دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

شبیه سازی اختلاط نانوسیالات داخل میکرومیکسرهای غیر فعال تزریقی به روش دوفازی

استاد راهنما:

دکتر سیما باهری اسلامی

استاد مشاور:

دکتر رضا غرائی خسروشاهی

پژوهشگر:

آرش علیزاد بنائی

تاریخ: شهریور ۹۳

نام خانوادگی دانشجو: علیزاد بنائی **نام:** آرش

عنوان پایان نامه: بررسی عددی اختلاط نانوسیالات داخل میکرومیکسرهای تزریقی به روش دوفازی

استاد راهنما: دکتر سیما باهری اسلامی

استاد مشاور: دکتر رضا غرائی خسروشاهی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** تبدیل انرژی

دانشگاه: دانشگاه تبریز **دانشکده:** مهندسی مکانیک **تاریخ فارغ التحصیلی:** شهریور ۱۳۹۳

تعداد صفحه: ۷۵

کلید واژه ها: اختلاط – نانوسیالات – نانوسیال غیر نیوتنی - میکرومیکسر – جریان دوفازی

چکیده

در این پایان نامه، اختلاط سه نوع نانوسیال مس - آب، تیتانیوم دی اکسید - آب و تیتانیوم دی اکسید- محلول ۰/۵درصد وزنی کربوکسی متیل سلولز در آب در داخل یک میکرومیکسر غیرفعال تزریقی در جریان آرام به صورت عددی بررسی شده است. دو نوع نانوسیال دارای رفتار نیوتنی بوده و یک نوع آن دارای رفتار غیر نیوتنی می باشد. از یک یا دو جریان تزریقی در دو حالت بدون بفل و با بفل در داخل یک میکرومیکسر دو بعدی با دیواره‌های دما ثابت استفاده شده است. برای بررسی جریان نانوسیالات از مدل دو فازی مخلوط (mixture model) استفاده شده است. معادلات حاکم با روش حجم محدود گسسته سازی شده و با برنامه‌ای که به زبان FORTRAN نوشته شده، حل شده اند. برای کاهش زمان محاسبات از یک روش جدید SOR تغییر یافته استفاده شده است. در بررسی حاضر به بررسی دبی جرمی ورودی اصلی و تزریقی، تعداد تزریق کننده ها، فاصله افقی بین تزریق کننده ها، اثر کسر حجمی تزریق، اثر گرادیان دما، جهت تزریق، اندازه بفل ها، فاصله افقی بین بفل ها و مکان بفلها بر درجه اختلاط و افت فشار پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دبی جرمی جریان اصلی درجه اختلاط و افت فشار بی بعد را کاهش می دهد. همچنین با افزایش نسبت جرمی تزریق درجه اختلاط و افت فشار افزایش می یابد. نتیجه گرفته شد که وجود دو تزریق اختلاط بیشتری را ایجاد می کند. فاصله بین تزریق کننده ها تاثیر ناچیزی بر درجه اختلاط و افت فشار دارد. جهت تزریق تاثیر کمی بر درجه اختلاط داشته ولی تاثیر به سزایی بر افت فشار دارد. بررسی ها نشان می دهد که تاثیر گرادیان دما بر کیفیت اختلاط به دلیل شدت و ضعف دیفیوژن دمایی به نوع نانوسیال بستگی دارد ولی تغییرات دما در تمامی نانوسیالات افت فشار را تحت تاثیر قرار می دهد. نتایج نشان می دهد کسر حجمی تزریقی تاثیر چندانی بر افت فشار نداشته ولی درجه اختلاط را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد. بفلها درجه اختلاط را بهبود می بخشند ولی افت فشار را افزایش می دهند.

فهرست مطالب

مقدمه	**۱**
۱- بررسی منابع	**۳**
۲- مبانی و روش ها	**۱۳**
۲-۱ هندسه و شبکه بندی	**۱۳**
۲-۲ معادلات حاکم	**۱۵**
۲-۲-۱) معادلات حاکم بر جریان سیالات	**۱۵**
۲-۲-۲) شرایط مرزی	**۱۶**
۲-۲-۳) برنامه ریزی نرم افزاری و روش حل	**۱۷**
۲-۲-۳-۱) روش مرکزی	**۲۰**
۲-۲-۳-۲) روش فراباد مرتبه اول	**۲۱**
۲-۲-۳-۳) روش توانی	**۲۱**
۲-۲-۳-۴) روش QUICK	**۲۳**
۲-۲-۳-۵) روش فراباد مرتبه دوم	**۲۵**
۲-۲-۳-۶) روش ترکیبی فراباد مرتبه دوم و مرکزی	**۲۵**
۲-۲-۳-۶) همبسته سازی سرعت و فشار و روش حل	**۲۷**
۲-۲-۴) خواص ترموفیزیکی	**۳۰**
۲-۲-۴-۱) لزجت	**۳۰**
۲-۲-۴-۲) چگالی	**۳۲**
۲-۲-۴-۳) گرمای ویژه	**۳۲**
۲-۲-۴-۴) هدایت حرارتی	**۳۳**
۲-۲-۴-۵) ضرایب دیفیوژن براونی و دمایی	**۳۵**
۲-۲-۵) اعداد بی بعد استفاده شده در نتایج	**۳۶**
۲-۲-۵-۱) عدد رینولدز	**۳۶**
۲-۲-۵-۲) درجه اختلاط	**۳۶**
۲-۲-۵-۳) نسبت جرمی تزریق	**۳۷**
۲-۲-۵-۴) نسبت رینولدز تزریق	**۳۷**
۲-۲-۵-۵) افت فشار بی بعد	**۳۸**
۲-۲-۵-۶) سرعت افقی بی بعد	**۳۸**
۲-۲-۵-۷) پارامترهای هندسی بی بعد	**۳۸**

۳- نتایج و بحث **۳۹**
۳-۱) استقلال اندازه شبکه **۳۹**
۳-۲) اعتبار سنجی نتایج **۴۰**
۳-۳) توضیحات کلی در مورد نتایج **۴۲**
۳-۴) تاثیر دبی جرمی جریان اصلی **۴۳**
۳-۵) تاثیر نسبت جرمی تزریق و فاصله بین تزریق ها **۴۴**
۳-۶) تاثیر توزیع کسر حجمی نانوسیال در ورودی های میکرومیکسر **۵۲**
۳-۷) تاثیر جهت تزریق **۵۶**
۳-۸) تاثیر گرادیان دما **۶۲**
۳-۹) تاثیر بفل ها **۶۵**
۳-۱۰) بررسی کارایی روش های مختلف عددی برای معادله انتقال جرم **۷۰**
نتیجه گیری و پیشنهاد ها **۷۱**
نتیجه گیری **۷۱**
پیشنهادها برای مطالعات آینده **۷۲**
منابع مورد استفاده **۷۳**

فهرست شکل ها

شکل ۲-۱) هندسه میکرومیکسر مورد مطالعه ۱۴

شکل ۲-۲) شبکه بندی جابجا شده ۱۴

شکل ۲-۳) دمای یک نقطه از بفل و نقاط مجاور آن ۱۶

شکل ۲-۴) نمای سلولهای سرعت افقی به همراه سلول های مجاور آن ۱۷

شکل ۲-۵) فلوچارت روش SIMPLE ۲۹

شکل ۲-۶) تغییرات شاخصهای توانی و ضریب سازگاری با کسر حجمی نانوذرات برای نانوسیال غیر نیوتنی تیتانیوم دی اکسید در محلول ۰/۵ درصد جرمی کربوکسی متیل سلولز در آب در ۲۹۳K ۳۱

شکل ۳-۱) توزیع کسر حجمی نانوذرات مس برای جریان نانوسیال مس – آب با یک تزریق از دیواره پایینی، $l_1^* = 8, H_3^* = 0.4, \dot{m}_1 = 0.01\frac{mg}{s}, mr = 1, \phi_1 = 0, \phi_3 = 0.02$ ۳۹

شکل ۳-۲) توزیع کسر حجمی نانوذرات تیتانیوم دی اکسید برای جریان نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC با یک تزریق از دیواره پایینی، $l_1^* = 8, H_3^* = 0.4, \dot{m}_1 = 0.01\frac{mg}{s}, mr = 1, \phi_1 = 0, \phi_3 = 0.02$ ۴۰

شکل ۳-۳) مقایسه پروفیلهای سرعت توسعه یافته حل عددی و حل تحلیلی برای جریان آب خالص بین دو صفحه موازی، $Re_{H_1} = 0.5$ ۴۱

شکل ۳-۴) مقایسه پروفیلهای سرعت توسعه یافته حل عددی و حل تحلیلی برای جریان محلول ۰/۵ درصد جرمی CMC در آب بین دو صفحه موازی، $Re_{H_1} = 0.5$ ۴۱

شکل ۳-۵) مقایسه افت فشار بی بعد مطالعه حاضر با نتایج عباسی و همکاران برای جریان نانوسیال مس – آب بین دو صفحه موازی ، $\phi_1 = 0.03$ ۴۲

شکل ۳-۶) تاثیر دبی جرمی جریان اصلی بر الف) درجه اختلاط و ب) افت فشار در نسبت جرمی تزریق ثابت، $mr = 2, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, l^*_2 = 0$ ۴۳

شکل ۳-۷) تاثیر نسبت جرمی تزریق بر درجه اختلاط در فواصل مختلف بین تزریق کننده ها الف) نانوسیال مس – آب، ب) نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – آب، ج) نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02$ ۴۶

شکل ۳-۸) توزیع کسر حجمی نانوذرات مس در نانوسیال مس – آب برای $mr = 1.5$ (چپ) و $mr = 3$ (راست)، الف) یک تزریق، ب) دو تزریق با $l_2^* = 0$، ج) دو تزریق با $l_2^* = 0.5$، د) دو تزریق با$l_2^* = 1$، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02$ ۴۷

شکل ۳-۹) توزیع کسر حجمی نانوذرات تیتانیوم دی اکسید در نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – آب برای $mr = 1.5$ (چپ) و $mr = 3$ (راست)، الف) یک تزریق، ب) دو تزریق با $l_2^* = 0$، ج) دو تزریق با $l_2^* = 0.5$، د) دو تزریق با $l_2^* = 1$ $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02$ ۴۸

شکل ۳-۱۰) توزیع کسر حجمی نانوذرات تیتانیوم دی اکسید در نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC برای $mr = 1.5$ (چپ) و $mr = 3$ (راست)، الف) یک تزریق ب) دو تزریق با $l_2^* = 0$، ج) دو تزریق با $l_2^* = 0.5$، د) دو تزریق با $l_2^* = 1$، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02$ ۴۸

شکل ۳-۱۱) توزیع کسر حجمی نانوذرات در نانوسیالات الف) مس – آب، ب) تیتانیوم دی اکسید – آب، ج) تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}\,, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, l_2^* =, mr = 1$ ۴۹

شکل ۳-۱۲) تاثیر نسبت جرمی تزریق بر افت فشار بی بعد در فواصل مختلف بین تزریق کننده ها الف) نانوسیال مس – آب، ب) نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – آب، ج) نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02$ ۵۰

شکل ۳-۱۳) توزیع کسر حجمی نانوذرات برای نانوسیال مس – آب، الف) $\phi_1 = 0.05, \phi_2 = 0.0, \phi_3 = 0.0$، ب) $\phi_1 = 0.0, \phi_2 = 0.02, \phi_3 = 0.03$، ج) $\phi_1 = 0.03, \phi_2 = 0.0175, \phi_3 = 0.0175$، $l_2^* = 1.0$ $Re_{H_1} = 0.01$, $\chi = 4$ ۵۴

شکل ۳-۱۴) توزیع کسر حجمی نانوذرات برای نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – آب، الف) $\phi_1 = 0.05, \phi_2 = 0.0, \phi_3 = 0.0$، ب) $\phi_1 = 0.0, \phi_2 = 0.02, \phi_3 = 0.03$، ج) $\phi_1 = 0.03, \phi_2 = 0.0175, \phi_3 = 0.0175$، $l_2^* = 1.0$ $Re_{H_1} = 0.01$, $\chi = 4$ ۵۴

شکل ۳-۱۵) توزیع کسر حجمی نانوذرات برای نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC، الف) $\phi_1 = 0.05, \phi_2 = 0.0, \phi_3 = 0.0$، ب) $\phi_1 = 0.0, \phi_2 = 0.02, \phi_3 = 0.03$، ج) $\phi_1 = 0.03, \phi_2 = 0.0182, \phi_3 = 0.0182$، $l_2^* = 1.0$ $Re_{H_1} = 0.01$, $\chi = 4$ ۵۵

شکل ۳-۱۶) تاثیر زاویه تزریق بر درجه اختلاط در نانوسیالات الف) مس – آب، ب) تیتانیوم دی اکسید – آب، ج) تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}\,, mr = 3, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, l^*{}_2 = 1$ ۵۷

شکل ۳-۱۷) تاثیر زاویه تزریق بر افت فشار بی بعد در نانوسیالات الف) مس – آب، ب) تیتانیوم دی اکسید – آب، ج) تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}\,, mr = 3, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, l^*{}_2 = 1$ ۵۸

شکل ۳-۱۸) خطوط جریان با رنگ کسر حجمی نانوذرات در نانوسیال مس – آب، الف) $\alpha_2=\alpha_3=90^\circ$، ب) $\alpha_2=30^\circ\ \alpha_3=120^\circ$ ج) $\alpha_2=150^\circ\ \alpha_3=30^\circ$، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}\,, mr = 3, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, l^*{}_2 = 1$ ۶۰

شکل ۳-۱۹) خطوط جریان با رنگ کسر حجمی نانوذرات در نانوسیال تیتانیوم دی اکسید – آب، الف) $\alpha_2=\alpha_3=90^\circ$، ب) $\alpha_2=\alpha3=150^\circ$ ج) $\alpha_2=\alpha_3=30^\circ$، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}\,, mr = 3, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, l^*{}_2 = 1$ ۶۰

شکل ۳-۲۰) خطوط جریان با رنگ کسر حجمی نانوذرات ۶۱
در نانوسیال تیتانیوم دی اکسید –محلول CMC، الف) $\alpha_2=\alpha_3=90^\circ$، ب) $\alpha_2=30^\circ$ $\alpha_3=120^\circ$،
ج) $\alpha_2=120^\circ$ $\alpha_3=60^\circ$ $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}\,, mr = 3, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, {l^*}_2 = 1$
شکل ۳-۲۱) تاثیر گرادیان دما بر الف) درجه اختلاط و ب) افت فشار بی بعد ۶۳
l_2^* =0, $\dot{m}_1 = 2500\,{}^{\mu g}/_{S}$, mr = 2, $\phi_1 = 0$, $\phi_2 = 0.02$, $\phi_3 = 0.02$
شکل ۳-۲۲) توزیع کسر حجمی نانوذرات در سطح مقطع خروجی میکروکانال برای اختلاف ۶۴
دمای ۱۰K، l_2^* =0, $\dot{m}_1 = 2500\,{}^{\mu g}/_{S}$, mr = 2, $\phi_1 = 0$, $\phi_2 = 0.02$, $\phi_3 = 0.02$
شکل ۳-۲۳) تاثیر ارتفاع بفل ها بر الف) درجه اختلاط، ب) افت فشار بی بعد ۶۶
$\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}, mr = 2, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, {l^*}_2 = 0, {l^*}_3 = 7, {l^*}_4 = 1$
شکل ۳-۲۴) تاثیر فاصله بین بفل ها بر الف) درجه اختلاط، ب) افت فشار بی بعد ۶۷
$\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}, mr = 2, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, {l^*}_2 = 0, {l^*}_3 = 7,$
$H_4^* = H_5^* = 0.4$
شکل ۳-۲۵) توزیع کسر حجمی نانوذرات برای ${l^*}_4 = 0$ (راست) و ${l^*}_4 = 1$ (چپ) برای ۶۷
نانوسیالات الف) مس – آب، ب) تیتانیوم دی اکسید – آب، ج) تیتانیوم دی اکسید – محلول
CMC، $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}, mr = 2, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, {l^*}_2 = 0, {l^*}_3 = 7$
شکل ۳-۲۶) تاثیر بفل قبل از تزریق بر درجه اختلاط نانوسیالات الف) مس – آب، ۶۸
ب) تیتانیوم دی اکسید – آب، ج) تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC،
$\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}, mr = 2, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, {l^*}_2 = 1, {l^*}_3 = 4.5, {l^*}_4 = 1,$
$H_4^* = H_5^* = 0.7$
شکل ۳-۲۷) شکل ۲۷-۴ خطوط جریان، درجه اختلاط و افت فشار بی بعد برای $\dot{m}_1 =$ ۶۹
$5000\,{}^{\mu g}/_{S}$ (راست) و $\dot{m}_1 = 10\,{}^{\mu g}/_{S}$ (چپ)، الف) مس – آب،
ب) تیتانیوم دی اکسید – آب، ج) تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC،
$mr = 2, \phi_1 = 0, \phi_2 = \phi_3 = 0.02, {l^*}_2 = 0, {l^*}_3 = 7, {l^*}_4 = 1, H_4^* = H_5^* = 0.4$
شکل ۳-۲۸) مقایسه بین روش های مختلف گسسته سازی جملات همرفتی معادله انتقال جرم ۷۰
برای نانوسیال مس – آب در حالت یک تزریق،
$\dot{m}_1 = 5000\,{}^{\mu g}/_{S}, mr = 1, \phi_1 = 0, \phi_3 = 0.02$

فهرست جدول ها

جدول ۳-۱) تاثیر توزیع کسر حجمی نانوذرات در ورودی های میکرومیکسر برای نانوسیالات الف) مس – آب، ب) تیتانیوم دی اکسید – آب، ج) تیتانیوم دی اکسید – محلول CMC، $\chi = 4, Re_{H_1} = 0.01,\ l_2^* = 1.0$ ۵۳

فهرست علائم

L	طول میکرومیکسر
H	ارتفاع
l_1	فاصله تزریق کننده پایینی از ورودی اصلی میکرومیکسر
l_2	فاصله بین تزریق کننده های بالایی و پایینی
l_3	فاصله بفل پایینی از ورودی اصلی میکرومیکسر
l_4	فاصله بین بفل های بالایی و پایینی
$\vec{V}$	بردار سرعت
p	فشار
C_p	گرمای ویژه
T	دما
k	ضریب هدایت حرارتی
D_b	ضریب دیفیوژن براونی
D_t	ضریب دیفیوژن دمایی
F	شار جرمی در وسط مرزهای هر سلول
D	ضریب دیفیوژن در وسط مرزهای هر سلول
S_1	جمله چشمه معادله گسسته سازی شده ناشی از گسسته سازی جمله چشمه معادله دیفرانسیل
S_2	جمله چشمه ناشی از قرار گرفتن سلول در نزدیکی مرز
Pe	عدد پکلت $=\frac{F}{D}$
n_l	تعداد خطوط شبکه در روش خط به خط
m	ضریب سازگاری
n	شاخص توانی
k_b	ثابت بولتزمن $= 1.3806488 \times 10^{-23}$
d	قطر
Re	عدد رینولدز
DOM	درجه اختلاط
mr	نسبت جرمی تزریق
Δp^*	افت فشار بی بعد
U	سرعت افقی بی بعد
x	مختصات محور افقی
y	مختصات محور عمودی

X	مختصات محور افقی بی بعد
Y	مختصات محور عمودی بی بعد
$\dot{m}$	دبی جرمی

زیروند ها

nf	نانوسیال
f	سیال پایه
p	نانوذرات
j	مؤلفه بردار سرعت
e	شرقی
w	غربی
n	شمالی
s	جنوبی
S	مقیاس بندی شده
0	محاسبه شده در ۲۹۳K
$w2$	دیواره بالایی
$w3$	دیواره پایینی
1	ورودی اصلی
2	ورودی بالایی
3	ورودی پایینی

علائم یونانی

ρ	چگالی
ϕ	کسر حجمی
η	لزجت
α	زاویه تزریق نسبت به دیواره
$\bar{\bar{\dot{\gamma}}}$	تانسور نرخ کرنش
α_f	پخشندگی گرمایی سیال پایه
σ	واریانس کسر جرمی
χ	نسبت عدد رینولدز
Δ	تغییرات

Surname: Alizad Banaei **Name:** Arash

Thesis Title: Simulation of nanofluids mixing through passive injection micromixers using two phase method

Supervisor: Dr. Sima Baheri Islami
Advisor: Dr. Reza Gharraei Khosroshahi

Degree: Master of Science **Major:** Mechanical Engineering
Field: Energy Conversion **University:** University of Tabriz
Faculty: Mechanical Engineering **Graduation Date:** September 2014 **Pages:** 75

Key Words: Mixing – Nanofluids – non-Newtonian nanofluid – micromixer – two phase method

Abstract: In this thesis, mixing of laminar flows of Copper – water, Titanium Dioxide – water and Titanium Dioxide – Carboxymethyl cellulose aqueous solution nanofluids in a passive injection micromixer has been studied, numerically. Both Newtonian and non-Newtonian base fluid has been investigated. Single or double injection flows without or with baffles in a micromixer with isothermal walls have been used. Mixture two-phase model has been used to simulate the nanofluid flow inside micromixer. A FORTRAN code has been written to solve the governing equations. A modified SOR method has been used to decrease the computation time, considerably. The effect of main inlet mass flow rate and mass flow rate ratio, number of injection flows, horizontal distance between injections, volume fraction, temperature, injection orientation, height of baffles, horizontal distance between baffles and location of baffles on mixing degree and pressure drop have been investigated. The results show that mixing index and non-dimensional pressure drop decrease by increasing main inlet mass flow rate. Also mixing index and pressure drop increase by increasing mass flow rate ratio. The results indicate that double injection produces better mixing quality than the single one. Distance between injection flows does not have significant effect on mixing index and pressure drop. Injection orientation has little effect on mixing index but affects the pressure drop, considerably. Effect of temperature on mixing index depends on the kind of nanofluid due to different intensity of thermal diffusion but temperature variation affects pressure drop for all of the nanofluids. Volume fraction does not have remarkable effect on pressure drop but has considerable effect on mixing index. The results indicate that baffles improve mixing index but also increase pressure drop.

Faculty of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Thesis is approved for the degree of Master of Science

in Mechanical Engineering in the field of Energy Conversion

Title:

Simulation of nanofluids mixing through passive injection micromixers using two phase method

Supervisor:

Dr. Sima Baheri Islami

Advisor:

Dr. Reza Gharraei Khosroshahi

Researcher:

Arash Alizad Banaei

Date:

September 2014

مقدمه

در دو دهه اخیر استفاده از جریان سیالات در مقیاس میکرو به دلیل کاربرد فراوان آن در بیوشیمی، توزیع دارو در بدن، فعال سازی سلولی، واکنش آنزیمها و ... پدیدار گشته و گسترش یافته است. همچنین امروزه استفاده از نانوسیالات جهت افزایش انتقال حرارت به سرعت توسعه یافته است. نانوسیالات می توانند مخلوط ذرات بسیار ریز فلزی یا اکسید فلزی (۱ الی ۱۰۰ نانو متر) با هدایت گرمایی بالا باشند که با یک سیال پایه مانند آب، اتیلن گلیکول یا ... مخلوط شده و باعث افزایش چشمگیر انتقال حرارت نسبت به مایع خالص می‌گردند. همچنین نانو سیالات می توانند نوع خاصی از داروها باشند که در ابعاد ذکر شده به خون تزریق می‌شوند تا به عضو آسیب دیده یا یک غده سرطانی اثر کنند. امروزه جریان نانوسیالات در مقیاس میکرو، به دلیل کاربرد وسیع آن در دارورسانی و خنک کاری قطعات کامپیوتری به یکی از زمینه های مورد علاقه محققان برای مطالعه تبدیل شده است. در کاربردهایی مانند آزمایشگاه های تراشه‌ای (Lab-on-a-chip) امکان دارد یک نانوسیال با یک سیال خالص یا چند نانوسیال با هم مخلوط شوند تا اندازه‌گیری خاصی بر روی آنها انجام شده و یا برای یک واکنش شیمیایی آماده سازی شوند. همانگونه که می دانیم، عدد رینولدز در میکروکانال ها بسیار پایین می باشد. بنابرین در مواقعی که نیاز به اختلاط سریع وجود دارد، بدلیل عدم وجود آشفتگی در جریان و پایین بودن نیروهای اینرسی، اختلاط دیفیوژنی[1] نقش اصلی را ایفا می کند. بنابراین برای رسیدن به یک اختلاط مناسب، طولهای بلند میکروکانال یا زمان های بالا مورد نیاز می باشد که در اکثر کاربردهای ذکر شده، چنین امکانی وجود ندارد. در چنین مواقعی استفاده از میکرومیکسرها توصیه می شود. میکرومیکسرها در حالت کلی بر دو نوعند: فعال و غیر فعال. در نوع فعال آن، یک عامل خارجی باعث اختلاط دو سیال می شود مانند اغتشاش فشاری یا میدان الکتریکی؛ در حالی که در نوع غیر فعال سیالات بدون عامل خارجی به علت هندسه خاص میکرومیکسر با هم تماس پیدا کرده و مخلوط می شوند. مدل غیر فعال به دلیل هزینه های پایین ترآن نسبت به مدل فعال، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. یکی از انواع میکرومیکسرهای غیر فعال نوع تزریقی است که در آن از تزریق سیال مخلوط شونده در سیال اصلی استفاده می شود. اختلاط در این نوع میکرومیکسرها با توجه به سطح تماس زیاد دو سیال و کوچکتر بودن مسیر اختلاط بهتر انجام می پذیرد. در مطالعه حاضر، هدف

[1] Diffusion

بررسی مطالعه اختلاط دو نانو سیال یا یک سیال و یک نانوسیال در میکرومیکسرهای تزریقی است. نانوسیال در این مطالعه به صورت دوفازی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، سه نوع نانو سیال مورد بررسی قرار گرفته است که هر نانوسیال با سیال پایه یا نانوسیال همجنس خودش مخلوط می شود. دو مورد از نانوسیالات مورد بررسی، نیوتنی و یک مورد به صورت غیر نیوتنی می باشد. برای حل معادلات حاکم روش حجم محدود و برنامه‌ای که به زبان فرترن نوشته شده، استفاده شده است. یکی از مشکلات بررسی عددی اختلاط، زمان بالای محاسبه می باشد که در این مطالعه با استفاده از یک روش جدید عددی زمان محاسبه به صورت چشمگیری کاهش داده شده است. در نهایت تأثیر کمیت‌هایی مانند مکان و زاویه تزریق، کسر حجمی نانوسیالات، نسبت جرمی جریان تزریقی، اثر تغییرات دما، اثر بفل ها و . . . بر درجه اختلاط و افت فشار و نحوه توزیع نانوذرات مورد بررسی قرار گرفته است و با مقایسه بین حالات مختلف، بهینه ترین حالات از لحاظ اختلاط و افت فشار معرفی شده است.

۱- بررسی منابع

در مبحث اختلاط سیالات داخل میکرومیکسرها مطالعات عددی و تجربی فراوانی انجام شده است. از جدیدترین مطالعات در این زمینه می توان به کار کیم و همکاران [۱] اشاره کرد. آنها در این مقاله اختلاط آب و اتانول در میکرومیکسرهای مسطح با محفظه های اختلاط دایره ای شکل را که به وسیله کانالهای انقباضی به هم وصل شده اند به صورت عددی با روش حجم محدود بررسی کردند. آنها معادلات سه بعدی ناویر استوکس را برای محدوده اعداد رینولدز ۰/۱ تا ۱۰ و برای نسبت ثابت عرض کانال انقباضی به قطر محفظه اختلاط (۰/۱۲۵) برای چهار نوع مختلف آرایش لوله های انقباضی حل کردند. در این مطالعه، درجه اختلاط بر حسب تغییرات کسر جرمی در خروجی کانال بیان شد و درجه اختلاط در میکرومیکسر پیشنهاد شده، با سه نوع دیگر که فقط یک لوله انقباضی را دارا بودند، مقایسه شد. نتایج نشان داد که برای رینولدزهای پایین، که در آن پخش مولکولی غالب است، اختلاط به شکل بسیار خوب انجام می شود ولی برای رینولدزهای بالاتر از ۵۰ این نوع میکرومیکسر کارایی چندانی نخواهد داشت. همچنین افت فشار در این میکرومیکسر نسبت به سه میکرو میکسر دیگر بسیار پایین تر بود که در نهایت به کار بردن آن برای رینولدزهای کمتر از ۱۰ پیشنهاد شد.

یو و همکاران [۲] اختلاط آب و اتانول را داخل یک میکرومیکسر با قابلیت ساخت ساده با ساختار سه بعدی تناوبی به صورت عددی و تجربی برررسی کردند. نتایج عددی نشان داد که شکل موجی مربعی باعث ایجاد جریان گردابه ای آرام و شیارها باعث کشیدگی جریان می شوند که این دو پدیده باعث ایجاد اغتشاش سه بعدی در جریان شده و درجه اختلاط را نسبت به حالت بدون وجود این ساختارها، به طور چشمگیری در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز افزایش می دهد. آنها با تغییر مکان شیار مکعبی، بهینه ترین حالت را از نظر درجه اختلاط و افت فشار با استفاده از شبیه سازی های عددی پیدا کردند. مشاهده شد که درجه اختلاط در میکرومیکسر بهینه با افزایش دبی جرمی افزایش پیدا کرده و در حدود رینولدز ۲۲۰ به مقدار ثابتی می رسد. میکرومیکسر پیشنهاد شده برای شرایط کاری اعداد رینولدز بین ۲۲۰-۳۰ پیشنهاد شد. سپس میکرومیکسر بهینه، ساخته و بصورت تجربی آزمایش شد و نتایج بدست آمده، با داده های پنج نوع میکرومیکسر تجاری موجود در مقالات مقایسه شدند که درجه اختلاط تنها یکی از این میکرومیکسرها بالاتر از میکرومیکسر بهینه بود. همچنین در این مقاله بیان شد که میکرومیکسر پیشنهاد شده به دلیل ساخته شدن از فولاد ضد زنگ، مقاومت بالایی در برابر دما و فشار بالا و خوردگی داشته و بدلیل هزینه کم، برای تولید انبوه مناسب می باشد.

کیم و همکاران [۳] اختلاط اتانول و آب را در یک میکرومیکسر غیر فعال با دیواره های همگرا و واگرا با پروفیل سینوسی بصورت عددی با روش حجم محدود بررسی کردند. میکرومیکسر پیشنهادی آنها به شکلی بود که کانال اصلی به وسیله یک مانع دایروی، به دو کانال فرعی گسسته شده و سپس این دو کانال دوباره به هم می رسیدند که در نتیجه آن، سیالات مخلوط شونده، جدا و بازآمیخته می شدند. آنها معادلات سه بعدی حاکم بر جریان سیالات را در محدوده اعداد رینولدز ۱۰ الی ۷۰ با به کار بردن سلولهای بی سازمان هرمی شکل به روش حجم محدود حل کردند. آنها ادعا کردند که برای رسیدن به دقت بالا در محاسبه درجه اختلاط، تنها استفاده از کسرهای جرمی سلولهای مقطع خروجی کافی نیست و باید نقاطی دیگر در بین آنها در نظر گرفت و مقدار کسر جرمی را در آنها با میان یابی بدست آورد تا به دقت مورد نظر رسید. بررسی ها برای تاثیر عدد رینولدز، دامنه دیواره های سینوسی و نسبت ظاهری کانال بر درجه اختلاط انجام شد. نتایج نشان داد که گردابه های متقارن نزدیک گلوگاه و جریانات ثانویه ناشی از نیروهای گریز از مرکز، به شدت درجه اختلاط را تحت تأثیر قرار می- دهند. مشاهده شد که هرچقدر دامنه دیواره ها بیشتر باشد، جریانهای ثانویه قویتر شده و اختلاط بهتر انجام می پذیرد در حالی که افت فشار کاهش می یابد، همچنین هرچقدر عدد رینولدز بیشتر باشد جریان های ثانویه قویتر شده و درجه اختلاط افزایش می یابد علاوه بر آن، با افزایش نسبت ظاهری کانال، درجه اختلاط افزایش یافته و افت فشار کاهش پیدا می کند. بررسی ها نشان داد که درجه اختلاط هنگامی که عرض دو کانال فرعی برابر است، نسبت به حالتی که عرض های دو کانال متفاوت است، بیشتر است. همچنین نتایج نشان داد که افت فشار برای کاربرد در سیستم های آزمایشگاههای تراشه ای قابل قبول می باشد.

گلاسگو و همکاران [۴] اثر هندسه میکرومیکسر را بر اختلاط جریانهای متناوب به صورت عددی بررسی کردند. آنها معادلات ناویر استوکس دو و سه بعدی را برای محدوده اعداد رینولدز ۰/۳ تا ۳۰ بصورت عددی حل کردند. در این مقاله، اثر پارامترهای مختلف از جمله هندسه میکرومیکسر، عدد رینولدز، اختلاف فاز زمانی تزریق سیالات از دو ورودی به میکرومیکسر و فرکانس تزریق بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که هندسه مکان به هم رسیدن دو ورودی سیال و شکل کانال تاثیر قابل توجهی روی درجه اختلاط دارد، زیرا هندسه در به وجود آمدن جریانات ثانویه نقش بسزایی دارد، همچنین نتایج نشان داد که اثر جریان نوسانی روی درجه اختلاط بیشتر از اثر جریانات ثانویه ناشی از هندسه میکرومیکسر است و می توان با ترکیب این دو روش، به درجات اختلاط بالاتر دست یافت، همچنین مشاهده شد که با افزایش فرکانس جریان تناوبی، درجه اختلاط افزایش می یابد، علاوه بر آن مشاهده شد که کیفیت اختلاط با افزایش عدد رینولدز بهتر می شود. نتایج نشان داد که هرچقدر

اختلاف فاز زمانی تزریق از دو ورودی کمتر شود، درجه اختلاط بیشتر می شود همچنین وجود شیار در میکرومیکسر کیفیت اختلاط را بهبود می بخشد.

وانگ و همکاران [۵] به بررسی عددی اختلاط در میکرومیکسرهای درختی بصورت عددی پرداختند که هندسه آن از بافت های بیولوژیکی اقتباس شده بود. در این مقاله معادلات ناویر استوکس برای حالات ساده اتصالات T شکل به صورت عددی حل شد و مشاهده شد که با افزایش عدد رینولدز، سه نوع جریان در داخل میکرومیکسر قابل مشاهده است: جریان لایه ای، جریان گردابی و جریان به دام افتاده. بررسی ها نشان داد که با افزایش عدد رینولدز و تعداد شاخه های T شکل، درجه اختلاط افزایش می یابد، همچنین افت فشار داخل میکرومیکسر درختی بطور قابل ملاحظه ای کمتر از مدل میکروکانال ساده است.

کیم و همکاران [۶] به بررسی عددی اختلاط آب و اتانول در میکرومیکسرهای خمیده با شیارهای مستطیلی پرداختند. در این بررسی، ابتدا تاثیر عدد رینولدز در بازه ۹۰-۰٫۵ بر اختلاط بررسی شد، سپس تاثیر پارامترهای هندسی از جمله عرض و عمق شیارها بر درجه اختلاط مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای اعداد رینولدز بالاتر از ۱۰، وجود شیارها باعث بهبود درجه اختلاط می شوند، همچنین مشاهده شد که درجه اختلاط به عرض شیار حساس می باشد، اما عمق شیار تاثیری بر کیفیت اختلاط ندارد، همچنین افت فشار در حالت میکرومیکسر شیاردار اندکی کمتر از حالت بدون شیار است.

گالتی و همکاران [۷] به مطالعه عددی تاثیر شرایط ورودی بر وقوع جریانهای بـه دام افتـاده در یـک میکرومیکسر T شکل پرداختند. مطالعات آنها نشان داد که اگر سرعت در مکان تلاقی جریانها توسـعه یافته نباشد، جریان به دام افتاده در اعداد رینولدز بالا و با یک الگوی متفـاوت رخ داده کـه منجـر بـه درجات اختلاط پایینتری نسبت به حالت وجود پروفیل سرعت توسعه یافته در تقاطع جریان هـا مـی شود. در این مقاله تاثیر اندازه شبکه و معیار همگرایی بر نتایج بررسی شد، زیـرا بـدلیل امکـان وجـود ناپایداری در حل، حتی در باقیمانده های زیر $۱۰^{-۷}$، باید توجه ویژه ای به معیار همگرایی می شد.

لی و همکاران [۸] به بررسی عددی ناپایای اختلاط نانوداروها در داخل یک میکرومیکسر تزریقی گرم شده پرداختند. در این مقاله، نتایج عددی با نتایج تجربی اعتبار سنجی شدند. در این مطالعه برای رسیدن به کیفیت اختلاط تقریبا کامل، به تغییر پارامترهایی از قبیل طول میکرومیکسر، قطر ذرات نانو، نرخ جرم عبوری از میکرومیکسر، مساحت اعمال شار گرمایی و میزان تزریق نانودارو پرداخته شد. نتایج نشان داد که وجود شار گرمایی باعث بهبود کیفیت اختلاط می شود، همچنین کیفیت اختلاط

با کاهش قطر ذرات نانو، افزایش طول میکرومیکسر وکاهش اعداد رینولدز جریان اصلی و تزریقی افزایش می یابد.

پترسون و همکاران [۹] به بررسی عددی و تجربی یک میکرومیکسر همراه با موانع، برای اختلاط در اعداد رینولدز پایین پرداختند. در این مقاله از موانع لوزی، دایروی، مثلثی و لوزی پله دار برای جداسازی و اختلاط مجدد جریانها به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که وجود موانع به خصوص موانع دایروی بهترین کارایی را در افزایش درجه اختلاط دارند، همچنین افت فشار بر واحد طول بدست آمده در این میکرومیکسر کم می باشد. آنها ادعا کردند که بدلیل ساختار صفحه ای این نوع میکرومیکسر و سادگی ساخت، می توان از این نوع میکرومیکسر در آزمایشگاه های تراشه ای استفاده کرد.

کیم و همکاران [۱۰] اختلاط در یک میکرومیکسر جدید برمبنای جدایی و اختلاط مجدد غیر متقارن جریان سیال را بصورت عددی و تجربی در محدوده اعداد رینولدز۸۰-۱۰مورد بررسی قرار دادند. در این میکرومیکسر، جریان سیال به دو قسمت با نرخ های جرمی متفاوت تقسیم شده و این دو جریان دوباره به هم می رسیدند. نتایج نشان داد که این نوع میکرومیکسر به ازای نسبت های عرض های دو کانال، درجات اختلاط مختلفی ایجاد می کند، بیشترین درجه اختلاط مربوط به حالتی است که عرض یک کانال، ۲ برابر عرض کانال دیگر باشد، همچنین کمترین درجه اختلاط هنگامی صورت می گیرد که عرض دو کانال مساوی باشند.

باهری و همکاران [۱۱] هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان نانوسیال آب – آلومینیوم اکسید را داخل یک میکروکانال همراه با بفل بصورت عددی بررسی کردند. در این مطالعه، معادلات حاکم بر جریان سیال، با استفاده از روش تفاضل محدود برای اعداد رینولدز ۵، ۲۰ و ۵۰ و کسر حجمی ۰ و ۴ درصد حل شدند و اثر پارامترهای مختلف مانند عدد رینولدز، کسر حجمی، فاصله و ارتفاع بفل ها بررسی گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که وجود بفل ها، افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، ضریب انتقال حرارت محلی را افزایش می دهد، همچنین نتایج نشان دادندکه عامل اصلی افزایش اختلاط و ضریب انتقال حرارت، گردابه های پشت بفل ها هستند.

کاپرو و همکاران [۱۲] اختلاط DNA با آنزیم مهار کننده آن را در یک میکرومیکسر غیر فعال با شکل زیگزاگ، بصورت عددی و تجربی بررسی کردند. در این مطالعه، طول لازم میکرومیکسر برای اختلاط کامل، به وسیله شبیه سازی تخمین زده شد. سپس نمونه آزمایشگاهی این میکرومیکسر از

فیلم خشک با جنس ایمید[1] با قابلیت تصویر برداری با استفاده از تکنولوژی چاپ مدار قابل انعطاف ساخته شد. نتایج نشان داد که وقتی میکرومیکسر تا دمای $37^{\circ}C$ گرم شود، می توان در عرض ۲٫۵ دقیقه به اختلاط کامل رسید که قابلیت این میکرومیکسر برای استفاده در آزمایشگاه های تراشه ای برای تشخیص بیماری ها به اثبات رسید.

وانگ و همکاران [۱۳] نوعی میکرومیکسر گردابه بی نظم که از دو محفظه باز و بسته و یک میکروکانال مارپیچ تشکیل شده بود را بصورت تجربی آزمایش کردند. در این میکرومیکسر ابتدا مواد مخلوط شونده به محفظه باز انتقال می یافت و فشار گاز خارجی به آن اعمال می شد، این فشار گاز باعث می شد که ساختار گردابه ای بی نظمی درون محفظه باز شکل بگیرد که این ساختارها باعث هدایت مواد مخلوط شونده به درون میکروکانال مارپیچ و محفظه بسته می شد که در آنجا بر اثر تراکم مواد مخلوط شونده، ساختار گردابه ای جدیدی ایجاد می شد که مواد را دوباره به محفظه باز برمی گرداند که این ساختار گردابه ای، باعث اختلاط موثر دو جزء مخلوط شونده می شد.

ماتسویاما و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی بهینه سازی فرایند امولسیون سازی، داخل یک میکرومیکسر اوریفیسی، با استفاده از تغییر هندسه میکرومیکسر پرداختند. در این مطالعه، اثر پارامترهای مختلف مانند قطر سوراخ، طول سوراخ، زاویه همگرایی، قطر خروجی میکرومیکسر، نسبت انبساط و دبی حجمی بر اندازه قطرات سیال پراکنده شده در سیال پایه بررسی گردید. نتایج نشان داد که قطر قطرات پراکنده شده، با نرخ اتلاف انرژی جنبشی داده شده به سیال در اثر انقباض، نسبت معکوس دارد، همچنین بررسی ها نشان داد که برای رسیدن به اندازه مناسب قطرات پخش شونده، به افت فشار بالایی نیاز است.

یانگ و همکاران [۱۵] یک میکرومیکسر ضربدری شیاردار را با قابلیت ساخت ساده که دارای دو قطعه روی هم سوار شونده به شکل صلیب می باشد بصورت عددی و تجربی بررسی کردند. در هر دو بررسی عددی و تجربی، جریان صلیبی و جریانهای بی نظم عمودی مشاهده شد که این جریان ها باعث افزایش سطح تماس دو سیال مخلوط شونده می شد. نتایج نشان داد که این میکرومیکسر، ۴۶٪ درجه اختلاط بالاتری نسبت به میکرومیکسر جناغی ضربدری[2] با طول $2047\ \mu m$ دارد. در این مطالعه، با بررسی تاثیر نسبت های نرخ جریان های دو کانال بر درجه اختلاط و افت فشار، حالت بهینه ای معرفی شد که در آن، درجه اختلاط بالا همراه با افت فشار پایین وجود دارد.

[1] Imide
[2] Staggered herringbone micromixer

آذربادگان و همکاران [۱۶] به بهینه سازی چند متغیره در میکرومیکسرهای جناغی ضربدری، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. در این مطالعه، ابتدا به بهینه سازی نسبت ظاهری کانال مخلوط شونده، نسبت عمق شیار به ارتفاع کانال، نسبت عرض شیار به گام شیارها و ضریب نامتقارنی پرداخته شد، سپس دو پارامتر زاویه شیارها و تعداد شیارها، بهینه سازی شدند، هرچند این دو متغیر، تاثیر چندانی بر درجه اختلاط نداشتند. معیار کلیه بهینه سازی ها، درجه اختلاط و افت فشار بود. در نهایت حالتی که بیشترین درجه اختلاط و کمترین افت فشار را دارا بود، معرفی شد.

لی و همکاران [۱۷] برای افزایش درجه اختلاط در میکرومیکسرهای جریان چند لایه ای، از نواحی پی در پی جریان های گردابه ای استفاده کردند زیرا زمان لازم برای اختلاط در میکرومیکسرهای معمولی جریان چند لایه ای، از طریق دیفیوژن مولکولی بسیار بالا می باشد. ابتدا اثر نواحی جریان گردابه ای در اعداد رینولدز مختلف بر درجه اختلاط بصورت عددی بررسی گردید، سپس میکرومیکسر پیشنهاد شده، به وسیله فناوری چاپ سنگی روی صفحات ویفر قابل عکسبرداری، ساخته شد. نتایج نشان داد که برای اعداد رینولدز بالای ۴۰۰ می توان به وسیله اضافه کردن نواحی جریان های گردابه ای، به درجات اختلاط بالاتر از ۹۰٪ دست یافت.

شئو و همکاران [۱۸] اختلاط در یک میکرومیکسر خمیده با کانالهای جداکننده و بازآمیزنده جریان را بصورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آنها نشان داد که درجه اختلاط در این میکرومیکسر، ۲۰٪ بیشتر از سه نوع میکرومیکسر ضربدری خمیده با کانالهای با انقباض ناگهانی، میکرومیکسر ضربدری خمیده با عرض کانال ثابت و میکرومیکسر خمیده ساده می باشد. همچنین نتایج نشان داد که در اثر نیروی گریز از مرکز، جریانهای ثانویه گردابه ای ایجاد می شود که به گردابه های دین مشهورند. همچنین در نتایج بدست آمده، افت فشار در این میکرومیکسر، ۵۰٪ بیشتر از دو میکرومیکسر ضربدری خمیده دیگر بود.

کیم و همکاران [۱۹] به بررسی و بهینه سازی اختلاط داخل میکرومیکسرهای با ساختارهای اصلاح شده تسلا، بصورت عددی پرداختند. میکرومیکسر پیشنهادی آنها از ساختارهای تکرار شوندن دو کانال، یکی به شکل کانال تخت واگرا و دیگری به شکل کانال خمیده بود که جریان سیالات مخلوط شونده را جدا و مجددا مخلوط می کردند. در این مقاله، نتایج برای اعداد رینولدز ۴۰- ۰٫۰۵ و بر حسب دو پارامتر بی بعد نسبت عرض دهانه کانال واگرا به عرض کانال اصلی و نسبت عرض کانال منحنی به عرض کانال اصلی بیان شدند. بهینه سازی برای رینولدز ۴۰ و برای درجه اختلاط و ضریب اصطکاک انجام گرفت. نتایج نشان داد که کیفیت اختلاط و افت فشار به شدت به پارامترهای هندسی میکرومیکسر بستگی دارد.