

مطالعه تجربی تأثیرات ویژگی‌های فیزیکی سیال بر روی عملکرد پمپ رسانشی

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

دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹
بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۰۱
پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵

کلمات کلیدی:

الکتروهایدرودینامیک
پمپ رسانش الکتریکی
اختلاف تحرک یونی
مشخصه‌های کارکردی پمپ

خلاصه: در مقاله حاضر، با انجام تست‌های تجربی عملکرد پمپ رسانشی با استفاده از الکترودهای مسطح برای دو مایع دی‌الکتریک مختلف نرمال-هگزان و نرمال-دکان به‌عنوان سیال عامل مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه برای ضخامت‌های مختلف فیلم سیال و با در نظر گرفتن ولتاژ الکتریکی متغیر، انجام شده و اثرات پارامترهای مختلف مانند ویژگی‌های فیزیکی سیال (اختلاف تحرک یونی، چگالی و گرانشی) و دمای کارکرد مایعات بر عملکرد و بازده پمپ بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیال با اختلاف تحرک یونی بالاتر با وجود آن که باعث افزایش مصرف توان پمپ می‌شود، ولی به دلیل بیشتر کردن سرعت جریان، افزایش قابل ملاحظه‌ای را در دبی و بازده پمپ ایجاد می‌نماید. بر این اساس، می‌توان بیان نمود که در کاربردهای صنعتی استفاده از سیال با اختلاف تحرک یونی بالاتر به دلیل افزایش توأم دبی و بازده پمپ مناسب‌تر خواهد بود. از سوی دیگر اگرچه بازده پمپ رسانشی با افزایش ولتاژ اعمالی کاهش می‌یابد، دبی جریان که از دیگر ویژگی‌های مهم پمپ است و در مورد پمپ رسانشی اهمیتی بیشتر از بازده دارد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتیجه قابل توجهی که حاصل می‌شود این است که افزایش درجه حرارت سیال به دلیل کاهش میزان چگالی و گرانشی آن باعث افزایش بازده می‌شود.

۱- مقدمه

اعمال میدان الکتریکی به یک سیال دی‌الکتریک^۱ نیروی حجمی مکانیکی^۲ ایجاد می‌کند که در برخی شرایط می‌تواند به جریان سیال منجر شود. این پدیده 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 ، ϵ و ρ به‌ترتیب 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^۳ (نیروی الکتروفوریتیک^۴) نامیده می‌شود. عبارت دوم، نیروی دی‌الکتریک^۵ است و به علت گرادیان گذردهی الکتریکی^۶ ایجاد می‌گردد. همچنین، عبارت سوم نیروی الکترواستریکتیو^۷ است که ناشی از قابلیت فشردگی سیال می‌باشد. این سه نیرو لزوماً به‌صورت هم‌زمان در یک سیستم خاص حضور ندارند؛ به‌عنوان 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^۸ [۳-۶]، پمپ‌های القایی^۹ [۱۰] و پمپ‌های رسانشی^{۱۰} تقسیم می‌شوند. در پمپ‌های کشش یونی، بارها

- 3 Coulomb Force
- 4 Electrophoretic force
- 5 Dielectric force
- 6 Electric permittivity
- 7 Electrostrictive force
- 8 Ion-drag pump
- 9 Induction pump
- 10 Electrical conduction pump

- 1 Dielectric
- 2 Mechanical body force

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mjafari@tabrizu.ac.ir



در میان انواع گوناگون پمپ‌های الکتروهیدرونیامیکی، کارکرد پمپ رسانشی یک زمینه تحقیقاتی نسبتاً جدید می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. جیانگ^۴ و همکاران [۱۵] مطالعه در مورد پمپاژ مایعات دی‌الکتریک با پدیده رسانش الکتریکی را آغاز و کارکرد پمپ‌های رسانشی را بررسی نمودند. آن‌ها در کارشان از سه نوع الکتروودولتاژ بالای سوزنی، لوله توخالی و چند لوله‌ای و همچنین سیال کاری $R-123$ استفاده کردند. آتن^۵ و سیدیقوبی [۱۶] با مدل‌سازی عددی پمپ رسانشی را با در نظر گرفتن انواع مختلف الکتروودها به صورت صفحه-نقطه و صفحات موازی بررسی کردند. هاناوکا^۶ و همکاران [۱۷]، جت مایع ایجادشده توسط پمپاژ رسانشی را مطالعه نمودند. آن‌ها الکتروودولتاژ بالا را بدون لبه‌های تیز و مشابه یک حلقه استوانه‌ای کشیده شده طراحی و همچنین از الکتروودهای متفاوت برای اتصال به زمین استفاده کردند. از الکتروودهای مختلف برای اتصال به زمین استفاده کردند و اثر برخی عوامل را بر پدیده پمپاژ رسانشی بررسی نمودند. صدیقی [۱۸] به‌طور تجربی به بررسی رفتار فیلم مایع تحت اثر 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. یزدانی و سیدیقوبی [۱۹] اثر رسانش الکتریکی بر جریان فیلم مایع را به صورت عددی بررسی و مشاهده کردند که برای الکتروودهای مسطح، متفاوت بودن مقدار پهنای الکتروودهای مثبت و منفی همسایه در یک جفت الکتروود، منجر به جریان خالص مایع می‌شود. حجتی و اسماعیل‌زاده [۲۰] پمپاژ رسانشی با الکتروودهای استوانه‌ای را به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار دادند و اثر میدان الکتریکی و ضخامت فیلم سیال بر کارکرد آن را بررسی کردند. حمایت‌خواه و همکاران [۲۱] الگوی جریان پمپ‌های رسانش الکتریکی با الکتروودهای مسطح را مورد بررسی قرار دادند و نتایج خود را رابطه با موقعیت و وضعیت ایجاد گردابه در نزدیکی الکتروودها ارائه کردند. نوردانش و اسماعیل‌زاده [۲۲] 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. غرائی و همکاران [۲۳] پمپ‌های رسانش الکتریکی را به صورت عددی شبیه‌سازی و نتایج عددی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. سبحانی و همکاران [۲۴] جریان فروریزنده فیلم روغن ترانسفورمر را در مجاورت میدان الکتریکی

به‌طور مستقیم به سیال تزریق می‌شود. این امر می‌تواند خواص الکتریکی سیال کاری را در طول زمان عملکرد پمپ تضعیف کند و همچنین موجب پدیداری اتفاقاتی چون تخلیه کرونا شود که هیچ کدام از موارد یادشده مطلوب نمی‌باشند. پمپاژ القایی، با القای بار ناشی از عدم یکنواختی رسانش الکتریکی سیال صورت می‌پذیرد که عدم یکنواختی به دلیل ناهمگنی مایع و یا اختلاف درجه حرارت ایجاد می‌شود. بنابراین، هنگام کار با سیستم‌های همگن و تک‌دما، پمپاژ القایی رخ نمی‌دهد. پدیده پمپاژ رسانشی بر پایه تعادل دینامیکی جداسازی^۱ و بازترکیب^۲ یون‌های تجزیه‌شده استوار است و یک مکانیزم مناسب پمپاژ برای سیالات هم‌گن و تک‌دما می‌باشد. رابطه (۲) تعادل دینامیکی اشاره‌شده برای پمپاژ رسانشی را نشان می‌دهد [۱۴-۱۱]:

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

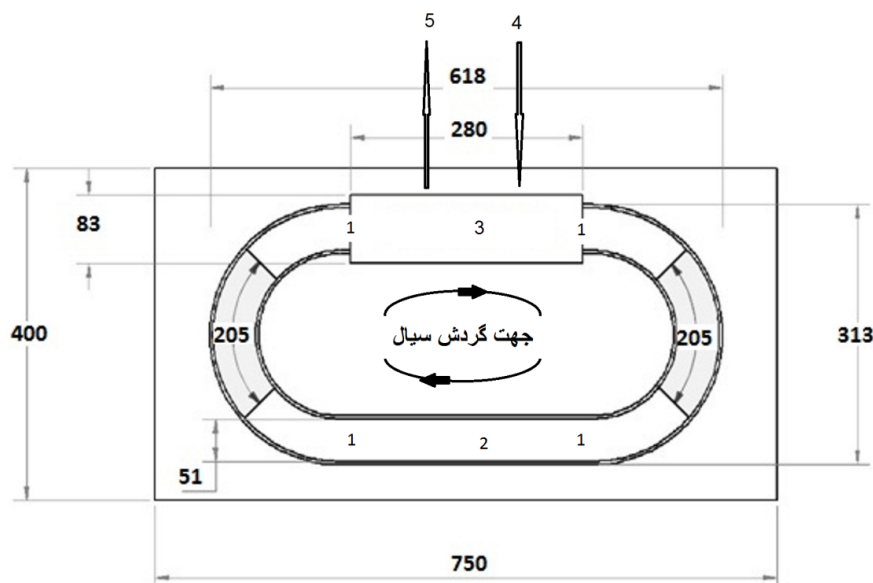
که در آن k_d و k_r به ترتیب ثابت‌های مربوط به آهنگ جداسازی و بازترکیب یون‌ها می‌باشد. آهنگ بازترکیب را می‌توان یک ثابت در نظر گرفت، درحالی‌که آهنگ جداسازی تابعی از شدت میدان الکتریکی است. برای میدان الکتریکی قوی‌تر از ۱ کیلوولت بر متر، شدت جداسازی بالاتر از شدت بازترکیب است و این امر منجر به وجود بارهای آزادی می‌گردد که به سمت الکتروودهای با قطب مخالف حرکت می‌کنند [۱۵]. 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 یکدیگر را خنثی کنند. برای جلوگیری از این مسئله، طراحی سیستم باید به‌گونه‌ای باشد که یک نیروی خالص به‌عنوان 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 منجر به افزایش شدت میدان الکتریکی در مجاورت آن الکتروود می‌شود که این امر موجب اعمال نیروی قوی‌تر به لایه سیال با بار مخالف مربوط به آن می‌شود. عامل دوم، متفاوت بودن تحرک یونی^۳ بارهای مثبت و منفی یک مایع است که قابلیت این بارها برای حرکت به سمت الکتروودهای متناظر با قطب مخالف را تعیین می‌کند. البته اثر دومین عامل یادشده ممکن است نتایج مختلفی را برای مایعات با میزان تحرک یونی بارهای مثبت و منفی متفاوت ایجاد کند.

4 Jeong
5 Atten
6 Hanaoka

1 Dissociation
2 Recombination
3 Ion Mobility



(الف)



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

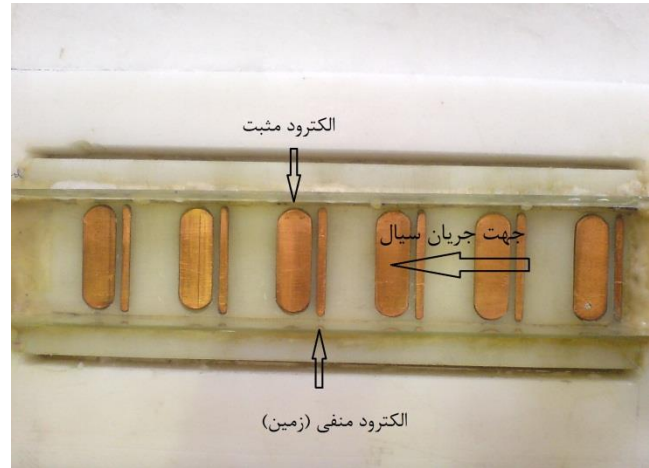
Fig. 1. (a) Experimental setup, (b) Schematic of the setup: 1. Temperature sensors, 2. Flow rate measurement location, 3. Electrodes location, 4, 5. Electrical power in/out

بررسی اجمالی مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون هیچ مطالعه‌ای در زمینه بررسی هم‌زمان اثرات تغییر دمای کارکرد و استفاده از مایعات دی‌الکتریک مختلف بر روی مشخصه‌های کارکردی پمپ‌های رسانشی انجام نشده است. تنها تحقیق موجود، با استفاده از یک سیال عامل دی‌الکتریک (نفت سفید) که حتی مایع خالص نیز نیست و نمی‌توان برای آن ویژگی‌های فیزیکی ثابتی در نظر گرفت، صورت پذیرفته است [۲۲]. باید توجه داشت که دماهای کارکردی مختلف در هنگام استفاده از قابلیت‌های بهبود انتقال گرما در مورد پدیده پمپاژ رسانشی، بسیار مهم است و حتی می‌تواند امکان به‌کارگیری پمپ را در معرض چالش جدی قرار دهد. بر

بررسی نمودند. نتایج نشان داد که اعمال میدان، ضخامت فیلم فروریزنده را برای گستره وسیعی از اعداد رینولدز کاهش می‌دهد. یزدانی و سیدیعقوبی [۲۵] تأثیر تزریق بار بر عملکرد پمپ رسانش الکتریکی را مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده نمودند تزریق بار مثبت منجر به تضعیف عملکرد پمپ رسانش الکتریکی و در نهایت معکوس شدن جریان پمپ می‌شود. میرزایی و صفراول [۲۶] بهبود انتقال گرمای جابه‌جایی با به‌کارگیری رسانش الکتروهایدرودینامیکی را بررسی و برای آن یک پارامتر تأثیر معرفی کردند. نتایج نشان داد روش ارائه شده برای رینولدزهای پایین تأثیر بیشتری را نشان می‌دهد.

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 PT100 زیر گرم‌کن‌ها تعبیه شده است تا امکان کنترل دمای آن‌ها را با تغییر جریان الکتریکی فراهم کند. حسگر به یک کنترل‌کننده دمای Autonics مدل TC4Y-14R متصل شده است که نقش تغییردهنده جریان الکتریکی را ایفا می‌کند. دقت اندازه‌گیری برای درجه حرارت، ضخامت فیلم، ولتاژ اعمال شده و جریان الکتریکی به ترتیب برابر ۰/۱ درجه سانتی‌گراد، ۰/۲ میلی‌متر، ۱ ولت و ۱ نانو آمپر است. باید توجه داشت که در یک آزمایش تجربی همراه با انتقال گرما، کالیبراسیون ترموکوپل‌ها مسأله‌ای 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 به طور لحظه‌ای هم‌زمان با فرایند خنک‌شدن، به وسیله هر کدام از ترموکوپل‌ها و نیز به وسیله یک دماسنج مخصوص کالیبراسیون (با دقت ۰/۱ 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 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 آزمایشات به ترتیب برابر 25°C و $85/5\text{kPa}$ می‌باشد.

آرایش شش جفت الکتروود مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. عرض الکتروودهای مسطح نصب‌شده روی کف کانال، برای الکتروودهای زمین و ولتاژ بالا به ترتیب برابر ۴ و ۱۶ میلی‌متر است. فاصله بین الکتروودهای ولتاژ بالا و الکتروودهای زمین متناظر آن‌ها برابر ۲ میلی‌متر و فاصله بین یک الکتروود ولتاژ بالا و الکتروود زمین از جفت همسایه آن برابر ۲۲ میلی‌متر است [۱۹].



شکل ۲: آرایش الکتروودهای مورد استفاده در آزمایش

Fig. 2. Arrangement of the electrodes in the setup

این اساس در مطالعه حاضر، اثر پارامترهایی مانند دمای کارکرد سیستم و ولتاژ اعمال شده بر کارکرد و قابلیت به کارگیری پمپ رسانشی با الکتروودهای مسطح برای دو نوع مایع دی‌الکتریک مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- تجهیزات آزمایش

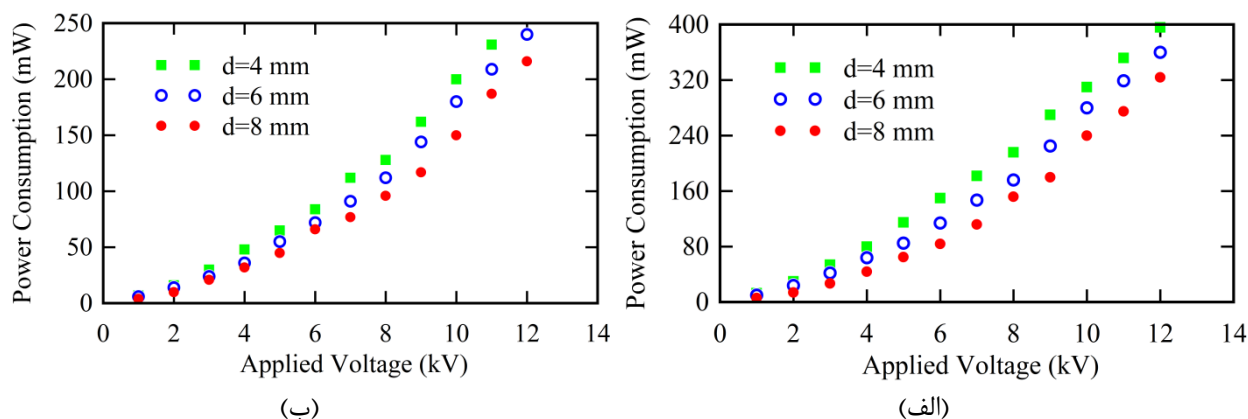
تصویر تجهیزات آزمایشی مطالعه حاضر و طرح‌واره آن در شکل ۱ نشان داده شده است. پمپ رسانشی دارای یک کانال حلقه‌ای-شکل از جنس پلی‌اتیلن و دیوار ساخته‌شده از پلکسی‌گلس می‌باشد. حلقه شامل دو بخش بدون انحنا و دو بخش منحنی شکل است. بر روی یکی از بخش‌های بدون انحنا، الکتروودهای مسطح نصب شده‌اند و در بخش دیگر اندازه‌گیری سرعت جریان انجام می‌شود. زیر سطح دو بخش منحنی، گرم‌کن‌هایی^۱ به منظور ایجاد امکان تغییر دمای سیال تعبیه شده‌اند. عرض کانال ۵۱ و ارتفاع آن ۲۰ میلی‌متر است.

Table 1. Physical properties of the used fluids

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی مایعات مورد استفاده

رسانش الکتریکی $[29] (10^{-12} \text{ S/m})$	حرک یونی $(10^{-8} \text{ m}^2/\text{V s})$		گرانروی $(\text{mPa.s}) [28]$	چگالی $[27] (\text{kg/m}^3)$	نوع ماده
	یون مثبت	یون منفی			
۸۰	۶/۸	۱۰	۰/۳۱۲۶	۶۵۷	نرمال-هگزان
۳/۴۶	۱/۵	۳/۵	۰/۹۲۹۱	۷۲۸	نرمال-دکان

1 Heater



شکل ۳: تغییرات مصرف توان برحسب ولتاژ اعمالی: (الف): نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

Fig. 3. Power consumption versus applied voltage: (a) n-hexane, (b) n-decane

همان‌گونه که از شکل ۳ مشاهده می‌شود برای سیال نرمال-هگزان با اعمال ولتاژ ۶ کیلوولت، توان مصرفی برای ضخامت‌های ۶ و ۸ میلی‌متر فیلم مایع نسبت به ضخامت ۴ میلی‌متر به ترتیب ۲۴٪ و ۴۴٪ کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به این صورت بیان نمود که با افزایش ضخامت فیلم، ممان اینرسی گردابه‌ها افزایش و سرعت در مجاورت الکترودها کاهش می‌یابد و در نتیجه مصرف جریان و توان کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین، مقادیر متناظر کاهش توان مصرفی برای سیال عامل نرمال-دکان به ترتیب برابر ۱۴٪ و ۲۱٪ به دست می‌آید. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که برای ضخامت فیلم مایع برابر ۶ میلی‌متر و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، مصرف توان نرمال-هگزان و نرمال-دکان به ترتیب برابر با ۱۱۴ و ۷۲ میلی‌وات می‌باشد. به علت کم‌تر بودن اختلاف تحرک یونی و هم‌چنین رسانش الکتریکی و بالاتر بودن مقادیر چگالی و گرانشی سیال عامل نرمال-دکان نسبت به نرمال-هگزان، سرعت گردابه‌ها در اطراف الکترودها کاهش بیشتری می‌یابد و در نتیجه مقادیر توان مصرفی برای ضخامت‌های مختلف فیلم نرمال-دکان به نسبت پایین‌تر از مقادیر متناظر مربوط به نرمال-هگزان می‌شود.

۳-۲- دبی حجمی

تغییرات سرعت سیال با ولتاژ اعمال شده برای دو مایع مورد مطالعه، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ولتاژ منجر به افزایش سرعت مایع در کانال می‌شود. با افزایش ولتاژ، شدت میدان الکتریکی و بنابراین نیروی حجمی اعمال شده به بارها افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش سرعت حرکت سیال می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که برای ولتاژهای بیش از ۳ کیلوولت، آهنگ تغییرات سرعت بالاتر می‌رود که این امر

ویژگی‌های فیزیکی مایعات مورد استفاده در این مطالعه که نرمال-هگزان^۱ و نرمال-دکان^۲ می‌باشند، در جدول ۱ نشان داده شده است. دمای میانگین مایع موجود در کانال با استفاده از حسگر دمای PT۱۰۰ اندازه‌گیری می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، پمپاژ رسانشی فیلم دو مایع دی‌الکتریک مختلف در یک کانال باز با استفاده از الکترودهای مسی مسطح بررسی می‌شود. هم‌چنین، اثر ویژگی‌های فیزیکی مایع بر مشخصه‌های عملکردی پمپ مانند مصرف توان، دبی جریان و بازده مورد بحث قرار می‌گیرد. در هر مرحله، داده‌ها هنگامی که سیستم در حالت پایا تثبیت می‌شود، جمع‌آوری می‌گردد.

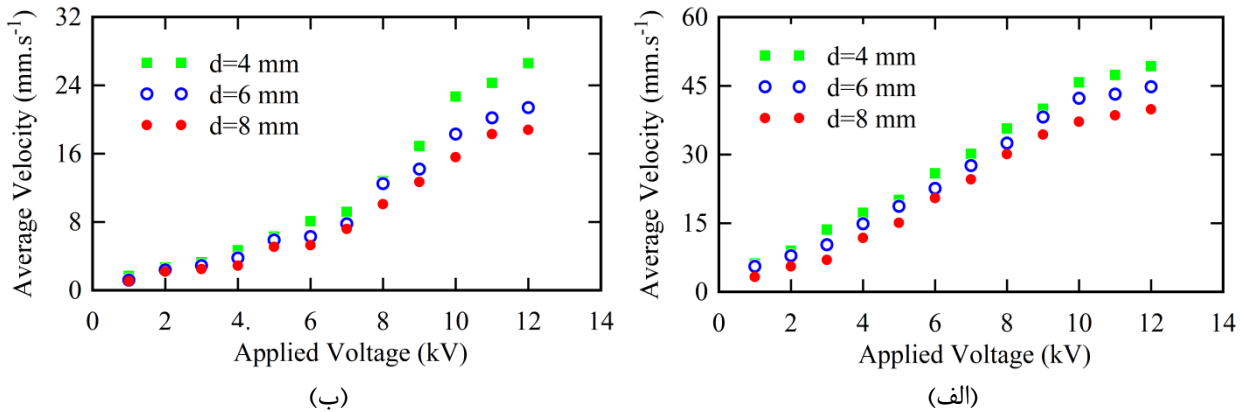
۳-۱- مصرف توان

در این بخش، تأثیر ولتاژ اعمالی بر روی مصرف توان پمپ رسانشی مورد بحث قرار می‌گیرد. تغییرات مصرف توان الکتریکی با ولتاژ اعمال شده برای دو سیال در شکل ۳ نشان داده شده است. نمودار مصرف توان رفتاری مشابه چندجمله‌ای درجه دوم را نشان می‌دهد که از رابطه زیر قابل پیش‌بینی است:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

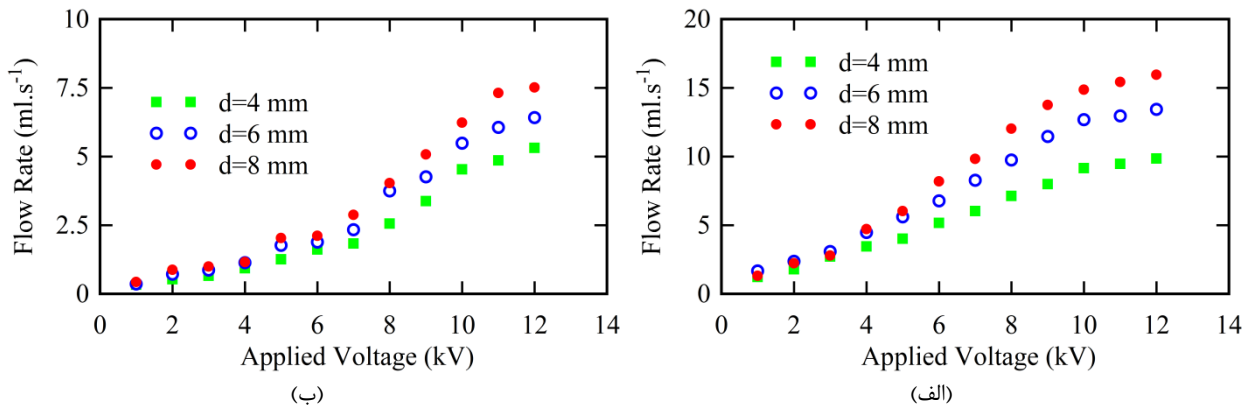
که در آن P ، V و R به ترتیب مصرف توان، ولتاژ اعمال شده و مقاومت الکتریکی می‌باشد.

- | | |
|---|----------|
| 1 | n-hexane |
| 2 | n-decane |



شکل ۴: تغییرات سرعت سیال برحسب ولتاژ اعمالی (الف) سیال عامل نرمال-هگزان (ب) سیال عامل نرمال-دکان

Fig. 4. Average velocity versus applied voltage: (a) n-hexane, (b) n-decane



شکل ۵: تغییرات دبی حجمی سیال برحسب ولتاژ اعمالی (الف) سیال عامل نرمال-هگزان (ب) سیال عامل نرمال-دکان

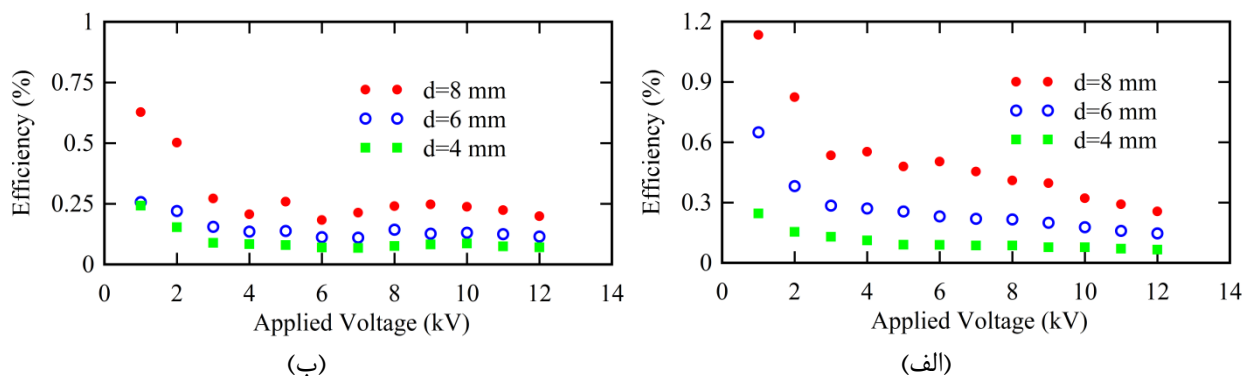
Fig. 5. Flow rate versus applied voltage: (a) n-hexane, (b) n-decane

میانگین نرمال-هگزان و نرمال-دکان به ترتیب برابر با ۲۲/۶ و ۶/۳ متر بر ثانیه می‌باشد که برای سیال دوم ۲۵۹ درصد بیشتر از سیال اول است. در ادامه تغییرات دبی حجمی جریان دو مایع برحسب ولتاژ اعمالی مورد مطالعه قرار می‌گیرد که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار دبی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = dwu \quad (۴)$$

که در آن d ، w و u به ترتیب ضخامت فیلم، پهنای کانال و سرعت میانگین سیال می‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که برای ضخامت فیلم مایع برابر ۶ میلی‌متر و ولتاژ اعمالی ۱۲ کیلوولت، دبی نرمال-هگزان و نرمال-دکان به ترتیب برابر با ۱۳/۴۴ و ۶/۴۲ میلی‌لیتر بر ثانیه می‌باشد

به دلیل تشدید آهنگ جداسازی یونها می‌باشد. هم‌چنین، برای ولتاژهای بالاتر از ۱۰ کیلوولت، جریان سرعت بالای مایع در اطراف الکتروود، بارها را از مجاورت الکتروودها جابه‌جا می‌کند و نیروی اعمال شده بر روی آن‌ها را کاهش می‌دهد. این تأثیر در شکل ۳ به صورت حالت اشباع برای سرعت دیده می‌شود که با افزایش بیشتر ولتاژ، آهنگ تغییرات سرعت میانگین سیال کمتر می‌گردد. افزایش ضخامت فیلم که منجر به بیشتر شدن ممان اینرسی مایع می‌شود، دبی جریان را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر نرمال-دکان در مقایسه با نرمال-هگزان به دلیل مقادیر پایین‌تر برای اختلاف تحرک یونی که یکی از عامل‌های اصلی پمپاژ رسانشی است، سرعت کمتری را نشان می‌دهد. البته چگالی و گرانشی بالاتر نرمال-دکان به عنوان عوامل مقاومت در مقابل حرکت سیال نیز به کاهش سرعت کمک می‌کنند. به عنوان مثال، برای ضخامت فیلم مایع برابر ۶ میلی‌متر و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، سرعت



شکل ۶: تغییرات بازده پمپ برحسب ولتاژ اعمالی: (الف): نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

Fig. 6. Efficiency variations with applied voltage: (a) n-hexane, (b) n-decane

از کاربردهای عملی بسیار مهم و حائز اهمیت می‌باشد، به علت مصرف کم توان در پدیده پمپاژ رسانشی این کاهش بازده که با افزایش دبی جریان همراه است می‌تواند مطلوب باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که فیلم‌های ضخیم‌تر مورد مطالعه با توجه به توان خروجی بالاتر و همچنین مصرف توان الکتریکی پایین‌تر که به آن اشاره شد، بازده بالاتری را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود، استفاده از نرمال-دکان بازده و همچنین دبی پایین‌تری نسبت به نرمال-هگزان دارد که این امر یک عامل محدودکننده برای استفاده از آن به‌عنوان سیال عامل است، هرچند نرمال-دکان دارای مزایای مهمی مانند نقطه اشتعال بالاتر می‌باشد. همچنین در شکل ۶ مشخص است که افزایش ضخامت فیلم بر بازده پمپ با سیال نرمال-هگزان نسبت به بازده پمپ با سیال نرمال-دکان اثر بیشتری دارد. علت این پدیده آن است که در سیال عامل نرمال-هگزان تحرک یون‌ها نسبت به نرمال-دکان بالاتر و چگالی و گرانشی پایین‌تر می‌باشد و بنابراین گردابه‌ها در همسایگی الکترود با حضور نرمال-هگزان آسان‌تر ایجاد می‌شوند و در نتیجه بازده افزایش می‌یابد. لازم به یادآوری است که در بعضی از کاربردها مانند خنک‌کاری دستگاه‌های الکترونیکی، ضخامت فیلم عامل محدودکننده طراحی است و باید مورد توجه قرار گیرد.

۳-۴- تأثیر دمای کارکرد

با توجه به این که تغییر دمای مایع دی‌الکتریک منجر به تغییر بازده پمپ می‌شود، بررسی این تأثیر به‌ویژه هنگامی که پمپ رسانشی به‌عنوان یک مبادله‌کن گرما مورد استفاده قرار می‌گیرد، بسیار مهم است. شکل ۷ تأثیر دمای میانگین مایع بر روی بازده پمپ رسانشی را برای ضخامت ۴ میلی‌متری

که برای سیال دوم در حدود دو برابر سیال اول است. با وجود آن که سرعت فیلم‌های نازک‌تر مایع بالاتر است، ولی از آن‌جا که با افزایش ضخامت فیلم سطح مقطع جریان بیشتر می‌شود، دبی حجمی افزایش می‌یابد.

۳-۳- بازده پمپ

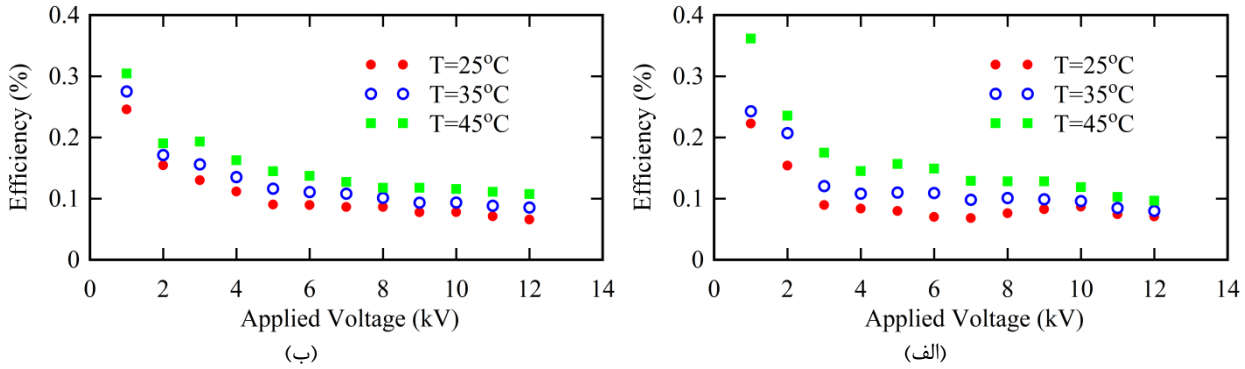
یکی دیگر از پارامترهای مهم در مطالعه عملکرد پمپ‌ها بازده آن می‌باشد. با مدنظر قرار دادن توان خروجی و توان مصرفی، بازده پمپ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta = \frac{\text{pump output power}}{\text{power consumption}} = \frac{\rho g Q h}{VI} \quad (5)$$

که در آن h انرژی ویژه جریان کانال روباز است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۳۰]:

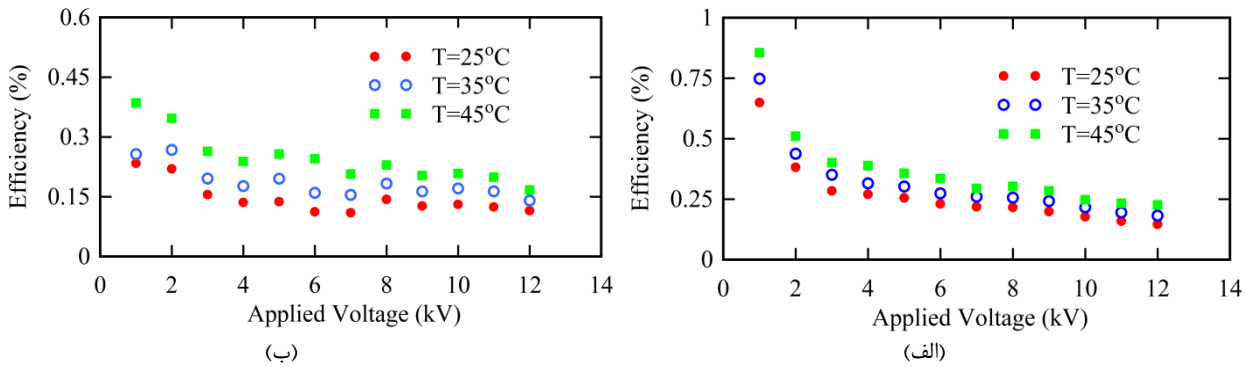
$$h = d + \frac{u^2}{2g} \quad (6)$$

در شکل ۶ تغییرات بازده برای دو مایع مورد بررسی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بازده پمپ برای ضخامت ۶ میلی‌متر سیال عامل نرمال-هگزان با اعمال ولتاژهای ۶ کیلوولت و ۱۲ کیلوولت به ترتیب برابر ۰/۲۳٪ و ۰/۱۵٪ است که ۳۵ درصد کاهش را در نتیجه افزایش دوبرابری ولتاژ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای هر دو سیال عامل مورد بررسی، افزایش ولتاژ به علت ایجاد آشفتگی بیشتر بر روی الکترودها بازده را کاهش می‌دهد. با توجه به این که افزایش دبی جریان برای بسیاری



شکل ۷: تغییرات بازده برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۴ میلی‌متری فیلم مایع: (الف): نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

Fig. 7. Efficiency variations with applied voltage for film thickness $d = 4\text{mm}$: (a) n-hexane, (b) n-decane



شکل ۸: تغییرات بازده برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۶ میلی‌متری فیلم مایع: (الف): نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

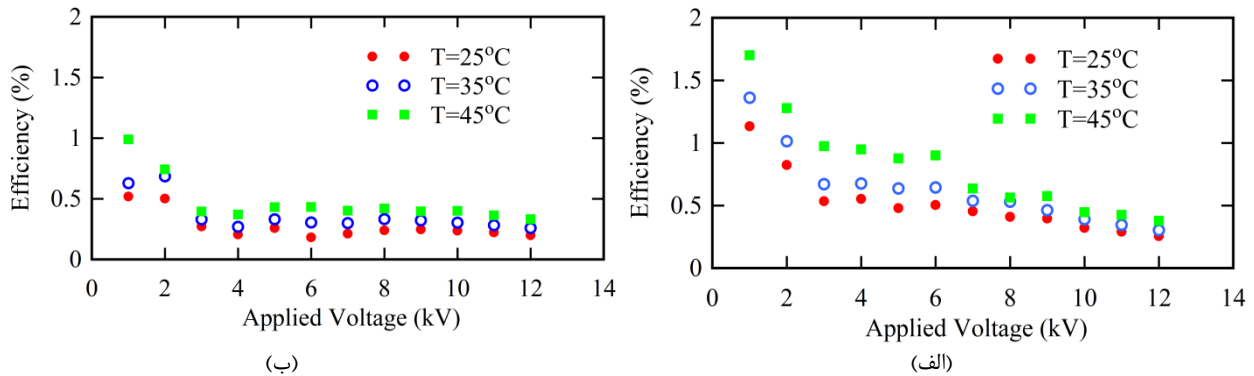
Fig. 8. Efficiency variations with applied voltage for film thickness $d = 6\text{mm}$: (a) n-hexane, (b) n-decane

که دلیل آن به‌طور کامل در مورد شکل ۶ توضیح داده شده است و در این‌جا برای رعایت اختصار از آوردن مجدد آن پرهیز می‌گردد. در این ضخامت فیلم نیز دیده می‌شود که با افزایش دمای میانگین مایع، بازده پمپ بیشتر می‌گردد. برای نمونه، میزان افزایش بازده پمپ در دماهای ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای سیال عامل نرمال-هگزان با اعمال ولتاژ ۶ کیلوولت به ترتیب برابر ۱۷٪ و ۴۵٪ است. همچنین، در شکل ۹ تأثیر دمای میانگین مایع بر روی بازده پمپ برای ضخامت ۸ میلی‌متری فیلم مایع نشان داده شده است. در این ضخامت نیز همانند ضخامت ۶ میلی‌متری، افزایش دمای میانگین مایع، بازده پمپ را افزایش می‌دهد. برای مثال، افزایش بازده پمپ در دماهای ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای سیال عامل نرمال-هگزان با اعمال ولتاژ ۶ کیلوولت به ترتیب برابر ۲۹٪ و ۸۰٪ است.

از آنجایی که در مورد نرمال-هگزان به دلیل مقادیر بالاتر تحرک یونی

فیلم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با افزایش دمای میانگین مایع بازده پمپ بیشتر می‌شود. برای مثال میزان افزایش بازده پمپ در دماهای ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای سیال عامل نرمال-هگزان با اعمال ولتاژ ۶ کیلوولت به ترتیب برابر ۲۳٪ و ۵۲٪ است. از آن‌جا که دو مایع در دماهای بالاتر دارای چگالی و گرانشی پایین‌تری هستند، حرکت گردابه‌ها و همچنین جریان سیال در کانال آسان‌تر می‌شود. این امر باعث افزایش توان خروجی و همچنین کاهش مصرف انرژی می‌گردد که منجر به افزایش بازده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تغییرات بازده به‌عنوان تابعی از ولتاژ اعمال شده برای هر دو مایع در ضخامت ۴ میلی‌متری فیلم بسیار مشابه است.

تأثیر دمای میانگین سیال بر روی بازده پمپ رسانی برای ضخامت ۶ میلی‌متری فیلم مایع در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره گردید، بازده برای نرمال-هگزان نسبت به نرمال-دکان بالاتر است



شکل ۹: تغییرات بازده برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۸ میلی‌متری فیلم مایع: (الف): نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

Fig. 9. Efficiency variations with applied voltage for film thickness $d = 8\text{mm}$: (a) n-hexane, (b) n-decane

سرعت و دبی جریان عمل می‌کنند.

اگرچه بازده پمپاژ رسانی با افزایش ولتاژ اعمالی کاهش می‌یابد، ولی به علت افزایش دبی جریان این مسئله از اهمیت کم‌تری برخوردار است. از سوی دیگر، کاهش بازده ناشی از افزایش ولتاژ برای نرمال-هگزان آهنگ تندتری را نشان می‌دهد و برای بعضی از کاربردهای آن می‌توان از محدوده بهینه ولتاژ اعمالی استفاده نمود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای کارکرد به دلیل کاهش چگالی و گرانشی هر دو مایع موجب افزایش بازده پمپ می‌شود. این مسئله برای ضخامت ۴ میلی‌متری فیلم مایع قابل ملاحظه نمی‌باشد، ولی در ضخامت‌های ۶ و ۸ میلی‌متر تأثیر آن بیشتر دیده می‌شود. همچنین با توجه به این که با افزایش دما حرکت گردابه‌ها آسان‌تر صورت می‌پذیرد، بنابراین اثر افزایش دما بر افزایش بازده برای نرمال-هگزان بیشتر از حالت متناظر مربوط به استفاده از سیال نرمال-دکان می‌باشد.

در نهایت می‌توان بیان نمود که با وجود بالاتر بودن دبی و بازده برای حالت استفاده از نرمال-هگزان، باید توجه داشت که این هیدروکربن نسبت به نرمال-دکان و هیدروکربن‌های سنگین‌تر نقطه اشتعال پایین‌تری دارد. این مسئله به‌ویژه در دماهای کارکردی بالاتر بسیار مهم است و می‌تواند عامل محدودکننده مهمی در استفاده از نرمال-هگزان یا دیگر هیدروکربن‌های سبک، به‌عنوان سیال عامل سیستم پمپ رسانی الکتریکی باشد.

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.

و نیز چگالی و گرانشی پایین‌تر، گردابه‌های بزرگ‌تر و مؤثرتری بر روی الکترودها تشکیل می‌شود (که البته این مسئله در فیلم‌های ضخیم‌تر مایع مشهودتر است)، بنابراین بازده پمپ نسبت به حالت استفاده از نرمال-دکان بیشتر می‌باشد. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که تأثیر افزایش دما بر بازده پمپ در هنگام استفاده از نرمال-هگزان نسبت به نرمال-دکان به‌طور معناداری بیشتر است. مقادیر بازده برای ضخامت‌های ۶ و ۸ میلی‌متری فیلم مایع، در برخی نقاط اندکی خارج از روند منحنی‌وار موجود در شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود که این امر ناشی از طبیعت گذرای گردابه‌های تشکیل شده می‌باشد. البته روند کلی تغییرات بازده، مطابقت مناسبی با توضیحات ارائه شده دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر پمپاژ رسانی دو دی‌الکتریک هیدروکربنی دارای ویژگی‌های متفاوت شامل تحرک یونی، چگالی و گرانشی، به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که هرچند افزایش ولتاژ اعمال شده باعث افزایش مصرف توان برای هر دو سیال نرمال-هگزان و نرمال-دکان می‌شود، اما برای یک ولتاژ مشخص، سیال عامل نرمال-هگزان مصرف توان بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین بررسی نتایج مشخص می‌کند که اختلاف تحرک یونی و رسانی الکتریکی، پارامترهای غالب تعیین‌کننده میزان مصرف توان هستند. علاوه بر این، در یک ولتاژ مشخص، به علت مقدار بالاتر اختلاف تحرک یونی برای نرمال-هگزان و تشدید ایجاد گردابه در بالای الکترودها، سرعت و دبی سیال در کانال برای نرمال-هگزان بالاتر است. برخلاف آنچه در مورد مصرف توان گفته شد، مقادیر بالاتر چگالی و گرانشی برای نرمال-دکان به‌عنوان عوامل کاهش

- (2001) 950-958.
- [11] 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).
- [12] 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.
- [13] S.-I. Jeong, J. Seyed-Yagoobi, Experimental study of electrohydrodynamic pumping through conduction phenomenon, *Journal of Electrostatics*, 56(2) (2002) 123-133.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] R. Hanaoka, H. Nakamichi, S. Takata, T. Fukami, Distinctive flow properties of liquid jet generated by EHD pump and conical nozzle, *Electrical Engineering in Japan*, 154(1) (2006) 9-19.
- [18] M.A.W. Siddiqui, Experimental Study of Stratified Liquid Film Pumping with Electric Conduction Phenomenon, Doctoral Dissertation, Illinois Institute of
- [2] J. Melcher, *Continuum electromechanics* (Cambridge, MIT press, 198 (1981) 3.1-3.26.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] W.F. Pickard, Ion drag pumping. I. Theory, *Journal of Applied Physics*, 34(2) (1963) 246-250.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] A. Washabaugh, M. Zahn, J. Melcher, Electrohydrodynamic traveling-wave pumping of homogeneous semi-insulating liquids, *IEEE transactions on electrical insulation*, 24(5) (1989) 807-834.
- [10] 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)

- [24] A. Sobhani, S. Nasirivatan, R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, Experimental investigation of fully developed falling film flow in the presence of conduction pumps, *Journal of Electrostatics*, 73 (2015) 71-79.
- [25] M. Yazdani, J.S. Yagoobi, The effect of uni/bipolar charge injection on EHD conduction pumping, *Journal of Electrostatics*, 75 (2015) 43-48.
- [26] M. Mirzaei, M. Saffar-Avval, Enhancement of convection heat transfer using EHD conduction method, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 93 (2018) 108-118.
- [27] 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.
- [28] O. Gzowski, Mobility of ions in liquid dielectrics, *Nature*, 194(4824) (1962) 173-173.
- [29] 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.
- [30] J.K. Vennard, *Elementary fluid mechanics*, Read Books Ltd, 2013.
- Technology, 2006.
- [19] 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).
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, M. Hemayatkhah, J. Danaeefar, Experimental investigation of electrohydrodynamic conduction pumping of various liquids film using flush electrodes, *Journal of Electrostatics*, 69(1) (2011) 43-53.

