

مطالعه عددی انتقال گرما از گرم کن پمپ رسانش الکتریکی به سیال دی الکتریک

نوید فرخی^۱، محرم جعفری^۲، اسماعیل اسماعیل زاده^۳

۱- دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۳- دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده

این پژوهش به مطالعه عددی انتقال گرما از گرم کن پمپ رسانش الکتریکی به دو هیدروکربن دی الکتریک نرمال- دکان و نرمال-دودکان می پردازد. مشاهده می شود که مقادیر متناظر آهنگ انتقال گرما برای نرمال-دودکان بیشتر از نرمال-دکان است و این مربوط به چگالی بالاتر نرمال-دودکان است که در دبی حجمی یکسان، جرم بیش تری از سیال وجود خواهد داشت و انتقال گرما افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال، در سرعت های ۵ و ۵۰ میلی متر بر ثانیه، آهنگ انتقال گرما برای نرمال-دودکان نسبت به نرمال-دکان به ترتیب ۸/۹ و ۱۳/۳ درصد بیشتر می باشد. همچنین، در مورد هر دو سیال، با افزایش سرعت جریان، دبی مقدار بیشتری خواهد داشت و این باعث افزایش انتقال گرما می شود. به طوری که برای سرعت ۵۰ میلی متر بر ثانیه، آهنگ انتقال گرما نسبت به سرعت ۵ میلی متر بر ثانیه برای نرمال-دکان و نرمال-دودکان به ترتیب ۱۲۷/۴ و ۱۳۶/۶ درصد افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: سیال دی الکتریک، الکترو هیدرودینامیک، پمپ رسانش الکتریکی، انتقال گرما

۱. مقدمه

اعمال میدان الکتریکی به سیال دی‌الکتریک باعث ایجاد نیروی حجمی مکانیکی در آن می‌شود که در شرایط خاصی می‌تواند منجر به جریان سیال شود. پدیده مورد اشاره در بسیاری از کاربردها مانند انتقال جرم، انتقال گرما، پمپاژ فیلم مایع و خنک‌کاری دستگاه‌های الکترونیکی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱]. نیروهای حجمی ایجاد شده بر اثر اعمال میدان الکتریکی به سیال به صورت زیر بیان می‌شود [۲]:

$$f_e = qE - \frac{1}{2}E^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \rho \right] \quad (1)$$

که در آن f_e ، q ، E ، ϵ و ρ به ترتیب معرف نیروی حجمی، چگالی حجمی بار الکتریکی، شدت میدان الکتریکی و گذردهی الکتریکی و چگالی سیال می‌باشد. اولین عبارت در رابطه (۱) نشان‌دهنده نیرویی است که به بارهای آزاد (مثبت یا منفی) اعمال و نیروی کولمب^۱ (نیروی الکترواستاتیکی^۲) نامیده می‌شود. عبارت دوم، نیروی دی‌الکتریک^۳ است و به علت گرادیان گذردهی الکتریکی^۴ ایجاد می‌گردد. همچنین، عبارت سوم نیروی الکترواستریکتیو^۵ است که ناشی از قابلیت فشردگی سیال می‌باشد. این سه نیرو لزوماً به صورت هم‌زمان در یک سیستم خاص حضور ندارند؛ به عنوان مثال، برای یک محیط سیال تک‌فاز و تک‌دما، نیروی کولمب تنها نیروی ایجادکننده جریان سیال است [۱]. پمپ‌های الکتروهایدرودینامیکی به‌طور کلی بر اساس نحوه شکل‌دهی یون‌ها به سه دسته پمپ‌های کشش یونی^۶ [۳-۶]، پمپ‌های القایی^۷ [۷-۱۰] و پمپ‌های رسانشی^۸ تقسیم می‌شوند. در میان انواع گوناگون پمپ‌های الکتروهایدرودینامیکی، کارکرد پمپ رسانشی یک زمینه تحقیقاتی نسبتاً جدید است که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. جیانگ^۹ و همکاران [۱۱] مطالعه در مورد پمپاژ مایعات دی‌الکتریک با پدیده رسانش الکتریکی را آغاز و کارکرد پمپ‌های رسانشی را بررسی نمودند. آتن^{۱۰} و سیدی‌عقوبی [۱۲] با مدل‌سازی عددی، پمپ رسانشی را با در نظر گرفتن انواع مختلف الکترودها مطالعه کردند. یزدانی و سیدی‌عقوبی [۱۳] اثر رسانش الکتریکی بر جریان فیلم مایع را به صورت عددی مطالعه و مشاهده کردند که برای الکترودهای مسطح، متفاوت بودن مقدار پهنای الکترودهای مثبت و منفی همسایه در یک جفت الکترو، منجر به جریان خالص مایع می‌شود. همایتخواه و همکاران [۱۴] الگوی جریان پمپ‌های رسانش الکتریکی با الکترودهای مسطح را مورد بررسی قرار دادند و نتایج خود در رابطه با موقعیت و وضعیت ایجاد گردابه در نزدیکی الکترودها ارائه کردند. نوردانش و اسماعیل‌زاده [۱۵] به بررسی تجربی انتقال گرما در پمپ‌های رسانش الکتریکی با الکترودهای مسطح برای نفت سفید پرداختند. آن‌ها گزارش نمودند که با اعمال میدان الکتریکی، انتقال گرما به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. میرزایی و صفاراول [۱۶] بهبود انتقال گرمای جابه‌جایی با

^۱ Coulomb Force^۲ Electrophoretic Force^۳ Dielectric Force^۴ Electric Permittivity^۵ Electrostrictive Force^۶ Ion-drag Pump^۷ Induction Pump^۸ Electrical Conduction Pump^۹ Jeong^{۱۰} Atten

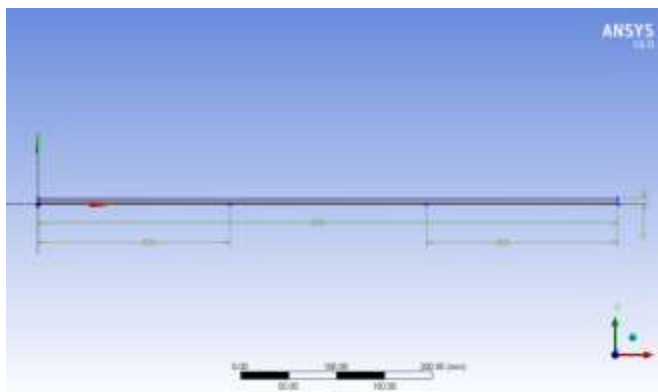
به کارگیری رسانش الکترو هیدرودینامیکی را بررسی و برای آن یک پارامتر تأثیر معرفی کردند. نتایج کار آن‌ها مشخص نمود که روش ارائه شده برای رینولدزهای پایین تأثیر بیشتری را نشان می‌دهد. با توجه به این که در کارهایی که با انتقال گرما در پمپ رسانش الکتریکی سروکار دارند، انتقال گرما از گرم‌کن‌ها به سیالات دی‌الکتریک صورت می‌پذیرد، بررسی تطبیقی تأثیر نوع سیال در این انتقال گرما از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. بر این اساس در مطالعه حاضر، اثر پارامترهایی مانند نوع سیال و سرعت جریان (ناشی از اعمال میدان الکتریکی) بر روی آهنگ انتقال گرما از گرم‌کن پمپ رسانش الکتریکی به هیدروکربن‌های دی‌الکتریک، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی عددی قرار می‌گیرد.

۲. شبیه‌سازی عددی

در این بخش جریان سیال دی‌الکتریک بر روی گرم‌کن پمپ رسانش الکتریکی، مورد شبیه‌سازی عددی قرار می‌گیرد و نتایج بحث و بررسی می‌شود.

۱.۲. مدل‌سازی هندسه

مدل‌سازی هندسه در محیط Design Modeler نرم‌افزار ANSYS Workbench صورت پذیرفته است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱- مدل ایجاد شده در محیط Design Modeler

در این هندسه جریان سیال با دمای ۳۰۰ درجه کلوین از مجرای دوبعدی به عرض ۶ میلی‌متر وارد می‌شود و پس از طی نمودن مسیری به طول ۲۰۰ میلی‌متر که برای توسعه یافته شدن کامل جریان در بالاترین عدد رینولدز در نظر گرفته شده است، از روی سطح گرم‌کن به طول ۲۰۵ میلی‌متر و با دمای ثابت ۳۷۳ درجه کلوین می‌گذرد. سرعت جریان برای حالت‌های مختلف به ترتیب برابر ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه (که همگی در محدوده جریان آرام قرار دارند) می‌باشد. ویژگی‌های فیزیکی مایعات مورد استفاده در این مطالعه که نرمال - دکان و نرمال - دودکان می‌باشند، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی مایعات مورد استفاده

نوع ماده	چگالی (kg/m^3)	گرانروی (mPa.s)	رسانش گرمایی (W/m.K)
نرمال - دکان	۷۲۸	۰/۹۲۹۱	۰/۱۴۷
نرمال - دودکان	۷۵۰	۱/۳۴	۰/۱۴

۲,۲. مش مورد استفاده

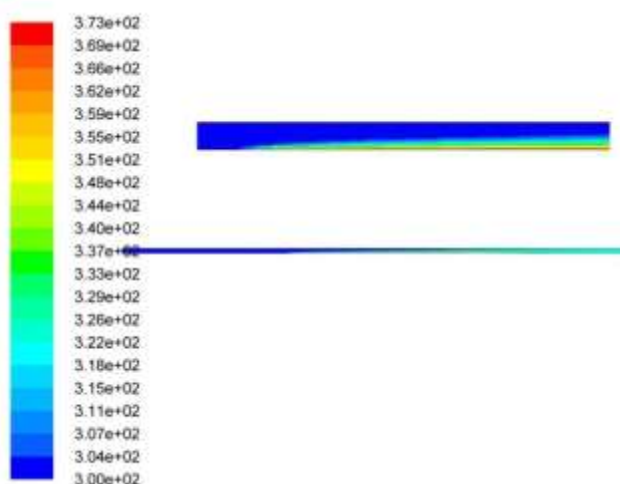
مش مورد استفاده برای این بررسی در محیط Meshing نرم افزار ANSYS Workbench ایجاد شده است که تعداد سلول های مش برابر ۲۴۲۰ عدد و از نوع چهارضلعی منظم (مستطیلی) می باشد.

۳,۲. حل عددی

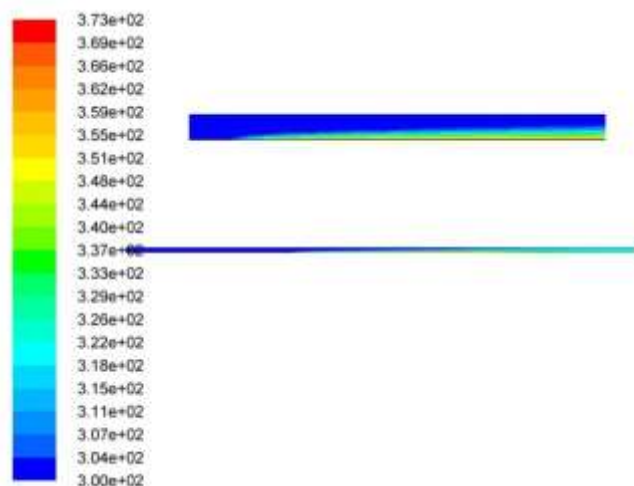
حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال گرما (شامل معادله پیوستگی، معادله بقای مومنتوم و معادله انرژی) در نرم افزار ANSYS FLUENT صورت می پذیرد. در ادامه نتایج حل مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

۳. نتایج و بحث

همان گونه که اشاره شد، شبیه سازی های عددی برای دو سیال نرمال- دکان و نرمال-دودکان در سرعت های ۵، ۱۰، ۳۰، ۲۰، ۴۰ و ۵۰ میلی متر بر ثانیه انجام گردیده است که در ادامه به تحلیل نتایج آن پرداخته می شود. شکل ۲ و ۳ توزیع دما برای حالت ۵ میلی متر بر ثانیه جریان نرمال- دکان و نرمال-دودکان را نشان می دهد. مشخص است که برای هر دو سیال در این سرعت تغییرات دمایی بر روی گستره وسیعی از عرض مجرا دیده می شود و این مربوط به سرعت به نسبت پایین سیال است که فرصت مناسبی را برای انتقال گرما از سطح گرم کن به سیال دی الکتریک فراهم می آورد. البته در مورد تفاوت دو سیال از نظر عملکرد انتقال گرما، بعدتر بحث انجام خواهد شد.

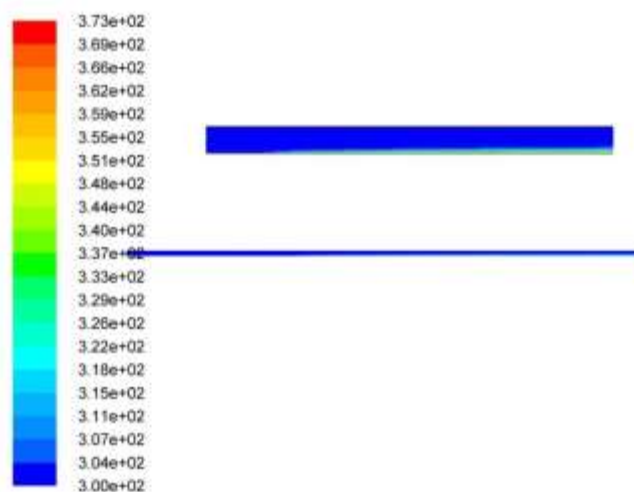


شکل ۲- توزیع دما برای حالت ۵ میلی متر بر ثانیه جریان نرمال-دکان

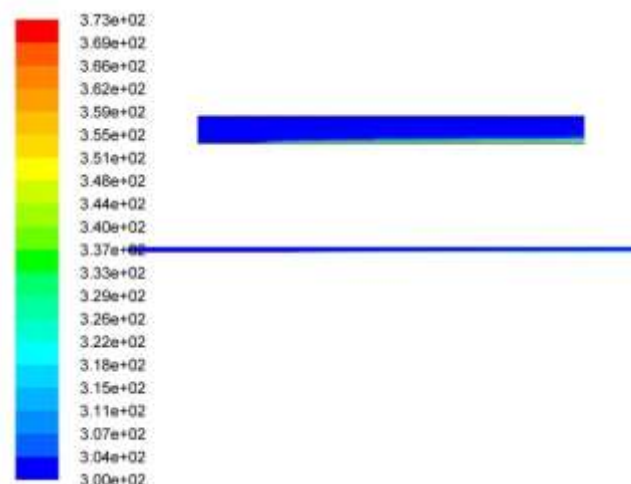


شکل ۳- توزیع دما برای حالت ۵ میلی‌متر بر ثانیه جریان نرمال-دودکان

با افزایش سرعت سیال گذرنده از روی گرم‌کن، فرصت کم‌تری برای تبادل گرما بین سطح گرم‌کن و سیال دی‌الکتریک فراهم می‌باشد و این مسئله به صورت گستردگی کمتر تغییرات دمایی بر روی عرض مجرا قابل مشاهده خواهد بود. در این جا و در شکل‌های ۴ و ۵ به عنوان حالت پیشینه، توزیع دما برای سرعت ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه جریان نرمال-دکان و نرمال-دودکان آورده شده است و برای رعایت اختصار از نمایش حالت‌های دیگر یعنی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه پرهیز می‌گردد.

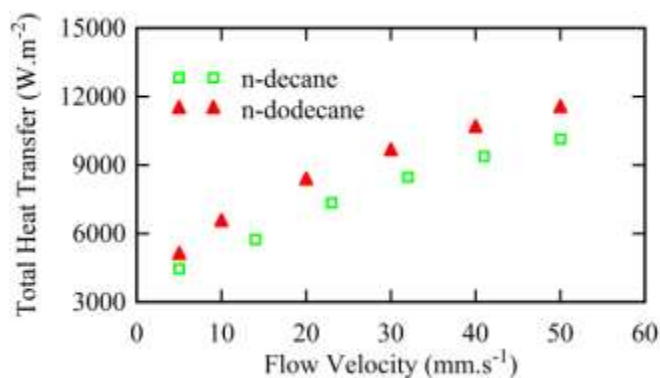


شکل ۴- توزیع دما برای حالت ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه جریان نرمال-دکان



شکل ۵- توزیع سرعت و دما برای حالت ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه جریان نرمال-دکان

شکل ۶ آهنگ انتقال گرما از گرم‌کن برای دو سیال در سرعت‌های مختلف جریان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش سرعت جریان، دبی مقدار بیشتری خواهد داشت و این باعث افزایش انتقال گرما می‌شود. به‌طوری‌که برای سرعت ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، آهنگ انتقال گرما نسبت به سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه برای نرمال-دکان و نرمال-دودکان به ترتیب ۱۲۷/۴ و ۱۳۶/۶ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۶- آهنگ انتقال گرما از گرم‌کن برای دو سیال و در سرعت‌های مختلف

البته باید توجه داشت که مقادیر متناظر آهنگ انتقال گرما برای نرمال-دودکان بیشتر از نرمال-دکان است و این مربوط به چگالی بالاتر نرمال-دودکان است که در دبی حجمی یکسان، جرم بیش‌تری از سیال وجود خواهد داشت و انتقال گرما افزایش خواهد یافت. به‌عنوان مثال، در سرعت‌های ۵ و ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، آهنگ انتقال گرما برای نرمال-دودکان نسبت به نرمال-دکان به ترتیب ۸/۹ و ۱۳/۳ درصد بیشتر می‌باشد. این مسئله با توجه به پایین‌تر بودن رسانش گرمایی نرمال-دودکان در مقایسه با نرمال-دکان مهم به نظر می‌رسد.

۴. نتیجه گیری

این پژوهش به مطالعه انتقال گرما از گرم کن به سیال دی الکتریک می پردازد. مشاهده می شود که نرمال-دودکان به دلیل چگالی بالاتر نسبت به نرمال-دکان (باوجود پایین تر بودن رسانش گرمایی آن) در مقایسه با نرمال-دکان عملکرد انتقال گرمایی بهتری را نشان می دهد. همچنین، در مورد هر دو سیال، با بیشتر شدن سرعت جریان، دبی افزایش و به تبع آن آهنگ انتقال گرما بین سطح گرم کن و سیال دی الکتریک بیشتر می شود.

مراجع

1. Cho, D.S., S. Kang, and Y.K. Suh, *Development of a bi-directional electrohydrodynamic pump: Parametric study with numerical simulation and flow visualization*. *Advances in Mechanical Engineering*, ۲۰۱۶. ۸(۶): p. ۱۲-۳۴.
2. Melcher, J., *Continuum electromechanics* (Cambridge. MIT press, ۱۹۸۱. ۱۹۸: p. ۳,۱-۳,۲۶.
3. Atten, P. and M. Haidara, *Electrical conduction and the motion of dielectric liquids in a knife-plane electrode assembly*. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, ۱۹۸۵(۲): p. ۱۸۷-۱۹۸.
4. Bryan J. and J. Seyed-Yagoobi, *Analysis of ۲-dimensional flow field generated by a ۱-electrode-pair ion-drag pump*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, ۱۹۹۴. ۱(۳): p. ۴۵۹-۴۶۶.
5. Crowley, J.M., G.S. Wright, and J.C. Chato, *Selecting a working fluid to increase the efficiency and flow rate of an EHD pump*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ۱۹۹۰. ۲۶(۱): p. ۴۲-۴۹.
6. Pickard, W.F., *Ion drag pumping. I. Theory*. *Journal of Applied Physics*, ۱۹۶۳. ۳۴(۲): p. ۲۴۶-۲۵۰.
7. Brand, K. and J. Seyed-Yagoobi, *Effect of electrode configuration on electrohydrodynamic induction pumping of a stratified liquid/vapor medium*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ۲۰۰۲. ۳۸(۲): p. ۳۸۹-۴۰۰.
8. Seyed-Yagoobi, J., et al., *Induction electrohydrodynamic pump in a vertical configuration: Part ۱—Theory*. *Journal of Heat Transfer*, ۱۹۸۹. ۱۱۱(۳): p. ۶۶۴-۶۶۹.
9. Washabaugh, A., M. Zahn, and J. Melcher, *Electrohydrodynamic traveling-wave pumping of homogeneous semi-insulating liquids*. *IEEE transactions on electrical insulation*, ۱۹۸۹. ۲۴(۵): p. ۸۰۷-۸۳۴.
10. Wawzyniak, M. and J. Seyed-Yagoobi, *Electrohydrodynamic induction pumping of a stratified liquid/vapor medium in the presence of volumetric and interface electric charges*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ۲۰۰۱. ۳۷(۴): p. ۹۵۰-۹۵۸.
11. Jeong, S.-I., J. Seyed-Yagoobi, and P. Atten, *Theoretical/numerical study of electrohydrodynamic pumping through conduction phenomenon*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ۲۰۰۳. ۳۹(۲): p. ۳۵۵-۳۶۱.
12. Atten, P. and J. Seyed-Yagoobi, *Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry*. *IEEE Transactions on*

- Dielectrics and Electrical Insulation, ۲۰۰۳. ۱۰(۱): p. ۲۷-۳۶.
۱۳. Yazdani, M. and J. Seyed-Yagoobi, *Electrically induced dielectric liquid film flow based on electric conduction phenomenon*. IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, ۲۰۰۹. ۱۶(۳): p. ۹۳۳-۹۳۸.
۱۴. Hemayatkhah, M., R. Gharraei, and E. Esmailzadeh, *Flow pattern visualization of liquid film conduction pumping using flush mounted electrodes*. Experimental Thermal and Fluid Science, ۲۰۱۱. ۳۵(۶): p. ۹۳۳-۹۳۸.
۱۵. Nourdanesh, N. and E. Esmailzadeh, *Experimental study of heat transfer enhancement in electrohydrodynamic conduction pumping of liquid film using flush electrodes*. Applied Thermal Engineering, ۲۰۱۳. ۵۰(۱): p. ۳۲۷-۳۳۳.
۱۶. Mirzaei, M. and M. Saffar-Avval, *Enhancement of convection heat transfer using EHD conduction method*. Experimental Thermal and Fluid Science, ۲۰۱۸. ۹۳: p. ۱۰۸-۱۱۸.