



Experimental Study of the Effects of Fluid Physical Properties and Working Temperature on Heat Transfer in Conduction Pump

M. Jafari^{1*}, E. Esmaeilzadeh^{1,2}, N. Farrokhi¹

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

ABSTRACT: In the current paper, heat transfer in conduction pumping of n-hexane and n-decane dielectrics (as working fluids) using flush electrodes is investigated by conducting experimental tests. The study has been carried out for different fluid film thicknesses and variable applied electric voltage, and the effects of various parameters such as physical properties (ion mobility difference, density and viscosity), as well as fluid working temperature on heat transfer performance of the conduction pump have been investigated. The results show that higher ion mobility difference, as well as lower density and viscosity, increases the flow rate and heat transfer in the conduction pump, due to the improvement of the vortices formation in the vicinity of the electrodes. Moreover, it significantly increases the heat transfer in the pump by creating turbulent flow around the electrodes. On the other hand, higher operating temperatures enhance the flow rate and heat transfer due to decreasing density and viscosity and also increasing the temperature gradient between the source and the destination of heat transfer. The intense heat transfer enhancement by using the conduction phenomenon compared to the ordinary fluid flow pumping through a simple duct (having no electrodes) is seen for all film thicknesses and working temperatures. Maximum observed enhancement of Nusselt number for n-hexane and n-decane are equal to 1041% and 568%, respectively.

Review History:

Received: Apr. 22, 2019

Revised: Sep. 16, 2019

Accepted: Nov. 05, 2019

Available Online: Nov. 05, 2019

Keywords:

Electrohydrodynamic

Electrical conduction pump

Ion mobility difference

Pump characteristics

1. Introduction

Applying electric field to a dielectric fluid medium causes mechanical body-force, which can create fluid flow at some conditions. This phenomenon can be used in many applications such as mass transport, heat transfer, liquid film pumping and electronic device cooling. ElectroHydroDynamic (EHD) pumps are mostly categorized in three types based on the way they form free charges: ion-drag pumps, induction pumps and conduction pumps. Conduction pumping phenomenon is based on the dynamic equilibrium of molecules dissociation and recombination of the ions generated from dissociation, which is a suitable pumping mechanism for homogeneous and isothermal fluids. Eq. (1) shows the mentioned dynamic equilibrium for conduction pumping [1]



where k_d , k_a are constants of dissociation and recombination rates, respectively.

From the different types of electrohydrodynamic pumps, Conduction pumping is a relatively new field among EHD topics. Jeong and Seyed-Yagoobi [2] began the studies about pumping of dielectric fluids by conduction phenomenon, and investigated conduction pumping performance. Atten and Seyed-Yagoobi [3] presented a simple model of conduction

with its corresponding numerical model. They used different electrode types and dielectrics. Yazdani and Seyed-Yagoobi [4] numerically investigated the effects of conduction on flow of liquid film. They observed that for the flush electrodes, difference between the width of the electrodes leads to net flow of liquid. Hemayatkhan et al. [5] experimentally investigated the flow pattern of the electrical conduction pump with flush electrodes, and presented their results about the location and situation of eddies creation in the vicinity of the electrodes. Nourdanesh and Esmaeilzadeh [6] experimentally investigated heat transfer in electrical conduction pump with flush electrodes for kerosene. They reported that by applying electrical field heat transfer was enhanced significantly. Gharraei and Esmaeilzadeh [7] numerically simulated conduction pump with flush electrodes, and compared the results with the experimental results, which showed proper conformity.

To the best of the authors' knowledge, there has been no study working on the simultaneous effects of changing working temperature and using different dielectric fluids on heat transfer and heat transfer enhancement in conduction pumps. In the current study, effect of parameters such as working temperature of the system and applied voltage for two different dielectric liquids (n-hexane and n-decane) on

*Corresponding author's email: mjafari@tabrizu.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

heat transfer enhancement of the conduction pump with flush electrodes is experimentally investigated. It is obvious that using electrical conduction pumps can be very useful because of their unique characteristics such as the lack of moving parts. On the other hand, these pumps can be used in certain applications to enhance heat transfer. The combination of good hydrodynamic performance and excellent heat transfer characteristics will make conduction pumps more applicable in future.

2. Methodology

The setup has a loop-shaped channel with its floor made of polyethylene and walls made from plexiglass. The loop consists of two direct sections and two curved sections. One of the direct sections has the flush electrodes mounted on it, while the other one is the place where measurements of flow velocity are performed. Under the surface of the two curved sections, heaters are embedded to create the ability of changing fluid temperature. Average temperature of the fluid in the channel is measured by using temperature sensors. Measurements accuracy for temperature, film thickness, applied voltage and electrical current are $\pm 0.03^\circ\text{C}$, $\pm 0.2\text{ mm}$, $\pm 1\text{ V}$, $\pm 1\text{nA}$, respectively.

3. Results and Discussion

In this section, electrical conduction pumping of two different dielectric liquid films in an open channel using copper flush electrodes is investigated, and the effect of liquid physical properties and temperature of the dielectric liquid on heat transfer enhancement of the pump is discussed. With the heat transfer coefficient known, the Nusselt number is obtained as follows:

$$\bar{N}u = \frac{\bar{h}d_h}{k} \quad (2)$$

where \bar{h} , d_h and k are heat transfer coefficient, hydraulic diameter of the channel and the thermal conductivity of the dielectric fluid, respectively.

The Nusselt number variations for the film thickness are shown in Fig. 1. As can be seen, the applied voltage increases the Nusselt number. In almost all cases, n-hexane exhibits a higher Nusselt number than n-decane, which is due to its physical properties. As explained earlier, higher ion mobility differences and lower viscosity and density cause n-hexane to form stronger vortices near the electrodes. The created vortices, in addition to creating the flow in the channel, also increase the heat transfer due to their turbulent nature. Maximum observed enhancement of Nusselt number for n-hexane and n-decane for the film thickness are equal to 677.6% and 568.2%, respectively. Moreover, higher operating temperatures increase the Nusselt number further. For a thickness of at the operating voltage of 6 kV, increasing the temperature from 35°C to 45°C increases the Nusselt number for n-hexane and n-decane in case C2 by 133.1% and 104.7%, respectively.

4. Conclusion

The current study experimentally investigated enhancing heat transfer by using electrical conduction pumping of two hydrocarbon dielectric having different properties such as ion

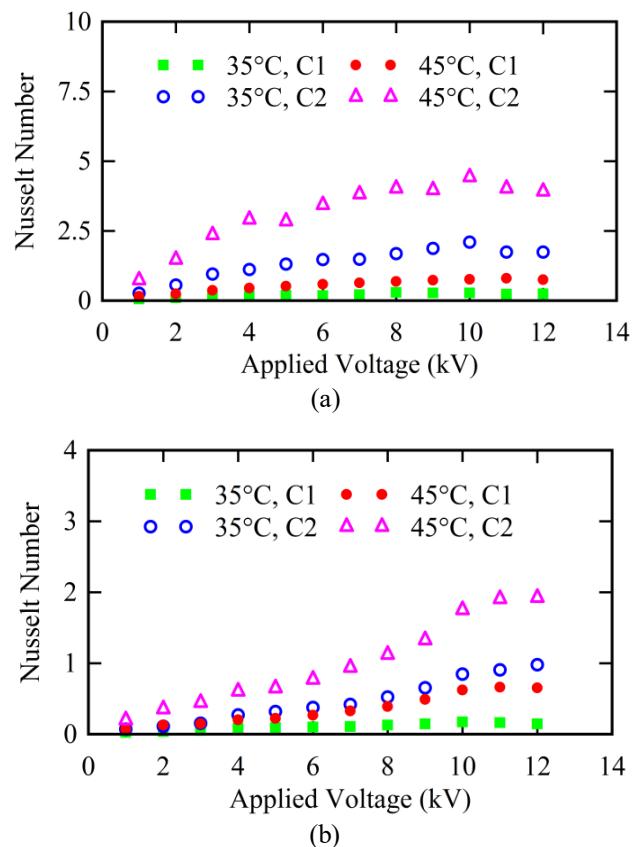


Fig. 1. The Nusselt number changes with applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane

mobility, density and viscosity. Results show that:

- At a given voltage, flow rate and heat transfer in the channel are higher for n-hexane. This is due to the higher value of ion mobility difference for n-hexane which improves the vortex formation in the vicinity of the electrodes. For n-decane, higher density and viscosity also act as decreasing agents.

- It is observed that increasing the operating temperature increases the flow rate. Due to the decrease in density and viscosity at higher temperatures, the increased temperature facilitates the vortex motion (which results in fluid flow in the channel) in the vicinity of the electrodes. It is also evident that heat transfer at higher temperatures increases due to the higher temperature difference between the heat source and the surroundings.

- The Nusselt number is significantly increased for all different thicknesses of the fluid film and also operating temperatures by the use of electrical conduction pumps, which is due to the creation of turbulence in the vicinity of the electrodes. For a thickness of at the operating voltage of 6 kV, increasing the temperature from 35°C to 45°C increases the Nusselt number for n-hexane and n-decane in case C2 by 133.1% and 104.7%, respectively.

References

- [1] R. Raghavan, J. Qin, L.Y. Yeo, J.R. Friend, K. Takemura, S. Yokota, K. Edamura, Electrokinetic actuation of low conductivity dielectric liquids, Sensors and Actuators B: Chemical, 140(1) (2009) 287-294.

- [2] S.-I. Jeong, J. Seyed-Yagoobi, P. Atten, Theoretical/numerical study of electrohydrodynamic pumping through conduction phenomenon, IEEE Transactions on Industry Applications, 39(2) (2003) 355-361.
- [3] P. Atten, J. Seyed-Yagoobi, Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10(1) (2003) 27-36.
- [4] M. Yazdani, J. Seyed-Yagoobi, Electrically induced dielectric liquid film flow based on electric conduction phenomenon, IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, 16(3) (2009).
- [5] M. Hemayatkhah, R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, Flow pattern visualization of liquid film conduction pumping using flush mounted electrodes, Experimental Thermal and Fluid Science, 35(6) (2011) 933-938.
- [6] N. Nourdanesh, E. Esmaeilzadeh, Experimental study of heat transfer enhancement in electrohydrodynamic conduction pumping of liquid film using flush electrodes, Applied Thermal Engineering, 50(1) (2013) 327-333.
- [7] R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, M.R.H. Nobari, Numerical investigation of conduction pumping of dielectric liquid film using flush-mounted electrodes, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 28(1) (2014) 89.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Jafari, E. Esmaeilzadeh, N. Farrokhi, Experimental Study of the Effects of Fluid Physical Properties and Working Temperature on Heat Transfer in Conduction Pump, Amirkabir J. Mech Eng., 53(3) (2021) 383-386.

DOI: [10.22060/mej.2019.16182.6297](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16182.6297)



مطالعه تجربی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی سیال و دمای کارکرد بر روی انتقال گرما در پمپ رسانشی

محرم جعفری^{*}، اسماعیل اسماعیلزاده^۱، نوید فرخی^۱

۱- دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۲

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۸/۳۰

كلمات کلیدی:

الکتروهیدرودینامیک

پمپ رسانش الکتریکی

اختلاف تحرک یونی

افزایش انتقال گرما

عدد ناسلت

خلاصه: در مقاله حاضر با انجام تست‌های تجربی، انتقال گرما در پمپ رسانشی با استفاده از الکترودهای مسطح برای دو مایع دی‌الکتریک نرمال-هگزان و نرمال-دکان به عنوان سیال عامل مورد مطالعه قرار گرفته است. این پژوهش برای ضخامت‌های مختلف فیلم سیال و با در نظر گرفتن ولتاژ الکتریکی متغیر، انجام شده و اثرات پارامترهای مختلف مانند ویژگی‌های فیزیکی (اختلاف تحرک یونی، چگالی و گرانروی) و همچنین دمای کاری سیال بر عملکرد انتقال گرمای پمپ بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بالاتر بودن اختلاف تحرک یونی سیال دی‌الکتریک و همچنین پایین‌تر بودن چگالی و لزجت، بدليل بهبود کیفیت تشکیل گردابه‌ها در همسایگی الکترودها باعث افزایش دبی جریان و افزون بر این بهدلیل ایجاد جریان آشفته در اطراف الکترودها موجب افزایش بسیار قابل توجه انتقال گرما در پمپ می‌شود. از سوی دیگر بیشتر بودن دمای کاری نیز به‌سبب کاهش چگالی و گرانروی و همچنین افزایش گرادیان دما بین منبع و مقصد انتقال گرما باعث بالارفتن دبی و انتقال گرمایی گردد. افزایش شدید انتقال گرما با استفاده از پدیده رسانش الکتریکی در مقایسه با گذر معمولی جریان از درون یک مجرای ساده (فاقد الکترود) برای تمام ضخامت‌های مختلف فیلم و دمای کاری مشاهده می‌شود. بیشترین مقادیر افزایش عدد ناسلت برای نرمال-هگزان و نرمال-دکان به ترتیب برابر ۱۰۴۱ و ۵۶۸ درصد مشاهده می‌شود.

۱- مقدمه

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

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

که در آن f_e ، E ، ε و ρ به ترتیب نشان‌دهنده نیروی حجمی، چگالی حجمی بار الکتریکی، شدت میدان الکتریکی، گذردهی

۱ Dielectric

۲ Mechanical Body Force

* نویسنده عهددار مکاتبات: mjafari@tabrizu.ac.ir



3 Coulomb Force

4 Electrophoretic Force

5 Electrostrictive Force

6 Ion-drag Pump

7 Induction Pump

8 Electrical Conduction Pump

9 Dissociation

10 Recombination

(Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسنده‌گان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.

توسط پمپاژ رسانشی را مطالعه نمودند. آن‌ها الکتروود ولتاژ بالا را بدون لبه‌های تیز و مشابه یک حلقه استوانه‌ای کشیده شده طراحی و با استفاده از الکتروودهای متفاوت برای اتصال به زمین، اثر برخی عوامل را بر پدیده پمپاژ رسانشی بررسی نمودند. صدیقی [۱۹] به طور تجربی به بررسی رفتار فیلم مایع تحت تأثیر پدیده رسانش الکتریکی پرداخت. وی از آرایش‌های گوناگون الکتروود و ضخامت‌های متفاوت فیلم مایع استفاده کرد. نتایج مطالعه وی نشان داد که کارکرد پمپ به میزان ولتاژ اعمال شده و ضخامت فیلم بستگی دارد. بیزدانی و سیدیعقوبی [۲۰] اثر رسانش الکتریکی بر جریان فیلم مایع را به صورت عددی شبیه‌سازی و مشاهده کردند که برای الکتروودهای مثبت و منفی همسایه مسطح، متفاوت بودن مقدار پهنای الکتروودهای مثبت و منفی همسایه در یک جفت الکتروود، منجر به ایجاد جریان خالص مایع می‌شود. حجتی و همکاران [۲۱] پمپاژ رسانشی با الکتروودهای استوانه‌ای را به طور تجربی مورد مطالعه قراردادند و اثر میدان الکتریکی و ضخامت فیلم سیال بر کارکرد آن را بررسی کردند. همایت‌خواه و همکاران [۲۲] الگوی جریان پمپ‌های رسانش الکتریکی با الکتروودهای مسطح را مورد بررسی قرار دادند و نتایج پژوهش خود در رابطه با موقعیت و وضعیت ایجاد گردابه در نزدیکی الکتروودها را ارائه کردند. نوردانش و اسماعیل‌زاده [۲۳] به بررسی تجربی انتقال گرما در پمپ‌های رسانش الکتریکی با الکتروودهای مسطح برای نفت سفید پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که با اعمال میدان الکتریکی، انتقال گرما به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. بیزدانی و سیدیعقوبی [۲۴] اثرات تحرک یونی نایابر بارهای مثبت و منفی بر جریان ایجادشده در پمپاژ رسانشی با الگوهای متقارن و نامتقارن الکتروودها را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها تأثیر میزان اختلاف تحرک یونی بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی جریان در پمپ رسانشی را نشان می‌دهد. غرائی و همکاران [۲۵] به طور تجربی رفتار هیدرودینامیکی جریان در حال توسعه فیلم فروریزنده آرام را در حضور پدیده هدایت الکترووهیدرودینامیکی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اعمال میدان الکتریکی با استفاده از الکتروودهای مسطح که هندسه جریان و ساختار اصلی فیلم را تغییر نمی‌دهد، می‌تواند رفتار فروریزش فیلم مایع را تحت تأثیر قرار دهد. سبحانی و همکاران [۲۶] جریان فروریزش فیلم روغن ترانسفورمر را در مجاورت میدان الکتریکی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که اعمال میدان، ضخامت

پمپاژ سیالات هم‌گن و تک‌دما می‌باشد. رابطه (۲) تعادل دینامیکی

$$AB \xleftarrow{\frac{k_d}{k_r}} A^+ + B^- \quad (2)$$

اشاره شده برای پمپ رسانشی را نشان می‌دهد [۱۲-۱۵]: که در آن k_d و k_r به ترتیب ثابت‌های مربوط به آهنگ جداسازی و بازترکیب یون‌ها می‌باشد. آهنگ بازترکیب را می‌توان ثابت در نظر گرفت، در حالی که آهنگ جداسازی تابعی از شدت میدان الکتریکی است. برای میدان الکتریکی قوی‌تر از ۱ کیلوولت بر متر، شدت جداسازی بیشتر از شدت بازترکیب است و این منجر به ایجاد بارهای آزادی می‌شود که به سمت الکتروودهای با قطب مخالف حرکت می‌کند [۱۶]. نیروی جاذبه بین هر یک از الکتروودهای با دو قطب آند یا کاتد و لایه سیال با بار مخالف الکتروود، دارای جهت‌های مخالف هستند که می‌توانند باعث خنثی شدن یکدیگر شوند. برای جلوگیری از این پیشامد، سیستم باید به گونه‌ای طراحی شود که یک نیروی خالص به عنوان برآیند دو نیروی جاذبه باقی بماند. دو عامل برای ایجاد این امکان وجود دارد که اولین عامل طراحی نامتقارن الکتروود آند و کاتد است. کاهش عرض الکتروود با حفظ مقدار اولیه طول آن باعث افزایش شدت میدان الکتریکی در مجاورت آن الکتروود می‌گردد که این موجب اعمال نیروی قوی‌تر به لایه سیال با بار مخالف مربوط به آن می‌شود. عامل دوم، اختلاف میزان تحرک یونی^۱ بارهای مثبت و منفی یک مایع است که قابلیت این بارها برای حرکت به سمت الکتروودهای متناظر با قطب مخالف را تعیین می‌کند.

در میان پمپ‌های الکترووهیدرودینامیکی، پمپ رسانشی و کارکردهای آن یک زمینه پژوهشی نسبتاً جدید می‌باشد که در سالیان اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. جیانگ^۲ و همکاران [۱۶] مطالعه در مورد پمپاژ مایعات دی‌الکتریک با پدیده رسانش الکتریکی را آغاز و کارکرد پمپ‌های رسانشی را بررسی نمودند. در کار آن‌ها از سه نوع الکتروود ولتاژ بالای سوزنی، لوله توخالی و چند لوله‌ای و همچنین از سیال کاری R-123 استفاده شده بود. آتن^۳ و سیدیعقوبی [۱۷] با در نظر گرفتن انواع مختلف الکتروودها به صورت صفحه- نقطه و صفحات موازی، پمپ رسانشی را به طور عددی شبیه‌سازی کردند. هاناواکا^۴ و همکاران [۱۸]، جت مایع ایجادشده

1 Ion Mobility

2 Jeong

3 Atten

4 Hanaoka

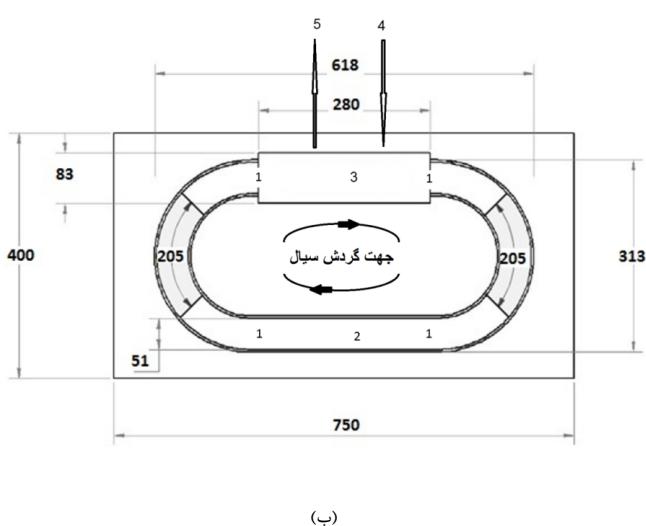
رسانش الکتریکی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها مانند نداشتن قطعات متحرک می‌تواند بسیار مفید باشد. از سوی دیگر این پمپ‌ها را می‌توان به دلیل دارا بودن ویژگی‌های عالی برای بهبود انتقال گرما، در کاربردهای خاصی مورد استفاده قرار داد. ترکیب عملکرد هیدرودینامیکی مناسب و انتقال گرمای عالی، اهمیت و ایجاد کاربردهای بیشتر برای این پمپ‌ها در آینده را به دنبال خواهد داشت.

۲- تجهیزات آزمایش

شکل ۱ نشان‌دهنده تصویر تجهیزات آزمایشی مطالعه حاضر و طرح‌واره آن می‌باشد. ساختار پمپ رسانشی دارای یک کanal حلقه‌ای شکل با سطح زیرین از جنس پلی‌اتیلن و دیوار ساخته شده از پلکسی‌گلس می‌باشد. حلقه شامل دو بخش بدون انحنای و دو



(الف)



(ب)

Fig. 1. (a) Experimental setup, (b) Schematic of the setup: 1. Temperature sensors, 2. Flow rate measurement location, 3. Electrodes location, 4,5. Electrical power in/out

شکل ۱: (الف) تصویر تجهیزات آزمایشی (ب) طرح‌واره تجهیزات آزمایشی: ۱- حسگرهای دما (ترموکوپل‌ها) - ۲- محل سنجش دبی - ۳- محل قرارگیری الکترودها و ۴- ورود و خروج جریان برق از منبع تغذیه

فیلم فروریزندۀ را برای گستره وسیعی از اعداد رینولدز کاهش می‌دهد. یزدانی و سیدیعقوبی [۲۷] تأثیر تزریق بار بر عملکرد پمپ رسانش الکتریکی را مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده نمودند که تزریق بار مثبت منجر به تضعیف عملکرد پمپ رسانش الکتریکی و درنهایت معکوس شدن جریان در پمپ می‌شود. میرزاچی و صفار اول [۲۸] بهبود انتقال گرمای جابه‌جایی با بهکارگیری رسانش الکتروهیدرودینامیکی را بررسی و برای آن یک پارامتر تأثیر معرفی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد روش ارائه شده برای رینولدزهای پایین تأثیر بیشتری را نشان می‌دهد. استیشکف^۱ و واسیلکف^۲ [۲۹] تشکیل بار الکتریکی در نزدیکی سطح دی‌الکتریک جامد در یک مایع دی‌الکتریک ضعیف را که تحت تأثیر میدان الکتریکی خارجی قوی رخ می‌دهد، مطالعه کردند. نتایج نشان داد که در حالت کلی، بار بهصورت یک لایه ایجاد می‌شود و می‌تواند درنتیجه حمل آن، در امتداد سطح دی‌الکتریک تجمع یابد. نوردانش و همکاران [۳۰] استفاده از پمپ‌از رسانشی فیلم سیال دی‌الکتریک توأم با پمپ‌از مکانیکی را مورد بررسی قراردادند و تأثیرات متقابل دو عامل پمپ‌از را مطالعه نمودند. این نتایج در برخی محدوده‌های ولتاژ اعمالی موجب هم‌افزایی و در بعضی محدوده‌ها دارای اثر عکس مشاهده گردید. جعفری و همکاران [۳] بهطور تجربی عملکرد پمپ رسانشی با الکترودهای مسطح را برای دو مایع دی‌الکتریک نرمال-هگزان و نرمال-دکان به عنوان سیال عامل مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی سیال و دمای کارکرد بر عملکرد هیدرودینامیکی و بازده پمپ را بررسی نمودند.

مرور و بررسی کارهای انجام‌شده نشان می‌دهد که تاکنون هیچ پژوهشی به منظور بررسی هم‌زمان اثرات دمای کارکرد و استفاده از مایعات دی‌الکتریک مختلف بر روی انتقال گرما و افزایش آن در پمپ‌های رسانشی انجام نشده است. بر این اساس در مطالعه تجربی حاضر، تأثیر دمای کارکرد سیستم و ولتاژ اعمال شده به دو مایع دی‌الکتریک نرمال-هگزان و نرمال-دکان بر افزایش انتقال گرما در پمپ رسانشی با الکترودهای مسطح مورد بررسی قرار گرفته است. قابلیت کار کردن در دمای‌های مختلف هنگام استفاده از کاربردهای افزایش انتقال گرما در پدیده پمپ‌از رسانش الکتریکی از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. مشخص است که استفاده از پمپ‌های

¹ Stishkov² Vasilkov

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی مایعات مورداستفاده

Table 1. Physical properties of the used fluids

نوع ماده	[۳۱] (kg/m ³)	چگالی	[۳۲] (mPa.s)	گرانروی (mPa.s)	[۳۳] بون منفی	تحرک یونی (m ² /V s)	رسانش الکتریکی [۳۴] (۱۰ ^{-۸} S/m)
نرمال-هگزان	۶۵۷		۰/۳۱۲۶	۶/۸	۱۰	۸۰	
نرمال-دکان	۷۲۸		۰/۹۲۹۱	۱/۵	۳/۵	۳/۴۶	

همراه با انتقال گرما، کالیبراسیون ترموموکوپل‌ها مسئله‌ای بسیار مهم برای اطمینان از صحت نتایج می‌باشد که در پژوهش حاضر نیز مورد توجه قرار گرفته است. روند کار به این صورت است که یک لیوان آب داغ برای کالیبره کردن ترموموکوپل‌ها در شرایط محیط قرار داده می‌شود تا به تدریج خنک شود. دمای آب به طور لحظه‌ای همزمان با فرایند خنکشدن، به وسیله هر کدام از ترموموکوپل‌ها و نیز به وسیله یک دماسنچ مخصوص کالیبراسیون (با دقیق ۰/۰۳ درجه سانتی‌گراد) ثبت می‌گردد. به این ترتیب انحراف سنجش دما توسط ترموموکوپل‌ها از مقدار واقعی، در ثبت مقدار دما مشخص و در محاسبات لحاظ می‌شود. همچنین باید توجه داشت که داده‌ها در شرایط کاملاً پایا و مستقل از زمان جمع‌آوری شود. بنابراین در هر مرحله از ثبت داده‌ها باید آن اندازه از اعمال تغییرات، زمان بگذرد تا نتایج وابسته به زمان نباشند. دما و فشار محیط در هنگام انجام آزمایش‌ها به ترتیب برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۸۵/۵ کیلوپاسکال می‌باشد.

آرایش شش جفت الکترود مورداستفاده برای ایجاد جریان سیال در شکل ۲ نشان داده شده است. عرض الکترودهای مسطح نصب شده روی کف کanal، برای الکترودهای زمین و ولتاژ بالا به ترتیب برابر ۴ و ۱۶ میلی‌متر است. فاصله بین الکترودهای ولتاژ بالا و الکترودهای زمین متناظر آن‌ها برابر ۲ میلی‌متر و فاصله بین یک الکترود ولتاژ بالا و الکترود زمین از جفت همسایه آن برابر ۲۲ میلی‌متر است [۲۰].

ویژگی‌های فیزیکی مایعات مورداستفاده در این پژوهش که عبارت از نرمال-هگزان^۷ و نرمال-دکان^۸ می‌باشند، در جدول ۱ نشان داده شده است. دمای میانگین مایع موجود در کanal با استفاده از حسگر دمای پی‌تی ۱۰۰ اندازه‌گیری می‌شود.

بخش منحنی شکل است. بر روی یکی از بخش‌های بدون انحنا، الکترودهای مسطح نصب شده‌اند (بخش سی^۱) و بخش دیگر فاقد الکترود می‌باشد (بخش سی^۲). زیر سطح دو بخش منحنی، گرم‌کن^۳‌هایی به منظور ایجاد امکان تغییر دمای سیال تعییه شده است. عرض کانال ۵۱ و ارتفاع آن ۲۰ میلی‌متر است. گرم‌کن‌ها از صفحات مسی ساخته شده‌اند و عایقی بر روی آن‌ها نصب شده است تا گرم‌کن‌ها از سیال موجود در کانال جدا شوند. همچنین، حسگر دما مدل پی‌تی ۱۰۰^۴ زیر گرم‌کن‌ها تعییه شده است تا امکان کنترل دمای آن‌ها را با تغییر جریان الکتریکی فراهم کند. حسگر به یک کنترل کننده دمای اتونیکس^۵ مدل تی‌سی۱۴-۱۶R^۶ متصل شده است که نقش تغییردهنده جریان الکتریکی را بازی می‌کند. دقیق اندازه‌گیری برای دما، ضخامت فیلم، ولتاژ اعمال شده و جریان الکتریکی به ترتیب برابر ۰/۰۳ درجه سانتی‌گراد، ۰/۲ میلی‌متر، ۱ ولت و ۱ نانوآمپر است. باید توجه داشت که در یک آزمایش تجربی

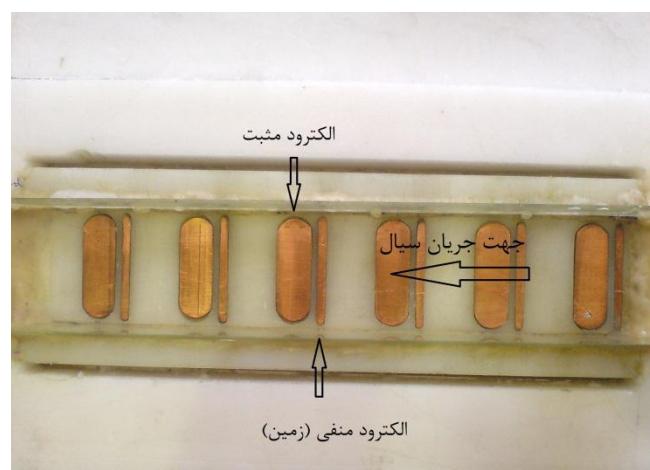
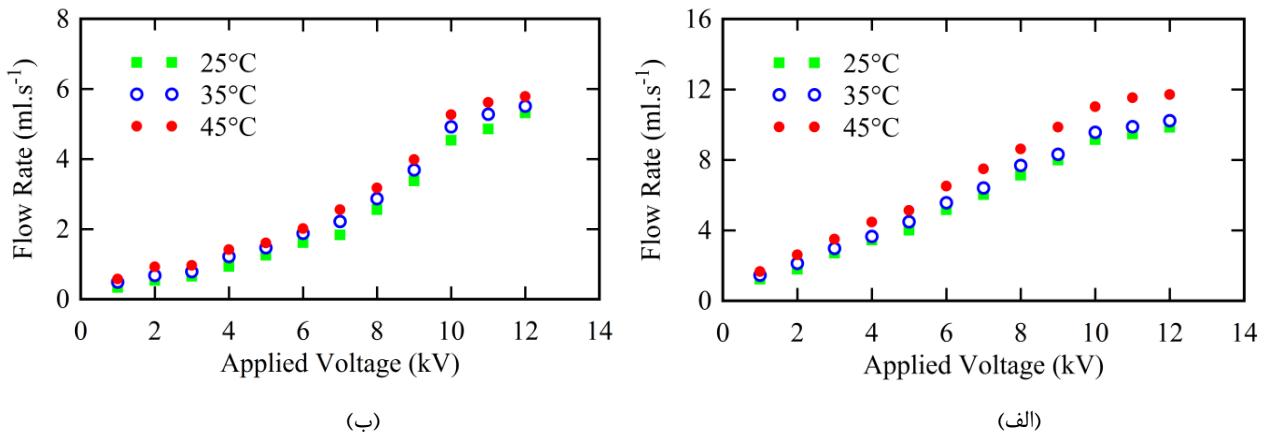


Fig. 2. Arrangement of the electrodes in the setup

شکل ۲: آرایش الکترودهای مورداستفاده در آزمایش

- 1 C2
- 2 C1
- 3 Heater
- 4 PT100
- 5 Autonics
- 6 TC4Y-14R

⁷ n-hexane⁸ n-decane



شکل ۳: تغییرات دبی سیال بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۴ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

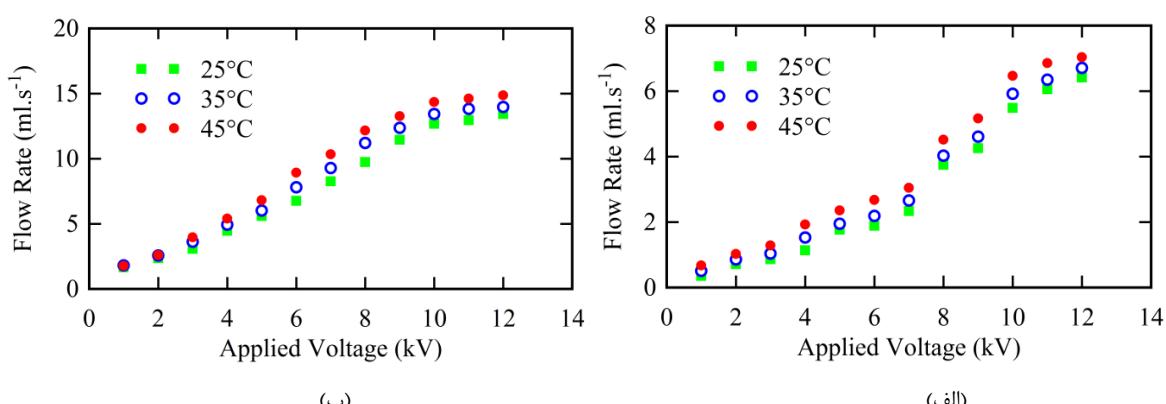
الکتریکی و درنتیجه آن نیروی حجمی اعمال شده به بارها شدت می‌یابد و این امر جریان سیال را سرعت می‌بخشد. در ولتاژهای بالاتر، آهنگ جداسازی یون‌ها تشدید می‌شود و بنابراین تغییرات دبی آهنگ بالاتری را نشان می‌دهد. برای ولتاژهای بالاتر از ۱۰ کیلوولت، جریان نسبتاً سریع سیال، بارها را از همسایگی الکتروودها دور می‌سازد و نیروی اعمال شده بر روی آن‌ها را کاهش می‌دهد که تأثیر آن بهصورت وضعیت اشباع برای جریان دیده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود، نرمال-دکان دبی پایین‌تری را نسبت به نرمال-هگزان نشان می‌دهد و این به دلیل مقادیر پایین‌تر اختلاف تحرک یونی (یکی از عوامل اصلی پمپاژ رسانایی) برای آن در مقایسه با نرمال-هگزان است. علاوه بر این، چگالی و لزجت بالاتر برای نرمال-دکان به عنوان عوامل مقاومت در مقابل حرکت سیال عمل می‌کنند. مشاهده می‌شود که افزایش دمای کارکرد باعث بیشترشدن دبی جریان می‌شود. از آنجا که هر دو سیال در دمای‌های بالاتر دارای مقادیر پایین‌تر چگالی و لزجت

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، انتقال گرما در پمپاژ رسانشی فیلم دو سیال دی‌الکتریک مختلف (نرمال-هگزان و نرمال-دکان) در یک کanal با استفاده از الکترودهای مسی مسطح بررسی می‌شود. همچنین، تأثیر ویژگی‌های فیزیکی سیال و دمای کارکرد بر مشخصه‌های انتقال گرمای پمپ مانند آهنگ انتقال گرما و عدد ناسلت مورد بحث قرار می‌گیرد. در هر مرحله، داده‌ها هنگامی که سیستم در حالت پایا ثابت می‌شود، جمع‌آوری می‌گردد.

۳-۱- دبی حجمی

تغییرات دبی جریان برای ضخامت فیلم ۴ میلی‌متر در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش ولتاژ موجب افزایش دبی جریان در کانال می‌گردد. با افزایش ولتاژ، میدان



شکل ۴: تغییرات دبی سیال بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۶ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

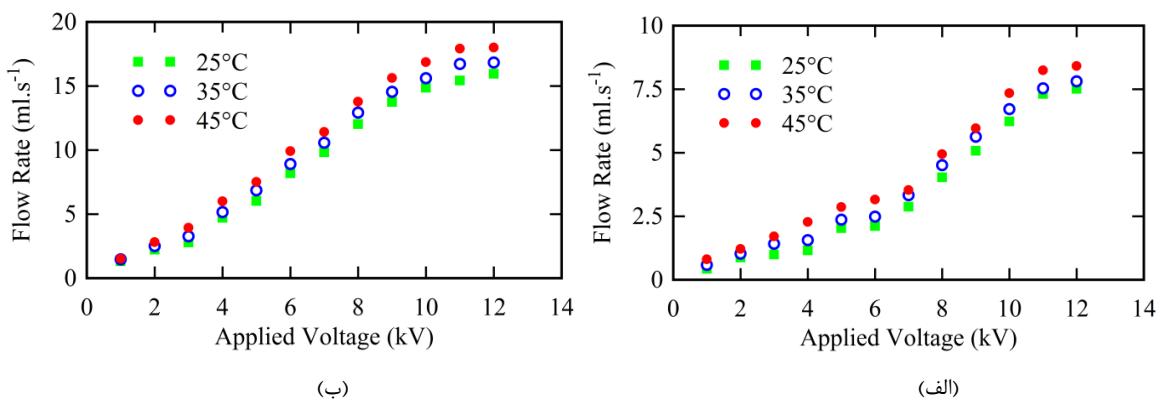


Fig. 5. Flow rate versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane
شکل ۵: تغییرات دبی سیال بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۸ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

۲-۳: انتقال گرما

آهنگ انتقال گرما از سیال دیالکتریک به هوای اطراف از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{m}^c = \dot{m}^c e^{\Delta T}$$

که در کanal، ظرفیت گرمایی ویژه سیال دیالکتریک و افت دمای سیال ناشی از انتقال گرما می‌باشد. تغییرات آهنگ انتقال گرما برای ضخامت فیلم ۴ میلی‌متر در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، افزایش ولتاژ موجب افزایش آهنگ انتقال گرما می‌گردد. با افزایش ولتاژ، علاوه بر افزایش دبی، آشفتگی جریان در همسایگی الکترودها نیز افزایش می‌یابد. این دو عامل سبب بیشتر شدن آهنگ انتقال گرما از سیال دیالکتریک به هوای اطراف می‌شود. البته همانند آن‌چه برای دبی گفته شد، در این جایز پس از یک ولتاژ تقریباً مشخص، وضعیت اشباع دیده می‌شود. جریان آشفته ایجاد شده در همسایگی الکترودها هم‌چنین آهنگ انتقال گرما در بخش سی ۲

هستند، دمای کارکردی بالاتر حرکت گردابه‌های ایجاد شده در مجاورت الکترودها که منجر به جریان سیال در کanal می‌شود را تسهیل می‌کند. برای ضخامت ۴ میلی‌متر در ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، افزایش دما از ۲۵ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد، دبی جریان برای نرمال-هگزان و نرمال-دکان را به ترتیب به اندازه ۲۵/۹% و ۲۴/۷% افزایش می‌دهد.

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب تغییرات دبی جریان برای ضخامت‌های فیلم ۶ و ۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد. مشخص است که با وجود آن که سرعت فیلم‌های نازک‌تر مایع بالاتر می‌باشد، ولی از آن‌جا که با افزایش ضخامت فیلم سطح مقطع جریان بیشتر می‌شود، دبی حجمی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در مورد ضخامت ۴ میلی‌متر توضیح داده شد در تمام موارد، دمای کاری بیشتر باعث افزایش دبی جریان می‌شود. علاوه بر این، نرمال-هگزان دبی بالاتری را نشان می‌دهد که پیش‌تر توضیح داده شده است.

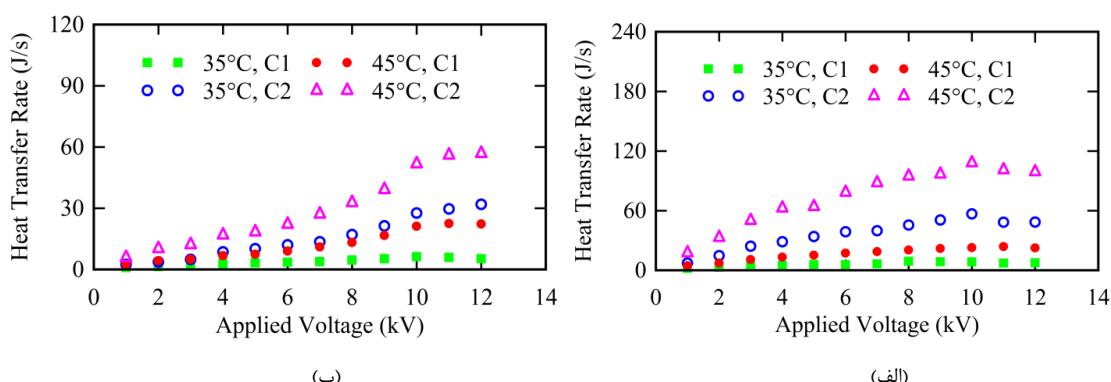


Fig. 6. Heat transfer rate versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane
شکل ۶: تغییرات آهنگ انتقال گرما بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۴ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

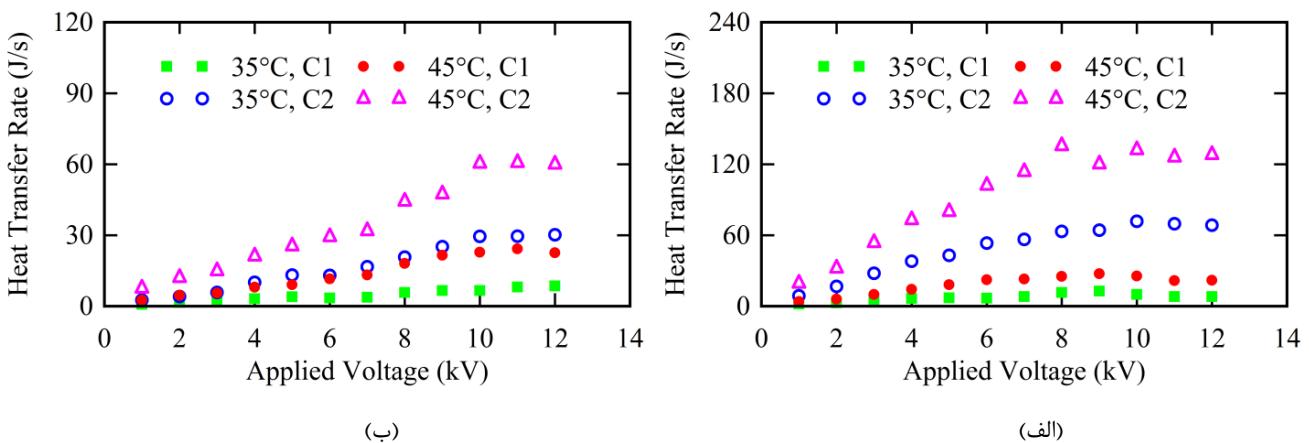


Fig. 7. Heat transfer rate versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane
شکل ۷: تغییرات آهنگ انتقال گرما بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۶ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

افزایش می‌دهد.
شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب تغییرات آهنگ انتقال گرما برای ضخامت‌های فیلم ۶ و ۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد. با وجود افزایش دبی جریان نسبت به ضخامت ۴ میلی‌متر، به دلیل کاهش افت دمای سیال در مقایسه با ضخامت یادشده که ناشی از پایین آمدن نسبت سطح تماس به حجم سیال می‌باشد، مقدار آهنگ انتقال گرما تغییر چندانی نسبت به موارد متناظر در آن ضخامت پیدا نکرده است. همان‌طور که در مورد ضخامت ۴ میلی‌متر توضیح داده شد در تمام موارد، دمای کارکردی بالاتر باعث افزایش دبی جریان می‌شود. علاوه بر این، نرمال-هگزان آهنگ انتقال گرمای بالاتری را نشان می‌دهد که پیش‌تر شرح داده شد.

۱-۲-۳- طراحی و تحلیل آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن متغیرهای جنس، ضخامت

را در مقایسه با بخش سی ۱ بهشت افزایش می‌دهد که این مسئله در شکل دیده می‌شود و البته در پایان بخش نتایج بیشتر مورد بحث قرار خواهد گرفت. همان‌طور که مشخص است، نرمال-دکان آهنگ انتقال گرمای پایین‌تری را نسبت به نرمال-هگزان نشان می‌دهد که این به دلیل مقادیر پایین‌تر اختلاف تحرک یونی (یکی از عوامل اصلی پمپاز رسانایی) و مقادیر بالاتر چگالی و لزجت برای آن در مقایسه با نرمال-هگزان است. در شکل ۶ دیده می‌شود که افزایش دمای کاری باعث افزایش آهنگ انتقال گرما می‌شود. علاوه بر آن‌چه در مورد افزایش دبی و تسهیل حرکت گردابه‌های ایجادشده در مجاورت الکترودها گفته شد، دمای‌های بالاتر به معنای گرادیان دمایی بیشتر بین منبع و مقصد انتقال گرما است که مشخصاً آهنگ انتقال گرما را بالا می‌برد. برای ضخامت ۴ میلی‌متر در ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، افزایش دما از ۳۵ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد، آهنگ انتقال گرما برای نرمال-هگزان و نرمال-دکان را در حالت سی ۲ به ترتیب به اندازه ۱۰۱/۷٪ و ۸۲/۷٪

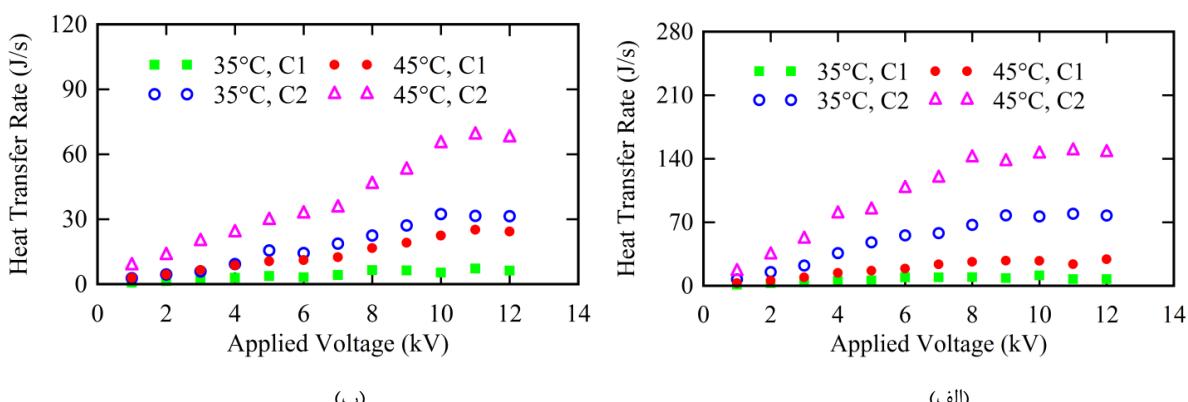


Fig. 8. Heat transfer rate versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane
شکل ۸: تغییرات آهنگ انتقال گرما بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۸ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

می باشد. همچنین مقادیر کوچک پی^۵ یا همان سطح معناداری (مقادیر کوچک تر از ۰/۰۵) نیز تائید می نماید که اثر پنج متغیر بررسی شده و همچنین اثر متقابل آنها بر روی پاسخ (آهنگ انتقال گرما) معنی دار است و به عبارت دیگر تغییر در سطوح متغیرهای مستقل باعث تغییرات معنی دار (که ناشی از تغییرات تصادفی نمی باشند) در متغیر وابسته می گردد. بنابراین می توان نتیجه گیری نمود که نتایج ناشی از شناس، تصادف و خطای نمونه گیری نیست و مدل نتایج و در نتیجه کلیت آزمایش ها از وضعیت بسیار خوبی برخوردار است. مقدار ضریب تشخیص^۶ برای مدل آزمایش ها برابر ۰/۹۴۰۸ به دست آمده است که در محدوده قابل قبولی قرار دارد و نرمال بودن نتایج را نشان می دهد. همچنین، مقدار دقت^۷ برابر ۸۰/۵۶۹ حساب شده است. چنان چه این نسبت بزرگ تر از ۴ باشد، بیان گر دقت پیش بینی مدل می باشد و این دقیق بودن مدل و در نتیجه طراحی مناسب آزمایش ها را نشان می دهد.

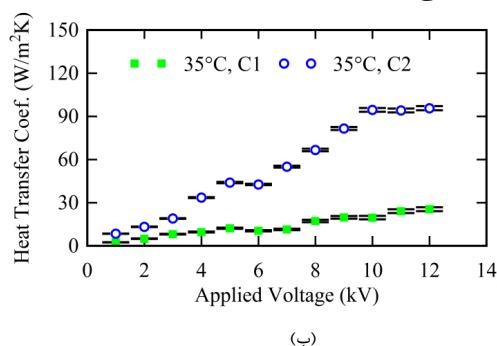
در مجموع، از آنالیز نتایج می توان این گونه نتیجه گرفت که طراحی آزمایش از وضعیت خوبی برخوردار است و متغیرهای آن به صورت مناسبی انتخاب شده است.

۲-۲-۳- ضریب انتقال گرما

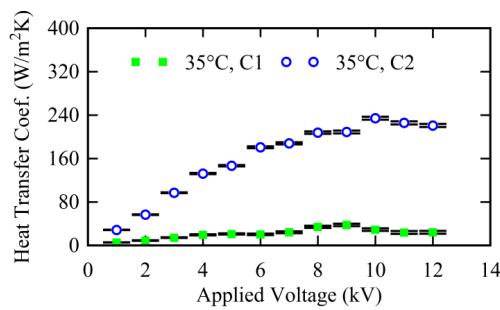
ضریب انتقال گرما از فیلم دی الکتریک از معادله زیر محاسبه

$$Q_h = \bar{h}A(T_{av} - T_\infty) \quad (4)$$

می شود:



(ب)



(الف)

Fig. 9. Heat transfer coefficient (with the corresponding uncertainty values) versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane

شکل ۹. تغییرات ضریب انتقال گرما همراه با مقادیر عدم قطعیت مربوطه بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۶ میلی متر (الف) نرمال- هگزان (ب) نرمال- دکان

۵ p value

۶ Coefficient of Determination

۷ Adeq Precision

جدول ۲: جدول آنوا برای متغیرهای آزمایش

Table 2. ANOVA table for experiments variables

p	مقدار	F	مریع مانگین	منبع
<0.0001	۲۸۸/۰۸	۱۸۵۴۴/۸۰		مدل
<0.0001	۵۸۹/۰۴	۳۷۹۱۸/۷۸		جنس سیال (A)
<0.0001	۴۱/۰۱	۲۶۴۰/۱۶		ضخامت فیلم سیال (B)
<0.0001	۴۶۲/۶۶	۲۹۷۸۳/۳۱		دمای کارکرد سیال (C)
<0.0001	۱۴۴۲/۵۵	۹۲۸۶۲/۲۸		وجود یا عدم وجود الکتروودها (D)
<0.0001	۷۱۵/۵۹	۴۶۰۶۵/۱۴		ولتاژ اعمال شده (E)
0.0013	۱۰/۵۶	۶۷۹/۷۸		AB
<0.0001	۵۷/۵۹	۳۷۰۷/۰۸		AC
<0.0001	۴۱۱/۷۶	۲۶۵۰۶/۷۸		AD
<0.0001	۴۷/۴۵	۳۰۵۴/۶۵		AE
0.0238	۵/۱۷	۳۳۲/۸۱		BC
<0.0001	۲۷/۴۶	۱۷۶۷/۴۵		BD
0.0002	۱۴/۰۸	۹۰۶/۵۷		BE
<0.0001	۱۱۹/۰۲	۷۶۶۲/۰۵		CD
<0.0001	۸۴/۱۷	۵۴۱۸/۳۶		CE
<0.0001	۲۹۳/۰۸	۱۸۸۶۶/۸۵		DE
-	-	۶۴/۳۷		باقیمانده

فیلم و دمای کارکرد سیال، وجود یا عدم وجود آشفتگی موضعی ناشی از الکتروودها و ولتاژ اعمال شده در مجموع ۲۸۸ آزمایش انجام شده است. پس از محاسبه مقادیر آهنگ انتقال گرما به منظور بررسی مؤثر و بهینه بودن متغیرهای آزمایش، تحلیل آزمایش ها با استفاده از روش پاسخ سطح^۱ صورت پذیرفته است. نتایج تحلیل های آماری در جدول ۲ (جدول آنوا^۲) آورده شده است.

همان گونه که در جدول ۲ دیده می شود، مقدار اف^۳ برای مدل آماری ایجاد شده بر اساس نتایج، عدد بزرگی (۰/۸/۲۸۸) به دست آمده است و این نشان دهنده کم بودن نویز در مدل و مناسب بودن^۴ آن

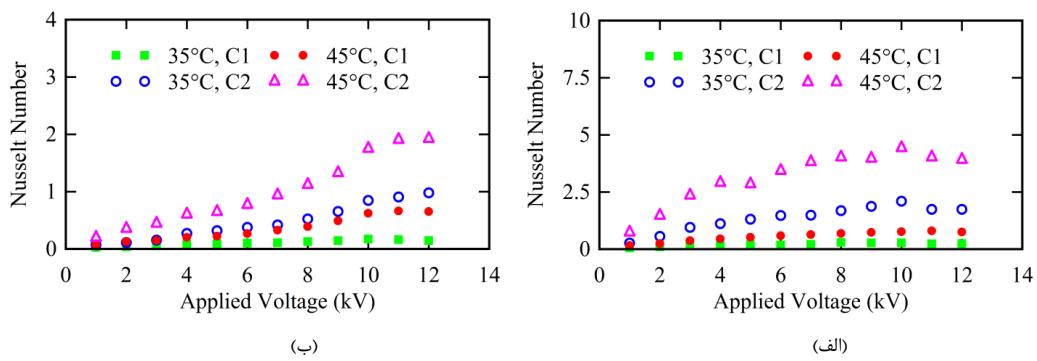


Fig. 10. Nusselt number versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane

شکل ۱۰: تغییرات عدد ناسلت بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۴ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

مریبوط به عدد ناسلت، ارائه نتایج آنالیز خطأ بر روی نمودارهای ضریب انتقال گرما صورت می‌پذیرد. به عنوان نمونه، شکل ۹ تغییرات ضریب انتقال گرما همراه با مقادیر عدم قطعیت مربوطه بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۶ میلی‌متر دو سیال دی‌الکتریک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است با افزایش ولتاژ، مقدار ضریب انتقال گرما و در نتیجه مقدار عدم قطعیت بیشتر می‌شود. بیشترین مقادیر عدم قطعیت برای نرمال-هگزان و نرمال-دکان در ضخامت ۶ میلی‌متر به ترتیب برابر ۲/۸۸ و ۱/۴۶ وات بر مترمربع درجه کلوین می‌باشد.

جدول ۳ بیشینه مقدار عدم اطمینان در محاسبه ضریب انتقال حرارت برای هر مطالعه موردی از کار فعلی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر عدم اطمینان در موارد سی ۱ در مقایسه با موارد متناظر سی ۲ بالاتر است و این به دلیل اختلاف دمای کمتر در بخش فاقد الکترود سیستم است. بیشینه عدم قطعیت کلی محاسبه شده

که در آن \bar{h} , T_{av} , A , T_∞ به ترتیب ضریب انتقال گرما، سطح فیلم در تماس با هوا، میانگین دمای توده سیال و دمای محیط است.

۱-۲-۲-۳ عدم قطعیت

عدم قطعیت تجربی با محاسبه جذر مجموع اثر پارامترهای اندازه‌گیری شده، به دست می‌آید و به شرح زیر است [۳۴]:

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

که δR و X_i به ترتیب عدم قطعیت مربوط به متغیر محاسبه شده و عدم قطعیت مشخص یک متغیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. برای بررسی انتقال گرما در پمپ رسانش الکتریکی، کمی بعدتر با ارائه عدد بی‌بعد ناسلت توضیحات مفصل داده خواهد شد. با این حال برای ارزیابی عدم قطعیت نتایج و بهمنظور خواناتر بودن نمودارهای

جدول ۳: بیشینه مقادیر عدم قطعیت برای هر مورد مطالعه

Table 3. Maximum uncertainty value for each case

بیشینه عدم قطعیت (%)					ضخامت فیلم (میلی‌متر)	ماده دی‌الکتریک		
دما ۳۵ درجه سانتی‌گراد		دما ۴۵ درجه سانتی‌گراد						
حالات	حالات	حالات	حالات	حالات				
سی ۲	سی ۱	سی ۲	سی ۱	سی ۱	نرمال-هگزان	نرمال-دکان		
۰/۸	۳/۲	۱/۳	۸/۵	۴				
۰/۸	۴/۳	۱/۳	۱۰/۶	۶				
۰/۸	۴/۷	۱/۴	۱۴/۱	۸				
۰/۷	۱/۸	۱/۲	۷/۱	۴	نرمال-دکان			
۰/۸	۲/۱	۱/۶	۶/۱	۶				
۰/۹	۲/۴	۱/۷	۸/۵	۸				

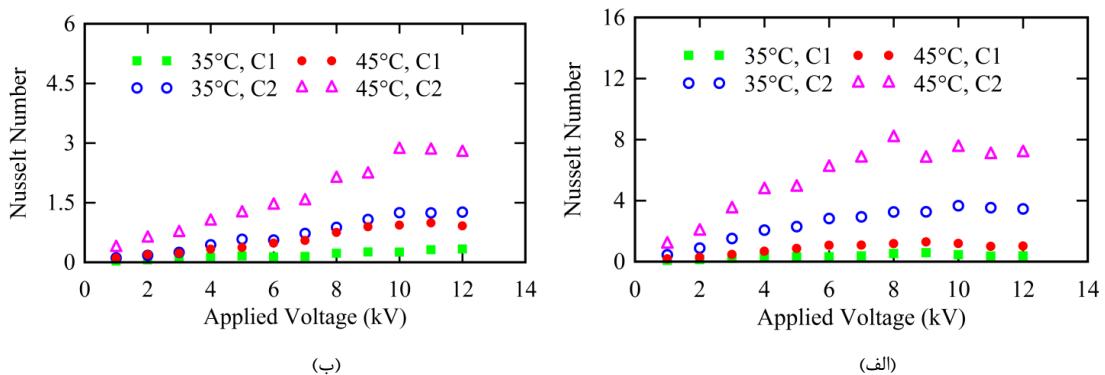


Fig. 11. Nusselt number versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane
شکل ۱۱: تغییرات عدد ناسلت بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۶ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

می‌دهد و این مسئله ناشی از خواص فیزیکی آن است. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد اختلاف حرکت یونی بالاتر و لزجت و چگالی پایین‌تر، موجب می‌شود تا نرمال-هگزان گردابه‌های قوی‌تری را در مجاورت الکتروودها ایجاد کند. گردابه‌های ایجادشده علاوه بر ایجاد جریان در کanal، هم‌چنین انتقال گرمایی را به دلیل ماهیت آشفته جریان پدید آمده، افزایش می‌دهند. علاوه بر این، دماهای کاری بالاتر باعث افزایش بیشتر عدد ناسلت می‌شود. برای ضخامت ۴ میلی‌متر در ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، افزایش دما از ۳۵ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد، عدد ناسلت را برای نرمال-هگزان و نرمال-دکان در حالت سی ۲ به ترتیب به اندازه ۱۳۳/۱٪ و ۱۰۴/۷٪ افزایش می‌دهد.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب تغییرات عدد ناسلت برای ضخامت‌های فیلم ۶ و ۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای ضخامت‌های بیشتر فیلم سیال، عدد ناسلت مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد. این مسئله به علت بالاتر بودن دبی جریان، باوجود

۱۴/۱٪ است.

۳-۲-۳- عدد ناسلت

با معلوم بودن ضریب انتقال گرمایی، عدد ناسلت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}d_h}{k} \quad (6)$$

که d_h و k به ترتیب قطر هیدرولیکی کanal و ضریب رسانش گرمایی سیال دی‌الکتریک می‌باشد.

تغییرات عدد ناسلت برای ضخامت فیلم ۴ میلی‌متر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ولتاژ اعمال شده عدد ناسلت را افزایش می‌دهد. تقریباً در همه موارد، نرمال-هگزان عدد ناسلت بالاتری را نسبت به نرمال-دکان نشان

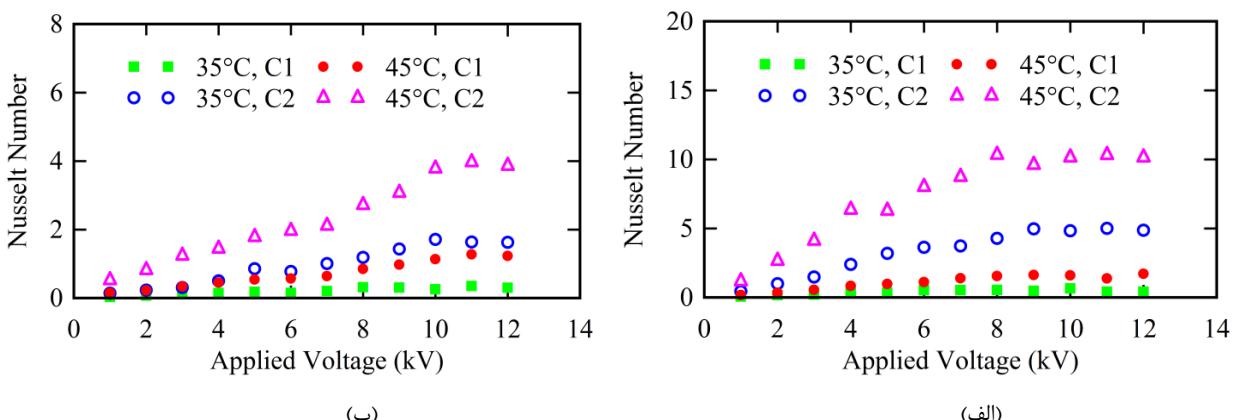


Fig. 12. Nusselt number versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane
شکل ۱۲: تغییرات عدد ناسلت بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۸ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

جدول ۴: افزایش عدد ناسلت برای حالت سی ۲ در مقایسه با حالت سی ۱
Table 4. Nusselt number enhancement for C2 in comparison with C1

نوع ماده	ضخامت فیلم (میلی‌متر)	دماهی ۳۵ درجه سانتی‌گراد	بیشترین افزایش (%)
نرمال-هگزان	۴	۶۷۷/۶	۵۳۸/۸
	۶	۸۴۵/۹	۶۲۴/۸
	۸	۱۰۴۰/۹	۶۶۸/۴
نرمال-دکان	۴	۵۶۸/۲	۱۹۴/۷
	۶	۳۸۳/۱	۲۳۰/۷
	۸	۵۵۵/۶	۲۶۳/۲

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر بهبود انتقال گرما در پمپاژ رسانش الکتریکی دو سیال دی‌الکتریک با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت مانند تحرک یونی، چگالی و لزجت به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که:

در یک ولتاژ مشخص، دبی جریان و انتقال گرما در کanal برای نرمال-هگزان بالاتر است. این مربوط به بیشتر بودن مقدار اختلاف تحرک یونی برای نرمال-هگزان است که باعث تقویت ایجاد گردابه در همسایگی الکترودها می‌شود. برای نرمال-دکان، مقادیر بالاتر چگالی و لزجت به عنوان عوامل کاهش‌دهنده عمل می‌کنند. به عنوان نمونه، برای ضخامت ۴ میلی‌متر در دماهی ۲۵ درجه سانتی‌گراد ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، دبی جریان برای نرمال-هگزان و نرمال-دکان به ترتیب برابر ۵/۱۸ و ۱/۶۲ میلی‌لیتر بر ثانیه می‌باشد.

مشاهده می‌شود که افزایش دماهی کاری باعث افزایش دبی سیال می‌شود. به علت کاهش مقادیر چگالی و لزجت در دماهای بالاتر، افزایش دما حرکت گردابهها در همسایگی الکترودها (که منجر به جریان سیال در کanal می‌شود) را تسهیل می‌نماید. همچنین مشخص است که انتقال گرما در دماهای بالاتر به علت اختلاف بیشتر دما بین منبع گرما و محیط افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، برای ضخامت ۴ میلی‌متر در ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، افزایش دما از ۳۵ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد، آهنگ انتقال گرما برای نرمال-هگزان و نرمال-دکان را در

نسبت پایین‌تر سطح تماس به حجم سیال است. در مورد حالت سی ۲ برای نرمال-هگزان در ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت و دماهی کاری ۴۵ درجه سانتی‌گراد، افزایش ضخامت فیلم از ۴ میلی‌متر به ۶ و ۸ میلی‌متر، عدد ناسلت را به ترتیب به میزان ۲۸٪ و ۳۲/۳٪ افزایش می‌دهد.

مسئله بسیار مهمی که در اینجا مشخص می‌گردد، آن است که مقادیر عدد ناسلت در بخش دارای الکترود (سی ۳) به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر مربوطه در بخش دیگر بدون الکترود (سی ۱) می‌باشد. جدول ۳ نشان‌دهنده افزایش عدد ناسلت در حالت سی ۲ در مقایسه با حالت سی ۱ است. نتایج درصد بیشینه افزایش برای هر ضخامت فیلم در دماهای کاری متفاوت در جدول آورده شده است.
 برای نرمال-هگزان، بیشینه افزایش برای دماهای کاری ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب برابر ۱۰۴۰/۹٪ و ۶۶۸/۴٪ می‌باشد. همچنین برای نرمال-دکان، بیشینه درصد افزایش برای دماهای کاری ذکر شده به ترتیب ۲/۵۶۸٪ و ۲/۲۶۳٪ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عدد ناسلت برای تمام ضخامت‌های مختلف فیلم و دماهای کاری کرد افزایش یافته است. این به دلیل جریان بسیار آشفته ایجاد شده در همسایگی الکترودها است که انتقال گرما از فیلم سیال به هوای محیط را افزایش می‌دهد. بررسی بهبود انتقال گرما و مقایسه آن با عملکرد سایر روش‌های فعال و غیرفعال انتقال گرما، اهمیت انجام مطالعات بیشتر برای استفاده از پمپ‌های رسانش الکتریکی به عنوان ابزار انتقال گرما را نشان می‌دهد.

۶- منابع

- [1] D.S. Cho, S. Kang, Y.K. Suh, Development of a bi-directional electrohydrodynamic pump: Parametric study with numerical simulation and flow visualization, *Advances in Mechanical Engineering*, 8(6) (2016) 12-34.
- [2] J. Melcher, *Continuum electromechanics* (Cambridge, MIT press, 1981) 3.1-3.26.
- [3] M. Jafari, E. esmaeilzadeh, N. Farrokhi, Experimental Study of the Effects of Fluid Physical Properties on Conduction Pump Performance, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2019) - DOI: 10.22060/MEJ.2019.14866.5961 (in Persian).
- [4] P. Atten, M. Haidara, Electrical conduction and the motion of dielectric liquids in a knife-plane electrode assembly, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (2) (1985) 187-198.
- [5] J. Bryan, J. Seyed-Yagoobi, Analysis of 2-dimensional flow field generated by a 1-electrode-pair ion-drag pump, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1(3) (1994) 459-466.
- [6] J.M. Crowley, G.S. Wright, J.C. Chato, Selecting a working fluid to increase the efficiency and flow rate of an EHD pump, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26(1) (1990) 42-49.
- [7] W.F. Pickard, Ion drag pumping. I. Theory, *Journal of Applied Physics*, 34(2) (1963) 246-250.
- [8] K. Brand, J. Seyed-Yagoobi, Effect of electrode configuration on electrohydrodynamic induction pumping of a stratified liquid/vapor medium, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(2) (2002) 389-400.
- [9] J. Seyed-Yagoobi, J. Chato, J. Crowley, P. Krein, Induction electrohydrodynamic pump in a vertical configuration: Part 1—Theory, *Journal of Heat Transfer*, 111(3) (1989) 664-669.
- [10] A. Washabaugh, M. Zahn, J. Melcher,

حالت سی ۲ به ترتیب به اندازه ۱۰٪ و ۸٪ افزایش می‌دهد.

عدد ناسلت برای تمام ضخامت‌های مختلف فیلم سیال و دماهای کاری با استفاده از پمپ رسانش الکتریکی به طور قابل توجهی افزایش یافته است که این ناشی از ایجاد جریان آشفته در همسایگی الکترودها می‌باشد. برای ضخامت ۴ میلی‌متر در ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، افزایش دما از ۳۵ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد، عدد ناسلت را برای نرمال-هگزان و نرمال-دکان در حالت سی ۲ به ترتیب به اندازه ۱۳۳٪/۱۰٪ و ۱۰۴٪/۱۰٪ افزایش می‌دهد.

۵- فهرست علائم

سطح فیلم در تماس با هوا	<i>A</i>
بخش بدون الکترود	<i>C1</i>
بخش دارای الکترود	<i>C2</i>
ظرفیت گرمایی ویژه	<i>c_p</i>
قطر هیدرولیکی کانال	<i>d_h</i>
شدت میدان الکتریکی	<i>E</i>
نیروی حجمی	<i>f_e</i>
ضریب رسانش گرمایی	<i>h̄</i>
ضریب انتقال گرما	<i>k</i>
ثابت آهنگ جداسازی یون‌ها	<i>k_d</i>
ثابت آهنگ بازترکیب یون‌ها	<i>k_r</i>
دبی جرمی سیال	<i>m̄</i>
عدد ناسلت	<i>Nu</i>
چگالی حجمی بار الکتریکی	<i>q</i>
عدم قطعیت متغیر محاسبه شده	<i>δR</i>
دماهی سیال	<i>T</i>
میانگین دماهی توده سیال	<i>T_{av}</i>
دماهی محیط	<i>T_∞</i>
عدم قطعیت مشخص یک متغیر	<i>X_i</i>
اندازه‌گیری شده	
علائم یونانی	
گذردهی الکتریکی	<i>ε</i>
چگالی سیال	<i>ρ</i>

Distinctive flow properties of liquid jet generated by EHD pump and conical nozzle, Electrical Engineering in Japan, 154(1) (2006) 9-19.

- [19] M.A.W. Siddiqui, Experimental Study of Stratified Liquid Film Pumping with Electric Conduction Phenomenon, Illinois Institute of Technology, 2006.
- [20] M. Yazdani, J. Seyed-Yagoobi, Electrically induced dielectric liquid film flow based on electric conduction phenomenon, IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, 16(3) (2009).
- [21] M. Hojjati, E. Esmaeilzadeh, B. Sadri, R. Gharraei, Electrohydrodynamic conduction pumps with cylindrical electrodes for pumping of dielectric liquid film in an open channel, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 392(1) (2011) 294-299.
- [22] M. Hemayatkah, R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, Flow pattern visualization of liquid film conduction pumping using flush mounted electrodes, Experimental Thermal and Fluid Science, 35(6) (2011) 933-938.
- [23] N. Nourdanesh, E. Esmaeilzadeh, Experimental study of heat transfer enhancement in electrohydrodynamic conduction pumping of liquid film using flush electrodes, Applied Thermal Engineering, 50(1) (2013) 327-333.
- [24] M. Yazdani, J. Seyed-Yagoobi, Effect of charge mobility on dielectric liquid flow driven by EHD conduction phenomenon, Journal of electrostatics, 72(4) (2014) 285-294.
- [25] R. Gharraei, M. Hemayatkah, S.B. Islami, E. Esmaeilzadeh, An experimental investigation on the developing wavy falling film in the presence of electrohydrodynamic conduction phenomenon, Experimental Thermal and Fluid Science, 60 (2015) 35-44.
- [26] A. Sobhani, S. Nasirivatan, R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, Experimental investigation of fully Electrohydrodynamic traveling-wave pumping of homogeneous semi-insulating liquids, IEEE transactions on electrical insulation, 24(5) (1989) 807-834.
- [11] M. Wawzyniak, 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, 37(4) (2001) 950-958.
- [12] R. Hanaoka, I. Takahashi, S. Takata, T. Fukami, Y. Kanamaru, Properties of EHD pump with combination of rod-to-rod and meshy parallel plates electrode assemblies, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16(2) (2009).
- [13] R. Hanaoka, S. Takata, M. Murakumo, H. Anzai, Properties of liquid jet induced by electrohydrodynamic pumping in dielectric liquids, Electrical Engineering in Japan, 138(4) (2002) 1-9.
- [14] S.-I. Jeong, J. Seyed-Yagoobi, Experimental study of electrohydrodynamic pumping through conduction phenomenon, Journal of Electrostatics, 56(2) (2002) 123-133.
- [15] R. Raghavan, J. Qin, L.Y. Yeo, J.R. Friend, K. Takemura, S. Yokota, K. Edamura, Electrokinetic actuation of low conductivity dielectric liquids, Sensors and Actuators B: Chemical, 140(1) (2009) 287-294.
- [16] S.-I. Jeong, J. Seyed-Yagoobi, P. Atten, Theoretical/numerical study of electrohydrodynamic pumping through conduction phenomenon, IEEE Transactions on Industry Applications, 39(2) (2003) 355-361.
- [17] P. Atten, J. Seyed-Yagoobi, Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10(1) (2003) 27-36.
- [18] R. Hanaoka, H. Nakamichi, S. Takata, T. Fukami,

fluid using electrohydrodynamic conduction pumps concept, *Applied Thermal Engineering*, 157 (2019) 113711.

[31] R.C. Reid, Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases. NB Vargaftik, Halsted Press, Division of John Wiley & Sons, Inc., New York, August, 1975. \$49.50, 758 pages, AIChE Journal, 21(6) (1975) 1235-1235.

[32] O. Gzowski, Mobility of ions in liquid dielectrics, *Nature*, 194(4824) (1962) 173-173.

[33] J. Bryan, J. Seyed-Yagoobi, Experimental study of ion-drag pumping using various working fluids, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 26(4) (1991) 647-655.

[34] R.J. Moffat, Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental thermal and fluid science*, 1(1) (1988) 3-17.

developed falling film flow in the presence of conduction pumps, *Journal of Electrostatics*, 73 (2015) 71-79.

[27] M. Yazdani, J.S. Yagoobi, The effect of uni/bipolar charge injection on EHD conduction pumping, *Journal of Electrostatics*, 75 (2015) 43-48.

[28] M. Mirzaei, M. Saffar-Avval, Enhancement of convection heat transfer using EHD conduction method, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 93 (2018) 108-118.

[29] Y.K. Stishkov, S. Vasilkov, D. Nechaev, The structure of field-induced near-wall charged layers arising in weakly conducting liquids near the surface of solid dielectrics, *Journal of Electrostatics*, 94 (2018) 44-50.

[30] N. Nourdanesh, S. Hossainpour, E. Esmaeilzadeh, Experimental investigation of heat transfer enhancement in an open-channel flow with dielectric

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Jafari, E. Esmaeilzadeh, N. Farrokhi, *Experimental Study of the Effects of Fluid Physical Properties and Working Temperature on Heat Transfer in Conduction Pump*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 1607-1620.

DOI: [10.22060/mej.2019.16182.6297](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16182.6297)

