دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران ، ایران، ۲۲ تا ۲۴ اردیبهشت ۱۳۹۴

# بررسی عددی پدیدهی اختلاط مغناطیسی درون ریزمجراها در حالت پایا

## داود نوری'، محمد پسندیده فرد<sup>۲</sup>

davoud.nouri@yahoo.com ، دانشکاه فردوسی مشهد / دانشکده مهندسی، mpfard@um.ac.ir الاشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک /دانشگاه فردوسی مشهد/دانشکده مهندسی،

## چکیدہ

در این مقاله به بررسی عددی پدیده اختلاط آب دی یونیزه و فروسیال Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> در یک ریزمجرای Y شکل در مجاورت یک میدان مغناطیسی حاصل از یک آهنربای دائمی پرداخته شده است. این فرایند توسط نرم افزار کامسول و در حالت دو بعدی و پایا شبیه سازی شده است. نتایج حاصل از روش عددی با نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی صورت گرفته توسط همین گروه اعتبار سنجی شده اند. نیروی مغناطیسی وارد شده به نانوذرات مغناطیسی سبب کشیده شدن آنها به سمت آب و بهبود راندمان اختلاط می شود. در این پژوهش تأثیر پارامترهای قدرت میدان مغناطیسی و دبی عبوری از ریزمجرا بر بازده اختلاط بررسی شده است. نتایج حاکی از افزایش چشمگیر راندمان اختلاط در میکرومیکسر مذکور در حضور میدان مغناطیسی نسبت به حالت عادی است. افزایش قدرت میدان، افزایش راندمان اختلاط را در پی دارد درحالی که افزایش دبی سیال، راندمان اختلاط کاهش می یابد.

# **واژه های کلیدی** میکرومیکسر، نانوسیال مغناطیسی، بازده اختلاط

### مقدمه

در سالهای اخیـر وسایل میکروفلوئیـدیک<sup>۲</sup> بـه خـاطر کـاربردهای گسترده در زمینههای زیستی، داروسازی، بیوشیمی و صـنعت مـورد توجـه قـرار گرفتـهانـد. در حـالی کـه ریزمجراهـا، میکروفلوئیدیک میکرومیکسرها، میکروفیلترها و غیره از اجزای وسایل میکروفلوئیدیک به شمار میروند اما میکرومیکسر و پدیدهی اختلاط در آن به عنـوان یکی از بخش هـای مهـم و اساسـی ایـن سیسـتم هـا محسـوب میشود[۲٫۱]. به طورکلی اختلاط در میکرومیکسرها به دو نوع فعال خارجی اعمال شده موجب آشفتگی نمونه می شود و در میکرو میکسر غیر فعال سطح تماس و زمان تماس گونهها بر اساس طراحی خـاص شکل میکروکانالها افزایش مییابد. بهطورکلی در میکرومیکسـرهای غیرفعال از دو روش افزایش سطح تمـاس بـین دو مـاده یـا افـزایش

Microfluidic

افزایش سطح تماس دو سیال شامل لایه سازی، ترکیب مجدد، قطعه قطعه سازی و تمرکز هیدرودینامیکی جریان است. میکرومیکسرهای فعال به طور معمول از تکنیکهای آکوستیک/ اولتراسونیک، اختلال فشاری، هیدرودینامیک الکتریکی، تکنیک های حرارتی استفاده می کنند[۳]. استفاده از نانوذرات مغناطیسی در میکرومیکسرها یکی دیگر از روشهای موجود جهت بهبود بازده اختلاط است. از آنجا که ذرات مغناطیسی در فروسیال می توانند از یک میدان مغناطیسی خارجی تأثیر بپذیرند؛ اگر آهنربای دائمی در محل صحیحی بیرون از میکرومیکسر قرار بگیرد، بازده اختلاط بالایی بین فروسیال و نمونه محلول دیگر در میکرومیکسر قابل دست یابی است.ون<sup>7</sup> و همکاران[۴] به صورت تجربی و عددی به بررسی فرایند اختلاط نانو سیال و آب دی یونیزه در یک میکرومیکسر فعال، تحت میدان مغناطیسی پرداخته اند. در مطالعهی آنها میدان مغناطیسی توسط یک آهنربای الکتریکی تولید شده است و تاثیر جریان AC و DC و همچنین قدرت میدان مغناطیسی بر بازدهی اختلاط بررسی شده است. نتایج نشان داد در حالتی که پیک میدان مغناطیسی اعمال شده ۶۰Oe باشد، راندمان اختلاط در کمتر از ۲s به حدود ۹۵% می سد و همچنین تفاوت چشمگیری بین جریان AC و DC در شرایط پژوهش آنها، وجود نداشته است. مائو أو همكاران [۵] نیز مدلی از یک میکرومیکسر سریع را با استفاده از نانو سیال مغناطیسی ارائه دادهاند که بر پایهی استانداردهای ساخت وسایل میکرو ساخته شده است. تسای<sup>6</sup> و همکاران[۶] نیـز در کـاری آزمایشـگاهی بـه بررسـی اخــتلاط آب و نانوسـيال Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> در يـک ميکروميکسـر Y-شـکل یرداختهاند. برای این کار آهنربای دائمی با قدرت G ۲۲۰۰ مستقیماً در زیر محل اتصال شاخه های میکرومیکسر نصب شد. این کار به بهبود بازده اختلاط کمک کرد.

عدم استفاده از منبع انرژی الکتریکی که جهت ایجاد آهنربای الکتریکی در مطالعات قبلی استفاده شدهاست، عدم تولید گرما در نمونه و در نتیجه مناسب بودن جهت استفاده در کاربردهای بیولوژیک و دستیابی به بازده بالای اختلاط از مزایای روش استفاده از نانوسیال مغناطیسی در مجاورت یک میدان مغناطیسی حاصل از یک آهنربای دائمی است. در این پژوهش به ارائهی مدلی جهت مطالعهی عددی

COMSOL

Wen

Mao

Tsai

## شبیهسازی دینامیک سیالات محاسباتی

ریزمجرای مورد بررسی از نوع Y-شکل و با مقطع مستطیلی با عرض ۵۰.۵mm در شاخهها و کانال اصلی میباشد. طول کانال اصلی اختلاط ۳.۵cm است.آهنربای دائمی به طول ۵cm وعرض ۵cm موازی شاخهی اصلی میکروکانال و در فاصلهی ۱mm از لبهی بالایی آن قرار دارد.



شکل ۱: نمایی از محیط مورد بررسی

از شاخهی بالایی میکرومیکسر فوق، آب و از شاخهی پایینی نانو سیال مغناطیسی جریان دارد. دبی آب و فروسیال ورودی به شاخههای ریزمجرا یکسان است به طوری که دبی عبوری از شاخهی اصلی میکرومیکسر برابر با ۳۰۰۵٬۳۰۳، ۳۰۰ و ۴۰ هما میباشد که در هرسه حالت رژیم جریان آرام است. در این مدل از فروسیال Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> با درصدهای وزنی ۲۱۲۵٬۰۰۵ و ۰۰۰۰ و دراتی با قطر میانگین ۴۰nm استفاده شده است. قدرت آهنربا هم بر حسب شار پسماند مغناطیسی در جهت عرضی آهنربا (جهت y) برای مقادیر ۲۰۰۰۵، ۲۰۰۰۵ و ۱۲۸۰۵ آزمایش شده است.

# معادلات حاکم و فرضیات

معادلات حاکم بر دینامیک سیال شامل معادلات مومنتوم و پیوستگی است که برای سیال تراکم ناپذیر در حالت پایا به صورت زیر بیان میشود:

فرم کلی معادله یجابجایی- پخش در حالت پایا به صورت زیر است:

$$\left(\vec{V}.\,\nabla\right)C = D\,\nabla^2C \tag{7}$$

در این معادله C غلظت گونه،  $ec{\mathcal{V}}$  بردار سرعت، D ضریب نفوذ بـین دو ماده است.

معادلات مربوط به میدان مغناطیسی نیز شامل معادلات زیر میباشند:

$\nabla . \vec{B} = 0$	(۴)
$\vec{B} = \mu_0 (\vec{M} + \vec{H})$	(۵)
$ abla  imes \vec{H} = 0$	(۶)
$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$	(Y)

در معادلات فوق که به معادلات ماکسول معروفند B، چگالی شار مغناطیسی است و واحد آن تسلا(T یا N/Am<sup>2</sup>) میباشد که معرف شار عبوری از واحد سطح است،  $\mu_0$  ضریب نفوذ پذیری خلأ،  $\overline{H}$  شدت میدان مغناطیسی خارجی(A/M)،  $\overline{M}$  مغناطیس پذیری فروسیال است و  $\overline{A}$  بردار پتانسیل مغناطیسی است. نیروی مغناطیسی وارد بر واحد حجم سیال در معادلهی (۲) از رابطهی زیر قابل محاسبه است:  $\overline{F} = \mu_0(\overline{M}.\nabla)\overline{H}$  (۸) (۸)  $\overline{F} = \mu_0(\overline{M}.\nabla)\overline{H}$  بنان مغناطیسی، توسط یک میدان به قدر کافی زمانی که یک ذرهی مغناطیسی، توسط یک میدان به قدر کافی بزرگ، مغناطیسی میشود، مغناطیس پذیری آن قبل از حالت اشباع به صورت زیر خواهد بود[۴و ۷]: (۹)

(۲)  $H_0 = M_0 = \chi \Pi C$  (۲) در معادله فوق،  $\overline{M}_0$  مغناطیس پذیری اولیه فوسیال، C غلظت گونه،  $\chi$  قابلیت مغناطیس پذیری فروسیال و  $\overline{H}$  شدت میدان مغناطیسی میباشد. با توجه به روابط فوق و در نظر گرفتن مغناطیسی در جهت x و y به صورت زیر قابل محاسبه اند[۴].

$$F_{mx} = \frac{C\chi}{\mu_0\mu_r F_{erro}^2} \left( \frac{\partial A_z}{\partial Y} \frac{\partial^2 A_z}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial A_z}{\partial X} \frac{\partial^2 A_z}{\partial X^2} \right)$$
(1.)  
$$F_{my} = -\frac{C\chi}{\mu_0\mu_r F_{erro}^2} \left( \frac{\partial A_z}{\partial X} \frac{\partial^2 A_z}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial A_z}{\partial Y} \frac{\partial^2 A_z}{\partial Y^2} \right)$$
(1.)

باید توجه داشت که در حین پدیـدهی اخـتلاط مقـدار ویسـکوزیته و چگالی مخلوط از روابط زیر محاسبه می شوند.

$$\rho = C\rho_{Ferro} + (1 - C)\rho_{Water} \tag{17}$$

$$\mu = \mu_F e^{R(1 - C)} \tag{17}$$

$$R = Ln(\frac{\mu_W}{\mu_F}) \tag{14}$$

$$\mu_F = \mu_w (1 + 2.5C) \qquad [\lambda] (1\Delta)$$

در ورودیهای کانال دبی حجمی<sup>۱</sup> به همراه ضخامت کانال برای دوسیال ورودی به عنوان شرط مرزی ورودی و در خروجی کانال شرط مرزی فشار خروجی اعمال شده است؛ همچنین در کلیهی دیوارهها شرط مرزی عدم لغزش<sup>۲</sup> اعمال شده است. همچنین در ورودی شاخهی پایینی کانال مقدار غلظت فروسیال به عنوان شرط مرزی وارد شده و در ورودی شاخهی بالایی کانال که نزدیک به آهنرباست مقدار غلظت صفر در نظر گرفته شده است. روی تمام دیواره ها شرط مرزی شار صفر، اعمال شده و در خروجی کانال هم

Flow rate `

No slip

شرط مرزی جریان خروجی ٔ اعمال شدهاست. در مورد میدان مغناطیسی، محیط حل به قدر کافی بزرگ در نظر گرفته شده و در مرز سیستم شرط مرزی عایق مغناطیسی ٔ اعمال شده است.

### نتايج

برای محاسبه بازده اختلاط ابتدا غلظت ها توسط رابطـه زیـر نرمـالایز می شوند.

$$c^* = \frac{c - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \tag{16}$$

که در این رابطه  $C_{min}$  و  $C_{max}$  به ترتیب غلظت کمینه و بیشینه درون ریزمجرا است. حال بازده اختلاط توسط رابطه(۱۷) که تسای و همکاران[۶] معرفی کردند، محاسبه می شود. این رابطه جهت محاسبهی راندمان اختلاط در طول کانال در مقاطع مختلف به کار گرفتهشده است.

$$ME = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left( \frac{c_i^* - \overline{c}^*}{\overline{c}^*} \right)$$
(17)

در این رابطه ME بازده اختلاط،  $\overline{c}^*$  میانگین غلظت نرمالایزشده ی گونهها در حالی است که اختلاط کامل انجام شده است.  $c_i^*$  غلظت نرمالایز شده در سلول i ام در مقطع مورد نظر و N تعداد سلول ها در مقطع مورد نظر است.

به منظور اعتبارسنجی کار عددی انجام شده، نتایج حاصل از شبیه سازی مسئله، با نتایج کار آزمایشگاهی صورت گرفته توسط همین گروه مقایسه شده اند. لذا سعی شده است شرایط شبیهسازی تا حد امکان به شرایط کار آزمایشگاهی شبیه باشد. به همین منظور از دبی، غلظت و قدرتهای مشابه در روند شبیهسازی استفاده شده است. در این آزمایش تصاویر گرفته شده توسط دوربین مدل MATLAB در رایانه ذخیره شده و به وسیله کد MATLAB پردازش شده اند. در شکل ۲ نمودار بازدهی اختلاط برحسب طول بی بعد ریزمجرا حاصل از کار آزمایشگاهی با نتایج عددی مقایسه شده است.



در این نمودار که مربوط به دبی ۶۰cc/min، قدرت ۲۰۰۰G و غلظت 0.05 درصد جرمی است، مشاهده می شود که نتایج عددی و تجربی با دقت بسیار بالایی با هم همخوانی دارند. شکل(۲) خاصیت مغناطیسی القایی توسط آهنربا (مغناطیس پذیری)

را نشان می دهد که یکی از نتایج حاصل از حل میدان مغناطیسی است. همانطور که دیده می شود فروسیال درون میکروکانال دارای خاصیت مغناطیسی شده است، این در حالی است که آب خالص که از شاخهی بالایی میکروکانال میگذرد و همچنین محیط اطراف آهنربا دارای هیچگونه مغناطیس پذیری نیستند.





برای بررسی تاثیر قدرت میدان مغناطیسی بر بازده اختلاط، مساله برای آهنربا هایی با قدرت ۲۸۰۰G، ۲۰۰۰G و ۳۰۰۰G و حالت بدون آهنربا در دبی عبوری ۳۰cc/min و غلظت ۰/۰۲۵ درصد جرمی بررسی شده اند. نتایج حاصل در شکل ۴ مشاهده می شود، قسمت پایین شکل مربوط به ۳cm انتهای ریزمجرا به ازای قدرتهای مختلف میدان خارجی میباشد. همانطور که دیده می شود با افزایش قدرت میدان مغناطیسی، بازده اختلاط افزایش می یابد زیرا با افزایش قدرت میدان خارجی، خاصیت مغناطیسی القا شده در فروسیال افزایش یافته و به تبع آن نیروهای مغناطیسی افزایش مییابد. با افزایش قدرت میدان از 2000G به 3000G میزان افزایش بازده ناچیز است که این موضوع بدان دلیل است که به ازای قدرت میدان خارجی 2000G خاصیت مغناطیس پذیری فروسیال به حد اشباع خود نزدیک شده است. همچنین در هر چهار مورد در طول میکروکانال بازده اختلاط درحال افزایش است، چرا که با پیشروی در طول میکروکانال سطح تماس دو سیال افزایش یافته و به تدریج نفوذ مولکولی افزایش میابد. در مورد قدرت های ۲۰۰۰G و ۳۰۰۰۶ از همان ابتدای میکروکانال بازده اختلاط در حدود %۹۰ است که نشان دهنده قابلیت میکرومیکسر مغناطیسی مدل شده در ارائه ی اختلاطی یکدست در طول میکروکانال می باشد. مشاهده می شود که حضور میدان مغناطیسی تأثیر به سزایی بر بازده اختلاط دارد که بیانگر این نکته

ISME2015, 12-14 May, 2015

Outflow Magnetic insulation

است که میتوان از این روش جهت بهرهمندی از اختلاطی سریع و با کیفیت استفاده کرد.

شکل۵ نشان دهندهی تأثیر دبی عبوری بر بازده اختلاط است. این نمودار برای قدرت میدان 30006 و غلظت 0.025 درصد جرمی رسم شده است. مشاهده میشود که با کاهش دبی عبوری از ریزمجرا، زمان ماند دو سیال در ریزمجرا افزایش یافته، در نتیجه فرصت بیشتری دراختیار دو گونه جهت اختلاط هرچه بهتر قرار می گیرد و این موضوع سبب افزایش بازده اختلاط تا ۹۰% در دبی ۳۰cc/min شده است.



شکل ۵: تأثیر دبی عبوری بر راندمان اختلاط

#### نتيجهگيری و جمعبندي

نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد وجود میدان مغناطیسی تأثیر چشمگیری بر بازدهی اختلاط دارد به طوری که میتوان با برقراری شرایط بهینه راندمان اختلاط را از حدود ۸% در حالت بدون آهنربا تا حدود ۹۰% در حالتی که آهنربا در مجاورت میکروکانال قرار دارد افزایش داد. همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش دبی عبوری از میکروکانال راندمان اختلاط کاهش مییابد. بررسی تأثیر غلظت نانوذرات مغناطیسی موجود در نانوسیال هم به عنوان یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر راندمان اختلاط افزایش مییابد.

## مراجع

[1] Whitesides, G. M., 2006. "The origins and the future of microfluidics," *Nature*, 442(7101),pp. 368-373.

[2] Stone, H. A., and Kim, S., 2001. "Microfluidics: Basic issues, applications, and challenges" *AICHE Journal*, 47(6),pp. 1250-1254.

[3] Mansur, E., Mingxing, Y., Yundong, W., Youyuan, D., 2008. "A State-of-the-Art Review of Mixing in Microfluidic Mixers", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **16**(4) 503-516.

[4] Wen, Chih-Yung., Liang, Kuok-Pong., Chen, Hua., Fu, Lung-Ming., 2011 "Numerical analysis of a rapid magnetic microfluidic mixer", *Electrophoresis*, 32, 3268–3276.

[5] Mao, L., Koser, H., 2007. "Overcoming The Diffusion Barrier: Ultra-Fast Micro-Scale Mixing Via Ferrofluids", *COMSOL Conference*.

[6] Tsai, T., Lion, D., Kuo, L., and Chen, P., 2009. "Rapid mixing between ferro-nanofluid and water in a semi-active Y-type micromixer," *Sensors and Actuators A: Physical*, 153, 267-273.

[7] Cao, Q., Han, X., Li, L., 2012. "Numerical analysis of magnetic nanoparticle transport in microfluidic systems under the influence of permanent magnets", *JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS*,45, 465001 (12pp).

[8] Bacri, J.C., Perzynski, R., 1995. "Colloidal Stability and Transport Properties of Ferrofluids", *Brazilian Journal of Physics*, vol. 25, no. 2, June.