطر ۶ میلی‌متر و سیال غیرنیوتنی در این مطالعه محلول کربوکسی متیل سلولز بوده است. پندیک مشاهده کرد که با افزایش چگالی محلول حداقل سرعت سیالی شدن بستر کاهش می‌یابد. او یک رابطه تجربی برای تخمین ارتفاع بستر در حالت سیالیت کامل ارائه کرد. ویجایا لکشیمی [۱۰] نیز مطالعه تجربی مشابه برای بستری مشابه با ذرات پلی اتیلن کم چگالی و پلی پروپیل با قطر ۴ تا ۸ میلی‌متر

۱- مقدمه

بستر سیالی و فرآیند سیال سازی یک عملیات رایج در صنایع فرآیندی برای جداسازی، افزایش سرعت انتقال جرم و انتقال گرما، جذب رطوبت و انجام فرآیندهای کاتالیستی در واکنش‌های شیمیایی است که در بسیاری از صنایع از جمله صنایع نفت، پتروشیمی، بیوشیمی، متالوژی و حتی در صنایع دارویی و غذایی مورد استفاده قرار است [۱ و ۲]. در اکثر کاربردها سیال عامل بستر رفتار غیرنیوتنی دارد و در نتیجه مطالعات زیادی توسط محققین جهت شناخت بهتر و بیشتر فیزیک این بسترها با سیال غیرنیوتنی به عنوان سیال عامل انجام شده است [۳]. یو [۴]، میشر [۵]، برا [۶]، کامرا و اپادیا [۷] و کاواس و البرت [۸] همگی بستر سیالی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: e.mehrabi@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۱/۰۹/۰۲

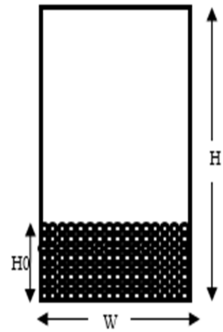
تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۷/۱۷

و غلظت های متفاوت از محلول کربوکسی متیل سلولز انجام داد و دو رابطه تجربی برای تخمین ضریب اصطکاک و حداقل سرعت سیالی شدن بستر ارائه کرد. یو [۴] پارامتر افت فشار را در بسترهای سیالی با سیال غیرنیوتنی برای جریان های خزشی مورد مطالعه قرار داد و یک رابطه تجربی بر مبنای داده های آزمایشگاهی خود جهت تخمین حداقل سرعت سیالیت ارائه کرد. کاواس و البرت [۸] نشان دادند که برای برخی از سیالات غیرنیوتنی می توان از رابطه ریچاردسون-زاکي [۱۱] استفاده کرد. آنها همچنین با استفاده از روش کریستوفر و میدلمن [۱۲] که بر مبنای افت فشار در بسترهای سیالی با سیال غیرنیوتنی است، به توافق با رابطه ریچاردسون-زاکي برای جریان لایه ای در حالت استفاده از عدد رینولدز تصحیح شده برای سیال غیرنیوتنی رسیدند. برا [۶] نشان داد که برای جریان سیال غیرنیوتنی در بستر با اعداد رینولدز تصحیح شده بیشتر از ۴۰، انبساط بستر از رابطه ریچاردسون-زاکي تبعیت می کند، اما در اعداد رینولدز تصحیح شده کمتر از ۴۰ رابطه ریچاردسون-زاکي برای انبساط بستر برقرار نیست. میشاس و آلبریچوا [۱۳] با مطالعه رفتار انبساطی بسترهای سیالی مایع-جامد با سیال غیرنیوتنی نشان دادند که رابطه ریچاردسون-زاکي برای جریان های خزشی برقرار نیست. آنها با توجه به داده های تجربی خود یک رابطه جهت انبساط بستر دوفاز با سیال غیرنیوتنی در جریان خزشی ارائه کردند. لالی و همکاران [۳] نیز در یک مطالعه تجربی برای جریان سیال غیرنیوتنی در بستر سیالی به بررسی ضریب پسا پرداخته و برای اعداد رینولدز تصحیح شده بیشتر از یک به توافق با ضریب پسا استاندارد برای سیال نیوتنی رسیدند. آنها به بررسی ضریب تاثیر دیواره پرداخته و نشان دادند که برای اعداد رینولدز تصحیح شده در محدوده ۱ تا ۲۰۰ می توان از رابطه ضریب تاثیر دیواره در نشست سیال نیوتنی برای بستر با سیال غیرنیوتنی استفاده کرد. در مطالعات دیگر یوان و همکاران [۱۴] و همچنین پنگ و همکاران [۱۵] تاثیر مدل های پسا بر رفتار جریان دو فاز سیال-جامد در بستر سیالی را بررسی کردند و مدل هایی را، برای جریان سیال غیر نیوتنی قانون توانی پیشنهاد دادند که پارامترهای رئولوژیکی سیال غیر نیوتنی را در جریان مایع-جامد را بررسی می کنند.

مطالعات بسترهای سیالی دوفاز مایع-جامد با سیال غیرنیوتنی عموماً به صورت آزمایشگاهی و تجربی بوده که در کنار مزیت دقت بالا و قابل اطمینان بودن خروجی ها، همواره معایبی چون هزینه های بالا در مدل سازی و مطالعه آزمایشگاهی و همچنین محدودیت در مطالعه ویژگی های جریان را به همراه دارد، لذا مدل سازی مناسب از این بسترها به روش های عددی در کنار مطالعات تجربی می تواند به توسعه هرچه سریع تر دانش طراحی و ساخت این بسترها که کاربردهای آنها در صنعت ثابت شده منجر گردد. یکی از روش های عددی نوین مورد استفاده جهت بررسی رفتار سوسپانسیون ها روش شبکه بولتزمن می باشد این روش رفتار سیال را به صورت مدل ماکروسکوپی معادله بولتزمن، در یک شبکه با میدان گسسته سرعت شبیه سازی می کند. از تابع توزیع سرعت به دست آمده از حل معادله بولتزمن، می توان برای محاسبه ویژگی های ماکروسکوپی سیال مانند چگالی، سرعت و فشار استفاده کرد [۱۶]. یکی از ویژگی های روش شبکه بولتزمن، این است که به علت طبیعت سینتیکی این روش، نرخ برش محلی می تواند به آسانی با صرف نظر از میدان سرعت محاسبه شود؛ بنابراین روشی مناسب برای حل جریان های

غیرنیوتنی است. آرنوف و راتمن اولین کسانی بودند که مدل قانون توانی را با استفاده از روش شبکه بولتزمن، مورد ارزیابی قرار دادند [۱۷].

فلاح و همکاران [۱۸] جریان سیال غیرنیوتنی گذرنده از روی سیلندر دایروی ساکن واقع در یک کانال را با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه سازی کردند، نتایج نشان داد برای شاخص توانی ثابت با افزایش نسبت انسداد، متوسط ضریب پسا کاهش می یابد در مطالعه دیگر توسط عزت نشان [۱۹]، جریان کاویتاسیونی داخل نازل با استفاده از روش شبکه بولتزمن چندفازی مدل سازی شده است. نتایج نشان از کارایی روش شبکه بولتزمن چندفازی برای شبیه سازی عددی جریان های کاویتاسیونی در داخل نازل است. همچنین نعمتی و سفید [۲۰] با استفاده از روش شبکه بولتزمن آنژیوبی تولید شده طی انتقال گرما دوگانه سیال غیر نیوتنی در حضور جذب گرما و میدان مغناطیسی را مدل سازی کردند. مهمترین مسئله در استفاده از روش شبکه بولتزمن برای شبیه سازی جریان های شامل ذرات، ارضای شرط مرزی عدم لغزش در مرز مشترک جامد و سیال است. برای این منظور روشهای بر مبنای گره و به طور خاص روشهای مرز شناور را می توان به عنوان یک گزینه مناسب مورد استفاده قرار داد. روش مرز شناور از یک شبکه محاسباتی کارترین ثابت برای مدلسازی جریان سیال و مجموعه های از نقاط مرزی لاگرانژی برای مدل کردن مرزهای جامد شناور در سیال بهره می گیرد. روش مرز شناور اساساً مرز جامد را تغییر شکل پذیر ولی با سختی بالا در نظر می گیرد. کوچکترین تغییر در مرز اولیه باعث تولید نیرویی می شود که مرز را به حالت اولیه بر می گرداند. توازن چنین نیروهایی در نقاط اوپلری توزیع می شود و در معادلات مومنتم یک جمله به صورت یک نیروی حجمی اضافه می شود که معادلات جدید در کل دامنه حل از جمله گرهمهای داخلی و خارجی جسم جامد حل می شوند. جهت کاهش هزینه محاسبات برای روش مرزهای شناور موجود، روش کارآمدتری با همان ایده کلی روش مرزهای شناور به نام روش نمایه هموار برای استفاده در معادلات ناویر-استوکس پیشنهاد شد. در این روش به جای استفاده از شرط مرزی در سطح مشترک ذرات جامد و سیال، ذرات جامد با استفاده از یک نیروی حجمی همواره مشخص در معادلات ناویر-استوکس نمایش داده می شوند. روش نمایه هموار یک معادله در کل ناحیه حل شامل حجم ذرات بدون هیچ شرط مرزی داخلی حل می کند [۲]. در این روش سطح مشترک بین جامد و سیال به طور هموار از سمت سیال به سمت جامد میل می کند، در نتیجه این سطح مشترک یک ضخامت مشخص دارد که در این ضخامت به تدریج و به طور هموار از سمت جامد به سمت سیال حرکت می کند. ویژگی مشترک استفاده از گره بندی کارترین در هر دو روش شبکه بولتزمن و روش نمایه هموار باعث می شود که ترکیب این دو روش برای حل جریانهای دارای ذرات جامد به عنوان یک روش کارآمد مطرح گردد. مهربانی و همکاران [۲] برای اولین بار از ترکیب روش شبکه بولتزمن و روش نمایه هموار برای شبیه سازی عددی بستر سیالی مایع-جامد با سیال نیوتنی استفاده کردند. آنها با مقایسه نتایج مدل سازی خود برای حداقل سرعت سیالیت بستر با معادله ارگان [۲۱] و برای تخلخل و ارتفاع بستر با معادله ریچاردسون-زاکي [۱۱] به توافق رسیدند. مهربانی و همکاران [۲۲] در مطالعه ای دیگر از این روش ترکیبی جهت مدل سازی و مطالعه رفتار هیدرودینامیکی بستر سیالی مایع-جامد معکوس با سیال نیوتنی استفاده کردند و به توافق خوبی با نتایج تجربی رسیدند، آنها با توجه به بررسی های خود این روش را در مدل سازی



شکل ۱- طرحواره ای هندسه بستر سیالی مدل شده

جدول ۱- ویژگی‌های سیالات مطالعه شده

لزجت		چگالی سیال kg/m ³	نام سیال
k(Pa.sn)	n		
۰/۰۰۱	۱	۱۰۰۰	آب
۰/۰۰۸	۱	۱۰۳۰	محلول گلیسرول ۷۵٪ (تجاری)
۰/۰۰۸	۰/۹۲	۱۰۳۰	محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱۲٪
۰/۰۰۸۹	۰/۸۱	۱۰۰۰	محلول پلی اکساید ۳۰۱ ۰/۳۵٪

جدول ۲- ویژگی‌های هندسه‌های مطالعه شده

شماره هندسه	ابعاد بستر (mm ²)	تعداد ذرات جامد	قطر ذرات جامد (mm)	ارتفاع اولیه بستر (mm)
۱	۶۰×۲۰	۴۱۶	۰/۶	۷/۸
۲	۶۰×۲۰	۴۰۸	۰/۸	۱۳/۶
۳	۶۰×۲۰	۴۲۳	۰/۴	۳/۶
۴	۶۰×۱۵	۴۰۸	۰/۶	۱۰/۲
۵	۶۰×۲۵	۴۰۰	۰/۶	۶
۶	۶۰×۲۰	۲۴۰	۰/۸	۸
۷	۶۰×۲۰	۴۱۶	۰/۸، ۰/۶، ۰/۴	۱۰/۴

۳- روش مدل سازی

در این مقاله از ترکیب روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار برای مدل-سازی عددی بستر سیالی مایع-جامد با سیال غیر نیوتنی با اندیس قاعده توانی در محدوده ۰/۸ تا ۱ استفاده شده است. مدل هیدرودینامیکی بر مبنای روش شبکه بولتزمن با علمگر برخورد باتانگار-گروس-کروک بوده که تابع توزیع بولتزمن حاصل از آن به صورت رابطه (۱) است.

$$f_{\alpha}(\vec{X} + \vec{c}_{\alpha}\delta t, t + \delta t) = f_{\alpha}(\vec{X}, t) - \frac{1}{\tau} [f_{\alpha}(\vec{X}, t) - f_{\alpha}^{eq}(\vec{X}, t)] \quad (1)$$

که در آن f_{α} ، δt ، \vec{c}_{α} و τ به ترتیب تابع توزیع شبکه بولتزمن برای ذرات، گام زمانی، بردارهای گسسته سرعت، مختصات نقاط شبکه و زمان آرامش بدون بعد هستند. f_{α}^{eq} تابع توزیع تعادلی در عملگر برخورد

بسترهای سیالی مایع-جامد کارآمد دانسته و استفاده از ترکیب روش شبکه بولتزمن و روش نمایه هموار را جهت مدل سازی بسترهای سیالی دوفاز پیشنهاد کردند. روحانی و همکاران [۲۳] رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون های حاوی سیال قانون توانی با استفاده از ترکیب روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار شبیه سازی و مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آن با نتایج عددی به دست آمده از سایر تحقیقات گذشته مقایسه و هماهنگی خوبی بین آنها مشاهده کردند.

هدف از این پژوهش، بررسی و آنالیز تاثیر پارامترهای هندسی و نوع سیال عامل غیرنیوتنی بر رفتار انبساطی بسترهای سیالی مایع-جامد غیرنیوتنی قانون توانی با استفاده از روش ترکیبی شبکه بولتزمن و نمایه هموار است که بدین منظور برای نخستین بار بستر سیالی غیرنیوتنی با ۷ هندسه متفاوت (شامل تعداد ذرات جامد متفاوت، قطر ذرات متفاوت، ابعاد متفاوت بستر و...) و سیال های غیر نیوتنی متفاوت به روش ترکیبی شبکه بولتزمن و نمایه هموار با استفاده از برنامه نویسی به زبان فرترن شبیه سازی شده و اثر پارامترهای مختلف هندسی و نوع سیال غیر نیوتنی بر رفتار انبساطی بستر مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این به منظور مقایسه تاثیر سیال های نیوتنی و سیال های غیر نیوتنی با مدل سازی بستر سیال نیوتنی، اثر تغییر سیال بر رفتار انبساطی بستر سیال نیوتنی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- هندسه بستر و شرایط مرزی

بسترهای سیالی غیرنیوتنی در کاربردهای صنعتی عموماً یک کانال استوانه عمودی شکل شامل ذرات جامد هستند که جریان سیال در آنها از پایین به بالا است. لذا مدل سازی برای یک هندسه دو بعدی با ذرات جامد که در آن جریان سیال از کف بستر وارد می شود، انجام شده است. شکل ۱، طرحواره ای از هندسه بستر و پارامترهای هندسی آن را نشان می دهد. جهت مطالعه رفتار انبساطی بستر غیر نیوتنی و اثر تغییر پارامترهای هندسی و سیال عامل بر آن و همچنین مقایسه رفتار انبساطی بستر سیالی نیوتنی و غیر نیوتنی هندسه های متفاوتی با چند سیال عامل مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته که مشخصات سیال ها و هندسه ها به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده است. در این مطالعه از روش عددی ترکیبی شبکه بولتزمن و نمایه هموار برای مدل سازی بستر سیالی دوفازی غیرنیوتنی استفاده شده که در آن شرط مرزی برای دیوارهای جانبی بستر و فصل مشترک ذرات جامد و سیال شرط عدم لغزش است. شرط مرزی پایین و بالای بستر نیز شرط مرزی زو-هی [۲۴] بوده که به ترتیب به صورت سرعت ثابت و فشار ثابت اعمال شده است. در این تحقیق رفتار انبساطی بستر با سیال های غیر نیوتنی با اندیس قاعده توانی در محدوده ۰/۸ تا ۱ مورد مطالعه قرار گرفته است.

¹ 75% Glycerol (Commercial Grade)

² 0.1% carboxyl methyl cellulose water solution (CMC)

³ 0.35% Polyox - 301 water solution

باتناگار-گروس-کروک است، که با توجه به مدل انتخاب شده برای سرعت در شبکه بولتزنم گسسته می‌شود [۲]. در این پژوهش از مدل سرعت D_2Q_9 که ۹ مولفه سرعت به صورت رابطه (۲) دارد، استفاده شده است.

$$\vec{c}_\alpha = \begin{cases} (0,0) & \alpha = 0 \\ \cos(\alpha - 1) \frac{\pi}{2}, \sin(\alpha - 1) \frac{\pi}{2} & \alpha = 1 - 4 \\ \sqrt{2} \cos(2\alpha - 9) \frac{\pi}{4}, \sin(2\alpha - 9) \frac{\pi}{4} & \alpha = 5 - 8 \end{cases} \quad (2)$$

که α ، نشان دهنده جهت مورد بررسی است. با توجه به مدل سرعت انتخاب شده تابع توزیع تعادلی به صورت رابطه (۳) گسسته می‌شود [۲].

$$f_\alpha^{eq}(\vec{x}, t) = w_\alpha \rho \left[1 + \frac{3u_\alpha}{c_\alpha^2} + \frac{9u_\alpha^2}{2c_\alpha^4} - \frac{3(\vec{u} \cdot \vec{u})}{2c_\alpha^2} \right] \quad (3)$$

که در آن u_α مقدار اسکالر بردار سرعت در جهت \vec{c}_α ، چگالی سیال در شبکه بولتزنم و w_α توابع وزنی هستند.

در این مدل‌سازی جهت برقرار شدن شرط عدم لغزش در فصل مشترک جامد - مایع و محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی بین ذرات جامد و سیال از روش نمایه هموار بهره گرفته شده است. این روش با اضافه کردن یک جمله به معادله برخورد، یک نیروی حجمی به گره‌های سیال مجازی قرار گرفته در درون ذره جامد وارد می‌کند. این نیرو از اختلاف مومنتم سیال و ذره جامد بدست می‌آید و گره‌های سیال مجازی را وادار به ارضا حرکت جسم صلب می‌کند. کمیت‌های محلی از قبیل سرعت و تابع غلظت ذرات جامد در روش نمایه هموار روی تمام ناحیه حل تعریف می‌شوند، این ناحیه، شامل سیال میزبان و کل ذرات جامد است. پرکاربردترین تابع برای ذرات جامد کروی شکل، به صورت رابطه (۴) است که در آن، R شعاع هر ذره X و ξ به ترتیب بردار موقعیت مرکز ذره جامد و ضخامت سطح مشترک ذره i ام است [۲].

$$\begin{aligned} \varphi_i(x, t) &= s(R_i - |x - R_i(t)|) \\ &= \begin{cases} 0 & x < -\xi/2 \\ \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi x}{\xi} + 1\right) & |x| \leq \xi/2 \\ 1 & x > \xi/2 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

سرعت گره‌های شبکه با بردار موقعیت که در ذره جامد قرار دارند را می‌توان از سینماتیک اجسام صلب به صورت $\varphi_i(x, t)[U_{ci}(t) + \omega_i \times (x - R_i(t))]$ بدست آورد، که در این رابطه $\{U_{ci}, \omega_i\}$ به ترتیب، سرعت خطی مرکز جرم ذرات و سرعت زاویه‌ای ذره i ام هستند. به کمک این رابطه و همچنین با استفاده از تابع غلظت ذرات جامد (رابطه ۴)، میدان سرعت را برای کل ذرات جامد به صورت رابطه (۵) تعریف کرد [۲].

$$\varphi(x, t) u_p(x, t) = \sum_{i=1}^{N_p} \varphi_i(x, t) [U_{ci}(t) + \omega_i \times \{x - R_i(t)\}] \quad (5)$$

نیروی بر واحد جرم برهم کنش هیدرودینامیکی جامد- سیال اعمال شده روی گره‌های سیال مجازی که درون ذره جامد قرار دارند را می‌توان به صورت رابطه ۶ محاسبه کرد.

$$\begin{aligned} f_H(x, t_n) &= \varphi(x, t_n) f_P(x, t_n) \\ &= \varphi(x, t_n) \frac{(u_p(x, t_n) - u(x, t_{n-1}))}{\Delta t} \end{aligned} \quad (6)$$

در انتها معادله تابع توزیع بولتزنم در ترکیب با روش نمایه هموار برای سیال نیوتنی به صورت رابطه (۷) است [۲].

$$f_\alpha(\vec{x} + \vec{c}_\alpha \delta t, t + \delta t) = f_\alpha(\vec{x}, t) - \frac{1}{\tau} [f_\alpha(\vec{x}, t) - f_\alpha^{eq}(\vec{x}, t)] + \frac{3w_\alpha \Delta t}{c_\alpha^2} (\vec{f}_H \cdot \vec{c}_\alpha) \quad (7)$$

که در آن \vec{f}_H نیروی حجمی وارد به گره‌های سیال مجازی قرار گرفته در درون ذره جامد است. در این مدل‌سازی حرکت خطی و زاویه‌ای ذرات

جامد نیز با استفاده از قانون حرکت نیوتن مدل شده است. در روش شبکه بولتزنم تفاوت معادلات سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در ثابت نبودن زمان آرامش است. چرا که برای سیالات غیرنیوتنی لزجت ظاهری تابع نرخ برش و در نتیجه در حل عددی تابعی از محل گره و زمان است، لذا باید زمان آرامش را به صورت تابعی از زمان و مکان بدست آورد. برای سیال غیرنیوتنی پارولا لزجت ظاهری از رابطه (۸) تبعیت می‌کند.

$$\mu' = k(4I_2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (8)$$

که در آن μ' ، k و n به ترتیب لزجت ظاهری سیال قانون توانی، ضریب ثابت سیال غیرنیوتنی (ثابت پایداری) و اندیس قاعده توانی هستند. در سیالات غیرنیوتنی، سه نوع رفتار رئولوژیکی وجود دارد: (۱) زمانی که مقدار اندیس قاعده توانی کمتر از یک باشد، سیال رقیق برشی یا شبه پلاستیک نامیده می‌شود. در این نوع سیالات مقدار لزجت با افزایش نرخ برش، کاهش می‌یابد؛ (۲) وقتی که مقدار اندیس قاعده توانی بزرگتر از یک باشد سیال غلیظ برشی یا دیلاتانت نامیده می‌شود که در آن مقدار لزجت با افزایش نرخ برش افزایش می‌یابد؛ (۳) زمانی که مقدار اندیس قاعده توانی مساوی با یک باشد سیال نیوتنی است. که در آن مقدار لزجت وابسته به نرخ برش است. در بسترهای سیالی غالباً محلول‌های گلیسرول و کربو کسی متیل و پلی اکسایدها استفاده می‌شود که مطابق جدول (۱) دارای اندیس قاعده توانی در محدوده ۰.۸ تا ۱ می‌باشند [۲۵]. بنابراین در این تحقیق رفتار سیال‌های غیر نیوتنی شبه پلاستیک مورد مطالعه قرار گرفته است.

I_2 نامساوی دوم تانسور تغییر شکل است که با استفاده از دو رابطه (۹) و (۱۰) در شبکه بولتزنم به بدست می‌آید [۱۶].

$$d_{\alpha\beta} = -\frac{3}{2\tau} \sum_{i=0}^8 (f_i - f_i^{eq}) c_{i\alpha} c_{i\beta} \quad (9)$$

$$I_2 = \sum_{\alpha, \beta=0}^8 d_{\alpha\beta} d_{\alpha\beta} \quad (10)$$

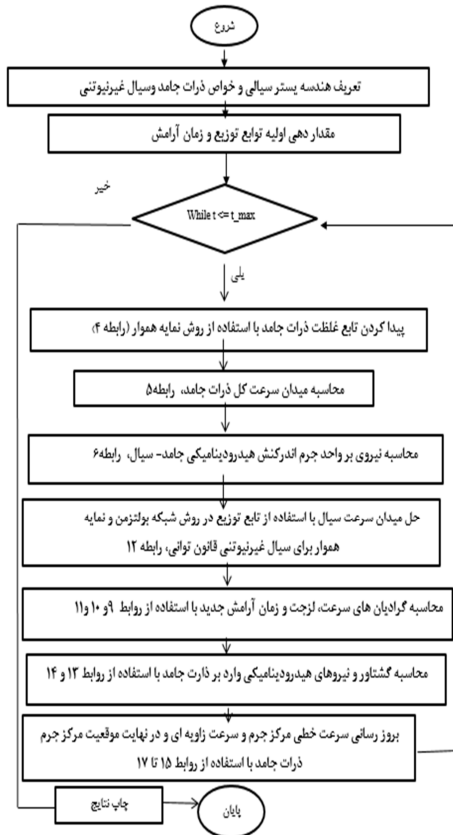
با محاسبه I_2 و جایگذاری آن در رابطه (۸)، لزجت ظاهری سیال غیرنیوتنی قانون توانی در گره و زمان مشخص بدست می‌آید. در نهایت زمان آرامش بدون بعد از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\tau(\vec{x}, t) = 0.5 + 3 \left(\frac{\mu'(\vec{x}, t)}{\rho} \right) \quad (11)$$

که در آن ρ چگالی سیال در شبکه بولتزنم است. با جایگذاری زمان بدون بعد بدست آمده از رابطه (۱۱) در رابطه (۷) معادله تابع توزیع در روش شبکه بولتزنم و نمایه هموار برای سیال غیرنیوتنی قانون توانی به صورت رابطه (۱۲) بدست می‌آید.

$$f_\alpha(\vec{x} + \vec{c}_\alpha \delta t, t + \delta t) = f_\alpha(\vec{x}, t) - \frac{1}{\tau(\vec{x}, t)} [f_\alpha(\vec{x}, t) - f_\alpha^{eq}(\vec{x}, t)] + \frac{3w_\alpha \Delta t}{c_\alpha^2} (\vec{f}_H \cdot \vec{c}_\alpha) \quad (12)$$

با انتگرال‌گیری از نیروی اعمال شده بر یک گره قرار گرفته درون جسم جامد روی کل حجم جسم جامد و همچنین انتگرال‌گیری از گشتاور حاصل از این نیرو روی کل حجم جسم جامد، می‌توان نیرو و گشتاور هیدرودینامیکی کل وارده از طرف سیال به هر ذره جامد را به صورت روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه کرد [۲].



شکل ۲- فلوجارت روش حل عددی

۴- اعتبارسنجی مدل مورد مطالعه

جهت ارزیابی مدل سازی انجام شده در این قسمت نتایج عددی با استفاده از روابط تجربی محققان برای حداقل سرعت سیالیت، تخلخل و ارتفاع بررسی شده اند.

۴-۱- حداقل سرعت سیالیت

روابط تجربی ارائه شده برای پیش بینی حداقل سرعت سیالیت در حالت بستر با سیال نیوتنی و غیرنیوتنی به طور کلی به شکل رابطه (۱۸) است.

$$Ar = f_1(n, \epsilon_{mf}) Re_{mf}^{n/(2-n)} + f_2(n, \epsilon_{mf}) Re_{mf}^{2/(2-n)} \quad (18)$$

که در آن ϵ_{mf} تخلخل اولیه بستر است. Ar و Re_{mf} نیز به ترتیب رینولدز حداقل سیالیت و عدد ارشمیدسی هستند که به صورت روط (۱۹) و (۲۰) تعریف می شوند.

$$Re_{mf} = \frac{D_p^n u_{mf}^{2-n} \rho_f}{k} \quad (19)$$

$$Ar = \frac{3}{4} C_{Dmf} Re_{mf}^{2/(2-n)} \quad (20)$$

که در آن C_D و D_p ، ρ_f ، u_{mf} به ترتیب حداقل سرعت سیالیت، چگالی سیال، قطر ذرات جامد و ضریب پسا می باشند، زیرنویس mf نیز به لحظه شروع فرآیند سیالیت بستر اشاره دارد.

$$F_i^H = - \int_{V_{p_i}} \rho \varphi(x, t_n) f_p(x, t_n) dV_{p_i} = \quad (13)$$

$$\int_{V_{p_i}} \rho \varphi(x, t_n) (\mathbf{u}(x, t_n) - \mathbf{u}_p(x, t_n)) dV_{p_i}$$

$$T_i^H = - \int_{V_{p_i}} (\mathbf{x} - \mathbf{R}_i^n) \times \rho \varphi(x, t_n) f_p(x, t_n) dV_{p_i} = \quad (14)$$

$$\int_{V_{p_i}} (\mathbf{x} - \mathbf{R}_i^n) \times \rho \varphi(x, t_n) (\mathbf{u}(x, t_n) - \mathbf{u}_p(x, t_n)) dV_{p_i}$$

که با استفاده از روش صریح اویلر^۱ می توان سرعت خطی و سرعت زاویه ای ذرات جامد را به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) بروز رسانی کرد.

$$\mathbf{U}_{c_i}^{n+1} = \mathbf{U}_{c_i}^n + M_{p_i}^{-1} \int_{t_n}^{t_n+\Delta t} (\mathbf{F}_i^H + \mathbf{F}_{lub,ij} + \mathbf{F}_i^{ext}) dt \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i^{n+1} = \boldsymbol{\omega}_i^n + I_{p_i}^{-1} \int_{t_n}^{t_n+\Delta t} (\mathbf{T}_i^H + \mathbf{T}_i^{ext}) dt \quad (16)$$

در رابطه (۱۵) M_{p_i} جرم ذره i ام، $\mathbf{F}_{lub,ij}$ نیروی روانکاری بین دو ذره یا یک ذره و دیواره در فواصل بسیار نزدیک به هم می باشد و \mathbf{F}_i^{ext} نیروی خارجی اعمال شده روی ذره i ام است که مقدار آن در این مطالعه صفر است. در رابطه (۱۶)، \mathbf{T}_i^{ext} گشتاور خارجی اعمال شده به ذره ناشی از نیروهای خارجی (که در این مطالعه مقدار آن صفر است) و \mathbf{I}_{p_i} تانسور ممان اینرسی ذره i ام هستند.

در آخر، بردار موقعیت جدید ذره را می توان از رابطه $\frac{dR_i}{dt} = \mathbf{U}_{c_i}$ و روش صریح اویلر به شکل رابطه (۱۷) محاسبه کرد [۲].

$$\mathbf{R}_i^{n+1} = \mathbf{R}_i^n + \int_{t_n}^{t_n+\Delta t} \mathbf{U}_{c_i} ds \quad (17)$$

فلوجارت روش حل عددی در شکل ۲ آورده شده است. برنامه به زبان برنامه نویسی فرترن نوشته شده که با تعریف میدان جاذبه و ویژگی های فیزیکی سیال و ذرات جامد و سپس مقدار دهی اولیه مقادیر پارامترها از جمله زمان آرامش اولیه، وارد چرخه اصلی خود می شود.

¹Euler explicit method

جدول ۳- توابع f_1 و f_2 در روابط تجربی برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی.

نام محقق	f_1	f_2	نوع سیال
مهربانی و همکاران [۲]	$150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$	$1.75 \frac{1}{\varepsilon^3}$	نیوتنی
یو [۴]	$\frac{12.5}{\varepsilon_{mi}^{2n+1}} \left[\frac{(9n+3)(1-\varepsilon_{mi})}{n} \right]^n$	0	غیرنیوتنی

توابع f_1 و f_2 برای رابطه تجربی یو [۴] در بستر با سیال غیرنیوتنی و رابطه تجربی نتیجه‌گیری شده توسط مهربانی و همکاران [۲] از معادله ارگان [۱۴] برای بستر با سیال نیوتنی در جدول ۳ ارائه شده است. چاهابرا [۲۵] خطای میانگین رابطه تجربی یو [۴] را جهت تخمین حداقل سرعت سیالیت بستر ۲۰ تا ۲۵ درصد گزارش کرده است. خروجی‌های مدل‌سازی بستر برای سه سیال عامل از جدول ۱ و هندسه ۱ از جدول ۲، به همراه مقادیر محاسبه شده از روابط تجربی برای حداقل سرعت سیالیت بستر با سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در جدول ۴ جهت مقایسه ارائه شده است.

جدول ۴- خروجی‌های مدل‌سازی و نتایج تجربی جهت مقایسه برای حداقل سرعت سیالیت بستر با هندسه ۱.

نام سیال	حداقل سرعت سیالیت (m/s)		درصد خطا
	مهربانی [۲]	یو [۴]	
آب	۰/۰۰۱۱۹	-	۶/۷
محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱٪	-	۰/۰۰۰۹۶	۴/۱
محلول پلی اکساید ۳۰۱٪	-	۰/۰۰۱۴۱	۸/۵

با توجه به جدول (۴) خروجی‌های مدل توافق مناسبی با رابطه مهربانی و همکاران [۲] برای بستر با سیال نیوتنی نشان می‌دهند و برای بستر با سیال غیرنیوتنی با در نظر گرفتن خطای میانگین گزارش شده برای رابطه تجربی یو [۴] و مقایسه آن با خطای نتایج مدل‌سازی از جدول (۴) می‌توان خروجی‌های مدل را برای بستر با سیال غیرنیوتنی نیز قابل قبول ارزیابی کرد.

۴-۲- تخلخل و ارتفاع بستر

خروجی‌های مدل برای تخلخل و ارتفاع نیز مورد ارزیابی و اعتبارسنجی با نتایج تجربی قرار گرفته که این بررسی‌ها برای بستر با سیال نیوتنی از رابطه تجربی ریچاردسون-زاکي [۱۱] (رابطه (۲۱)) و برای بستر با سیال غیرنیوتنی از رابطه تجربی میشاس و آلبرجیوا [۱۳] (رابطه (۲۲)) استفاده شده است.

$$\frac{U}{U_T} = \varepsilon^Z \quad (21 \text{ الف})$$

$$\frac{4.8 - Z}{Z - 2.4} = 0.0434Ar^{0.57} \left[1 - 2.4 \left(\frac{D_p}{D_b} \right)^{0.27} \right] \quad (21 \text{ ب})$$

که در آن D_b قطر بستر سیالی و U_T سرعت ترمینال است.

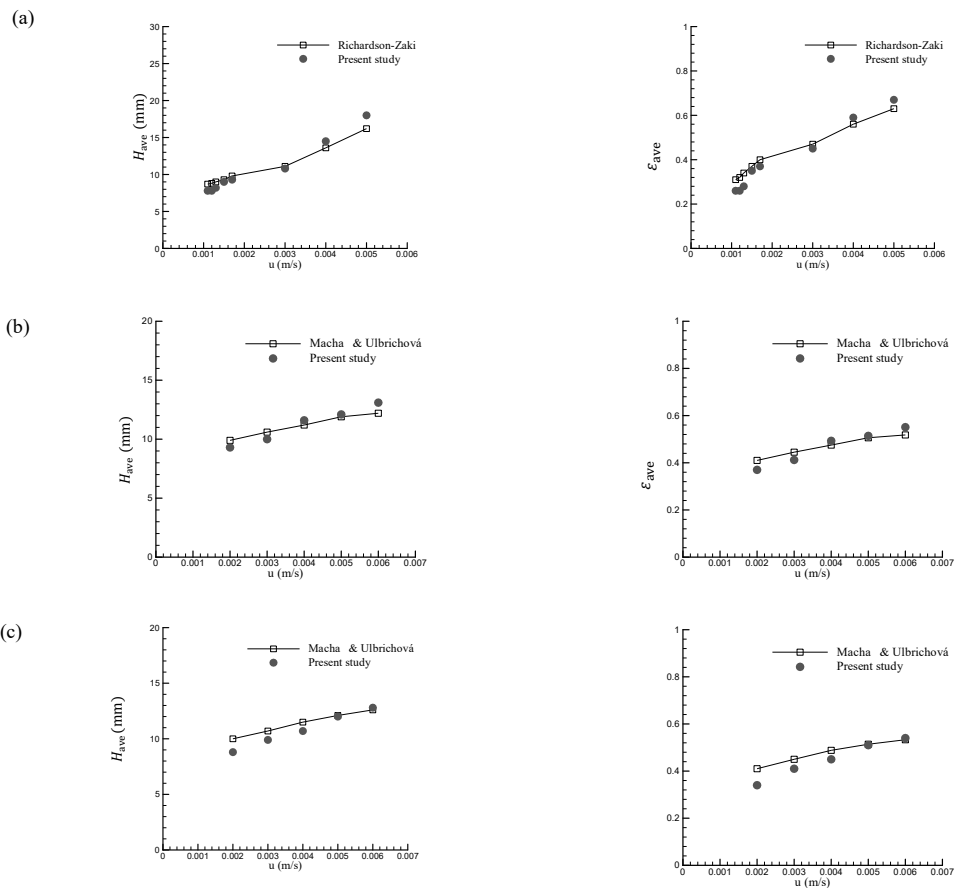
$$\frac{U}{U_T} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \right)^Z \quad (22 \text{ الف})$$

$$\varepsilon_{\max} = \left\{ 1 + 0.73(1-n) - 0.79 \left(\frac{D_p}{D_b} \right) \right\}^{-1} \quad (22 \text{ ب})$$

$$Z = 6.3 + 7(1-n) - 15.6 \left(\frac{D_p}{D_b} \right) \quad (22 \text{ ج})$$

برای محاسبه سرعت ترمینال جهت جایگذاری در رابطه (۲۲الف) نیاز به محاسبه ضریب پسا برای سیال غیرنیوتنی است، که در این پژوهش از تقریب ارائه شده توسط لالی و همکاران [۳] برای محاسبه ضریب پسا در بستر با سیال غیرنیوتنی استفاده شده است. خروجی‌های تخلخل میانگین و ارتفاع میانگین بستر حاصل از مدل‌سازی برای بستر با هندسه ۱ به همراه نتایج حاصل از رابطه تجربی ریچاردسون-زاکي [۱۱] برای آب در شکل ۳-ا، رابطه تجربی میشاس و آلبرجیوا [۱۳] برای محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱٪ در شکل ۳-ب و محلول پلی اکساید ۳۰۱٪ در شکل ۳-ج جهت مقایسه به‌صورت تابعی از سرعت سیال ورودی به بستر ارائه شده‌اند.

با توجه به شکل ۳ خروجی‌های مدل‌سازی در سرعت‌های ظاهری نزدیک به حداقل سرعت سیالیت مقادیر کمتری را برای تخلخل و ارتفاع بستر بدست می‌دهند، با افزایش سرعت ظاهری سیال ورودی اختلاف میان نتایج کاهش یافته و در سرعت‌های بالاتر خروجی‌های مدل مقادیر تخلخل و ارتفاع بستر را بیشتر از نتایج تجربی نشان می‌دهند. در مجموع خروجی‌های مدل برای بستر با سیال نیوتنی و غیرنیوتنی توافق مناسبی با نتایج تجربی نشان می‌دهند.



شکل ۳- ارتفاع میانگین بستر(چپ) و تخلخل میانگین بستر(راست) بدست آمده از مدل‌سازی و روابط تجربی برای بستر با هندسه ۱ (a) و آب، (b) محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱٪ و (c) محلول پلی اکساید ۳۰۱ ۳۵٪ به صورت تابعی از سرعت سیال ورودی.

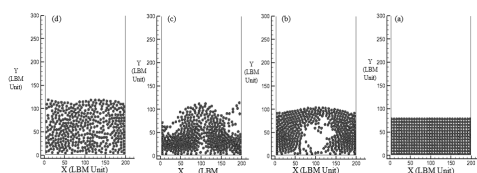
۲-۵- بررسی اثر تغییر سیال بر رفتار انبساطی بستر

جهت بررسی اثر تغییر سیال بر رفتار انبساطی بستر، برای بستر با هندسه ۱، دو سیال عامل نیوتنی و سیال عامل غیرنیوتنی با سرعت ظاهری 0.005 m/s تخلخل بستر به صورت تابعی از زمان در شکل ۵ رسم شده است. از شکل a-۵ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اندیس قاعده توانی تخلخل بستر افزایش می‌یابد، چرا که محلول $\text{CMC}1/0\%$ و محلول گلیسرول 75% ثابت پایداری برابری دارند (جدول ۱)، از طرفی مقایسه شکل a-۵ و b-۵ نیز این نتیجه‌گیری را تایید می‌کند، همچنین با توجه به شیب نمودار تخلخل نسبت به زمان برای بستر با محلول پلی اکساید ۳۰۱ و مقایسه آن با دو منحنی دیگر واضح است که افزایش ثابت پایداری سیال عامل نرخ افزایش تخلخل نسبت به زمان را در بستر کاهش می‌دهد. در شکل b-۵ در لحظه ۲ ثانیه تخلخل بستر با سیال غیرنیوتنی بیشتر از بستر با سیال نیوتنی است، دقت گردد که ارتفاع گزارش شده در شکل b-۵ ارتفاع میانگین بستر است و علت بیشتر بودن آن در لحظه ۲ ثانیه ناپایداری شدید در شکل بستر ناشی از شدیدتر بودن تاثیرات دیواره در بستر با سیال غیرنیوتنی در مقایسه با سیال نیوتنی است.

۵- بررسی رفتار انبساطی بستر سیالی غیر نیوتنی

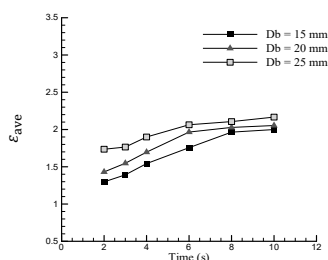
۵-۱- فرآیند سیالی شدن بستر و انبساط بستر

شکل ۴ فرآیند سیالی شدن بستر با هندسه ۱ و محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱٪ به عنوان سیال عامل در سرعت ظاهری 0.005 m/s را برای چهار لحظه متفاوت نشان می‌دهد. بستر در شکل ۴-a در لحظات اولیه است و ذرات بستر در آرایش اولیه خود قرار دارند، با گذشت $2/2$ ثانیه ذرات در میانه بستر منبسط شده و ارتفاع بستر افزایش یافته است، اما ذرات در نزدیک دیواره خود را بدلیل اثرات دیواره حفظ کرده‌اند (شکل ۴-b). شکل ۴-c بستر در لحظه $2/7$ ثانیه را نشان می‌دهد در این لحظه بستر آرایش اولیه خود را به‌طور کامل از دست داده و کاملاً ناپایدار است. در انتها بستر پس از گذشت ۹ ثانیه به ارتفاع نهایی و حالت پایدار خود رسیده است (شکل ۴-d).



شکل ۴- فرآیند سیالی شدن بستر با هندسه ۱ و محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱٪ با سرعت ظاهری 0.005 m/s برای زمان‌های (a) اولیه، (b) 2.2 s، (c) 2.7 s و (d) 9 s.

۳۷۵۰ kg/m³ و ۵۲۵۰ kg/m³ به صورت تابعی از زمان نشان می دهد.

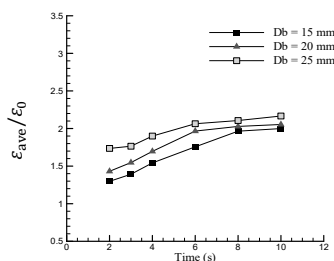


شکل ۷: تخلخل بستر به صورت تابعی از زمان برای هندسه ۱ با محلول ۰/۱ CMC % با سرعت ورودی ۰/۰۰۵ m/s برای ذرات با چگالی متفاوت.

با توجه به شکل ۷ با افزایش چگالی ذرات تخلخل میانگین بستر کاهش یافته است، چرا که نیروی وزن ذرات در بستر با افزایش چگالی افزایش یافته اما میزان نیروی پسا روی ذرات جامد ثابت است، همچنین با توجه به منحنی‌ها در شکل ۷ با افزایش چگالی ذرات جامد، بستر در زمان کوتاه‌تری به حالت پایدار خود رسیده است.

۵-۵- بررسی اثر قطر بستر بر رفتار انبساطی آن

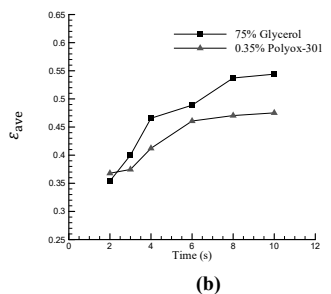
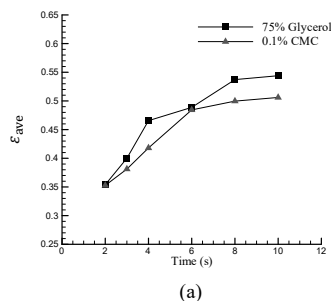
جهت بررسی اثر قطر بستر سیالی بر رفتار انبساطی آن، هندسه ۱، ۴ و ۵ از جدول (۲) با محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱ % با سرعت ورودی ۰/۰۰۵ m/s مدل شده و نسبت تخلخل برای این سه بستر به صورت تابعی از زمان در شکل ۸ رسم شده است. با توجه به شکل ۸ با افزایش قطر بستر سیالی، نسبت تخلخل بستر نیز افزایش یافته که علت اصلی آن کاهش اثرات دیواره با افزایش قطر بستر است. مقایسه هندسه‌های ۱ و ۵ با محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱ %، نشان می‌دهد که افزایش ۱۶۰ درصدی قطر بستر نسبت تخلخل را به طور متوسط ۲۰% افزایش داده است. همچنین با مقایسه میان نتایج در شکل‌های ۵ و ۷ می‌توان گفت که تاثیر کاهش قطر ذرات جامد برای افزایش نسبت تخلخل در بستر، دو برابر بیشتر از تاثیر افزایش قطر بستر برای این مقصود است. که از این نتیجه‌گیری می‌توان در طراحی و بهینه‌سازی بسترهای سیالی با سیال غیرنیوتنی بهره گرفت.



شکل ۸: نسبت تخلخل بستر به صورت تابعی از زمان برای هندسه ۱، ۴ و ۵ با محلول ۰/۱ CMC % با سرعت ورودی ۰/۰۰۵ m/s.

۵-۶- بررسی اثر ارتفاع اولیه بر رفتار انبساطی بستر

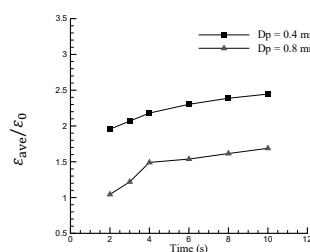
در راستای بررسی اثر ارتفاع اولیه بستر بر نسبت تخلخل آن، هندسه‌های ۲ و ۳ با محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱ % با سرعت



شکل ۹: تخلخل میانگین بستر با هندسه ۱ به صورت تابعی از زمان برای دو سیال عامل نیوتنی و غیرنیوتنی با سرعت ظاهری ۰/۰۰۵ m/s

۵-۳- بررسی اثر قطر ذرات بر رفتار انبساطی بستر

برای بستر با هندسه ۲ و ۳ از جدول ۲ و محلول ۰/۱ CMC % به عنوان سیال عامل با سرعت ورودی ۰/۰۰۵ m/s، نسبت تخلخل بستر به صورت تابعی از زمان در شکل ۶ رسم شده است. با توجه به این شکل با دو برابر شدن قطر ذرات نسبت تخلخل در بستر به طور متوسط در طول فرآیند ۵۰٪ کاهش یافته است، که این کاهش در لحظات ابتدایی فرآیند سیالیت به ۸۸٪ نیز می‌رسد. همچنین با دو برابر شدن قطر ذرات در بستر تا لحظه ۴ ثانیه با توجه به شیب منحنی‌ها نرخ افزایش تخلخل در بستر افزایش یافته که این پدیده به علت افزایش ارتفاع اولیه بستر است.

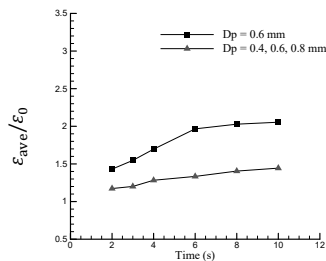


شکل ۶: تغییرات نسبت تخلخل بستر با هندسه ۲ و ۳ و محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱ % به صورت تابعی از زمان

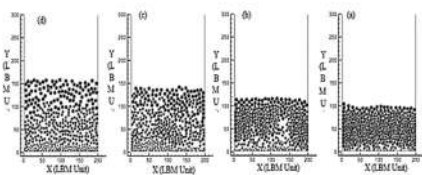
۵-۴- بررسی اثر چگالی ذرات بر رفتار انبساطی بستر سیالی غیرنیوتنی

یکی دیگر از پارامترهایی که در این مطالعه تاثیر آن بر رفتار انبساطی بستر سیالی غیر نیوتنی بررسی شده، چگالی ذرات جامد است. شکل ۷ تخلخل بستر با هندسه ۱ و محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۱ % با سرعت ورودی ۰/۰۰۵ m/s را برای ذرات با سه چگالی ۲۵۰۰ kg/m³،

دقت شود که در هندسه ۷ تعداد ذرات با سه قطر به نوعی وارد شده که قطر میانگین ذرات درون بستر برابر با قطر ذرات در هندسه ۱ باشد، لذا تنها پارامتر متفاوت میان دو هندسه ۱ و ۷ وجود هم‌زمان ذرات با قطرهای متفاوت است. با توجه به شکل ۱۱ وجود ذرات با قطرهای متفاوت به‌صورت هم‌زمان به‌طور متوسط ۲۵ درصد نسبت تخلخل بستر را کاهش می‌دهد، دلیل این پدیده این است که ذرات جامد با قطرهای کوچکتر فضای خالی بین ذرات بزرگتر و جداره های بستر را اشغال می‌کنند و در یک حجم یکسان تعداد ذرات با قطرهای متفاوت (ریز و درشت) بیشتر از حالت قطر یکسان می‌باشد بنابراین تخلخل برای شرایط یکسان در حالت قطرهای متفاوت کاهش می‌یابد. شکل ۱۲ فرآیند سیالیت را در بستر با هندسه ۷ برای ۴ زمان متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲ در طول فرآیند سیالیت بستر، ذرات با قطر کم‌تر به سمت پایین بستر و ذرات با قطر بیشتر به سمت بالا بستر حرکت کرده و پس از جدا شدن از یکدیگر حرکت آنها به یک ارتفاع و سطح مشخص در بستر محدود می‌گردد (شکل ۱۲-d). لذا در صورت وجود ذرات جامد از یک جنس با قطر متفاوت در بستر در نهایت و در حالت پایدار بستر این ذرات از یکدیگر تفکیک شده و در ارتفاع مشخصی قرار می‌گیرند. این حالت در برخی کاربردها مانند فرآیندهای جداسازی مطلوب است، اما در کاربردهایی مانند انتقال گرما ثابت بودن قطر ذرات سبب حرکت هر ذره در تمام طول بستر می‌شود و با توجه به شکل ۱۱، نسبت تخلخل ۲۵ درصد بیشتر نیز ارائه می‌دهد که در نتیجه برای افزایش انتقال گرما مطلوب‌تر از حالت وجود ذرات با چند قطر متفاوت است.



شکل ۱۱- نسبت تخلخل بستر به‌صورت تابعی از زمان برای هندسه ۱ و ۷ با محلول 0.1% CMC با سرعت ورودی 0.005 m/s.

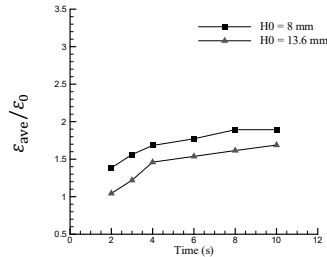


شکل ۱۲: فرآیند سیالی شدن بستر با هندسه ۷ و محلول کربوکسی متیل سلولوز ۰/۱٪ با سرعت ظاهری ۰/۰۰۵ m/s برای زمان‌های (a) 1 s، (b) 2 s، (c) 2.5 s و (d) 6 s.

۶- نتیجه‌گیری

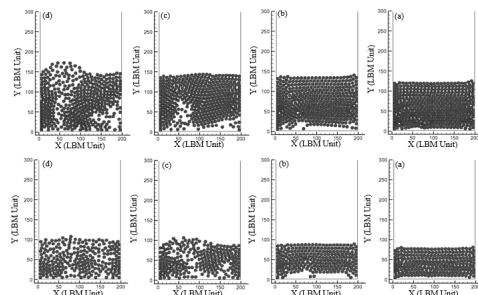
در این پژوهش به منظور مطالعه تاثیر سیال عامل و پارامترهای هندسی بر رفتار انبساطی و تخلخل بستر سیالی غیرنیوتنی، بستر سیالی با ۷ هندسه متفاوت و ۳ سیال عامل به روش ترکیبی شبکه بولتزمن و نمایه هموار مدل سازی شده است. نتایج نشان داد که:

ورودی 0.005 m/s مدل شده و نتایج نسبت تخلخل به‌صورت تابعی از زمان برای دو بستر در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به شکل ۹ با افزایش ارتفاع اولیه بستر نسبت تخلخل کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه شیب منحنی‌ها تا لحظه ۴ ثانیه، می‌توان دریافت که نرخ افزایش نسبت تخلخل در بستر با افزایش ارتفاع اولیه بستر در لحظات ابتدایی فرآیند سیالیت افزایش یافته است که علت این پدیده حفظ آرایش اولیه ذرات در لحظات ابتدایی فرآیند در بستر با ارتفاع اولیه بیشتر است.



شکل ۹- نسبت تخلخل بستر به‌صورت تابعی از زمان برای هندسه ۲ و ۶ با محلول 0.1% CMC با سرعت ورودی 0.005 m/s.

در لحظات ابتدایی فرآیند سیالیت با ورود سیال عامل به بستر به دلیل وجود اثرات دیواره، انبساط از میانه بستر شروع شده و ذرات در میانه بستر بلند می‌شوند، اما ذرات نزدیک دیواره بدلیل اثرات دیواره آرایش اولیه خود را حفظ می‌کنند، لذا انبساط میانی شدید، باعث افزایش سریع‌تر نسبت تخلخل در بستر می‌گردد که با افزایش ارتفاع اولیه بستر این پدیده مدت زمان بیشتری دوام می‌آورد. شکل ۱۰، چهار ثانیه ابتدایی فرآیند سیالیت را در دو بستر مدل شده را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل بستر با ارتفاع اولیه بیشتر تا لحظه ۴ ثانیه توانسته آرایش اولیه ذرات را در کناره‌ها حفظ کند ولی بستر با ارتفاع کمتر در لحظه ۳ ثانیه آرایش اولیه خود را از دست داده است.



شکل ۱۰- بستر با هندسه ۲ و ۶ با محلول 0.1% CMC در سرعت ورودی 0.005 m/s برای زمان‌های (a) 0.5 s، (b) 1 s، (c) 2 s و (d) 3 s.

۵-۷- بررسی اثر وجود هم‌زمان ذرات با قطرهای

مختلف بر رفتار انبساطی بستر

در کاربردهای صنعتی ذرات درون بستر قطر برابری ندارند، همچنین در برخی از کاربردها ذرات جامد در بستر با برخورد به یکدیگر و دیواره بستر شکسته و به ذرات با قطرهای کوچکتر تبدیل می‌شوند. شکل ۱۱ نسبت تخلخل را به‌صورت تابعی از زمان برای بستر با هندسه‌های ۱ و ۷ با محلول کربوکسی متیل سلولوز ۰/۱٪ برای زمان‌های متفاوت نشان می‌دهد.

[8] Kawase Y., Ulbrecht J., Mass and momentum transfer with non-Newtonian fluids in fluidized beds, *Chemical Engineering Communications*, Vol.32, No.1, pp.263-288,1985.

[9] Bendict R. F., Kumaresan G., Velan M., Bed expansion and pressure drop studies in a liquid-solid inverse fluidised bed reactor, *Bioprocess Engineering*, Vol.19, No.2, pp.137-142,1998.

[10] Lakshmi A.V., Balamurugan M., Sivakumar M., Samuel T. N., Velan M., Minimum fluidization velocity and friction factor in a liquid-solid inverse fluidized bed reactor, *Bioprocess Engineering*, Vol.22, No.5, pp.461-466,2000.

[11] Richardson J., Zaki W., This Week's Citation Classic: Sedimentation and fluidisation, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, Vol.32, No.1, pp.35-53,1954.

[12] Christopher R. H., Middleman S., Power-law flow through a packed tube, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol.4, No.4, pp.422-426,1965.

[13] Machač I., Ulbrichová I., Elson T., Cheesman D., Fall of spherical particles through non-Newtonian suspensions, *Chemical Engineering Science*, Vol.50, No.20, pp.3323-3327,1995.

[14] Yuan Z., Wang SH., Shao B., Xie L., Chen Y., Ma Y., Investigation on effect of drag models on flow behavior of power-law fluid-solid two-phase flow in fluidized bed. *Particuology*, Vol.70, No.2, pp.43-54,2022.

[15] Pang B., Wang SH., Lu H., A modified drag model for power-law fluid-particle flow used in computational fluid dynamics simulation. *Advanced Powder Technology*, Vol.32, No.4, pp.1207-1218,2021.

[۱۶] شیربانی قزوینی، میلاد، ورمزیار، مصطفی، محمدی، آرش. آنالیز دقت و پایداری مدل های گوناگون تقابل ذره ها در روش شبکه بولتزمن چند فازی . نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران ، ۳۸، ۵، ۳۸، ش. ۳، ص. ۲۵۳-۲۶۷، ۱۳۹۸.

[17] Aharonov E., Rothman DH., Non-Newtonian flow (through porous-media): A lattice Boltzmann method, *Geophys Res Lett*, Vol.20, No.1, pp.679-682,1993.

[۱۸] فلاح ک.، طیبی رهنی م.، قادری آ.، شبیه سازی عددی جریان سیال غیرنیوتنی گذرنده ازروی سیلندر دایروی ساکن در داخل کانال. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ، ۴۹، ۵، ۴۹، ش. ۲، ص. ۲۳۹-۲۴۷، ۱۳۹۸.

[۱۹] عزت نشان ا.، شبیه سازی عددی جریان کاوزیتاسیونی داخل نازل با استفاده از روش شبکه بولتزمن. نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۴۹، ۵، ش. ۱، ص. ۱۸۵-۱۷۹، ۱۳۹۸.

[۲۰] نعمتی م.، سفید م.، استفاده از روش لیتس بولتزمن در تحلیل آنتروپی تولید شده طی انتقال حرارت دوگانه سیال قانون توانی در حضور جذب/تولید گرما و میدان مغناطیسی. علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک. ۳۴، ش. ۳، ص. ۳۵-۶۶، ۱۴۰۱.

[21] Ergun S., Orning A. A., Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds, *Industrial & Engineering Chemistry*, Vol.41, No.6, pp.1179-1184,1949.

[22] Mehrabi Gohari E., Sefid M., Jahanshahi Javaran E., Numerical simulation of the hydrodynamics of an inverse liquid-solid fluidized bed using combined Lattice Boltzmann and smoothed profile methods, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol.38, No.10, pp.1471-1482,2017.

[۲۳] روحانی تزنگی، ح.، سلطانی گوهرریزی، ع.، جهانشاهی جواران، ا. بررسی رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون های حاوی سیال قانون توانی با استفاده از ترکیب روش شبکه بولتزمن و نمایه هموار. مکانیک سازه ها و شاره ها، د. ۹، ش. ۲، ص. ۱۹۷-۲۱۱، ۱۳۹۸.

[24] Zou Q., He On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model, *Physics of Fluids*, 9, 1591, 1997.

[25] Chhabra R. P., Comiti J., Machač I., Flow of non-Newtonian fluids in fixed and fluidised beds, *Chemical Engineering Science*, Vol.56, No.1, pp.1-27,2001.

۱- بستر با سیال نیوتنی به طور کلی تخلخل بیشتری نسبت به بستر با سیال غیرنیوتنی با اندیس قاعده توانی کمتر از ۱ ارائه می دهد و افزایش اندیس قاعده توانی باعث افزایش تخلخل بستر سیالی می شود.

۲- بررسی ها برای قطر ذرات جامد نشان داد، که نسبت تخلخل در بستر رابطه عکس با تغییر قطر ذرات جامد دارد. افزایش دو برابری در قطر ذرات باعث کاهش ۵۰ درصدی در نسبت تخلخل بستر با محلول CMC ۰/۱% شد.

۳- افزایش چگالی ذرات جامد و ارتفاع اولیه بستر نیز سبب کاهش تخلخل بستر گردید.

۴- خروجی های مدل برای بستر با قطرهای متفاوت نشان داد که افزایش قطر بستر سبب افزایش نسبت تخلخل بستر سیالی می شود و همچنین مقایسه ها برای تغییر قطر بستر و قطر ذرات جامد نشان داد که تاثیر کاهش قطر ذرات در افزایش نسبت تخلخل بستر ۲ برابر بیشتر از اثر افزایش قطر بستر سیالی برای این مقصود است.

۵- در مطالعه بستر سیالی شامل ذرات با قطرهای متفاوت، خروجی های مدل سازی نشان دادند که نسبت تخلخل در بستر با ذرات جامد با قطرهای برابر بیشتر از بستر با قطرهای متفاوت است. برای بستر با محلول CMC ۰/۱% در حالت ذرات جامد با قطر برابر، نسبت تخلخل متوسط در طول فرآیند ۲۵ درصد بیشتر از حالت ۳ قطر متفاوت برای ذرات جامد بوده است.

۶- مطالعه فرآیند سیالیت در بسترهای سیالی حاوی ذرات با قطرهای متفاوت نشان داد که در طی فرآیند ذرات براساس قطرهایشان در طول بستر دسته بندی شده و حرکت هر دسته محدود به طول خاصی از کل بستر خواهد بود. در مجموع مطالعه حاضر نشان داد که با مدل سازی بسترهای سیالی غیر نیوتنی به روش ترکیبی شبکه بولتزمن و نمایه هموار با دقت مناسبی می توان رفتار هیدرودینامیکی این بسترها را مطالعه و هزینه آنالیز و بررسی اینگونه سیستم ها را به مقدار قابل توجهی کاهش داد.

۷- مراجع

[1] Weber E., Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002.

[2] Mehrabi Gohari E., Sefid M., Jahanshahi Javaran E., Soltani Goharzi A., Hydrodynamic simulation of a liquid-solid fluidized bed using Lattice Boltzmann and smoothed profile methods, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, Vol.12, No.2, pp.196-211,2017.

[3] Dong Zhang G., Zhong Li M., Quan Xue J., Wang L., Lin Tian J., Wall-retardation effects on particles settling through non-Newtonian fluids in parallel plates, *Chemical Papers*, Vol.70, No.1, pp.1389-1398,2016.

[4] Yu Y., Wen C., Bailie R., Power-law fluids flow through multiparticle system, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol.46, No.3, pp.149-154,1968.

[5] Mishra P., Singh D., Mishra I., Momentum transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids flowing through packed and fluidized beds, *Chemical Engineering Science*, Vol.30, No.4, pp.397-405,1975.

[6] Brea F., Edwards M., Wilkinson W., The flow of non-Newtonian slurries through fixed and fluidised beds, *Chemical Engineering Science*, Vol.31, No.5, pp.329-336,1976.

[7] Kumar S., Upadhyay S., Mass and momentum transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in fixed and fluidized beds, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol.20, No.3, pp.186-195,1981.