

مدل‌سازی اختلاط درون ریزمجراهای کم‌عرض با خواص سطحی ناهمگن بر مبنای

معیار انتروپی

جعفر جماعتی

استادیار مکانیک دانشگاه رازی کرمانشاه
j.jamaati@razi.ac.ir

علی رضا فراهی نیا

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
a.farahinia@gmail.com

حمید نیازمند

استاد مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
niazmand@um.ac.ir

چکیده

در این مقاله اختلاط ناشی از جریان الکترواسموتیکی درون ریزمجراهای کم‌عرض ($K < 40$) بصورت عددی مدل‌سازی و مطالعه شده است. حل جریان‌های الکترواسموتیکی درون ریزمجراهای ناهمگن شدیداً وابسته به حل صحیح میدان الکتریکی و توزیع بارهای الکتریکی است. در حالتی که لایه دوگانه الکتریکی نازک باشد ($K \geq 40$)، میدان الکتریکی می‌تواند به سادگی تعیین شود اما برای کانال‌هایی با لایه دوگانه ضخیم، محاسبه درست میدان الکتریکی و توزیع بارهای الکتریکی درون ریزمجراهای ناهمگن فقط از طریق حل هم‌زمان معادلات ناویر-استوکس، ارنست-پلانک و پواسان-بولتزمن ممکن است. با داشتن میدان سرعت، معادله غلظت حل می‌شود. همچنین در این مقاله ارزیابی کمی اختلاط ناشی از جریان الکترواسموتیک بر مبنای انتروپی اختلاط انجام شده که تاکنون کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار ریزمخلوط‌گرهای الکترواسموتیکی تحت تاثیر نحوه آرایش بارهای الکتریکی ناهمگن، مقدار زناپتانسیل دیواره، مقدار ضخامت لایه دوگانه الکتریکی و مقدار عدد رینولدز می‌باشد. با بررسی آرایش‌های مختلف ناهمگنی بار، مشخص شد که کانال‌های دارای نامتقارنی بیشتر در الگوی ناهمگنی، علاوه بر عملکرد اختلاطی بهتر، در طول کمتری نیز به اختلاط مورد نیاز خواهند رسید. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد با ایجاد ناهمگنی‌ها روی دیواره، راندمان اختلاطی نسبت به ریزمجرای همگن، افزایش قابل توجهی خواهد داشت.

کلمات کلیدی: اختلاط، زناپتانسیل ناهمگن، انتروپی اختلاط، جریان الکترواسموتیک، لایه دوگانه الکتریکی، معادله ارنست-پلانک

۱- مقدمه

یکی از فرآیندهایی که به بارهای الکترواستاتیکی موجود در دیواره وابسته است، پدیده‌ی الکتروکنتیک^۱ می‌باشد که به حرکت سیال‌های ناهمگن^۲ درون ریزمجراها^۳ یا محیط‌های متخلخل پر شده از سیال می‌پردازد [۱]. واژه ناهمگن در اینجا به معنی وجود ذرات باردار در سیال می‌باشد. این ذرات می‌توانند جامد، مایع یا حباب‌های گاز در ابعاد میکرومتر یا نانومتر باشند. یکی از زیر مجموعه‌های مهم پدیده‌ی الکتروکنتیک، روش الکترواسموتیک^۴ در تحریک جریان سیالات است. در این پدیده یون‌های تجمع یافته در ناحیه لایه دوگانه الکتریکی^۵ از الکترولیت با بکارگیری یک میدان الکتریکی خارجی اعمال شده بین

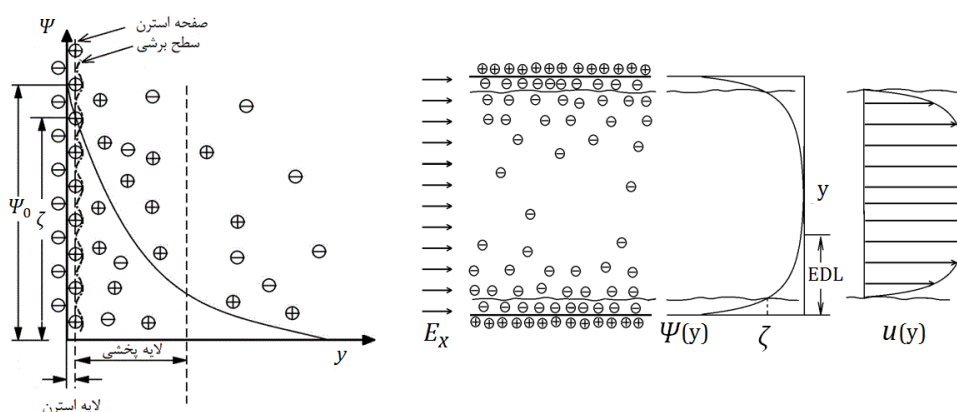
1. Electrokinetic
2. Heterogeneous Fluid
3. Microchannel
4. Electroosmotic
5. Electric Double Layer (EDL)

ورودی و خروجی ریزمجرا به حرکت در می‌آیند. حرکت یون‌های باردار باعث می‌شود بقیه ذرات سیال نیز در اثر لزجت به حرکت در آمده و در نتیجه یک جریان سیال ایجاد گردد [۲، ۳]. این جریان برای انتقال و اختلاط سیالات در سیستم‌های ریزسیالی^۶ که پایه و اساس تراشه‌های آزمایشگاهی می‌باشند، به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. اختلاط جریان الکترواسموتیک درون ریزمجرا با دیواره‌های همگن، تحت اثر نفوذ مولکولی صورت می‌گیرد و قدرتمند نیست، ولی به کمک فناوری شیمی سطح و ایجاد ناهمگنی‌های سطحی در بارهای الکتریکی سطوح، می‌توان جریان‌های چرخشی قابل توجهی درون یک ریزمجرا تولید کرد که موجب افزایش راندمان اختلاط می‌شود.

با وجود آنکه بررسی اختلاط ریزمجرایی با دیواره ناهمگن رونق زیادی داشته اما معیارهای اختلاطی بکار گرفته شده، محدود بوده است. به عنوان مثال معیار اختلاطی بسیار رایج، معیار مبتنی بر غلظت است [۴، ۵] که هم در کانال‌های همگن و هم در کانال‌هایی با زتاپتانسیل ناهمگن مورد استفاده بوده و نتایج قابل قبولی نیز ارائه می‌کند، اما در جریان‌های پیچیده شامل گردابه، معیارهای مبتنی بر غلظت دچار مشکلاتی هستند بدین صورت که در نواحی نزدیک گردابه میزان اختلاط را به درستی ارزیابی نمی‌کنند و نوسانات غیر فیزیکی در مقدار راندمان اختلاط پیش‌بینی می‌نمایند [۶]. در برخی از مطالعات موجود این پدیده به گردابه‌های غلظت ربط داده شده است و ادعا می‌شود که وجود گردابه‌ها باعث ایجاد نواحی با گرادبان شدید غلظت می‌گردد. اما معیار دیگری که می‌توان برای بررسی اختلاط ریزمجرها از آن استفاده کرد، معیار انتروپی اختلاط می‌باشد که برخلاف معیار معرفی شده قبلی، این معیار بیشتر در کانال‌های همگن و بدون ناهمگنی روی دیواره استفاده شده است [۷، ۸]. در این مقاله ارزیابی میزان اختلاط درون ریزمجرها بر مبنای معیار انتروپی اختلاط با تابع وزنی دبی برای اولین بار برای ریزمجرای فوق که دارای ناهمگنی است، انجام شده و بر پایه همین معیار چند ریزمخلوط‌گر مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم

سطوح دی الکتریک هنگامی که در معرض یک محلول الکترولیت قرار می‌گیرند، باردار می‌شوند و این بارهای سطحی، یون‌هایی از الکترولیت را که در مجاورت سطح هستند، تحت تاثیر قرار می‌دهند بطوری که بارهای الکترواستاتیکی (بارهای الکتریکی ساکن) بوجود آمده در سطح جامد، یون‌های مخالف درون مایع را جذب و یون‌های همنام را دفع خواهند کرد و در نهایت بارهای الکتریکی به یک آرایش جدید در مجاورت سطح خواهند رسید. لایه‌ای از سیال مجاور سطح جامد، که در آن بارهای الکتریکی به این آرایش جدید رسیده‌اند را لایه دوگانه الکتریکی می‌نامند (شکل ۱).



(ب) در مجاورت یک صفحه

(الف) درون کانال تخت

شکل ۱: (الف) توزیع پتانسیل الکتریکی درون کانال تخت و توزیع سرعت الکترواسموتیک (ب) توزیع پتانسیل الکتریکی و لایه دوگانه الکتریکی در مجاورت یک صفحه

اندازه‌گیری مستقیم پتانسیل الکتریکی در سطح مشترک جامد-مایع بسیار مشکل است اما در صفحه‌ی برشی (مرز بین لایه‌ی استرن^۷ و لایه‌ی پخش^۸) امکان پذیر خواهد بود. پتانسیل الکتریکی در این صفحه را زتاپتانسیل^۹ نامیده که به عنوان یک خاصیت برای مایع-جامد به صورت تجربی اندازه‌گیری می‌شود.

در تجزیه و تحلیل حاضر فرض شده است که سیال درون ریزمجرا یک سیال نیوتنی تراکم ناپذیر است و از اثرات شناوری و گرانشی چشم‌پوشی شده است. علاوه بر این دو گونه مورد اختلاط دارای ضرایب پخش مولکولی یکسانی هستند و هیچ واکنش شیمیایی در بین خود گونه‌ها و یا بین گونه‌ها و دیواره ریزمجرا رخ نمی‌دهد. تحت این شرایط معادلات حاکم مختلف در بخش زیر معرفی شده‌اند [۹].

۲-۱- معادله پواسان-بولتزمن

بر مبنای نظریه الکترواستاتیک، ارتباط بین توزیع پتانسیل الکتریکی داخلی (ψ) و خارجی (ϕ) با توزیع بارهای الکتریکی مثبت و منفی (n^+ , n^-) توسط معادله پواسان-بولتزمن مشخص می‌شود که شکل بی‌بعد آن به صورت رابطه (۱) است:

$$\nabla^2(\psi + \phi) = \frac{K^2}{2}(n^+ - n^-) \quad (1)$$

$K = H/\lambda$ پارامتر بی‌بعد دیبای-هوکل و λ ضخامت مشخصه لایه دوگانه الکتریکی است.

۲-۲- معادلات ارنست-پلانک

محاسبه غلظت‌های یونی از حل معادلات انتقال یون‌ها به دست می‌آید که با نام معادلات ارنست-پلانک شناخته می‌شوند. شکل بی‌بعد این معادلات به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} n^i) = \frac{1}{\text{Re Sc}^i} \{ \nabla^2 n^i + \vec{\nabla} \cdot [n^i (\vec{\nabla} \psi + A \vec{\nabla} \phi)] \} \quad (2)$$

معادله فوق برای یون‌های مثبت و منفی (یعنی $n^i = n^+, n^-$) نوشته می‌شود. \vec{V} بردار سرعت، $\text{Sc}^i = \mu/\rho D^i$ عدد اشمیت، Re عدد رینولدز بر مبنای سرعت مرجع $U_{ref} = \varepsilon E_{ref} \zeta / \mu$ است. D ضریب پخش مولکولی و $A = E_{ref} H / (K_b T / ze)$ یک پارامتر بی‌بعد می‌باشد که معرف نسبت ولتاژ اعمالی خارجی به ولتاژ مینا است. در این روابط μ لزجت دینامیکی، ε ضریب گذردهی الکترولیت، K_b ثابت بولتزمن، T دمای مطلق الکترولیت، z عدد والانس الکترولیت متقارن، e بار پایه الکترون و H عرض مجرا می‌باشد. در معادله فوق جمله سمت چپ تساوی مربوط به جابجایی یون‌ها است، جمله اول در سمت راست تساوی در صورت کسر مربوط به پخش مولکولی یون‌ها و جمله بعدی مربوط به پخش ناشی از مهاجرت یون‌ها بر اثر پتانسیل الکتریکی می‌باشد.

۲-۳-۱- معادلات ناویر-استوکس

برای جریان سیال در شرایط دائمی و با خواص فیزیکی ثابت، معادلات جریان در یک سیستم تحت اثرات الکتروکنتیک در شکل بی‌بعد به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شوند:

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) = -\vec{\nabla} P + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \vec{V} - B \rho_e (\vec{\nabla} \psi + A \vec{\nabla} \phi) \quad (3)$$

$B = n_0 K_b T / \rho U_{ref}^2$ یک پارامتر بی‌بعد است. جمله آخر در معادله (۳) نیروی حجمی ناشی از اثرات میدان الکتریکی و یون‌های باردار درون سیال است. این نیروی الکتریکی مشابه با نیروی گرانشی به صورت یک نیروی حجمی اثر می‌کند. در جریان‌های الکترواسموتیک این نیرو عامل حرکت سیال است.

7. Stern layer
 8. Diffuse layer
 9. Zeta-potential

۲-۴- معادله غلظت گونه‌ها

برای بررسی پدیده اختلاط، میدان اسکالر برای غلظت یک گونه بایستی حل شود. معادله حاکم بر میدان غلظت به شکل رابطه (۴) می‌باشد:

$$\vec{V} \cdot \vec{\nabla} C = \frac{1}{\text{Re Sc}} \nabla^2 C \quad (4)$$

که در آن $\text{Sc} = \mu / \rho D$ عدد اشمیت مربوط به گونه مورد نظر و $\text{Re} = \rho U_{\text{ref}} H / \mu$ عدد رینولدز می‌باشد. در ورودی ریزمجرا توزیع غلظت به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$C(x=0, y) = \begin{cases} 0 & 0 < y < \frac{H}{2} \\ 1 & \frac{H}{2} < y < H \end{cases} \quad (5)$$

۲-۵- معیار انتروپی اختلاط

برای ارزیابی اختلاط می‌توان از انتروپی به عنوان یک معیار استفاده نمود. معیار انتروپی شانون برحسب مقادیر غلظت در نقاط گسسته به صورت رابطه (۶) مطرح شده است [۱۰]:

$$S_{\text{mix}} = - \sum_{j=1}^M C_j \ln(C_j) \quad (6)$$

در این رابطه C_j مبین غلظت هر نقطه و M تعداد نقاط گسسته می‌باشد. بر مبنای رابطه فوق و با اعمال تابع وزنی دبی، معیار اصلاح شده برای یک سطح مقطع عبور جریان به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$S_{\text{mix}} = \frac{- \int_A C \ln(C) \rho u \, dy}{\int_A \rho u \, dy} \quad (7)$$

طبق رابطه (۷) به جای اینکه در ارزیابی میزان اختلاط از معیار انتروپی ساده استفاده شود، از معیار انتروپی وزن‌دار با تابع وزنی دبی استفاده خواهد شد. بر مبنای استفاده از معیار وزن‌دار انتروپی در هر مقطع از ریزمجرا، کارایی اختلاط را به صورت رابطه (۸) تعریف می‌کنیم:

$$\varepsilon_s = \frac{S_{\text{mix}} - S_{\text{inlet}}}{S_{\infty} - S_{\text{inlet}}} \quad (8)$$

در مسأله مورد بررسی با توجه به توزیع غلظت در ورودی ریزمجرا، در صورتی که طول کانال به اندازه کافی طویل باشد، اختلاط کامل به وجود می‌آید و مقدار غلظت نهایی برابر 0.5 خواهد بود. برای این حالت مقدار معیار انتروپی برابر حداکثر مقدار خود یعنی $S_{\infty} = -0.5 \ln(0.5)$ می‌باشد. بعلاوه در ورود مقدار معیار انتروپی برابر حداقل خود یعنی صفر است، لذا کارایی اختلاط طبق کسر معادله (۸) به صورت $\varepsilon_s = S_{\text{mix}} / 0.347$ محاسبه می‌گردد.

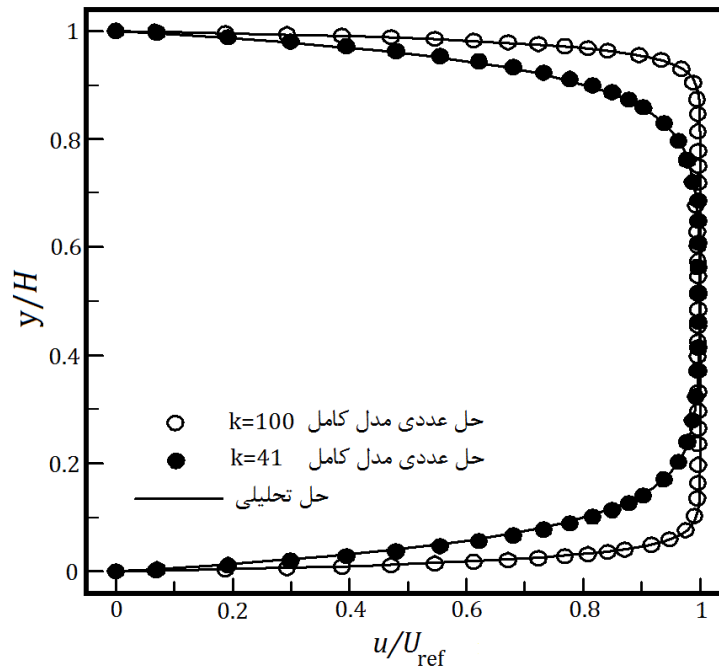
۳- روش عددی و اعتبار سنجی

برای حل عددی ابتدا میدان الکتریکی خارجی، ϕ ، بدست می‌آید. در آغاز مقدار پتانسیل ناشی از لایه دوگانه الکتریکی یعنی ψ ، درون حوزه برابر با صفر و روی دیواره‌ها برابر با مقدار زتاپتانسیل در نظر گرفته می‌شود. سپس معادلات مربوط به میدان الکتریکی داخلی و خارجی با مقدار اولیه $n^{\pm} = 0$ حل می‌شوند و میدان پتانسیل داخلی، ψ ، توسعه می‌یابد و بعد از آن معادلات ارنست-پلانک حل می‌گردند تا توزیع غلظت برای یون‌های مثبت و منفی یعنی n^+ و n^- بدست آید. سپس چگالی بارهای الکتریکی ρ_e از رابطه $\rho_e = n^+ - n^-$ بدست می‌آید. در این مرحله اولین تخمین برای نیروی الکتریکی حجمی قابل محاسبه است و می‌توان با استفاده از آن میدان جریان را بدست آورد. برای محاسبه میدان جریان ابتدا میدان فشار حدس زده

می‌شود و سپس معادلات اندازه حرکت برای حل میدان سرعت حل می‌گردد. با استفاده از میدان سرعت بدست آمده، معادله پیوستگی جهت اصلاح میدان های فشار و سرعت حل می‌شود. از آنجا که میدان جریان، چگالی بار الکتریکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، لذا مجدداً معادلات ارنست-پلانک حل می‌شوند تا توزیع غلظت‌های یونی و چگالی خالص بارهای الکتریکی بدست آید. در ادامه توزیع پتانسیل خارجی و داخلی محاسبه می‌شود. این مراحل آنقدر تکرار می‌گردند تا همگرایی مناسب حاصل شود. پس از همگرایی معادله جریان، معادله غلظت حل می‌شود.

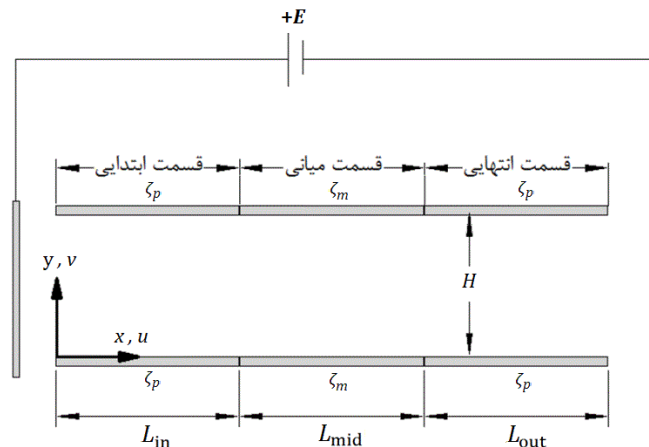
به عنوان مثالی از اعتبارسنجی، حل عددی میدان سرعت مربوط به جریان الکترواسموتیک درون ریزمجرای مستقیم و با سطح مقطع یکنواخت در حالتی که خواص دیواره همگن باشد، برای $E_{ext} = 14/59 \text{ v/mm}$ و $\zeta = 25 \text{ mv}$ و به ازای دو مقدار 41 و $K = 100$ به صورت عددی حل و در شکل ۲ با حل تحلیلی مقایسه شده است. تحت این شرایط در ناحیه توسعه یافته، توزیع سرعت تحلیلی برای یک جریان الکترواسموتیک خالص ناشی از میدان خارجی E_{ext} به صورت رابطه (۹) است.

$$u(y) = \frac{\varepsilon E_{ext} \zeta}{\mu} \left(1 - \frac{\psi(y)}{\zeta} \right) \quad (9)$$



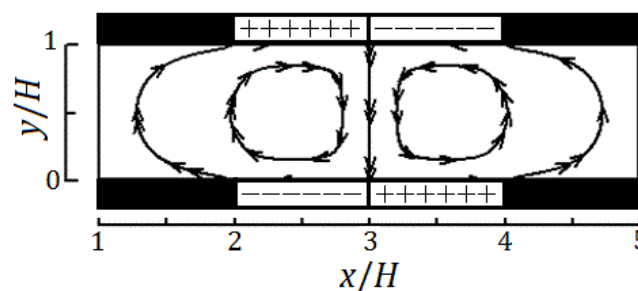
شکل ۲: تغییرات سرعت درون ریزمجرای همگن توسط حل عددی مدل کامل و حل تحلیلی میدان سرعت الکترواسموتیک

ریزمجراهایی که در این مقاله بررسی شده‌اند به منظور استفاده در یک ریزمخلوط‌گر طراحی گردیده‌اند و همگی به صورت یک ریزمجرای تخت دوبعدی دارای ارتفاع H و طول $L = 6H$ می‌باشند که طول آن‌ها به سه قسمت ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب با طول‌های $L_{in} = 2H$ ، $L_{mid} = 2H$ و $L_{out} = 2H$ تقسیم شده است (شکل ۳). در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی دیواره‌ها همگن و در قسمت میانی دیواره‌ها دارای تکه‌های ناهمگنی بار الکتریکی غیریکنواخت هستند، به طوری که زتاپتانسیل وابسته به آن‌ها، $\zeta(x)$ ، شامل مقادیر مثبت و منفی می‌باشد. در واقع قسمت میانی هر یک از دیواره‌های بالایی و پایینی متشکل از دو قطعه ناهمگنی با طول‌های مساویست که در هر قطعه، مقدار بار الکتریکی ثابت و یکنواخت است.



شکل ۳: مشخصات توزیع ناهمگن روی دیواره ریزمجرا

بسته به مقدار بار، نوع بار و نحوه آرایش مکانی قطعات ناهمگنی، مقدار و جهت سرعت لغزشی در مجاورت دیواره‌ها متفاوت خواهد بود و به تبع آن طرح‌های جریان به دست آمده، نقش‌های متفاوتی در فرآیند اختلاط بازی می‌کنند. در حالتی که مقدار بارهای قطعات با هم مساوی باشند، با حذف وضعیت‌های آینه‌ای، سه وضعیت متمایز برای آرایش بارها قابل تصور است. برای اولین آرایش، جزییات مربوط به توزیع بار در قسمت میانی ریزمجرا و طرح جریان الکترواسموتیک مربوطه در حضور میدان الکتریکی مثبت به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. برای حالت نشان داده شده در شکل ۴، قسمت میانی دارای ۴ تکه ناهمگنی است. روی دیواره بالایی از راست به چپ ابتدا یک تکه ناهمگنی با بار منفی (n) و سپس یک تکه ناهمگنی با بار مثبت (p) قرار دارد و در دیواره پایینی عکس این وضعیت تکرار شده است. زمانی که اندازه بارها در این ۴ تکه ناهمگنی برابر باشد، این وضعیت با نماد ($np-pn$) مشخص می‌شود. برای چیدمان بارها در قسمت میانی بر حسب علامت‌های مربوط به بارهای قطعه ناهمگنی می‌توان سه نوع آرایش متفاوت (با حذف حالات متقارن) بیان نمود. دو آرایش متفاوت دیگر که با همین ۴ تکه ناهمگنی شکل می‌گیرد عبارت‌اند از ($np-np$) و ($pp-nn$).

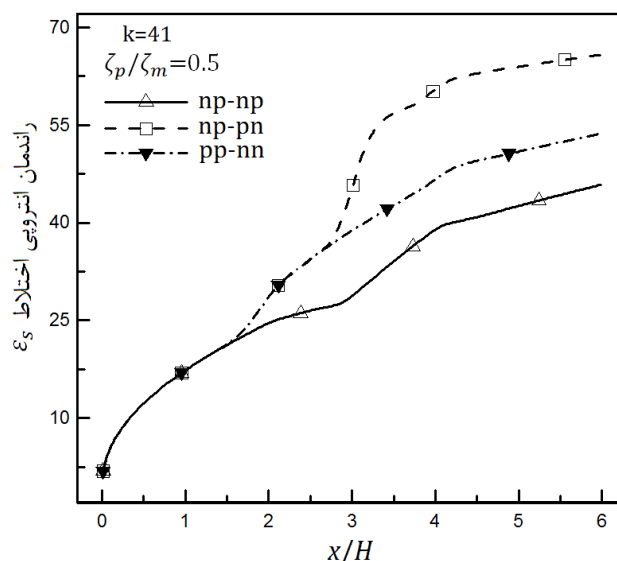


شکل ۴: یک نمونه از آرایش تکه‌های ناهمگنی بار و خطوط جریان الکترواسموتیک با E مثبت از چپ به راست

۴- نتایج

همانطور که قبلاً گفته شد ریزمخلوط‌گر مورد بررسی در بخش میانی خود دارای چهار تکه ناهمگنی می‌باشد. چیدمان این چهار تکه ناهمگنی می‌تواند در سه وضعیت کاملاً متفاوت (با حذف حالات آینه‌ای) صورت گیرد. مقایسه راندمان اختلاطی این آرایش‌ها در شکل ۵ برای یک نسبت زتاپتانسیل خاص ($\zeta_p/\zeta_m = 0.5$) نمایش داده شده است. ζ_p اندازه زتاپتانسیل در قسمت همگن و ζ_m اندازه زتاپتانسیل در قسمت میانی می‌باشند. از این شکل مشاهده می‌شود برای سه آرایش بار نشان داده شده آرایش بار دوم ($np-pn$) بیشترین راندمان اختلاطی را داراست. در این وضعیت، آرایش تکه‌های ناهمگنی بار، کاملاً نامتقارن است. هرچه این عدم تقارن بیشتر باشد، میزان اختلاط افزایش می‌یابد لذا بدترین عملکرد اختلاطی مربوط به آرایشی

است که بیشترین تقارن را در الگوی بار دارد و بهترین عملکرد اختلاط مربوط به آرایشی است که کمترین تقارن را در الگوی بار دارد. از طرفی مشاهده می‌شود که تا قبل از تکه‌های ناهمگنی، هر سه آرایش دارای راندمان اختلاطی یکسانی می‌باشند.



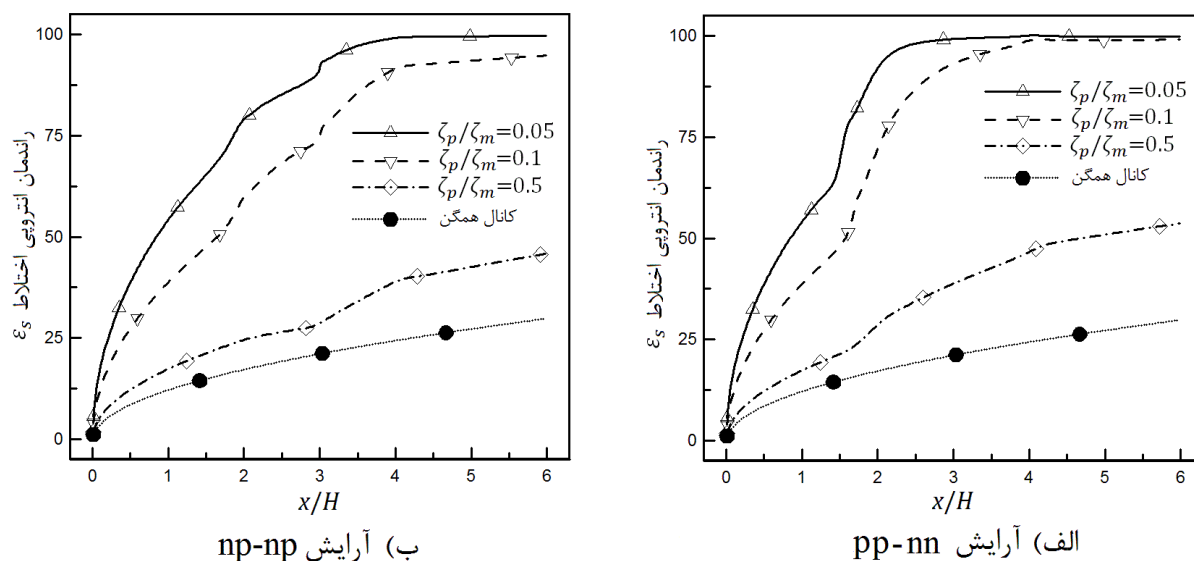
شکل ۵: تغییرات راندمان اختلاط در طول ریزمجرا به ازای زتپتانسیل خاص ($\zeta_p/\zeta_m = 0.5$) و برای آرایش‌های مختلف تکه‌های ناهمگنی بار ($K=41$)

یکی از عواملی که در میزان اختلاط الکتروکنتیک تاثیر دارد، میزان زتپتانسیل مربوط به دیواره است. برای بررسی این مطلب در شکل ۶ راندمان اختلاط به ازای سه مقدار متفاوت ζ_p/ζ_m و برای دو آرایش بار (np-np) و (pp-nn) مقایسه شده است. برای تمامی حالات مقدار $K = 41$ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که با وجود آرایش یکسان، از همان ابتدا راندمان اختلاط برای هر سه مورد متفاوت بوده است، این اختلاف از آنجایی نشأت گرفته که با تغییر نسبت زتپتانسیل مقدار دبی جریان تغییر می‌کند و این امر سبب تغییر راندمان اختلاطی خواهد شد. اما توجه شود که هرچه به انتهای کانال نزدیک می‌شویم، تغییرات اختلاطی کانال ناهمگن در نسبت زتپتانسیل‌های کم ($\zeta_p/\zeta_m < 0.5$) کاهش می‌یابد و خطوط تغییرات به صورت خط صاف با شیب کمتر از ۰/۰۱ درصد تبدیل می‌شود، این بدان معناست که در نسبت‌های کم زتپتانسیل، با توجه به فرصت و زمان بیشتر عبور سیال از ریزمجرا، عمده‌ی اختلاط در قسمت میانی که ناهمگنی‌ها حضور دارند، صورت می‌گیرد و انتهای کانال تاثیر کمتری بر اختلاط خواهد داشت.

همانطوری که برای هر دو آرایش بار در شکل ۶ مشخص است وجود قسمت میانی با آرایش بار ناهمگن سبب افزایش قابل توجه عملکرد اختلاطی نسبت به حالت زتپتانسیل یکنواخت (عدم ناهمگنی بار روی دیواره) شده است، بطوری که در بهترین حالت یعنی برای نسبت زتپتانسیل کم که فرصت و زمان بیشتر و گردابه‌های قوی‌تری جهت اختلاط وجود دارد، میزان اختلاط در انتهای کانال حدود ۷۰ درصد نسبت به کانال همگن افزایش یافته است. همچنین از این شکل برداشت می‌شود که در تمام موارد با پیش‌روی جریان در طول ریزمجرا راندمان اختلاطی بیشتر می‌شود، به ویژه با ورود جریان به قسمت میانی افزایش قابل توجهی در راندمان اختلاط رخ می‌دهد. این مطلب تایید خواهد کرد که حضور ناهمگنی‌ها روی دیواره، تاثیر مثبتی در افزایش و بهبود راندمان اختلاطی ریزمخلوط‌گرهای الکترواسموتیکی دارد، چراکه سبب ایجاد گردابه‌هایی نزدیک سطح می‌گردند که با حرکت چرخشی خود در آن نواحی، اختلاط بیشتر گونه‌ها را در بر خواهند داشت.

از طرفی با افزایش نسبت ζ_p/ζ_m راندمان اختلاط در هر مقطع کاهش می‌یابد. در حقیقت افزایش نسبت ζ_p/ζ_m به این معنی است که اثر پمپاژ در مقایسه با اثر اختلاط افزایش یافته که این مطلب به دو شیوه بر میزان اختلاط تاثیر می‌گذارد، اول اینکه زمان حضور سیال درون ریزمجرا و بخش اختلاطی کاهش می‌یابد، لذا فرصت کافی برای اختلاط فراهم نمی‌شود. دوم

اینکه افزایش سرعت متوسط سیال باعث می‌شود تا جریان‌های گردابه‌ای که در قسمت میانی وجود دارد، تضعیف گردند و لذا از میزان اثر اختلاطی آن‌ها کاسته می‌شود.



شکل ۶: تغییرات راندمان اختلاط در طول ریزمجرا به ازای زتاپتانسیل‌های مختلف نسبت به کانال همگن و برای دو آرایش بار (np-np) و (pp-nn)، (K=41)

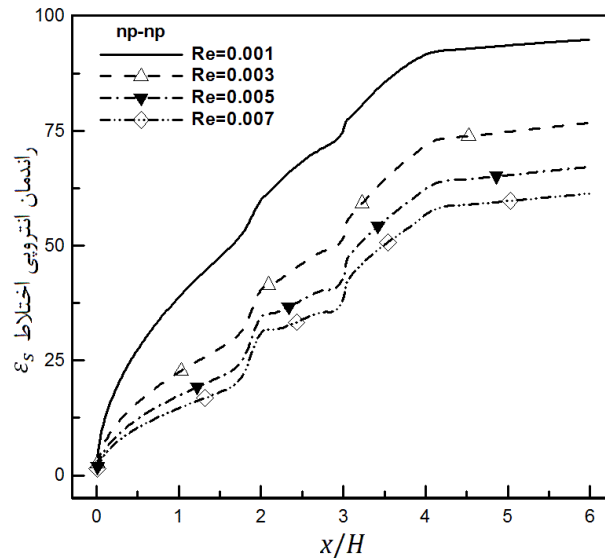
افزایش میزان نامتقارنی بار روی دیواره نه تنها باعث اختلاط بیشتر می‌شود، بلکه سبب خواهد شد که سیال در طول کمتری نیز به اختلاط نهایی دست یابد. از شکل ۶ مشاهده می‌شود که برای یک نسبت زتاپتانسیل خاص ($\zeta_p/\zeta_m = 0.05$)، در آرایش دوم (شکل ۶-الف) تقریباً در $x=2.5$ میزان راندمان به مقدار ماکزیمم خود رسیده است اما با توجه در آرایش دوم (شکل ۶-ب) در طولی بیشتر از $x=4$ این مقدار حاصل شده است. یعنی ۶۰٪ طول بیشتر مورد نیاز بوده است. لذا نتیجه می‌گیریم که میزان نامتقارنی بار، تاثیر به سزایی در میزان طول کانال جهت رسیدن به مقدار مشخص از اختلاط خواهد داشت. همچنین از هر دو آرایش شکل ۶ مشاهده می‌شود که تنها به ازای نسبت زتاپتانسیل ($\zeta_p/\zeta_m = 0.5$) مقدار اختلاط به مقدار ثابتی در طول کانال نرسیده، لذا به میزان طول بیشتری نیاز دارد، ولی در مقادیر دیگر زتاپتانسیل، مقدار اختلاط از یک طول مشخص به بعد در طول کانال تقریباً ثابت می‌ماند (تغییرات کمتر از ۰/۱ درصد است). این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که به منظور رسیدن به مقدار راندمان مشخصی از اختلاط چه میزان طول باید در طراحی ریزمخلوط‌گر در نظر گرفته شود، که این مقدار به نسبت زتاپتانسیل‌ها و نحوه آرایش بارها وابسته است.

یکی دیگر از عواملی که در بحث اختلاط دارای اهمیت است، مقدار عدد رینولدز جریان می‌باشد. همانطوری که از شکل ۷ قابل مشاهده است، هرچه میزان عدد رینولدز افزایش می‌یابد، مقدار اختلاط کم می‌شود. در واقع با افزایش سرعت متوسط سیال درون ریزمجرا، زمان حضور سیال و زمان اختلاط کاهش می‌یابد، بنابراین از میزان اختلاط کاسته می‌شود (یعنی اثری مشابه با افزایش نسبت زتاپتانسیل).

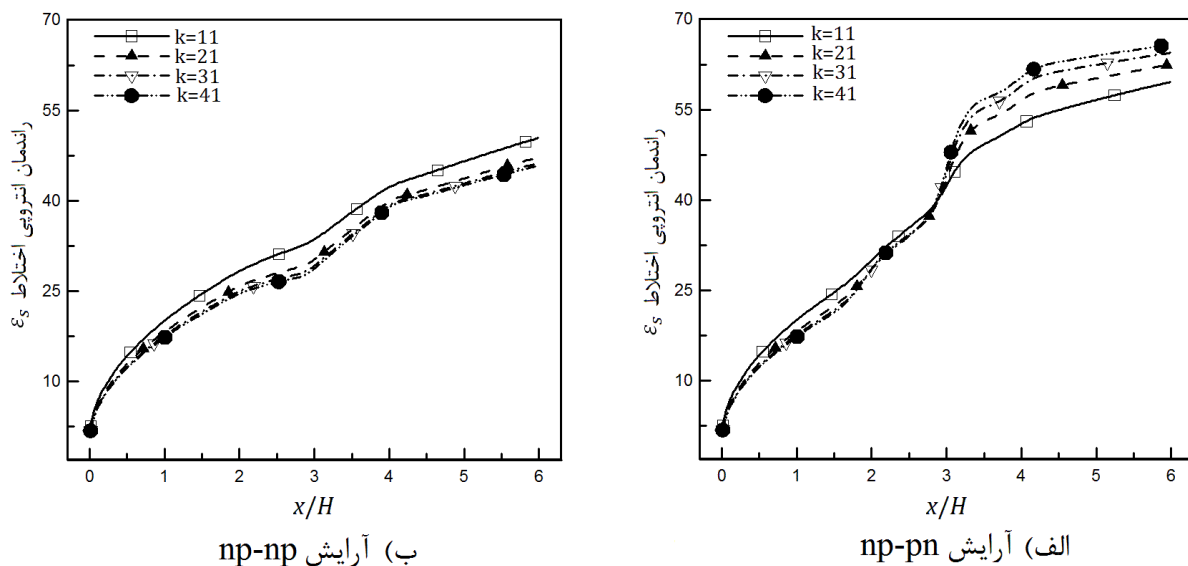
از طرف دیگر افزایش عدد رینولدز موجب می‌شود که سیال با سرعت بیشتری درون ریزمجرا به حرکت درآید و همین امر سبب کاهش قدرت گردابه‌های ایجاد شده بوسیله بارهای ناهمگن می‌شود، کاهش قدرت گردابه‌ها که عامل اصلی افزایش اختلاط در ریزمخلوط‌گر غیرفعال هستند، کاهش راندمان اختلاط را در پی خواهد داشت.

لذا علاوه بر نسبت زتاپتانسیل، مقدار پارامتر دیبای-هوکل، نحوه آرایش بارها و ناهمگنی‌ها روی دیواره، بایستی به میزان رینولدز جریان نیز توجه داشت، چراکه با توجه به یافته‌های اخیر بیشترین اختلاط زمانی خواهد بود که نسبت زتاپتانسیل ناهمگنی‌ها کم، میزان نامتقارنی بار زیاد و میزان رینولدز جریان کم باشد، البته مقدار پارامتر دیبای-هوکل نیز بایستی مناسب انتخاب شود که در ادامه بدان اشاره خواهد شد.

بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که میزان اختلاط علاوه بر نسبت زتاپتانسیل‌ها به شدت تحت تاثیر پارامتر دیبای هوکل و نحوه آرایش بارها است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که در شکل ۸-ب برای آرایش بار (np-np) و برای $\zeta_p/\zeta_m = 0.5$ کمترین مقدار راندمان اختلاط در $K = 41$ اتفاق می‌افتد، در حالی که تحت همان شرایط با توجه به شکل ۸-الف برای یک آرایش دیگر، یعنی آرایش (np-pn)، میزان اختلاط حداقل در $K = 11$ دیده می‌شود. این اختلاف به نحوه آرایش بارهای ناهمگنی روی دیواره وابسته است.



شکل ۷: تغییرات راندمان اختلاط در طول ریزمجرا به ازای اعداد رینولدز مختلف در زتاپتانسیل ($\zeta_p/\zeta_m = 0.1$) و برای آرایش (np-np) و ($K=41$)



شکل ۸: تغییرات انتروپی اختلاط در طول ریزمجرا به ازای نسبت زتاپتانسیل 0.5 و برای دو آرایش بار (np-np) و (np-pn) و مقادیر مختلف دیبای-هوکل

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با معرفی معیاری مناسب، اختلاط جریان در ریزمخلوگرهای الکترواسموتیکی تحلیل شد. رفتار چنین ریزمخلوط‌گرهایی تحت تاثیر نحوه آرایش بار الکتریکی ناهمگن، مقدار زتاپتانسیل روی دیواره، مقدار ضخامت لایه دوگانه الکتریکی (که با پارامتر دیبای-هوکل، K ، مقیاس می‌شود) و مقدار عدد رینولدز می‌باشد. مشاهده شد که در ریزمجراهای ناهمگن هرچه میزان نامتقارنی بار بیشتر باشد، در طول کمتری به راندمان اختلاطی مورد نظر خواهیم رسید. همچنین مشاهده شد در نسبت‌های کم زتاپتانسیل، عمده‌ی اختلاط در قسمت میانی که ناهمگنی‌ها حضور دارند، صورت گرفته و هرچه به انتهای کانال نزدیک می‌شویم، اثرات گردابه‌ها و چرخش ناشی از آن‌ها کمتر خواهد بود. علاوه بر این دیده شد وجود قسمت میانی با آرایش بار ناهمگن سبب افزایش قابل توجه عملکرد اختلاطی نسبت به حالت زتاپتانسیل یکنواخت (عدم ناهمگنی بار روی دیواره) شده است چراکه حضور ناهمگنی‌ها روی دیواره، سبب شکل‌گیری گردابه‌هایی نزدیک سطح می‌گردند که با حرکت چرخشی خود در آن نواحی، اختلاط بیشتر گونه‌ها را در بر خواهند داشت. این موضوع اهمیت ساخت ریزمخلوط-گرهایی با خواص سطحی ناهمگن را به جهت تاثیر مثبتی که در افزایش و بهبود راندمان اختلاطی دارند، قوت خواهد بخشید.

مراجع

- [1] A. Alizadeh, L. Zhang, M. Wang, 2014, Mixing enhancement of low-Reynolds electro-osmotic flows in microchannels with temperature-patterned walls, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 431, pp. 50-63.
- [2] S. Ebrahimi, A. Hasanzadeh-Barforoushi, A. Nejat, F. Kowsary, 2014, Numerical study of mixing and heat transfer in mixed electroosmotic/pressure driven flow through T-shaped microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 75, pp. 565-580.
- [3] R. Peng, D. Li, 2015, Effects of ionic concentration gradient on electroosmotic flow mixing in a microchannel, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 440, pp. 126-132.
- [4] A. Ahmadian Yazdi, A. Sadeghi, M. H. Saidi, 2015, Electrokinetic mixing at high zeta potentials: Ionic size effects on cross stream diffusion, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 442, pp. 8-14.
- [5] N. Solehati, J. Bae, A. P. Sasmito, 2014, Numerical investigation of mixing performance in microchannel T-junction with wavy structure, *Computers and Fluids*, Vol. 96, pp. 10-19.
- [6] J. Jamaati, A. R. Farahinia, H. Niazmand, 2015, Investigation of Mixing in Electroosmotic Micromixers using Nernst-Planck Equations, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 203-213.
- [7] P. Fodor, B. Vyhnaek, M. Kaufman, 2013, Entropic Evaluation of Dean Flow Micromixer, *Proceeding of COMSOL Conference*, Boston.
- [8] G. Zongyu, J. J. Chen, 2014, An analysis of the entropy of mixing for granular materials, *Powder Technology*, Vol. 266, pp. 90-95.
- [9] J. H. Masliyah, 1994, *Electrokinetic transport phenomena*, Alberta Oil Sands Technology and Research Authority.
- [10] C. E. Shannon, 1948, A mathematical theory of communication, *Bell Syst. Technol. Journal*, Vol. 27, pp. 379-423, 623-656.