



3D Modeling of the Effects of Arrangement and Geometry of the Rod Matrix on the Capturing of Micro-Particles in High Gradient Magnetic Filters

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sahami M.¹ MSc,
Jamaati J.^{*1} PhD

How to cite this article

Sahami M, Jamaati J. 3D Modeling of the Effects of Arrangement and Geometry of the Rod Matrix on the Capturing of Micro-Particles in High Gradient Magnetic Filters. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(10):2471-2480.

ABSTRACT

In this paper, a 3D model is proposed for investigating the performance of HGMS filters. This filter consists of a matrix of iron rods arranged in a channel with a square cross-section and subjected to an external magnetic field. The flowing fluid is the amine solution which contains the FeS micro-particles. In the presented model, first, the capture performances of magnetic particles for 2D geometries are calculated numerically at various conditions using COMSOL Multiphysics software through finite element method. Using these results, a database of capture performance has been established for different speeds of the flow, diameters of the particle and arrangement of the rods. By use of the processing of this database, the capture performance of semi-sized particles for a 3D problem is calculated through the integration of captured particles along the length of the rods. Finally, the amount of total particles captured on the rod matrix is obtained for a group of particles with various diameters assuming Gaussian distribution. The results indicate that in HGMS filters, the particle capturing is directly related to the particle diameter but inversely depends on Reynolds number and the vertical distance between the rods. Also, at the same conditions, the filtration of the triangular arrangement of rods is greater than the rectangular arrangement. However, the performance difference of these two arrangements decreases with increase in the flow velocity or increase in the distance between the rods or decrease in the diameter of the particles. These results can be used to optimize the filtration of particles in the magnetic filters at different conditions.

Keywords Capture Efficiency; Magnetic Filter; High Gradient Magnetic Separation; Gaussian Distribution of Particles; Arrangement of Magnetic Matrix

CITATION LINKS

[1] Removal of Iron scale from boiler feed-water in thermal power plant by magnetic separation: Large-scale experiment [2] Study on capture radius and efficiency of fine weakly magnetic minerals in high gradient magnetic field [3] Magnetic trap for removal of iron from amines [4] Magnetic filtration [5] Investigation of the particle capture of elliptic cross-sectional matrix for high gradient magnetic separation [6] Comparative study on the performance of circular and elliptic cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: Role of the applied magnetic induction [7] Development of high gradient magnetic separation system for removing the metallic wear debris to be present in highly viscous fluid [8] Effects of filter shapes on the capture efficiency of a superconducting high-gradient magnetic separation system. Superconductor Science and Technology [9] Particle Capture efficiency in a multi-wire model for high gradient magnetic ... [10] A realistic description of influence of the magnetic field strength on high gradient magnetic separation [11] Calculation of Evaluation Variables for High Gradient Magnetic Separation with an Idealized Capture Model [12] Study of a magnetic filter system for the characterization of particle magnetic property [13] Computational analysis of enhanced magnetic bioseparation in microfluidic systems with flow-invasive magnetic elements [14] High-gradient magnetic separation of ultrafine particles with rod matrix [15] The latest application of SLong vertical ring and pulsating High-gradient magnetic separator [16] Dynamic Trajectory and capture of fine dust magnetic mesh filters based on a particle velocity model [17] Physical properties of alkali metal-ammonia (amine) solutions studied by magnetic resonance methods [18] Magnetic properties of rocks and minerals [19] Modeling of dynamics, heat transfer, and combustion in two-phase turbulent flows: 1. Isothermal flows [20] Mathematical modeling of potential flow over a rotating cylinder [21] Convection heat transfer [22] Study on subway particle capture by ferromagnetic mesh filter in nonuniform magnetic field

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran

*Correspondence

Address: Razi University, Bagh-Abrishm Boulevard, Kermanshah, Iran. Postal code: 6714967346
Phone: +98 (83) 34283263
Fax: +98 (83) 34283263
j.jamaati@razi.ac.ir

Article History

Received: March 17, 2018

Accepted: February 13, 2019

ePublished: October 22, 2019

مدل سازی سه بعدی اثرات هندسه و آرایش ماتریس میله ها بر جذب میکروذرات در فیلترهای مغناطیسی گرادیان بالا

مسعود سهامی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

جعفر جماعتی PhD*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده

در این مقاله یک مدل سه بعدی برای بررسی عملکرد فیلترهای مغناطیسی ارائه شده است. این فیلتر متشکل از ماتریسی از میله های آهنی است که درون کانالی با سطح مقطع مربعی چیده شده اند و در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی هستند. سیال جاری درون کانال محلول آمین است که حاوی میکروذرات FeS است. در مدل ارائه شده ابتدا جذب ذرات مغناطیسی زیر میکرونی برای یک هندسه دوبعدی و در شرایط مختلف به صورت عددی با استفاده از نرم افزار کامسول (COMSOL) با روش المان محدود محاسبه می شود. توسط این نتایج یک پایگاه داده برای جذب ذرات به ازای سرعت های مختلف جریان، قطرهای مختلف ذرات و چیدمان های متفاوت میله ها به دست آمده است. از طریق پردازش داده های این پایگاه تعداد ذرات جذب شده روی یک دسته میله سه بعدی توسط انتگرال گیری عددی در راستای عمق میله محاسبه شده است. نهایتاً مقدار جذب ذرات روی ماتریس میله ها به ازای ورود طیف گاوسی از ذرات به کانال تعیین شده است. نشان داده می شود در این فیلترها مقدار جذب ذرات با قطر ذرات رابطه مستقیم و با عدد رینولدز جریان و فاصله عرضی بین میله ها رابطه معکوس دارد. همچنین در شرایط یکسان مقدار فیلتراسیون چیدمان مثلی میله ها نسبت به چیدمان مستطیلی بیشتر است که البته اختلاف میزان جذب ذرات در این دو آرایش با افزایش سرعت جریان، فاصله بین میله ها و کاهش قطر ذرات کاهش می یابد. این نتایج می تواند برای بهینه سازی فیلتراسیون ذرات در فیلترهای مغناطیسی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: بازدهی جذب، فیلتر مغناطیسی، جداسازی تحت گرادیان شدید مغناطیسی، طیف گاوسی ذرات، چیدمان ماتریس مغناطیسی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

*نویسنده مسئول: j.jamaati@razi.ac.ir

۱- مقدمه

جداسازی و فیلتراسیون میکروذرات ضعیف مغناطیسی از جریان سیال یکی از معضلات مهم در صنعت است. به عنوان مثال در فرایند شیرین سازی گاز، حضور ذرات FeS در سیال آمین موجب پدیده کف زایی و کاهش بازدهی عملکرد برج جذب آمین می گردد. جداسازی این ذرات از سیال آمین با استفاده از فیلترهای مکانیکی به خاطر ریز بودن این ذرات و افت فشار زیاد این فیلترها بسیار پرهزینه و کم راندمان می باشد. فیلترهای جداسازی با گرادیان مغناطیسی شدید (High Gradient Magnetic Separation) که به اختصار فیلترهای HGMS نامیده می شوند، فیلترهایی با افت فشار کم هستند و جهت جداسازی ذرات میکرونی از سیال پایه حتی در سرعت های جریان بالا قابل استفاده می باشند [1, 2]. این فیلترها شامل مجموعه ای از میله های باریک فرومغناطیس با سطوح مقطع دایروی هستند که به صورت موازی یا متقاطع بر مسیر جریان قرار می گیرند. اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر این مجموعه میله ها که اصطلاحاً ماتریس مغناطیسی نام دارند باعث می شود تا میدان مغناطیسی در اطراف آن ها تا چندین برابر میدان خارجی تقویت شود که خود باعث افزایش نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات و جذب بیشتر ذرات روی میله ها می گردد. از آنجا که در فیلترهای HGMS، هزینه شستشوی ماتریس ها نسبت به تعویض

کارتریج ها در فیلترهای مکانیکی بسیار کمتر است، لذا فیلترهای HGMS جایگزین مناسبی برای این فیلترها در صنعت می باشند [3]. به علاوه از جنبه مسائل محیط زیستی، استفاده از این فیلترها هم راستا با معاهدات بین المللی برای حفظ محیط زیست است زیرا عملکرد مناسب آن ها می تواند منجر به کاهش اتلاف سوخت و تولید دود در دیگ های بخار گردد [2].

معادلات حرکت ذرات در اطراف میله مغناطیس شده و محاسبه شعاع جذب (Capture Radius) میله های استوانه ای برای اولین بار توسط واتسون ارائه شده است [4]. در برخی حالات ساده، حل تحلیلی میدان مغناطیسی و جریان سیال حامل ذرات پارامغناطیسی حول یک میله مغناطیسی قابل انجام است و اثر تغییرات پارامترهای مؤثر بر جذب مانند سرعت جریان، میدان مغناطیسی خارجی و قطر ذرات بر بازدهی جذب یک میله مغناطیسی شده مورد مطالعه قرار گرفته است [5, 6]. با این وجود در این تحلیل ها اثر هم پوشانی میدان های مغناطیسی مربوط به میله های مجاور لحاظ نشده است. مشخص شده است که هرچه لزجت جریان سیال افزایش یابد بازدهی جذب فیلترهای مغناطیسی مشبک کاهش می یابد [7]. ضمناً هرچه قطر میله های موجود در ماتریس مغناطیسی کوچکتر باشد گرادیان مغناطیسی ایجاد شده در اطراف میله ها و در نتیجه جذب ذرات توسط آن ها افزایش می یابد [8]. جذب کامل ذرات زمانی رخ می دهد که اثرات نیروی مغناطیسی از اثرات نیروی پسا در فضای بین میله ها بیشتر باشد [9]. با افزایش میدان مغناطیسی خارجی تا حد اشباع مغناطیسی میله ها، جذب ذرات شدیداً افزایش می یابد. بعد از حالت اشباع چنانچه میدان خارجی از حد مشخصی فزونی یابد بازدهی جذب (Capture efficiency) دچار کاهش می گردد [10] و لذا عملکرد این فیلترها در حالت اشباع بهینه می باشد.

یکی از توزیع های رایج قطر ذرات معلق در جداسازی ذرات از جریان های سیال، طیف گاوسی می باشد [11] که کمتر در مطالعات موجود اعمال شده است. به علاوه عمده مسائل محدود به مطالعات دوبعدی است. در یک مطالعه بازدهی جذب فیلتر مغناطیسی مشبک متشکل از یک توری شبکه ای شکل تحت جریان یکنواخت با توزیع اندازه ذرات یکنواخت محاسبه شده و با تعمیم این نتایج برای یک مجموعه از صفحات توری، میزان جذب مورد بررسی قرار گرفته شده است [12]. با این وجود تاکنون عملکرد فیلترهای مغناطیسی در کانال های سه بعدی و تحت پروفیل های سرعت توسعه یافته به ازای ورود طیف ذرات با اندازه های مختلف و بررسی جامع پارامترهای مؤثر مانند قطر ذرات، فواصل بین میله ها، چیدمان میله ها و سرعت جریان سیال به علت زمان بر بودن شبیه سازی و بالا بودن هزینه اقتصادی مربوط به مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته نشده است.

با توجه به محدود بودن مطالعات عددی برای عملکرد یک فیلتر مغناطیسی سه بعدی، در این مقاله یک مدل عددی برای شبیه سازی سه بعدی عملکرد جذب در یک فیلتر مغناطیسی HGMS ارائه شده است. فیلتر مورد نظر متشکل از یک دسته میله متقاطع با جریان سیال است که درون یک کانال سه بعدی قرار دارد و تحت اثر میدان مغناطیسی خارجی باعث جداسازی ذرات زیرمیکرونی می گردد. با وجودی که این مدل برای حالت سه بعدی ارائه شده است، سرعت اجرای آن بالا و هزینه محاسباتی آن اندک است. یکی از ویژگی های این مدل توانایی محاسبه جذب برای یک مساله واقعی است که در آن ذرات با طیف غیر یکنواخت از اندازه قطر و یا جنس ذره وارد کانال می شوند. نتایج این مدل به صورتی

در مرز بالایی و پایینی با توجه به تقارن جریان، از شرط تقارن (گرادیان صفر عمود بر دیواره) استفاده شده است. بعلاوه در مرزهای جامد برای فشار طبق معادلات ناویر- استوکس شرط $\partial p / \partial n = \mu (\partial^2 u / \partial n^2)$ اعمال شده است که n عمود بر دیواره است. به صورت خلاصه شرایط مرزی جریان سیال در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱) شرایط مرزی جریان سیال در هندسه دوبعدی

شرایط مرزی	مرز
ورودی حوزه	سرعت ورودی
خروجی حوزه	فشار خروجی
دیواره‌های بالا و پایین	تقارن جریان
دیواره میله‌ها	عدم لغزش

۲-۲- معادلات میدان مغناطیسی (معادلات ماکسول)

طبق مطالعات موجود میدان‌های مغناطیسی متقاطع با جریان سیال عملکرد مناسب‌تری نسبت به دیگر پیکربندی‌ها جهت فیلتراسیون ذرات از سیال در کانال‌های حامل جریان دارند[5]. لذا در این مطالعه بردار میدان خارجی برابر $B_0 = 1 \text{ T}$ به صورت عمود بر جریان سیال اعمال می‌گردد. تا قبل از رسیدن میله‌ها به حالت اشباع مغناطیسی، بردار چگالی شار میدان مغناطیسی با بردار شدت میدان مغناطیسی در داخل حوزه حل به صورت زیر با هم رابطه دارند:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_0 \quad (۳)$$

که در آن $\vec{H}$ بردار شدت میدان مغناطیسی و به صورت عمود بر جریان است و μ_0 و μ_r نیز به ترتیب نفوذپذیری مغناطیسی خلاء و نفوذپذیری نسبی ماده می‌باشند. مقدار نفوذپذیری مغناطیسی خلاء برابر با $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ می‌باشد. همچنین میله‌ها از آهن با نفوذپذیری مغناطیسی نسبی $\mu_{r,p} = 4000$ ساخته شده‌اند[15]. در حل معادله میدان مغناطیسی فرض شده در ورودی و خروجی حوزه حل شرط عایق مغناطیسی وجود دارد و بعلاوه دیواره‌های بالا و پایین حوزه حل به عنوان خطوط تقارن برای میدان مغناطیسی در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۳- معادله حرکت ذرات در دیدگاه لاگرانژی

چون ذرات مورد مطالعه کروی و با قطر حداکثر $1 \mu\text{m}$ می‌باشند، عدد استوکس جریان بسیار کوچک است ($Stk \ll 1$) و لذا چرخش آن‌ها ناچیز و در نتیجه نیروهای شناوری و گرانشی وارد بر ذره در برابر سایر نیروهای پسا و مغناطیسی ناچیز فرض می‌شوند و ذرات خطوط جریان را تعقیب می‌نمایند و همچنین نیروهای پخش براونی به خاطر بالا بودن عدد پکله جریان ($Pe_D \gg 1$) قابل چشم‌پوشی هستند[16]. از آنجا که غلظت ذرات در جریان ناچیز فرض شده است و در مطالعه حاضر نسبت قطر ذرات به فاصله عرضی بین میله‌ها بسیار کوچک است ($d_p/H \ll 1$)، لذا از اثرات حرکت ذرات بر حرکت جریان سیال صرف نظر می‌شود و معادلات آن‌ها به صورت جفت شده یک‌طرفه (One way coupling) حل می‌شوند[13]. با این شرایط معادله حرکت ذرات بر اساس قانون دوم نیوتن به شکل زیر به دست می‌آید:

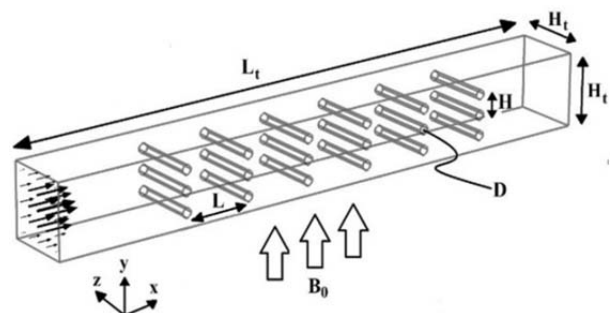
$$m_p \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_m + \vec{F}_d \quad (۴)$$

که در آن $\vec{V}$ بردار سرعت ذره، m_p جرم ذره، $\vec{F}_m$ و $\vec{F}_d$ به ترتیب بردارهای نیروی ناشی از میدان مغناطیسی و اصطکاک پوسته‌ای وارد بر ذره می‌باشند که از روابط زیر به دست می‌آیند:

ارائه شده است که از آن‌ها می‌توان برای پیش بینی عملکرد فیلترهای مغناطیسی در شرایط جریانی، هندسی و طیفی مختلف از ذرات استفاده نمود و شرایط بهینه برای جذب ذرات را مشخص نمود.

۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

شکل ۱ شماتیک هندسه کانال مورد نظر و ماتریس مغناطیسی شده را نشان می‌دهد. کانال مورد نظر دارای سطح مقطع مربعی با ضلع H_t و طول حوزه حل کانال در این مسئله L_t است. میله‌های ماتریس دارای قطر D ، فاصله طولی L از همدیگر و فاصله عرضی H هستند. میله‌های فلزی در تماس مستقیم با جریان سیال درون کانال هستند و نسبت به میله‌هایی که در کناره کانال روی دیواره خارجی کانال نصب می‌شوند عملکرد جذب بسیار بهتری دارند[13].



شکل ۱) هندسه کانال و ماتریس میله‌ها و جهت میدان مغناطیسی خارجی

فرض می‌شود جریان حاوی ذرات، توسعه یافته است و تحت اثر ماتریس مغناطیسی که وظیفه جذب و فیلتراسیون ذرات را بر عهده دارد، قرار می‌گیرد. میدان مغناطیسی خارجی مطابق شکل ۱ از پایین به بالا بر کانال اعمال می‌شود. اندازه مقطع کانال و طول آن به ترتیب برابر با $H_t = 10 \text{ cm}$ و $L_t = 7 \text{ cm}$ می‌باشد. از آنجا که کاهش قطر میله‌ها باعث بهبود عملکرد جذب آن‌ها می‌شود و با توجه به اینکه کوچک‌ترین قطر میله‌های مغناطیسی کاربردی در صنعت برابر با 1 mm است[14]، قطر میله‌های ماتریس مغناطیسی شده برابر با مقدار ثابت $D = 10 \text{ mm}$ و فاصله طولی بین آن‌ها $L = 3 \text{ mm}$ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱ معادلات جریان

عدد رینولدز جریان بر مبنای قطر میله‌ها در بیشترین سرعت جریان مورد بررسی در حدود $Re_D = 10$ می‌باشد. لذا رژیم جریان سیال آرام می‌باشد و با فرض کم بودن غلظت ذرات در سیال از حرکت آن‌ها تاثیری نمی‌گیرد و بنابراین با فرض تراکم‌ناپذیری جریان معادلات پیوستگی و معادلات ناویر- استوکس به صورت زیر برای جریان سیال برقرارند:

معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (۱)$$

که در آن $\vec{u}$ میدان سرعت سیال است.

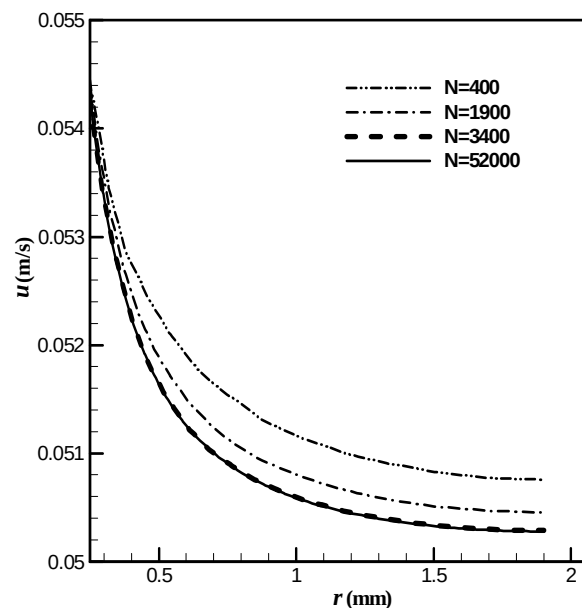
معادله ناویر- استوکس برای جریان سیال

$$\rho_f (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\vec{\nabla} p + \eta \nabla^2 (\vec{u}) \quad (۲)$$

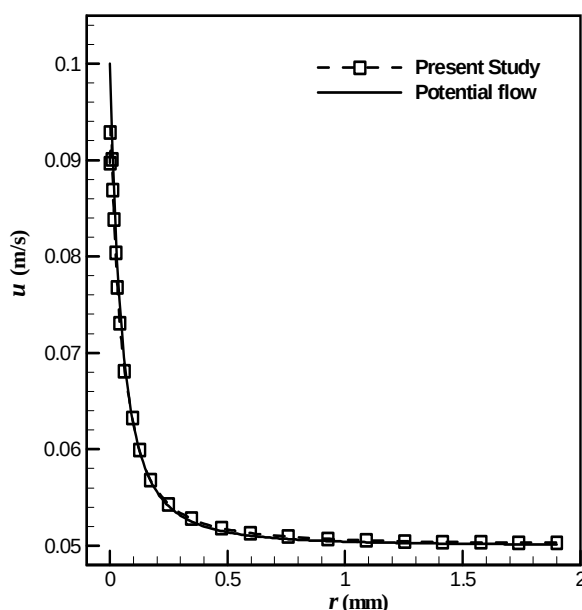
که در آن ρ_f چگالی سیال و برابر با $991/25 \text{ kg/m}^3$ بیانگر فشار و η لزجت دینامیکی سیال و برابر با $2/32 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ است. در ورودی حوزه حل مقدار سرعت معلوم فرض شده است و در خروجی فرض شده است که خطوط جریان به صورت موازی از حوزه حل خارج می‌شوند و لذا فشار ثابت در نظر گرفته شده است.

همان طور که در نمودار ۱ دیده می‌شود، برای شبکه با تعداد ۳۴۰۰ گره دقت مناسب برای حل مسائل جریان به دست می‌آید. برای این وضعیت، جریان پتانسیل شبیه‌سازی شده روی میله مذکور با حل تحلیلی آن در مرجع [20] مطابق با نمودار ۲ تنها ۱۰٪ خطا دارد که آن هم مربوط به نقاط بسیار نزدیک به دیواره می‌باشد.

یک فاکتور مهم در جذب ذرات توسط یک میله مغناطیسی، شعاع جذب می‌باشد. شعاع جذب بیشترین فاصله عمودی از محور تقارن میله است که در داخل آن محدوده همه ذرات با میله برخورد خواهند کرد. این فاصله در شکل ۲ با علامت R_c نشان داده شده است. در نمودار ۳ شعاع جذب ذرات روی میله دایروی به دست آمده است و با نتایج حل تحلیلی مرجع [5] مقایسه شده است. مطابق نمودار ۳ در بدترین نقاط خطای نسبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و حل تحلیلی در حدود ۴٪ است.



نمودار ۱) استقلال از شبکه برای مؤلفه افقی سرعت در نقطه بالایی استوانه



نمودار ۲) اعتبارسنجی مؤلفه افقی سرعت با حل تحلیلی در اطراف یک استوانه [20]

$$\vec{F}_m = 2\pi r_p^3 \mu_0 \mu_{r,f}^3 (1 - \mu_{r,p}) \nabla H^2 \quad (5)$$

$$\vec{F}_d = \frac{1}{\tau_p} m_p (\vec{u} - \vec{V}) \quad (6)$$

که در آن‌ها r_p شعاع ذره، μ_0 ، $\mu_{r,f}$ و $\mu_{r,p}$ به ترتیب ضریب نفوذپذیری خلأ، ضریب نفوذپذیری نسبی سیال و میکروذرات می‌باشند. در اینجا سیال حامل محلول آمین با $\mu_{r,f} = 1/0$ (طبق مرجع [17]) است که در فرآیند شیرین‌سازی گاز در پالایشگاه کاربرد دارد. میکروذرات مورد نظر شامل ذرات معلق ریز و ضعیف مغناطیسی FeS هستند که دارای نفوذپذیری مغناطیسی نسبی $\mu_{r,p} = 1/00174$ و چگالی $\rho_p = 4830 \text{ kg/m}^3$ هستند [18] که بایستی از جریان سیال آمین جدا شوند. τ_p زمان استراحت (Relaxation Time) ذرات است که در اعداد رینولدز کوچکتر از یک ($Re_{dp} \ll 1$) از رابطه زیر به دست می‌آید [19]:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\eta} \quad (7)$$

که در آن ρ_p چگالی و d_p قطر ذرات معلق در سیال می‌باشد.

۲-۴ بازدهی جذب

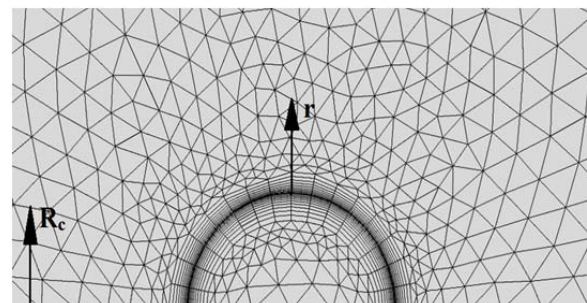
نسبت تعداد ذرات جذب شده روی یک دسته از میله‌های ماتریس مغناطیسی (N_c) به کل ذرات ورودی (N_t) به حوزه حل، بازدهی جذب تعریف می‌شود و با علامت $C.E.$ نشان داده می‌شود:

$$C.E. = \frac{N_c}{N_t} \quad (8)$$

بر مبنای این تعریف می‌توان بازدهی جذب کلی $C.E._{tot}$ فیلترهای مغناطیسی را تعریف نمود.

۳- استقلال از گره و اعتبارسنجی

به منظور بررسی صحت روش حل عددی نتایج جداسازی به روش HGMS در پیکربندی متقاطع میدان با جریان سیال برای شبکه‌های محاسباتی مختلف شبیه‌سازی شده است و نتایج مرجع [5] که مربوط به حل پتانسیل است، مقایسه شده است. برای نزدیک شدن به ویژگی جریان پتانسیل و اثر آن بر حرکت ذرات در شبیه‌سازی حاضر تمهیداتی انجام گرفته شد تا در ضمن اینکه عدد رینولدز جریان زیاد و لزجت جریان آرام ناچیز باشد، بتوان در قسمت تعقیب ذرات و نیروی پسا وارد بر ذرات، اثر لزجت اعمال شود. شبکه‌بندی دامنه حل مطابق شکل ۲ به وسیله سلول‌های مثلثی همراه با مش‌های لایه مرزی روی سطوح جامد برای محاسبه مناسب گرادیان سرعت و تنش برشی انجام گرفته شده است. از آنجا که جنس میله در ایجاد گرادیان مغناطیسی در اطراف آن اثر مهمی دارد لذا جهت حل معادلات میدان مغناطیسی در داخل میله نیاز است تا داخل میله هم مش‌بندی و میدان مغناطیسی در آن حل شود.



شکل ۳) ساختار شبکه در داخل حوزه سیال و میله جامد

است و $C.E(u_i)$ نیز بازدهی جذب موضعی بر مبنای سرعت موضعی روی دسته میله λ_m است. مشابه با این مرحله می‌توان جذب را برای سایر ردیف‌ها که مطابق شکل ۳ دارای سرعت برخوردی متفاوت هستند، نیز محاسبه نمود و مجموع ذرات جذب‌شده را برای کانال حاوی چند ردیف از میله‌ها به فرم مقابل ارائه نمود:

$$N_{c,t} = \sum_{i=1}^n N_{c,i} \quad (10)$$

که در آن $N_{c,t}$ تعداد کل ذرات جذب‌شده روی ماتریس میله‌ها می‌باشد. اندیس i برای همه ردیف‌ها منظور می‌شود و حداکثر آن برابر با $i_{max} = H_t/H$ است. اجرای این محاسبات و میان‌یابی‌های لازم، در نرم‌افزار متلب (MATLAB) کدنویسی شده است. نسبت جرم ذرات جذب‌شده روی مجموعه ماتریس میله‌ها به جرم کل ذرات ورودی بازدهی جرمی جذب نام‌گذاری می‌شود و از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$C.E_m = \frac{m_{c,t}}{m_{in}} \quad (11)$$

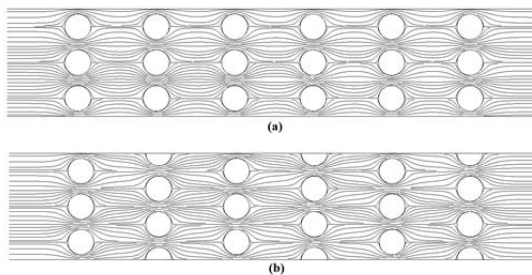
که در آن $m_{c,t}$ جرم ذرات جذب‌شده روی میله‌ها و m_{in} کل جرم ذرات ورودی به کانال می‌باشد و رابطه جرم ذرات با تعداد آن‌ها به‌صورت زیر است:

$$m = \frac{\rho_p}{6} N \pi d_p^3 \quad (12)$$

که در آن N : تعداد، d_p : قطر، ρ_p : چگالی ذره و m : جرم ذرات می‌باشد.

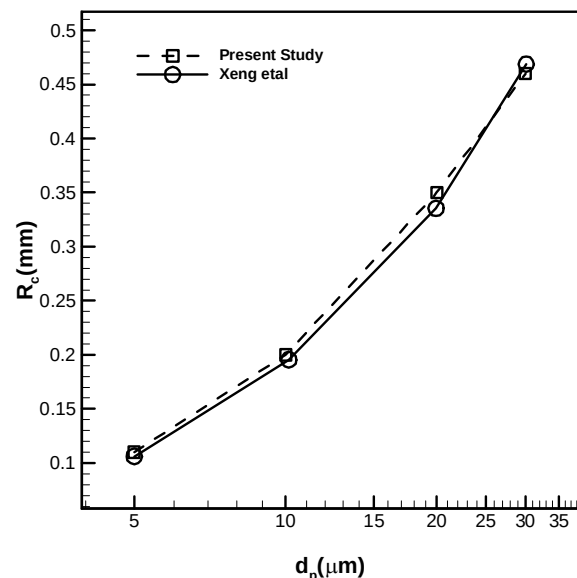
۵- نتایج

شکل ۴ خطوط جریان را برای دو آرایش مثلثی و مستطیلی برای سرعت یکنواخت ورودی برابر با $U_0 = 0.05 \text{ m/s}$ ، فاصله عرضی $H = 0.14 \text{ cm}$ و قطر ذرات برابر با $d_p = 0.6 \mu\text{m}$ نشان می‌دهد در قسمت‌های بعدی مقاله از این شرایط با عنوان شرایط مبنا یاد می‌شود.



شکل ۴ (۴) خطوط جریان برای دو آرایش میله‌ها در ماتریس مغناطیسی: (a) مستطیلی، (b) مثلثی ($U_0 = 0.05 \text{ m/s}$, $H = 0.14 \text{ cm}$, $d_p = 0.6 \mu\text{m}$)

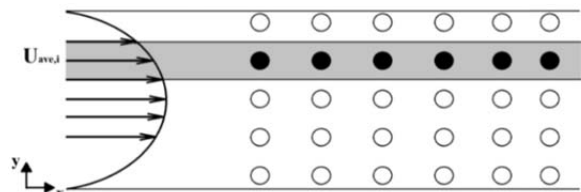
همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌خاطر کوچک بودن عدد رینولدز جریان ($Re_p \approx 1$)، خطوط جریان تقریباً به‌صورت متقارن دور میله‌ها را پیمایش نموده و هیچ‌گونه گردابه‌ای ایجاد نمی‌کنند. ضمناً مشاهده می‌شود که جریان در آرایش مثلثی امکان جذب ذرات درون جریان بیشتر است چرا که برخلاف آرایش مستطیلی خطوط جریان نمی‌توانند به مسیر مستقیم خود ادامه دهند و در اثر قرارگیری ماتریس‌ها در مسیر مستقیم جریان مجبور به انحراف از مسیر اولیه می‌شوند و امکان قرارگیری ذرات در معرض حوزه مغناطیسی فعال میله‌ها بیشتر می‌شود.



نمودار ۳) اعتبارسنجی نتایج مطالعه حاضر با داده‌های مرجع [5] برای شعاع جذب یک میله مغناطیسی

۴- روش مدل‌سازی فیلتر سه‌بعدی

ایده اصلی روش مدل‌سازی عملکرد فیلتر مغناطیسی در یک کانال مربعی در مقاله حاضر بر گرفته از مرجع [12] می‌باشد و اساس آن به‌صورت شماتیک در شکل ۳ آمده است.



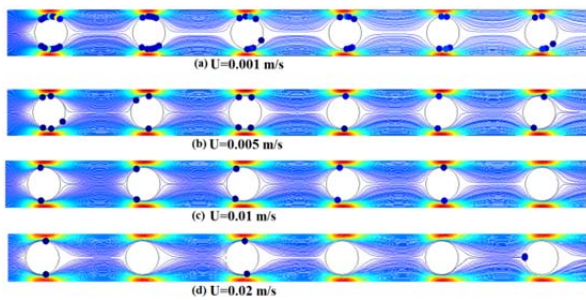
شکل ۳) نحوه محاسبه سرعت برخوردی برای یک ردیف از میله‌های مغناطیسی

روش مدل‌سازی به گونه‌ای است که عملکرد جذب فیلترهای سه‌بعدی بر مبنای تعمیم نتایج دوبعدی حاصل شده است. ابتدا برای یک ردیف مشخص از میله‌ها (که در شکل ۳ با اندیس i و سرعت برخوردی به آنها با $U_{ave,i}$ نشان داده شده است) توسط شبیه‌سازی دوبعدی، بازدهی جذب برای قطرهای مختلف ذرات، سرعت‌های متفاوت جریان ($U_{ave,i}$) و پارامترهای مختلف هندسی ماتریس به‌دست آمده است. توسط این نتایج یک پایگاه داده مناسب در حیطه متغیرهای حاکم تولید شده است. در شبیه‌سازی سه‌بعدی با توجه به اینکه سرعت‌های برخوردی به میله در جهت عمق کانال متفاوت است، لذا با کمک پایگاه داده مربوط به مسئله جذب دوبعدی، در راستای طول میله سرعت‌های محلی در نظر گرفته شده است و برای محاسبه جذب کلی، انتگرال‌گیری عددی در طول میله صورت گرفته شده است. داده‌های لازم برای سرعت‌های محلی در عمق میله از روابط تحلیلی میدان سرعت در کانال مربعی [21] به‌دست آمده است. به این ترتیب تعداد ذرات جذب‌شده روی یک ردیف از میله با جریان سه‌بعدی عبارت است از:

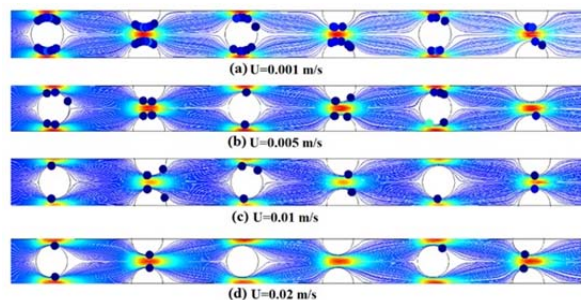
$$N_{c,i} = \frac{N_{t,i}}{H} \int_0^L C.E(u_i) dz \quad (9)$$

که در این رابطه $N_{c,i}$ تعداد ذرات جذب‌شده روی دسته میله افقی λ_m ، $N_{t,i}$ برابر با تعداد ذرات برخوردکننده با دسته میله افقی λ_m

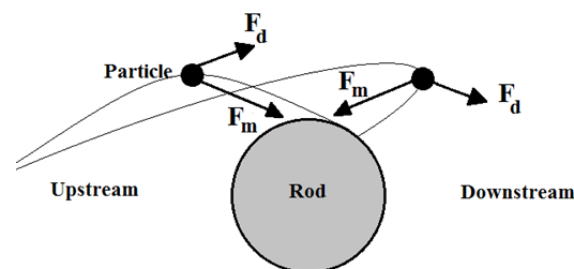
شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود جذب ذرات در نواحی سطوح بالا و پایین میله‌ها رخ می‌دهد. زیرا در اثر اعمال میدان مغناطیسی متقاطع با جریان، در محل رئوس میله‌ها تشدید میدان مغناطیسی رخ می‌دهد و همچنین جذب ذرات روی میله‌ها با سرعت ورودی به کانال رابطه عکس دارد. ضمناً میله‌های پایین‌دست جذب کمتری نسبت به میله‌های بالادست دارند چرا که در معرض تعداد کمتری از ذرات هستند. این نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد تعداد میله‌ها در ماتریس مغناطیسی در یک ردیف افقی اثر چندان زیادی بر جذب ذرات ندارد. همچنین میزان جذب ذرات در آرایش مثلی بیشتر از جذب آن‌ها در آرایش مستطیلی است. دلیل این پدیده افزایش امکان برخورد ذرات با میله‌ها است که به دلیل آرایش میله‌ها می‌باشد که باعث می‌شود که ذرات بیشتر تحت تأثیر میدان مغناطیسی میله‌ها قرار گرفته و بیشتر جذب میله‌ها شوند. مشاهده می‌شود ذرات روی میله‌ها بیشتر تمایل دارند که در سمت راست و بالای آن‌ها جذب شوند. دلیل این پدیده این است که مطابق شکل ۹ از آنجا که در ناحیه مجاور سطح میله اندازه نیروی مغناطیسی نسبت به نیروی درگ جریان وارد بر ذرات بزرگ‌تر است، برآیند دو نیروی مذکور هم در بالادست جریان و هم در پایین‌دست جریان به سمت سطوح بالا و پایین نیمه سمت راست سطح مقطع میله مغناطیسی خواهد بود.



شکل ۷ جذب ذرات هم‌قطر روی میله‌ها در ۴ سرعت یکنواخت ورودی در آرایش مستطیلی



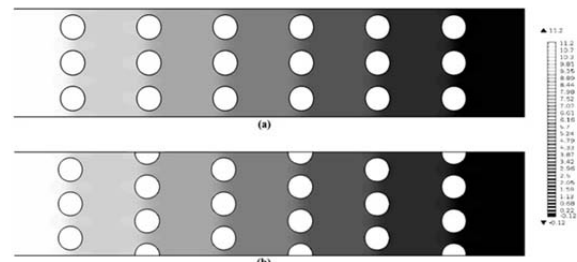
شکل ۸ جذب ذرات هم‌قطر روی میله‌ها در ۴ سرعت یکنواخت ورودی در آرایش مثلی



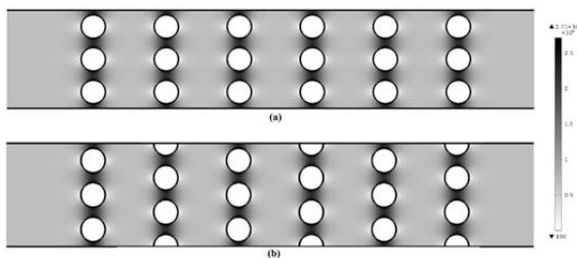
شکل ۹ کروکی نیروهای مؤثر بر حرکت ذره در جریان بالادست و پایین‌دست میله‌های مغناطیسی

در شکل ۵ نیز خطوط فشار بر حسب پاسکال در داخل سیستم دوبعدی مینا نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین افت فشار تقریباً به اندازه ۱۱/۲ Pa می‌باشد که انطباق مناسبی با مقدار افت فشار به‌دست آمده از کارهای قبلی دارد [22] و در هر دو آرایش تقریباً برابر می‌باشد. شکل ۵ بیانگر این است که در سرعت‌های مورد مطالعه افت فشار وابستگی زیادی به آرایش قرارگیری میله‌ها در ماتریس مغناطیسی ندارد.

شکل ۶ نیز شدت میدان مغناطیسی (H) بر حسب آمپر بر متر در اطراف مجموعه میله‌ها برای دو آرایش مذکور در سیستم دوبعدی مینا را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در بالا و پایین میله‌ها بیشترین مقدار شدت میدان برابر با $2/71 \times 10^4 \text{ A/m}$ است. دلیل این موضوع اعمال میدان مغناطیسی در راستای متقاطع با جریان بر میله‌های مغناطیسی می‌باشد که باعث تشدید میدان مغناطیسی در رئوس بالا و پایین میله‌ها می‌شود که در نتیجه آن جذب ذرات مغناطیسی در این نقاط ممکن می‌گردد. ضمناً شدت میدان مغناطیسی در سطوح راست و چپ میله‌ها دارای مقدار کمینه خود یعنی 199 A/m است. از آنجا که نیروی مغناطیسی طبق رابطه (۵) با شدت میدان رابطه مستقیم دارد، لذا انتظار می‌رود جذب ذرات در بالا و پایین میله‌ها بیشتر رخ دهد. ضمناً همان طور که از شکل ۶ مشخص است وجود میله‌ها در کنار هم موجب تقویت میدان خارجی، افزایش گرادیان میدان مغناطیسی (∇H) در اطراف آن‌ها و در نتیجه افزایش نیروی جاذبه مغناطیسی و نفوذ بیشتر میدان مغناطیسی در داخل سیال می‌گردد.



شکل ۵ کانتورهای فشار بر حسب پاسکال در شرایط مینا برای آرایش‌های مختلف میله‌ها: (a) آرایش مستطیلی، (b) آرایش مثلی

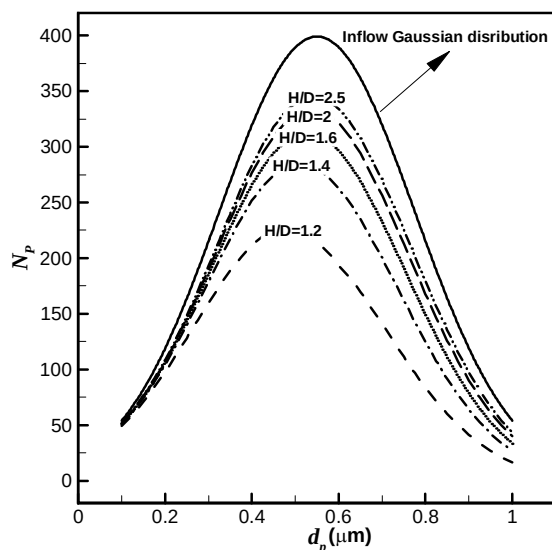


شکل ۶ کانتورهای شدت میدان مغناطیسی (H) بر حسب آمپر بر متر در شرایط مینا برای آرایش‌های مختلف میله‌ها: (a) آرایش مستطیلی، (b) آرایش مثلی

شکل ۷ و شکل ۸ جذب ذرات به ازای ورود یک توزیع یکنواخت ذرات به سیستم روی میله‌ها را به ازای ۴ سرعت مختلف جریان ورودی به سیستم را در آرایش‌های مستطیلی و مثلی میله‌ها نشان می‌دهد. تعداد ۵۰ ذره از ورودی سمت چپ وارد سیستم می‌شوند و از خروجی سمت راست از آن می‌شوند باید توجه داشت زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ ثانیه در نرم‌افزار لحاظ شد. با توجه به

است. همچنین مطابق با نمودار ۴ در بازه قطرهای $(0.7 \mu m < d_p)$ مشاهده می‌شود جذب ذرات بیشترین مقادیر را دارد. به عنوان مثال به ازای ورود طیفی که تعداد ذرات با $(0.6 \mu m < d_p)$ در آن ۳۷۰ عدد و تحت جریان با $Re_D = 0.5$ می‌باشد، تنها ۱۹۰ ذره با این قطر ذرات در خروجی باقی می‌ماند. همچنین قله نمودار طیف‌های خروجی نسبت به قله طیف ورودی به چپ متمایل شده که علت این پدیده تمایل کمتر ذرات ریزتر برای جذب در سیستم می‌باشد. دلیل این اتفاق این است که با توجه روابط ۵ و ۶ به ترتیب نیروی مغناطیسی و نیروی پسا وارد بر ذرات با قطر آن‌ها با توان سوم و دوم رابطه مستقیم دارند که این امر باعث می‌شود که با افزایش قطر ذرات اثر نیروی مغناطیسی بر حرکت ذرات نسبت به نیروی پسا غالب‌تر باشد و جذب ذرات در اثر افزایش قطر آن‌ها افزایش یابد.

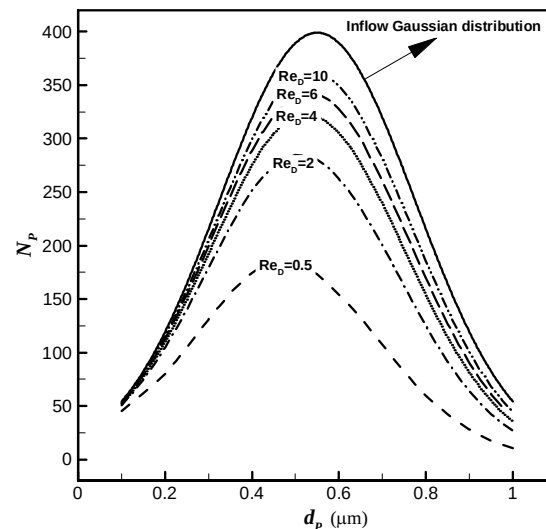
نمودار ۵ میزان تعداد ذرات خروجی از فیلتر مغناطیسی HGMS با آرایش مستطیلی به ازای ورود یک طیف گاوسی از ذرات با اندازه‌های مختلف و برای فواصل عرضی بی‌بعد مختلف بین میله‌ها در حالتی که عدد رینولدز جریان $Re_D = 2$ می‌باشد را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش فواصل عرضی بین میله‌ها میزان ذرات در خروجی فیلتر افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که با افزایش فاصله مذکور میزان هم پوشانی میدان مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی $(\vec{H})$ ، چگالی شار مغناطیسی $(\vec{B})$ و تقویت‌شدگی آن‌ها در فواصل بین میله‌ها کاهش می‌یابد. در نتیجه نفوذ نیروی مغناطیسی در سیال به خاطر کاهش گرادیان مغناطیسی (∇H) آن طبق رابطه (۵) کم می‌شود. بنابراین در فواصل عرضی زیاد بین میله‌ها نیروی پسا اثر غالب را روی حرکت ذرات می‌گذارد و این به معنای جذب کمتر ذرات است. از نمودار مذکور به وضوح مشخص است که ذرات با قطر کمتر $(d_p = 0.1 \mu m)$ عملاً دست نخورده از فیلتر خارج می‌شوند، حال آنکه ذرات با قطر بالاتر $(d_p = 1 \mu m)$ به‌طور کامل جذب میله‌ها می‌شوند. همچنین بیشترین میزان جذب در قطرهای میانی مربوط به طیف $(0.7 \mu m < d_p)$ رخ می‌دهد و نقطه ماکزیمم جذب به سمت چپ گرایش پیدا می‌کند که دلیل آن جذب کمتر ذرات با قطرهای کوچک است.



نمودار ۵ طیف تعداد ذرات خروجی از فیلتر HGMS سه‌بعدی با آرایش مستطیلی به ازای ورود طیف گاوسی ذرات در فواصل عمودی مختلف بین میله‌ها در $Re_D = 2$

۵-۱- عملکرد فیلتر مغناطیسی HGMS سه‌بعدی به ازای ورود طیف ذرات با توزیع گاوسی از قطرهای مختلف

از آنجا که در صنایع فیلترهای سه‌بعدی جهت جداسازی طیف مختلفی از ذرات با اندازه‌های مختلف به کار می‌روند، لذا مهم است که عملکرد این فیلترها برای جداسازی طیف مختلفی از اندازه ذرات مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که طیف گاوسی بر بسیاری از پدیده‌های طبیعی حاکم است لذا در ادامه عملکرد فیلتر مغناطیسی HGMS مورد نظر به ازای این طیف از ذرات مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نمودار ۴ طیف ذرات در خروجی فیلتر با آرایش مستطیلی را به ازای اعداد رینولدز مختلف جریان و برای فاصله عرضی بی‌بعد بین میله‌ها برابر با $H/D = 1/4$ نشان می‌دهد.



نمودار ۴ اثر عدد رینولدز بر طیف ذرات خروجی از فیلتر HGMS سه‌بعدی در آرایش مستطیلی به ازای ورود طیف گاوسی ذرات در $H/D = 1/4$

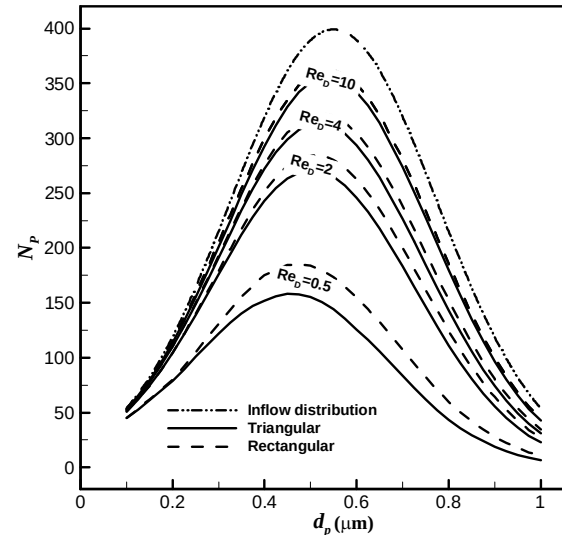
طیف ورودی به‌صورت توزیع گاوسی از ذرات با اندازه قطرهای مختلف در بازه 0.1 تا 1 میکرومتر است. رابطه طیف گاوسی این ذرات به فرم زیر می‌باشد:

$$f(x) = \frac{1000}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) \quad (13)$$

که در آن x در بازه $(-2, 2)$ است و با استفاده از یک تغییر متغیر خطی با قطر ذرات رابطه دارد به نحوی که کمترین قطر مورد مطالعه با کران $x = -2$ و بیشترین قطر مورد مطالعه با کران $x = 2$ مرتبط است. همان‌طور که از نمودار ۴ مشخص است، با افزایش عدد رینولدز جریان تعداد ذرات موجود در خروجی افزایش می‌یابد که این امر به خاطر افزایش اثر نیروی پسای وارد بر ذرات و چیره‌شدن آن بر نیروی مغناطیسی وارد بر ذره است. افزایش تعداد ذرات خروجی ناشی از جریان‌های با اعداد رینولدز بالا به معنای بازدهی جذب نامناسب فیلتر در این شرایط است. همچنین مشاهده می‌شود که شدت جذب ذرات در اعداد رینولدز پایین، بسیار بالاست به گونه‌ای که اختلاف بازدهی جذب در دو جریان با اعداد رینولدز پایین متوالی نسبت به جریان‌های مشابه با رینولدزهای بالاتر، بسیار بیشتر است. لذا فیلتراسیون ذرات در جریان‌های با اعداد رینولدز کوچک، بیشتر می‌باشد. برای ذرات با اندازه‌های کوچک $(d_p = 0.1 \mu m)$ تقریباً تعداد ذرات ورودی و خروجی برابر است و در نتیجه تقریباً هیچ فیلتراسیونی رخ نمی‌دهد. اما برای ذرات با قطرهای بزرگ $(d_p = 1 \mu m)$ و اعداد رینولدز کم $(Re_D = 0.5)$ تعداد ذرات خروجی تقریباً صفر می‌شود که به معنای جذب کامل ذرات

۵-۲- عملکرد فیلتر مغناطیسی HGMS به ازای ورود طیف گاوسی از ذرات با اندازه‌های مختلف

در نمودار ۶ نمودار تعداد ذرات در خروجی فیلتر مغناطیسی HGMS با آرایش مثلثی در مقایسه با فیلتر مغناطیسی HGMS با آرایش مستطیلی به ازای ورود طیف گاوسی از ذرات برای اعداد رینولدز جریان مختلف در حالت $H/D = 1/4$ نشان داده شده است.

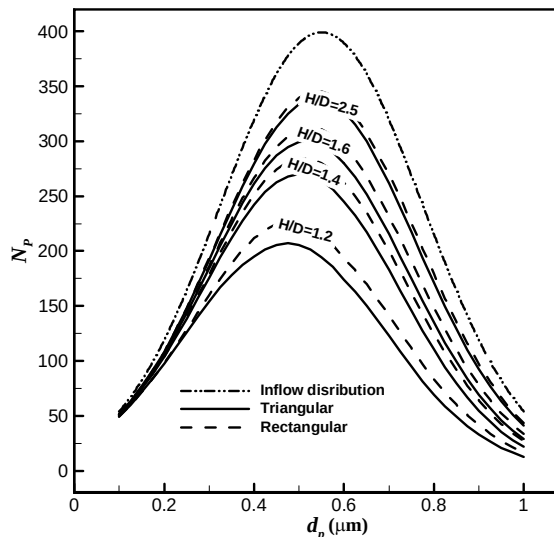


نمودار ۶) مقایسه طیف اندازه ذرات خروجی از فیلتر مغناطیسی HGMS در دو آرایش مستطیلی و مثلثی میله‌ها به ازای ورود طیف گاوسی ذرات در ورودی برای اعداد رینولدز مختلف در حالت $H/D = 1/4$

همان طور که از نمودار ۶ مشخص است، رفتار جذب فیلتر مغناطیسی HGMS با آرایش مثلثی دقیقاً مشابه رفتار جذب فیلتر مغناطیسی HGMS با آرایش مستطیلی است. با این وجود همواره تعداد ذرات خروجی فیلتر با آرایش مستطیلی از فیلتر مغناطیسی HGMS با آرایش مثلثی بیشتر است. دلیل این امر این است که بیشتر بودن اختلاط جریان ناشی از بی‌نظمی ذاتی قرارگیری میله‌های آرایش مثلثی در برابر جریان و بیشتر بودن زمان ماندگاری ذرات در داخل سیستم و در نتیجه قرارگیری بیشتر آن‌ها در معرض گرادیان میدان مغناطیسی خود باعث بالاتر رفتن جذب ذرات روی میله‌ها در آرایش مثلثی می‌شود. ضمناً این اختلاف با افزایش عدد رینولدز جریان کمتر می‌شود. دلیل این امر این است که برای اعداد رینولدز بالا ($Re_D = 10$) نیروی پسا نیروی غالب بر حرکت ذرات است. لذا حتی در هم پیچیدن‌های جریان هم نمی‌تواند تأثیر زیادی بر اثر نیروی پسا روی ذرات بگذارد. پس اکثر ذرات فارغ از نوع آرایش میله‌ها در ماتریس مغناطیسی، بدون اینکه جذب میله‌ها شوند همراه با سیال از کنار میله‌ها می‌گذرند و جذب آن‌ها نمی‌گردند. برعکس برای اعداد رینولدز پایین ($Re_D = 1$) نیروی پسا اثر کمتری روی ذره دارد و ذرات هنگامی که در معرض سطوح میله‌های موجود قرار می‌گیرند، بیشتر تحت اثر میدان مغناطیسی هستند و لذا بیشتر جذب میله‌ها می‌شوند.

نمودار تعداد ذرات خروجی از فیلتر مغناطیسی HGMS با آرایش مثلثی در مقایسه با آرایش مستطیلی برای کانال مربعی برای فواصل عرضی مختلف به ازای ورود یک طیف گاوسی از ذرات به سیستم در حالتی که عدد رینولدز جریان $Re_D = 2$ است، در نمودار ۷ رسم شده است. همان طور که از نمودار ۷ مشخص است، تعداد ذرات خروجی فیلترهای با آرایش مستطیلی همواره بیشتر از

فیلترهای با آرایش مثلثی است و این اختلاف با افزایش فواصل عرضی کاهش می‌یابد. علت این پدیده کاهش نفوذ نیروی مغناطیسی در داخل جریان و محدود شدن آن به کنار دیواره میله‌ها و در نتیجه کاهش شعاع جذب میله‌ها در سیال است که در نتیجه اغلب ذرات در داخل فواصل عرضی بین میله‌ها مسیرهایی را تحت نیروی پسا می‌پیمایند که به دور از دیواره میله‌ها و ناحیه نفوذ نیروی مغناطیسی است. در این حال جذب انجام‌گرفته که برای هر دو آرایش تقریباً یکسان است، تنها محدود به ذراتی است که از ناحیه کنار دیواره میله‌ها و حوزه نفوذ نیروی مغناطیسی عبور می‌کنند.



نمودار ۷) توزیع ذرات خروجی در دو آرایش مستطیلی و مثلثی میله‌ها برای مقادیر مختلف H/D وقتی که توزیع ذرات ورودی به‌صورت توزیع گاوسی باشد: ($Re_D = 2$)

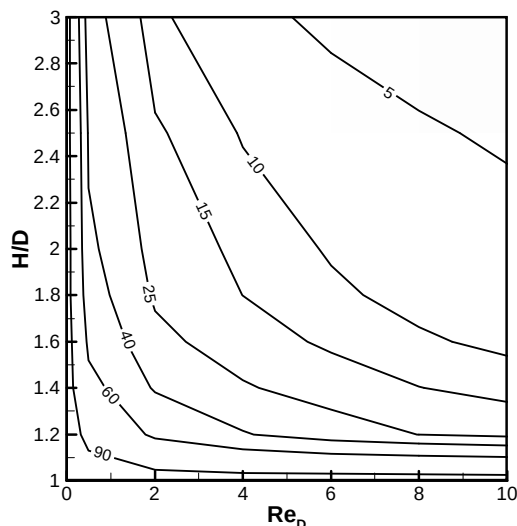
۵-۳- بررسی اثر عدد رینولدز بر بازدهی جرمی جذب

از آنجا که در بررسی عملکرد فیلترها در صنعت میزان جذب ذرات معلق در سیال اهمیت دارد. لذا در ادامه بازدهی جرمی جذب فیلترهای مغناطیسی HGMS با آرایش مستطیلی و مثلثی به ازای ورود طیف گاوسی از ذرات با قطرهای مختلف مورد قیاس قرار می‌گیرد. نمودار ۸ نمودار بازدهی جذب جرمی فیلترهای مغناطیسی HGMS با آرایش‌های مثلثی و مستطیلی به ازای ورود طیف گاوسی از ذرات با اندازه‌های مختلف بر حسب عدد رینولدز جریان در حالتی که فاصله عرضی بی‌بعد $H/D = 1/4$ است را نشان می‌دهد. همان طور که در نمودار ۸ دیده می‌شود، میزان بازدهی جذب جرمی فیلتر مغناطیسی HGMS با آرایش مثلثی از آرایش مستطیلی همواره بیشتر است. این اختلاف همان طور که در بخش ۵-۲ ذکر شد با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. دلیل این امر هم‌گالب شدن اثرات نیروی پسا بر حرکت ذرات فارغ از نوع آرایش میله‌ها می‌باشد.

۵-۴- بررسی اثر فاصله عرضی بی‌بعد بر بازدهی جرمی جذب فیلتر

نمودار ۹ بازدهی جرمی کل فیلترهای مغناطیسی HGMS با آرایش مثلثی و مستطیلی را بر حسب فاصله عرضی بی‌بعد بین میله‌ها (H/D) به ازای ورود طیف گاوسی از ذرات با قطرهای مختلف را در حالتی که عدد رینولدز جریان ورودی $Re_D = 2$ را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار ۹ مشاهده می‌شود که کاهش عدد رینولدز جریان باعث بهبود عملکرد فیلتر مغناطیسی در هر دو آرایش قرارگیری

دستیابی به بازدهی جرمی جذب $C.E_m = 40\%$ می‌توان فیلتری با فاصله عرضی $H/D = 1/4$ و جریان با عدد رینولدز $Re_D = 2$ را انتخاب نمود. ضمناً این کانتور نشان می‌دهد به ازای فواصل عرضی بی‌بعد کمتر از $H/D \leq 1/2$ بازدهی جرمی جذب فیلتر سه بعدی با آرایش مستطیلی همواره بیش از 40% است. بعلاوه برای اعداد رینولدز $Re_D \leq 2$ بازدهی جرمی جذب فیلتر بیش از 15% خواهد بود. همچنین در ناحیه با $Re_D \geq 6$ و $H/D \geq 2/5$ جذب جرمی توسط فیلتر حداکثر 10% می‌باشد و به ازای $Re_D \leq 2$ و $H/D \leq 1/2$ حداقل بازدهی جذب جرمی فیلتر 60% است.



نمودار ۱۰) کانتورهای بازدهی جذب جرمی برای یک فیلتر سه بعدی با آرایش مستطیلی به ازای طیف گاوسی ذرات در ورودی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل کاربردی برای بررسی عملکرد فیلترهای سه بعدی مغناطیسی در یک کانال مربعی ارائه شده است. توسط این مدل می‌توان با هزینه محاسباتی اندک اثر پارامترهای مختلف مانند قطر ذرات، فاصله عرضی بین میله‌ها، سرعت جریان برخوردی و نحوه آرایش میله‌ها را بر عملکرد جذب ذرات مطالعه نمود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- میله‌های پایین دست جذب کمتری نسبت به میله‌های بالادست دارند و از حد معینی به بعد افزایش میله‌ها در راستای طول کانال اثر اندکی بر افزایش بازدهی جذب ذرات دارد.
- آرایش‌هایی که باعث افزایش بیشتر گردان مغناطیسی می‌شوند، میزان جذب بیشتری مهیا می‌کنند.
- با افزایش قطر ذرات میزان جذب آن‌ها توسط ماتریس میله‌ها افزایش می‌یابد.

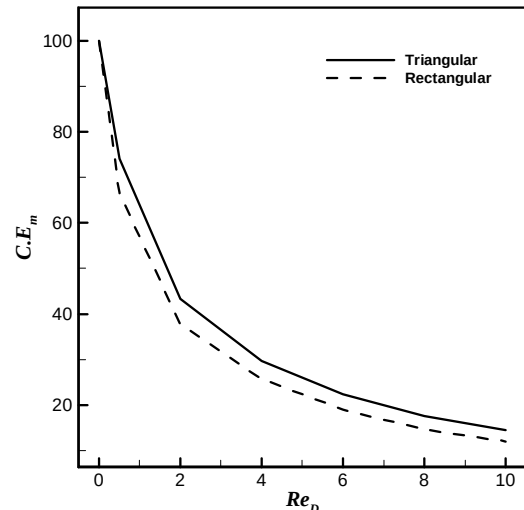
- با افزایش عدد رینولدز جریان بر مبنای قطر میله‌ها، اندازه بازدهی جذب فیلتر مغناطیسی گردان بالا کاهش می‌یابد.

- افزایش فاصله عرضی بین میله‌ها باعث کاهش بازدهی عملکرد جذب سیستم‌های HGMS می‌شود.

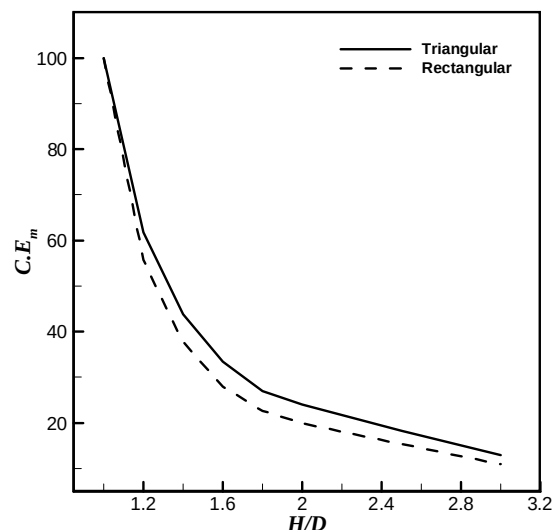
- در شرایط یکسان عملکرد فیلترهای HGMS با آرایش مثلثی نسبت به آرایش مستطیلی مناسب‌تر است و اختلاف عملکرد این دو آرایش با کاهش قطر ذرات و افزایش فاصله عرضی بین میله‌ها و افزایش عدد رینولدز جریان کاهش می‌یابد.

- با رسم کانتور بازدهی جذب برای یک طیف از ذرات با قطرهای مختلف مشخص شد که به ازای فواصل عرضی بی‌بعد کمتر از $H/D \leq 1/2$ بازدهی جرمی جذب فیلتر سه بعدی با آرایش

میله‌ها در ماتریس مغناطیسی می‌گردد. می‌توان دریافت که بازدهی جرمی جذب ذرات مغناطیسی برای فیلترهای با آرایش مثلثی همواره از آرایش مستطیلی بیشتر است. این اختلاف بازدهی جذب به همان دلایلی که در بخش ۵-۲ ذکر شد با افزایش فاصله عرضی و در نتیجه کاهش نفوذ گردان میدان مغناطیسی و کاهش همپوشانی میدان مغناطیسی در داخل جریان کاهش می‌یابد.



نمودار ۸) بازدهی جذب جرمی فیلتر برای چیدمان‌های مختلف میله‌ها بر حسب عدد رینولدز (توزیع گاوسی در ورودی و برای $H/D = 1/4$)



نمودار ۹) بازدهی جذب جرمی فیلتر برای چیدمان‌های مختلف میله‌ها بر حسب فاصله عمودی بین میله‌ها (توزیع گاوسی در ورودی و برای $Re_D = 2$)

۵-۵- کانتور بازدهی جذب جرمی فیلتر سه بعدی

در شرایط عملیاتی مختلف برای انتخاب فیلترها جهت فیلتراسیون جریان حاوی ذرات با طیف قطرهای مختلف، کانتورهای عملکرد فیلتر بسیار کاربردی هستند. لذا در این بخش یک نمونه از این نمودارها که از پس پردازش‌های متعددی به دست آمده در نمودار ۱۰ ارائه می‌شود. در این نمودار کانتور بازدهی جذب جرمی فیلتر سه بعدی با آرایش مستطیلی به ازای ورود طیف گاوسی از ذرات با قطرهای مختلف بر حسب فاصله عرضی بی‌بعد بین میله‌ها و اعداد رینولدز جریان ورودی به فیلتر رسم شده است. این کانتور برای بررسی عملکرد فیلتر به ازای فواصل عرضی و جریان‌های عبوری مختلف از فیلتر بسیار مفید می‌باشد. به عنوان مثال برای

2014;105(3):033508.

10- Zheng X, Wang Y, Lu D. A realistic description of influence of the magnetic field strength on high gradient magnetic separation. *Minerals Engineering*. 2015;79:94-101.

11- Xu F, Chen A. Calculation of Evaluation Variables for High Gradient Magnetic Separation with an Idealized Capture Model. *arXiv preprint arXiv:1611.09481 (Physics - Fluid Dynamics)*. 2016 Nov:1-11.

12- Li L, Greenberg PS, Jr Street KW, Chen DR. Study of a magnetic filter system for the characterization of particle magnetic property. *Aerosol Science and Technology*. 2011;45(3):327-335.

13- Khashan SA, Alazzam A, Furlani EP. Computational analysis of enhanced magnetic bioseparation in microfluidic systems with flow-invasive magnetic elements. *Scientific Reports*. 2014;4.

14- Chen L, Qian Z, Wen S, Huang S. High-gradient magnetic separation of ultrafine particles with rod matrix. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2013;34(5):340-347.

15- Zeng W, Dahe X. The latest application of SLon vertical ring and pulsating High-gradient magnetic separator. *Minerals Engineering*. 2003;16(6):563-565.

16- Huang S, Park H, Park YK, Jo YM. Dynamic Trajectory and capture of fine dust magnetic mesh filters based on a particle velocity model. *Aerosol Science and Technology*. 2015;49(8):633-642.

17- Nakamura Y. Physical properties of alkali metal-ammonia (amine) solutions studied by magnetic resonance methods. *Journal de Physique IV Colloque*. 1991;01(C5):61-70.

18- Hunt CP, Moskowitz BM, Banerjee SK. Magnetic properties of rocks and minerals. In: Ahrens TJ, editor. *Rock physics & phase relations: A handbook of physical constants*. Washington: American Geophysical Union; 1995. pp.189-204.

19- Zaichik LI, Pershukov VA, Kozelev MV, Vinberg AA. Modeling of dynamics, heat transfer, and combustion in two-phase turbulent flows: 1. Isothermal flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1997;15(4):291-310.

20- Askari Lasaki S, Shojaefard, M. Mathematical modeling of potential flow over a rotating cylinder. *International Journal of Engineering Transactions A: Basics*. 2011;24(1):55-63.

21- Bejan A. *Convection heat transfer*. 4th Edition. Hoboken: John Wiley & sons; 2013.

22- Huang S, Zhang X, Tafu M, Toshima T, Jo Y. Study on subway particle capture by ferromagnetic mesh filter in nonuniform magnetic field. *Separation and Purification Technology*. 2015;156 Pt 2:642-654.

مستطیلی همواره بیش از ۴۰٪ است. ضمناً برای اعداد رینولدز $Re_D \leq 2$ بازدهی جرمی جذب فیلتر بیش از ۱۵٪ خواهد بود. تحت همین شرایط در ناحیه با $Re_D \geq 6$ و $H/D \geq 2/5$ جذب جرمی توسط فیلتر کمتر از ۱۰٪ می‌باشد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Yamamoto J, Mori T, Akiyama Y, Okada H, Hirota N, Matsuura H, et al. Removal of Iron scale from boiler feed-water in thermal power plant by magnetic separation: Large-scale experiment. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019;29(5).
- 2- Zheng X, Wang Y, Lu D. Study on capture radius and efficiency of fine weakly magnetic minerals in high gradient magnetic field. *Minerals Engineering*. 2015;74:79-85.
- 3- Barnes DR, inventor. Magnetic trap for removal of iron from amines. United States Patent US6077332A. 2000 June 20.
- 4- Watson JHP. Magnetic filtration. *Journal of Applied Physics*. 1973;44(9):4209-4213.
- 5- Zheng X, Wang Y, Lu D. Investigation of the particle capture of elliptic cross-sectional matrix for high gradient magnetic separation. *Powder Technology*. 2016;297:303-310.
- 6- Zheng X, Wang Y, Lu D, Li X, Li S, Chu H. Comparative study on the performance of circular and elliptic cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: Role of the applied magnetic induction. *Minerals Engineering*. 2017;110:12-19.
- 7- Hayashi S, Mishima F, Akiyama Y, Nishijima S. Development of high gradient magnetic separation system for removing the metallic wear debris to be present in highly viscous fluid. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2010;470(20):1822-1826.
- 8- Kim YG, Song JB, Yang DG, Lee JS, Park YJ, Kang DH, et al. Effects of filter shapes on the capture efficiency of a superconducting high-gradient magnetic separation system. *Superconductor Science and Technology*. 2013;26(8):085002.
- 9- Eisenträger A, Vella D, Griffiths IM. Particle Capture efficiency in a multi-wire model for high gradient magnetic separation. *Applied Physics Letters*.