



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

محرم جعفری<sup>۱\*</sup>، اسماعیل اسماعیل‌زاده<sup>۲</sup>، نوید فرخی<sup>۱</sup>

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

### کلمات 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 به‌عنوان 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 گرانیروی) 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، به‌دلیل 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 گرانیروی و هم‌چنین افزایش گرادیان دما بین منبع و مقصد انتقال گرما باعث بالا رفتن دبی و انتقال گرما می‌گردد. افزایش شدید انتقال گرما با استفاده از پدیده رسانش الکتریکی در مقایسه با گذر معمولی جریان از درون یک مجرای ساده (فاقد الکترودها) برای تمام ضخامت‌های مختلف فیلم و دماهای کاری مشاهده می‌شود. بیش‌ترین مقادیر افزایش عدد ناسلت برای نرمال-هگزان و نرمال-دکان به‌ترتیب برابر ۱۰۴۱ و ۵۶۸ درصد مشاهده می‌شود.

### ۱- مقدمه

الکتریکی و چگالی سیال می‌باشد. عبارتهای موجود در طرف دوم رابطه (۱) به‌ترتیب از سمت چپ نشان‌دهنده نیروهای کولمب<sup>۳</sup> (نیروی الکتروفورتیک<sup>۴</sup>)، دی‌الکتریک و الکترواستریکتیو<sup>۵</sup> هستند [۳]. سه نیروی یادشده لزوماً به‌صورت هم‌زمان در یک سیستم مشخص حضور ندارند؛ به‌عنوان مثال، در یک محیط سیال تک‌فاز و تک‌دما، نیروی کولمب تنها نیروی ایجادکننده جریان سیال است [۱].

پمپ‌های الکتروهیدرودینامیکی به‌طور کلی بر اساس نحوه شکل‌دهی یون‌ها به سه دسته پمپ‌های کشش یونی<sup>۶</sup> [۴-۷]، پمپ‌های القایی<sup>۷</sup> [۸-۱۱] و پمپ‌های رسانشی<sup>۸</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. پدیده پمپاژ رسانشی بر پایه تعادل دینامیکی جداسازی<sup>۹</sup> و بازترکیب<sup>۱۰</sup> یون‌های تجزیه‌شده برقرار است و مکانیزم مناسبی برای

اعمال میدان الکتریکی به یک سیال دی‌الکتریک<sup>۱</sup> باعث ایجاد نیروی حجمی مکانیکی<sup>۲</sup> در آن می‌شود که در برخی شرایط می‌تواند به جریان سیال منجر 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 ایجادشده در اثر اعمال میدان الکتریکی به سیال به‌صورت 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  $f_e$ ،  $q$ ،  $E$ ،  $\epsilon$  و  $\rho$  به‌ترتیب نشان‌دهنده نیروی حجمی، چگالی حجمی بار الکتریکی، شدت میدان الکتریکی، گذردهی

3 Coulomb Force

4 Electrophoretic Force

5 Electrostrictive Force

6 Ion-drag Pump

7 Induction Pump

8 Electrical Conduction Pump

9 Dissociation

10 Recombination

1 Dielectric

2 Mechanical Body Force

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mjafari@tabrizu.ac.ir



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

$$AB \xrightleftharpoons[k_r]{k_d} A^+ + B^- \quad (2)$$

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، درحالی‌که 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 الکترودهای با قطب مخالف حرکت می‌کنند [۱۶]. نیروی جاذبه بین هر یک از الکترودهای با دو قطب آند یا کاتد و لایه سیال با بار مخالف الکترودها، دارای جهت‌های مخالف هستند که می‌توانند باعث خنثی شدن یکدیگر شوند. برای جلوگیری از این پدیده، سیستم باید به گونه‌ای طراحی شود که یک نیروی خالص به‌عنوان برآیند دو نیروی جاذبه باقی بماند. دو عامل برای ایجاد این امکان وجود دارد که اولین عامل طراحی نامتقارن الکترودها و کاتد است. کاهش عرض الکترودها با حفظ مقدار اولیه طول آن باعث افزایش شدت میدان الکتریکی در مجاورت آن الکترودها می‌گردد که این موجب اعمال نیروی قوی‌تر به لایه سیال با بار مخالف مربوط به آن می‌شود. عامل دوم، اختلاف میزان تحرک یونی<sup>۱</sup> بارهای مثبت و منفی یک مایع است که قابلیت این بارها برای حرکت به سمت الکترودهای متناظر با قطب مخالف را تعیین می‌کند.

در میان پمپ‌های الکترودهیدرو دینامیکی، پمپ رسانشی و کارکردهای آن یک زمینه پژوهشی نسبتاً جدید می‌باشد که در سالیان اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. جیانگ<sup>۲</sup> 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 الکترودها ولتاژ بالای سوزنی، لوله توخالی و چند لوله‌ای و همچنین از سیال کاری R-123 استفاده شده بود. آتن<sup>۳</sup> و سیدیعقوبی [۱۷] با در نظر گرفتن انواع مختلف الکترودها به‌صورت صفحه- نقطه و صفحات موازی، پمپ رسانشی را به‌طور عددی شبیه‌سازی کردند. هاناوکا<sup>۴</sup> و همکاران [۱۸]، جت مایع ایجاد شده

- 1 Ion Mobility
- 2 Jeong
- 3 Atten
- 4 Hanaoka

توسط پمپاژ رسانشی را مطالعه نمودند. آن‌ها الکترودها ولتاژ بالا را بدون لایه‌های تیز و مشابه یک حلقه استوانه‌ای کشیده شده طراحی و با استفاده از الکترودهای متفاوت برای اتصال به زمین، اثر برخی عوامل را بر پدیده پمپاژ رسانشی بررسی نمودند. صدیقی [۱۹] به‌طور تجربی به بررسی رفتار فیلم مایع تحت تأثیر پدیده رسانش الکتریکی پرداخت. وی از آرایش‌های گوناگون الکترودها 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. یزدانی و سیدیعقوبی [۲۰] اثر رسانش الکتریکی بر جریان فیلم مایع را به‌صورت عددی شبیه‌سازی و مشاهده کردند که برای الکترودهای مسطح، متفاوت بودن مقدار پهنای الکترودهای مثبت و منفی همسایه در یک جفت الکترودها، منجر به ایجاد جریان خالص مایع می‌شود. حتی و همکاران [۲۱] پمپاژ رسانشی با الکترودهای استوانه‌ای را به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار دادند و اثر میدان الکتریکی و ضخامت فیلم سیال بر کارکرد آن را بررسی کردند. همایتنخواه و همکاران [۲۲] الگوی جریان پمپ‌های رسانش الکتریکی با الکترودهای مسطح را مورد بررسی قرار دادند و نتایج پژوهش خود در رابطه با موقعیت و وضعیت ایجاد گردابه در نزدیکی الکترودها را ارائه کردند. نوردانش و اسماعیل‌زاده [۲۳] به بررسی تجربی انتقال گرما در پمپ‌های رسانش الکتریکی با الکترودهای مسطح برای نفت سفید پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که با اعمال میدان الکتریکی، انتقال گرما به‌میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است. یزدانی و سیدیعقوبی [۲۴] اثرات تحرک یونی نابرابر بارهای مثبت و منفی بر جریان ایجاد شده در پمپاژ رسانشی با الگوهای متقارن و نامتقارن الکترودها را به‌صورت عددی بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها تأثیر میزان اختلاف تحرک یونی بر مشخصه‌های هیدرو دینامیکی جریان در پمپ رسانشی را نشان می‌دهد. غرائی و همکاران [۲۵] به‌طور تجربی رفتار هیدرو دینامیکی جریان در حال توسعه فیلم فروریزنده آرام را در حضور پدیده هدایت الکترودهیدرو دینامیکی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اعمال میدان الکتریکی با استفاده از الکترودهای 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 فروریزنده فیلم روغن ترانسفورمر را در مجاورت میدان الکتریکی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که اعمال میدان، ضخامت

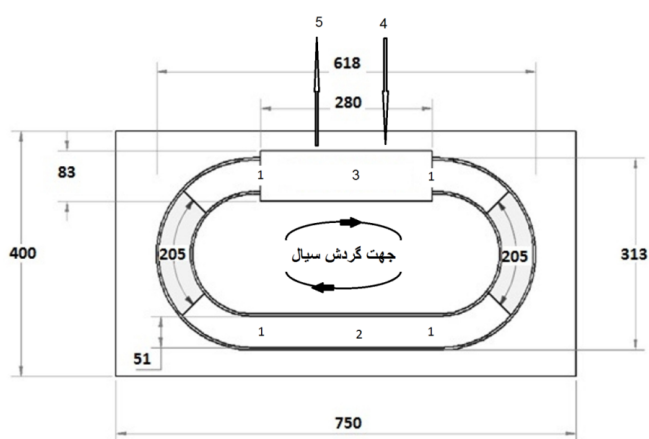
رسانش الکتریکی به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها مانند نداشتن قطعات متحرک می‌تواند بسیار مفید باشد. از سوی دیگر این پمپ‌ها را می‌توان به دلیل دارا بودن ویژگی‌های عالی برای بهبود انتقال گرما، در کاربردهای خاصی مورد استفاده قرار داد. ترکیب عملکرد هیدرودینامیکی مناسب و انتقال گرمای عالی، اهمیت و ایجاد 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 کانال حلقه‌ای شکل با سطح زیرین از جنس پلی‌اتیلن و دیوار ساخته‌شده از پلکسی‌گلس می‌باشد. حلقه شامل دو بخش بدون انحنا 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 ۴ و ۵- ورود و خروج جریان برق از منبع تغذیه

فیلم فروریزنده 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. میرزایی و صفار اول [۲۸] بهبود انتقال گرمای جابه‌جایی با به‌کارگیری رسانش الکترو هیدرودینامیکی را بررسی و برای آن یک پارامتر تأثیر معرفی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد روش ارائه‌شده برای رینولدزهای پایین تأثیر بیشتری را نشان می‌دهد. استیشکف<sup>۱</sup> و واسیلکف<sup>۲</sup> [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 در نتیجه حمل آن، در امتداد سطح دی‌الکتریک تجمع یابد. نوردانش و همکاران [۳۰] استفاده از پمپاژ رسانشی فیلم سیال دی‌الکتریک توأم با پمپاژ مکانیکی را مورد بررسی قرار دادند و تأثیرات متقابل دو عامل پمپاژ 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 به‌عنوان 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 به‌منظور 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 اعمال‌شده 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 دماهای مختلف هنگام استفاده از کاربردهای افزایش انتقال گرما در پدیده پمپاژ رسانش الکتریکی از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. مشخص است که استفاده از پمپ‌های

1 Stishkov  
2 Vasilkov

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی مایعات مورد استفاده  
Table 1. Physical properties of the used fluids

نوع ماده	چگالی [۳۱] (kg/m <sup>3</sup> )	گرانروی [۳۲] (mPa.s)	تحرک یونی (۱۰ <sup>-۸</sup> m <sup>2</sup> /V s)		رسانش الکتریکی [۳۳] (۱۰ <sup>-۱۲</sup> S/m)
			یون مثبت	یون منفی	
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 ترموکوپل‌ها 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 ترموکوپل‌ها در شرایط محیط قرار داده می‌شود تا به تدریج خنک شود. دمای آب به‌طور لحظه‌ای هم‌زمان با فرایند خنک‌شدن، به‌وسیله هر کدام از ترموکوپل‌ها و نیز به‌وسیله یک دماسنج مخصوص کالیبراسیون (با دقت ۰/۰۳ درجه سانتی‌گراد) ثبت می‌گردد. به این ترتیب انحراف سنجش دما توسط ترموکوپل‌ها 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 مورد استفاده برای ایجاد جریان سیال در شکل ۲ نشان داده شده است. عرض الکترودهای مسطح نصب‌شده روی کف کانال، 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 مورد استفاده در این پژوهش که عبارت از نرمال-هگزان<sup>۷</sup> و نرمال-دکان<sup>۸</sup> می‌باشند، در جدول ۱ نشان داده شده است. دمای میانگین مایع موجود در کانال 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<sup>۱</sup>) و بخش دیگر فاقد الکترود می‌باشد (بخش سی<sup>۲</sup>). زیر سطح دو بخش منحنی، گرم‌کن<sup>۳</sup>هایی به‌منظور ایجاد امکان تغییر دمای سیال تعبیه 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<sup>۴</sup> زیر گرم‌کن‌ها تعبیه شده است تا امکان کنترل دمای آن‌ها را با تغییر جریان الکتریکی فراهم کند. حسگر به یک کنترل‌کننده دمای اتونیکس<sup>۵</sup> مدل تی‌سی ۴-وای ۱۴-آر<sup>۶</sup> متصل شده است که نقش تغییردهنده جریان الکتریکی را بازی می‌کند. دقت اندازه‌گیری برای دما، ضخامت فیلم، ولتاژ اعمال‌شده و جریان الکتریکی به ترتیب برابر ۰/۰۳ درجه سانتی‌گراد، ۰/۲ میلی‌متر، ۱ ولت و ۱ نانوامپر است. باید توجه داشت که در یک آزمایش تجربی

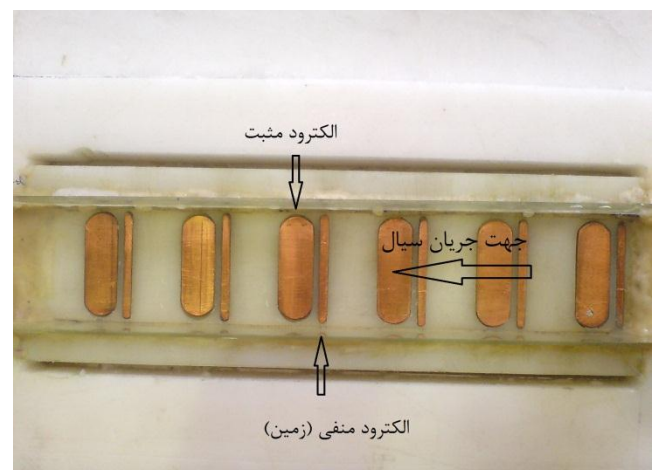
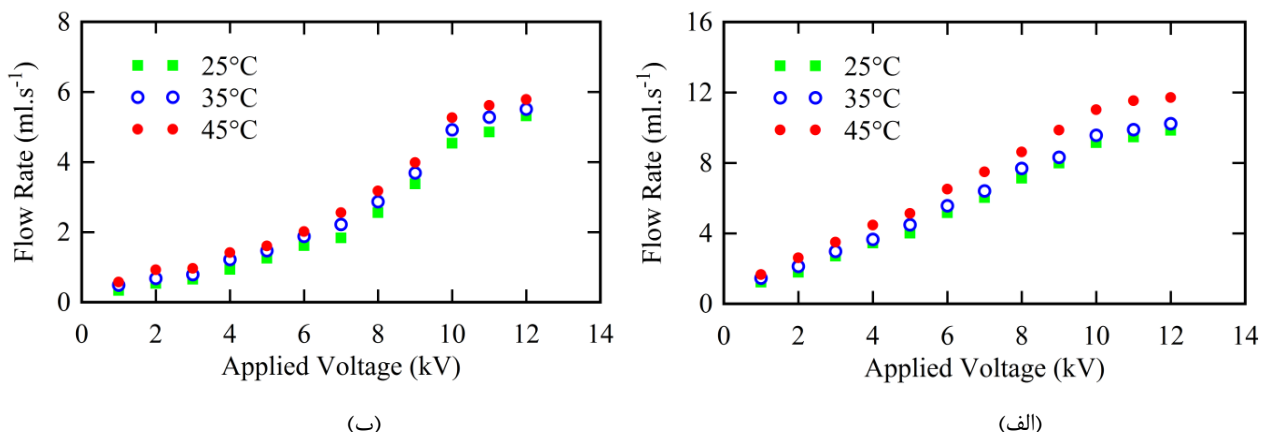


Fig. 2. Arrangement of the electrodes in the setup  
شکل ۲: آرایش الکترودهای مورد استفاده در آزمایش

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

7 n-hexane  
8 n-decane



**Fig. 3. Flow rate versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane**  
 شکل ۳: تغییرات دبی سیال برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۴ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

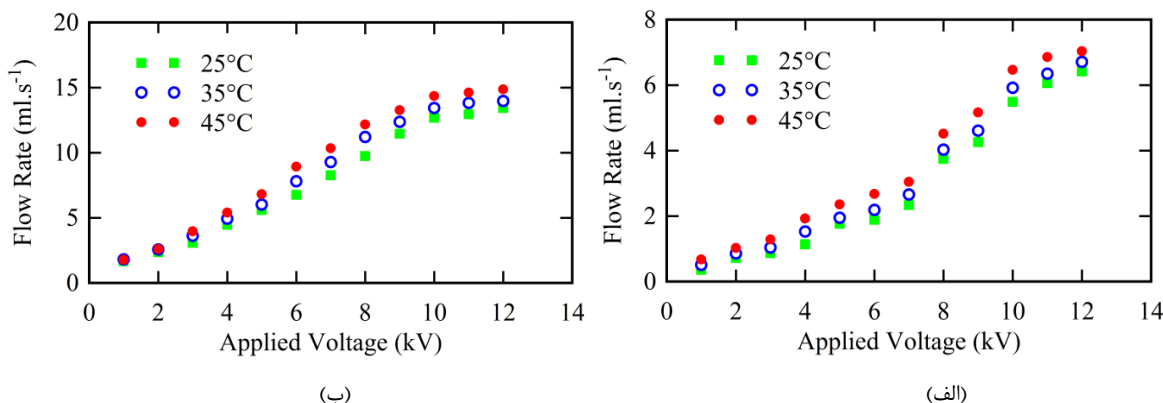
الکتریکی و در نتیجه آن نیروی حجمی اعمال شده به بارها شدت می‌یابد و این امر جریان سیال را سرعت می‌بخشد. در ولتاژهای بالاتر، آهنگ جداسازی یون‌ها تشدید می‌شود و بنابراین تغییرات دبی آهنگ بالاتری را نشان می‌دهد. برای ولتاژهای بالاتر از ۱۰ کیلوولت، جریان نسبتاً سریع سیال، بارها را از همسایگی الکترودها دور می‌سازد و نیروی اعمال شده بر روی آن‌ها را کاهش می‌دهد که تأثیر آن به صورت 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 بیشتر شدن دبی جریان می‌شود. از آن‌جا که هر دو سیال در دماهای بالاتر دارای مقادیر پایین‌تر چگالی و لزجت

### ۳- نتایج و بحث

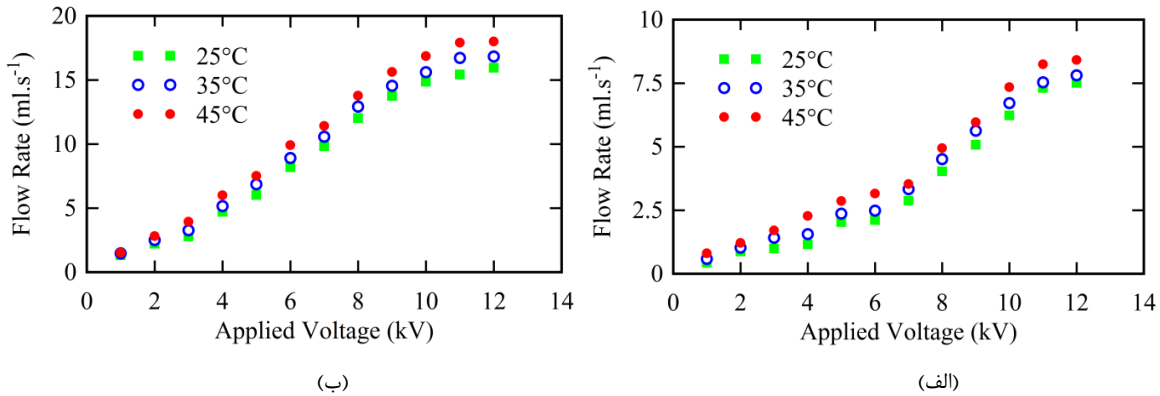
در این قسمت، انتقال گرما در پمپاژ رسانشی فیلم دو سیال دی‌الکتریک مختلف (نرمال-هگزان و نرمال-دکان) در یک کانال با استفاده از الکترودهای مسی مسطح بررسی می‌شود. همچنین، تأثیر ویژگی‌های فیزیکی سیال و دمای کارکرد بر مشخصه‌های انتقال گرمای پمپ مانند آهنگ انتقال گرما و عدد ناسلت مورد بحث قرار می‌گیرد. در هر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



**Fig. 4. Flow rate versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane**  
 شکل ۴: تغییرات دبی سیال برحسب 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 برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۸ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

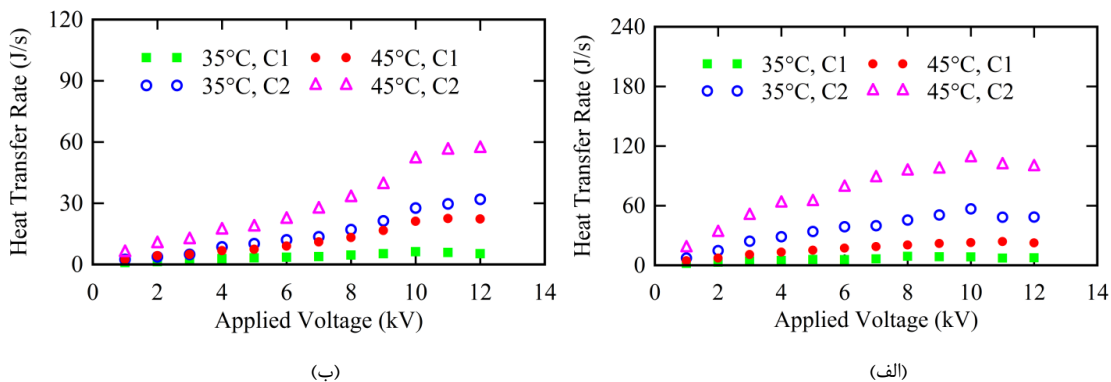
### ۲-۳: انتقال گرما

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

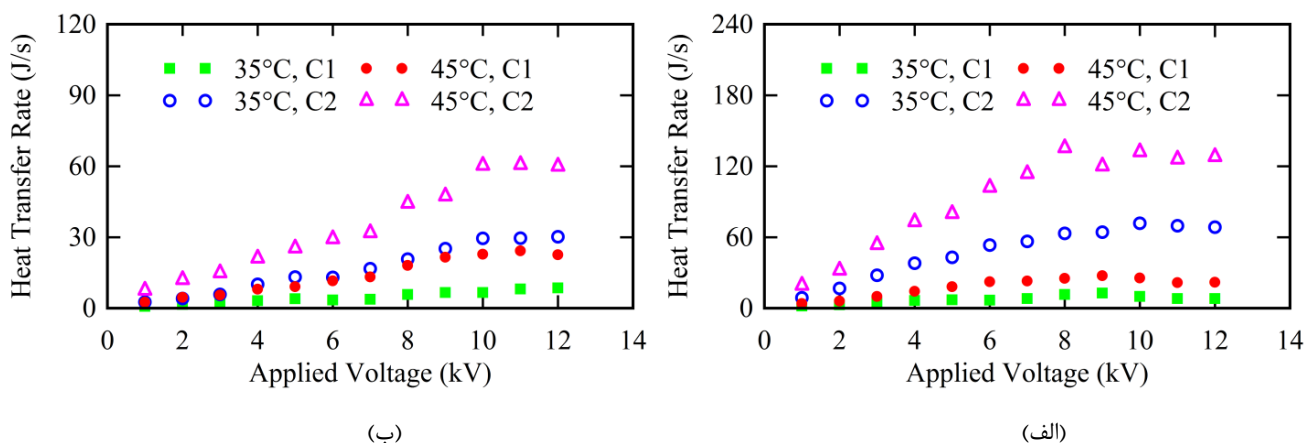
که  $\dot{m}$ ،  $c_p$  و  $\Delta T$  به ترتیب دبی جرمی جریان سیال دی‌الکتریک در کانال، ظرفیت گرمایی ویژه سیال دی‌الکتریک و افت دمای سیال ناشی از انتقال گرما می‌باشد. تغییرات آهنگ انتقال گرما برای ضخامت فیلم ۴ میلی‌متر در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، افزایش ولتاژ موجب افزایش 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 این‌جا نیز پس از یک ولتاژ تقریباً مشخص، وضعیت اشباع دیده می‌شود. جریان آشفته ایجادشده در همسایگی الکترودها همچنین آهنگ انتقال گرما در بخش سی ۲

هستند، دماهای کارکردی بالاتر حرکت گردابه‌های ایجادشده در مجاورت الکترودها که منجر به جریان سیال در کانال 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 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 آن‌که 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 برحسب 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 برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۶ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

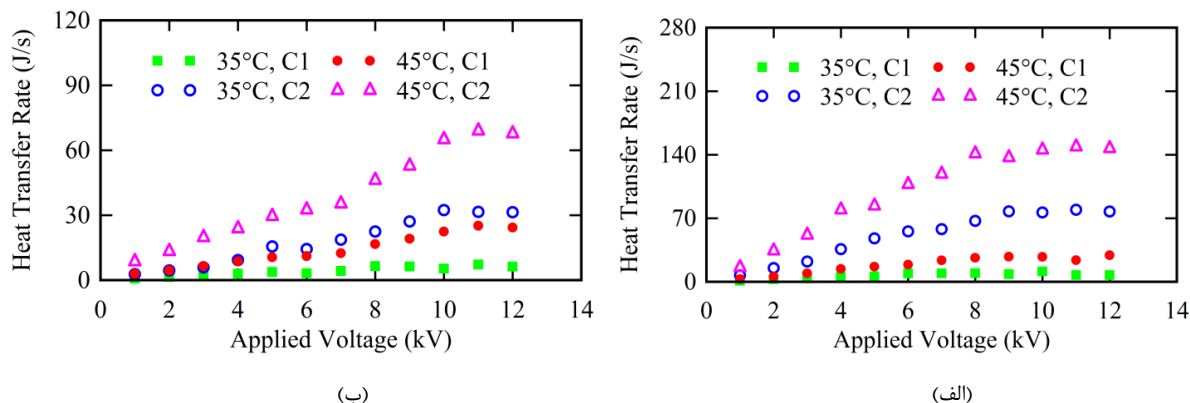
افزایش می‌دهد.

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.

### ۳-۲-۱- طراحی و تحلیل آزمایش‌ها

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

را در مقایسه با بخش سی ۱ به شدت 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 پمپاژ 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، دماهای 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 برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۸ میلی‌متر (الف) نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

می‌باشد. هم‌چنین مقادیر کوچک پی<sup>۵</sup> یا همان سطح معناداری (مقادیر کوچک‌تر از ۰/۰۵) نیز تأیید می‌نماید که اثر پنج متغیر بررسی شده و هم‌چنین اثر متقابل آن‌ها بر روی پاسخ (آهنگ انتقال گرما) معنی‌دار است و به‌عبارت‌دیگر تغییر در سطوح متغیرهای مستقل باعث تغییرات معنی‌دار (که ناشی از تغییرات تصادفی نمی‌باشند) در متغیر وابسته می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که نتایج ناشی از شانس، تصادف و خطای نمونه‌گیری نیست و مدل نتایج و در نتیجه کلیت آزمایش‌ها از وضعیت بسیار خوبی برخوردار است. مقدار ضریب تشخیص<sup>۶</sup> برای مدل آزمایش‌ها برابر ۰/۹۴۰۸ به دست آمده است که در محدوده قابل قبولی قرار دارد و نرمال بودن نتایج را نشان می‌دهد. هم‌چنین، مقدار دقت<sup>۷</sup> برابر ۸۰/۵۶۹ حساب شده است. چنان‌چه این نسبت بزرگ‌تر از ۴ باشد، بیان‌گر دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد و این دقیق بودن مدل و در نتیجه طراحی مناسب آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

در مجموع، از آنالیز نتایج می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که طراحی آزمایش از وضعیت خوبی برخوردار است و متغیرهای آن به‌صورت مناسبی انتخاب شده است.

### ۳-۲-۲- ضریب انتقال گرما

ضریب انتقال گرما از فیلم دی‌الکتریک از معادله زیر محاسبه

$$Q_h = \bar{h}A(T_m - T_\infty) \quad (۴)$$

می‌شود:

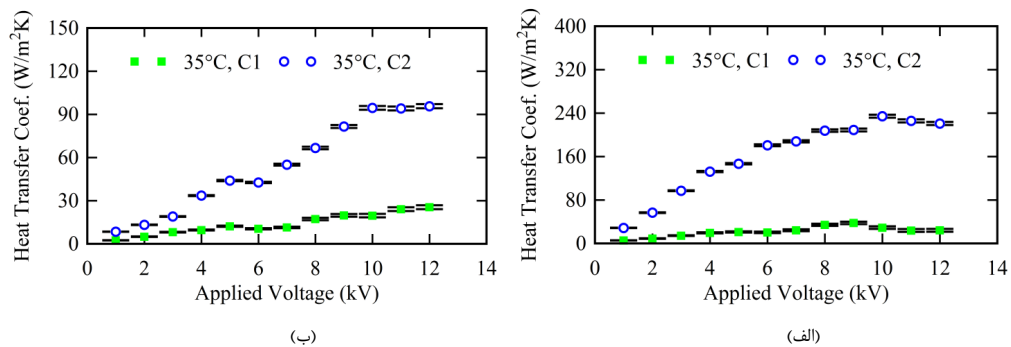


Fig. 9. Heat transfer coefficient (with the corresponding uncertainty values) versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane

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

جدول ۲: جدول آنوا برای متغیرهای آزمایش

Table 2. ANOVA table for experiments variables

مقدار <i>p</i>	مقدار <i>F</i>	مربع میانگین	منبع
<۰/۰۰۰۱	۲۸۸/۰۸	۱۸۵۴۴/۸۰	مدل
<۰/۰۰۰۱	۵۸۹/۰۴	۳۷۹۱۸/۷۸	جنس سیال (A)
<۰/۰۰۰۱	۴۱/۰۱	۲۶۴۰/۱۶	ضخامت فیلم سیال (B)
<۰/۰۰۰۱	۴۶۲/۶۶	۲۹۷۸۳/۳۱	دمای کارکرد سیال (C)
<۰/۰۰۰۱	۱۴۴۲/۵۵	۹۲۸۶۲/۲۸	وجود یا عدم وجود الکترودها (D)
<۰/۰۰۰۱	۷۱۵/۵۹	۴۶۰۶۵/۱۴	ولتاژ اعمال شده (E)
۰/۰۰۱۳	۱۰/۵۶	۶۷۹/۷۸	AB
<۰/۰۰۰۱	۵۷/۵۹	۳۷۰۷/۰۸	AC
<۰/۰۰۰۱	۴۱۱/۷۶	۲۶۵۰۶/۷۸	AD
<۰/۰۰۰۱	۴۷/۴۵	۳۰۵۴/۶۵	AE
۰/۰۲۳۸	۵/۱۷	۳۳۲/۸۱	BC
<۰/۰۰۰۱	۲۷/۴۶	۱۷۶۷/۴۵	BD
۰/۰۰۰۲	۱۴/۰۸	۹۰۶/۵۷	BE
<۰/۰۰۰۱	۱۱۹/۰۲	۷۶۶۲/۰۵	CD
<۰/۰۰۰۱	۸۴/۱۷	۵۴۱۸/۳۶	CE
<۰/۰۰۰۱	۲۹۳/۰۸	۱۸۸۶۶/۸۵	DE
-	-	۶۴/۳۷	باقیمانده

فیلم و دمای کارکرد سیال، وجود و یا عدم وجود آشفستگی موضعی ناشی از الکترودها و ولتاژ اعمال شده در مجموع ۲۸۸ آزمایش انجام شده است. پس از محاسبه مقادیر آهنگ انتقال گرما به‌منظور بررسی مؤثر و بهینه بودن متغیرهای آزمایش، تحلیل آزمایش‌ها با استفاده از روش پاسخ سطح<sup>۱</sup> صورت پذیرفته است. نتایج تحلیل‌های آماری در جدول ۲ (جدول آنوا<sup>۲</sup>) آورده شده است.

همان‌گونه که در جدول ۲ دیده می‌شود، مقدار اف<sup>۳</sup> برای مدل آماری ایجاد شده بر اساس نتایج، عدد بزرگی (۰۸/۲۸۸) به دست آمده است و این نشان‌دهنده کم بودن نویز در مدل و مناسب بودن<sup>۴</sup> آن

5 *p* value  
6 Coefficient of Determination  
7 Adeq Precision

1 Surface Response Methodology  
2 ANOVA Table  
3 *F* value  
4 Significant



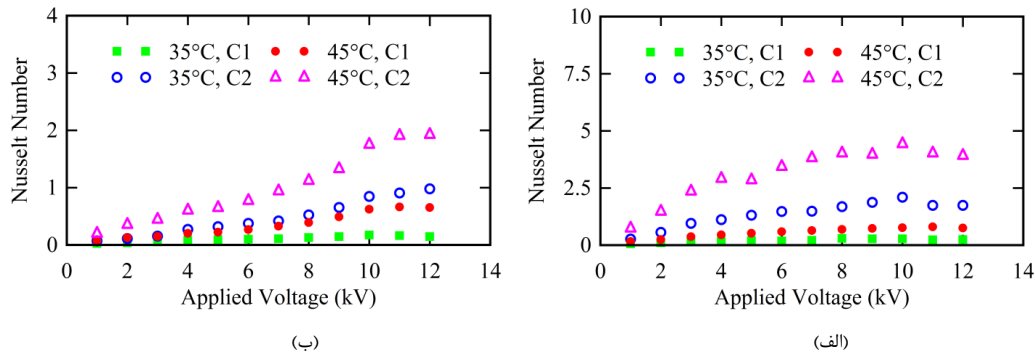


Fig. 10. Nusselt number versus applied voltage for film thickness : (a) n-hexane, (b) n-decane

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

مربوط به عدد ناسلت، ارائه نتایج آنالیز خطا بر روی نمودارهای ضریب انتقال گرما صورت می‌پذیرد. به‌عنوان 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 کلونین 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 دمایی کمتر در بخش فاقد الکتروود سیستم است. بیشینه عدم قطعیت کلی محاسبه‌شده

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

### ۳-۲-۱-۲-۳ عدم قطعیت

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

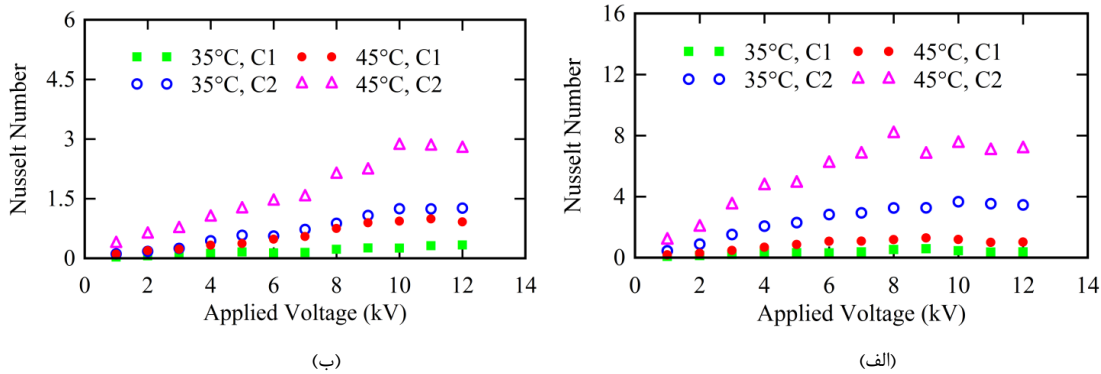
$$\delta R = \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

که  $\delta R$  و  $X_i$  به ترتیب عدم قطعیت مربوط به متغیر محاسبه‌شده و عدم قطعیت مشخص یک متغیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. برای بررسی انتقال گرما در پمپ رسانش الکترونیکی، 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
دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد		دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد			
حالت سی ۲	حالت سی ۱	حالت سی ۲	حالت سی ۱		
۰/۸	۳/۲	۱/۳	۸/۵	۴	نرمال-هگزان
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 برحسب 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 تحرک یونی بالاتر و لزجت و چگالی پایین‌تر، موجب می‌شود تا نرمال-هگزان گردابه‌های قوی‌تری را در مجاورت الکترودها ایجاد کند. گردابه‌های ایجادشده علاوه بر ایجاد جریان در کانال، هم‌چنین انتقال گرما 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 به‌اندازه 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.

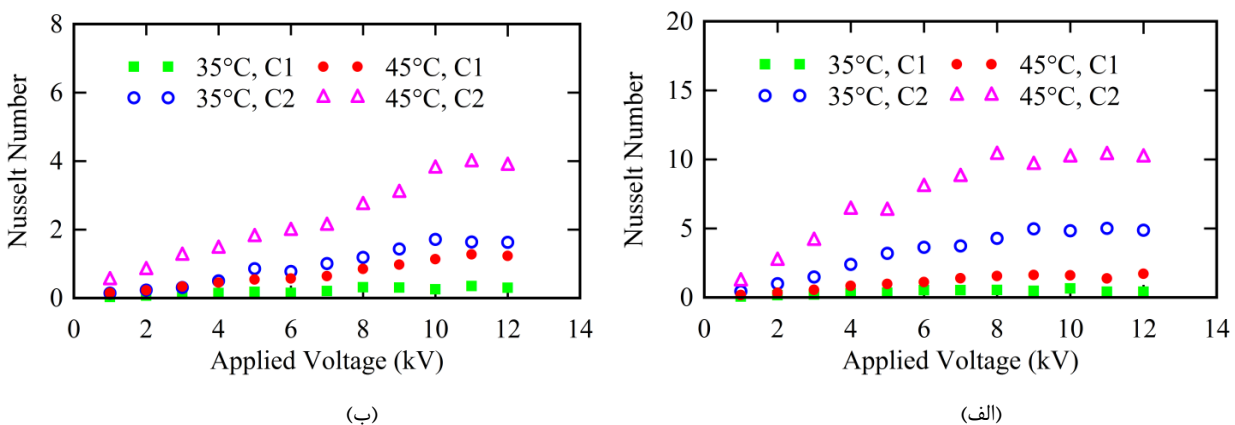
### ۳-۲-۳- عدد ناسلت

با معلوم بودن ضریب انتقال گرما، عدد ناسلت به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}d_h}{k} \quad (۶)$$

که  $d_h$  و  $k$  به ترتیب قطر هیدرولیکی کانال 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 اعمال‌شده 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 برحسب 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)	بیشترین افزایش (%)
نرمال-هگزان	۴	دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد / ۵۳۸/۸
	۶	دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد / ۶۲۴/۸
	۸	دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد / ۶۶۸/۴
نرمال-دکان	۴	دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد / ۱۹۴/۷
	۶	دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد / ۲۳۰/۷
	۸	دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد / 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 کانال 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 دمای 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 دمای 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 کانال 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 دمای 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 این جا مشخص می‌گردد، آن است که مقادیر عدد ناسلت در بخش دارای الکترودها (سی ۲) به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر مربوطه در بخش دیگر بدون الکترودها (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 کارکرد 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

حالت سی ۲ به ترتیب به اندازه ۱۰۱/۷٪ و ۸۲/۷٪ افزایش می‌دهد.

- [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. Washabauch, M. Zahn, J. Melcher,

عدد ناسلت برای تمام ضخامت‌های مختلف فیلم سیال و دماهای کاری با استفاده از پمپ رسانش الکتریکی به‌طور 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 ۱۳۳/۱٪ و ۱۰۴/۷٪ افزایش می‌دهد.

## ۵- فهرست علائم

A	سطح فیلم در تماس با هوا
C1	بخش بدون الکترودها
C2	بخش دارای الکترودها
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه
$d_h$	قطر هیدرولیکی کانال
E	شدت میدان الکتریکی
$f_e$	نیروی حجمی
$\bar{h}$	ضریب رسانش گرمایی
k	ضریب انتقال گرما
$k_d$	ثابت آهنگ جداسازی یون‌ها
$k_r$	ثابت آهنگ باز ترکیب یون‌ها
m	دبی جرمی سیال
$\overline{Nu}$	عدد ناسلت
q	چگالی حجمی بار الکتریکی
$\delta R$	عدم قطعیت متغیر محاسبه شده
T	دمای سیال
$T_{av}$	میانگین دمای توده سیال
$T_\infty$	دمای محیط
$X_i$	عدم قطعیت مشخص یک متغیر اندازه‌گیری شده
علائم یونانی	
$\varepsilon$	گذردهی الکتریکی
$\rho$	چگالی سیال

- 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. Esmailzadeh, 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. Hemayatkhah, R. Gharraei, E. Esmailzadeh, 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. Esmailzadeh, 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. Hemayatkhah, S.B. Islami, E. Esmailzadeh, 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. Esmailzadeh, 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. Esmailzadeh, 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. Esmailzadeh, 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)

