



# Experimental Study of the Thermal-Hydraulic Performance of Several Ionic Liquids in a Counter-Current Double-Tube Micro Heat Exchanger

K. Darabi<sup>1</sup>, A. Parvareh<sup>2\*</sup>

1- MSc. Student of Chemical Engineering, Razi University

2- Assistant Professor of Chemical Engineering, Razi University

Email: [arsalanparvareh@yahoo.com](mailto:arsalanparvareh@yahoo.com)

## Abstract

*In this study, the effect of different ionic liquids on heat transfer in a counter-current double tube micro heat exchanger has been investigated. Experiments were performed in double-tube heat exchanger with a shell diameter of 6 mm, and the tube inner and outer diameter of 0.91 and 2 mm, and the length of 50 cm. Heat transfer using two ionic liquids ([HMIM] BF<sub>4</sub> and [HMIM] Cl), saline water, Urmia brine, and tap water as hot streams in the tube side and the tap water as the cold stream in the shell side was studied. Two inlet temperatures of 60 and 70 °C was considered for the hot stream and its volume flow rate varied from 0.5 to 3.3 mL/min. The evaluation of the overall heat transfer coefficient indicated that, at different flow rates, the highest coefficients were observed in the following order: saline water solution, [HMIM] BF<sub>4</sub>, [HMIM] Cl, Urmia brine, and tap water. Additionally, the best thermal-hydraulic performance was achieved in the following order: saline water solution, Urmia brine, and the ionic liquids [HMIM] BF<sub>4</sub> and [HMIM] Cl.*

Received: 18 December 2024

Accepted: 11 March 2025

Page Number: 112-122

## Keywords:

Ionic Liquid,  
Heat Transfer,  
Micro Heat Exchanger,  
Thermal-Hydraulic  
Performance Coefficient

## Please Cite this Article Using:

Darabi, K., & Parvareh, A. (2026). Experimental Study of the Thermal-Hydraulic Performance of Several Ionic Liquids in a Counter-Current Double-Tube Micro Heat Exchanger. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(142), 112-122, [In Persian].



## بررسی آزمایشگاهی عملکرد حرارتی - هیدرولیکی چند مایع یونی درون میکرومبدل دولوله‌ای جریان ناهمسو

خاطره دارایی<sup>۱</sup>، ارسلان پرواره<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه رازی

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه رازی

پیام‌نگار: [arsalanparvareh@yahoo.com](mailto:arsalanparvareh@yahoo.com)

### چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱  
شماره صفحات: ۱۱۲ تا ۱۲۲

### کلیدواژه‌ها:

مایع یونی،  
انتقال حرارت،  
میکرومبدل،  
شاخص عملکرد حرارتی-  
هیدرولیکی

در این تحقیق، اثر مایعات یونی مختلف در تبادل حرارتی، در یک میکرومبدل دولوله‌ای جریان ناهمسو به صورت آزمایشگاهی در دبی‌های مختلف سیال گرم و دو دمای ورودی بررسی شده است. آزمایش‌ها در یک میکرومبدل دولوله‌ای با قطر پوسته  $6\text{ mm}$  و قطر داخلی میکرولوله  $0.91\text{ mm}$  و طول  $50\text{ cm}$  انجام شد. تبادل حرارت میان مایعات یونی ۱- هگزیل ۳- متیل امیدازولیوم تترافلوئورو بورات ( $[HMIM] BF_4$ ) و ۱- هگزیل ۳- متیل امیدازولیوم کلراید ( $[HMIM] Cl$ )، محلول شورا به نمکی، محلول سنگ نمک دریاچه ارومیه و آب شهری به عنوان سیال گرم درون میکرولوله و آب شهری به عنوان سیال سرد درون پوسته بررسی شد. برای سیال گرم درون لوله، دو دمای ورودی  $60^\circ\text{C}$  و  $70^\circ\text{C}$  و دبی حجمی در محدوده  $0.5$  تا  $3.3\text{ mL/min}$  در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به ارزیابی ضریب کلی انتقال حرارت نشان داد که در دبی‌های مختلف، بیشترین ضریب کلی انتقال حرارت به ترتیب مربوط به محلول شورا به نمکی،  $[HMIM] BF_4$ ،  $[HMIM] Cl$ ، محلول سنگ نمک دریاچه ارومیه و آب بوده است. در حالی که، بهترین عملکرد حرارتی- هیدرولیکی به ترتیب مربوط به محلول شورا به نمکی، محلول آب نمک دریاچه ارومیه، مایعات یونی  $[HMIM] BF_4$  و  $[HMIM] Cl$  است.

\* کرمانشاه، دانشگاه رازی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

دارایی، خاطره، و پرواره، ارسلان. (۱۴۰۴). بررسی آزمایشگاهی عملکرد حرارتی- هیدرولیکی چند مایع یونی درون میکرومبدل دولوله‌ای جریان ناهمسو، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۴۲)، ۱۱۲-۱۲۲.

## ۱. مقدمه

مایعات یونی گروهی از نمکها هستند که از آنیونهای آلی یا معدنی و کاتیونهای آلی تشکیل شده‌اند و در دماهای نزدیک به دمای محیط، شکل مایع دارند. از برتری‌های اصلی این مواد، می‌توان به قابلیت استفاده در محدوده دمایی وسیع، ظرفیت گرمایی بالا، چگالی بالا، پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، فشار بخار پایین و بی‌ضرربودن آن‌ها اشاره کرد. با توجه به اهمیت اطلاع از خواص ترموفیزیکی در استفاده از مایعات یونی در فرایندهای تبادل حرارت، مطالعات متعددی در زمینه اندازه‌گیری و ارزیابی خواص ترموفیزیکی و ترموشیمیایی مایعات یونی طی سال‌های اخیر انجام شده است. والکنبورگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱]، خواص فیزیکی و شیمیایی، شامل: نقطه ذوب، نقطه جوش، گرمای ویژه، فشار بخار، ضریب هدایت حرارتی، چگالی و گرانروی سه نوع مایع یونی را اندازه‌گیری کردند. نتایج به دست آمده بیانگر مناسب‌تر بودن این مایعات نسبت به سیالات رایج انتقال حرارت هم‌چون سیالات با پایه روغن سیلیکون در محدوده‌های دمایی متوسط به بالا بود. مینیا<sup>۲</sup> و چرچز<sup>۳</sup> در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی هدایت حرارتی مایع یونی ۱- بوتیل-۳- متیل ایمیدازولیوم تترافلوربورات و بهبود آن از راه افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید روی و نانو لوله‌های کربنی پرداختند و نشان دادند که نوع نانوذره و دما تأثیر قابل توجهی بر هدایت حرارتی دارد [۲]. در این مطالعه، به پیچیدگی‌های پیش‌بینی تغییرات هدایت حرارتی در نانوکلئیدها اشاره شده و بر ضرورت داده‌های تجربی - به دلیل محدودیت‌های مدل‌های نظری موجود - تأکید شده است.

علاوه بر مطالعات انجام شده در زمینه اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی مایعات یونی، انتقال حرارت جابه‌جایی با مایعات یونی در تحقیقات مختلف بررسی شده است که از نقطه نظر توسعه فرایند و افزایش مقیاس حائز اهمیت است. در این راستا، پائول<sup>۴</sup> و همکاران [۳]، نتایج تجربی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی را برای مایع یونی [C4mim][NTf2] در یک مجرا با مقطع مستطیل با نسبت منظرهای مختلف گزارش کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مایع یونی از ضریب انتقال حرارت آب بدون یون

در شرایط مشابه کمتر است که دلیل آن را می‌توان به نیروی گران‌رو بالاتر و ضریب هدایت حرارتی پایین‌تر مایع یونی نسبت داد. چن<sup>۵</sup> و همکاران، آزمایش‌هایی را در راستای بررسی رفتار حرارتی و روانه‌شناختی (رئولوژیکی) مایع یونی [C4mim][NTf2] انجام دادند [۴]. آن‌ها انتقال حرارت جابه‌جایی این مایع یونی را در شرایط رژیم جریان آرام در محدوده دمایی ۲۰-۹۰ درجه سلسیوس مطالعه کردند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مربوط به مایع یونی استفاده شده درون لوله صاف بسیار کمتر از این ضریب برای آب مقطر تحت شرایط یکسان است.

مطالعات پیشین، نشان داده است که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مایعات یونی به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین‌تر آن‌ها، نسبت به آب کمتر است. بنابراین، لزوم تقویت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مایعات یونی به عنوان سیال انتقال حرارت ضروری است. مطالعات تجربی و تئوری متعددی در زمینه انتقال حرارت در پدیده‌های میعان و جوشش درون لوله‌های پرده‌دار انجام گرفته که در آن‌ها سازوکار افزایش انتقال حرارت توأم با تغییر فاز گزارش شده است [۵]. ایمساراد<sup>۶</sup> و همکاران، اثر ترکیبی نانوسیال، نوار تابیده دوپل و لوله مجهز به میکروفین را بر نرخ انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و شاخص عملکرد حرارتی بررسی کردند [۶]. نانوسیال اکسید مس در آب با غلظت‌های ۰/۳ تا ۱ درصد حجمی در محدوده رینولدز ۵۶۵۰ تا ۱۷۰۰۰ به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. نتایج نشان داد که لوله پرده‌دار مجهز به نوار تابیده دوپل، شاخص عملکرد حرارتی بهتری را در مقایسه با لوله مجهز به نوار تابیده تک و هم‌چنین، لوله پرده‌دار بدون نوار تابیده، در شرایط عملیاتی یکسان نشان داد.

زمزمیان و همکاران در یک تحقیق آزمایشگاهی اثر استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس را در محدوده ۱-۰/۱ درصد وزنی در سیال پایه اتیلن گلیکول در مبدل دولوله‌ای و مبدل صفحه‌ای در رژیم جریان درهم بررسی کردند [۷]. نتایج تحقیق آن‌ها بیانگر افزایش ۵۰-۲ درصدی میزان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نسبت به سیال پایه در ترکیبات مختلف تهیه شده بود. مقایسه میان نتایج تجربی و نتایج نظری، بیانگر اختلاف زیاد در دماهای بالا و غلظت‌های بالای نانوسیال بود که دلیل این اختلاف به دست محققان در لحاظ نشدن تأثیر دما و شیوه پایداری سازی

1. Valkenburg
2. Minea
3. Cherecheș
4. Paul

5. Chen  
6. Eiamsa-Ard

ظرفیت گرمایی این مایعات یونی را در محدوده ۸۰-۳۹۳ کلوین اندازه‌گیری و مشاهده کردند که این دو مایع یونی، دارای محدوده دمایی عملیاتی وسیع‌تری نسبت به مایعات یونی گزارش‌شده دیگر است. هم‌چنین، مشاهده شد که مایع یونی [C4eim][SbF6] تا دمای °C ۱۶- و مایع یونی [C5eim][SbF6] تا دمای °C ۳۰- مایع باقی‌می‌ماند که امکان استفاده از آن‌ها را در محیط‌های بسیار سرد فراهم می‌کند. اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی این دو مایع یونی، شامل: گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و گرانروی دینامیک، آن‌ها را به‌عنوان دو مایع یونی مناسب انتقال حرارت معرفی کرد.

باتوجه به اهمیت انتقال حرارت در سامانه‌های میکروسیالی و هم‌چنین، هزینه بالای سنتز مایعات یونی، در تحقیق حاضر، تبادل حرارت درون یک مبدل دولوله با استفاده از دو نوع مایع یونی، یک نوع شورابه نمکی، محلول آب نمک دریاچه ارومیه و آب به‌عنوان سیال عامل، درون یک میکرومبدل دولوله‌ای به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. ضریب کلی انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و شاخص عملکرد حرارتی- هیدرولیکی در دبی‌های مختلف جریان ناهمسوی سیال گرم و سرد درون میکرومبدل ارزیابی و مقایسه شده است. استفاده از شورابه نمکی و محلول آب نمک دریاچه ارومیه به‌عنوان ترکیبات یونی موجود در طبیعت در فرایند تبادل حرارت بدین منظور انجام گرفته است که قابلیت آن‌ها به‌عنوان مایعات دارای ساختار یونی در رقابت با مایعات یونی سنتزی بررسی شود.

## ۲. سامانه آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌ها

### ۲-۱ میکرومبدل دولوله‌ای

به‌منظور انجام آزمایش‌ها، یک میکرومبدل دولوله‌ای جریان ناهمسو به طول ۵۰ cm با میکرولوله داخلی از جنس مس و پوسته از جنس پلکسی گلاس طراحی و ساخته شد. میکرولوله دارای قطر داخلی و خارجی به ترتیب برابر با ۰/۹۱ mm و ۲ mm است و لوله خارجی به‌عنوان پوسته مبدل با قطر داخلی ۶ mm در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از اتلاف حرارت، دیواره خارجی مبدل و هم‌چنین، محل‌های نازل‌های ورودی و خروجی جریان‌ها کاملاً عایق شده است. دماهای ورودی و خروجی جریان‌ها با یک ترمومتر ۱۲ کاناله مدل BTM-4208SD با قابلیت ثبت و ذخیره دماها و مجهز به ترموکوپل‌های نوع K

نانوسیال و هم‌چنین، نوع ماده پایدارکننده ذکر شده است.

سجادی و همکاران [۸]، به بررسی مدل‌های مختلف پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات با سیال پایه آب و نانوذرات اکسید تیتانیم پرداختند و ضمن مقایسه نتایج مدل‌ها با داده‌های تجربی گزارش‌شده در مقالات مختلف دریافتند که افزودن نانوذرات در محدوده ۱ تا ۳ درصد حجمی، ضریب هدایت حرارتی را بین ۱ تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد. در نقطه مقابل، استفاده از نانوذرات با قطر بزرگ‌تر، میزان بهبود ضریب هدایت کمتری را در شرایط مشابه نشان داده است.

مطالعات سال‌های اخیر نشان داده است که لوله‌های مجهز به پره‌های میکرو، نقش مهمی را در افزایش انتقال حرارت داشته‌اند، ولی مطالعات انجام‌شده در زمینه انتقال حرارت تک‌فاز، عمدتاً بر روی سیالاتی هم‌چون آب، روغن و اتیلن گلیکول به‌عنوان سیال عامل بوده که محدود به دماهای کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس است. داده‌های آزمایشگاهی چندانی در خصوص مایعات یونی، که در محدوده دمایی بسیار وسیعی به‌کار می‌روند، در مراجع ذکر نشده است.

در تحقیق هی و همکاران [۹]، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با مایع یونی ۱- هگزیل ۳- متیل ایمیدازولیوم تترافلوئوربورات ([HMIM] BF4) در مبدل دولوله‌ای با لوله‌های صاف و پره‌دار به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. مایع یونی درون لوله داخلی و آب‌خنک‌کن با جریان متقاطع درون لوله خارجی جریان داشت. علاوه بر بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری درون مبدل، خواص ترموفیزیکی مایع یونی، شامل ضریب هدایت حرارتی، چگالی، گرمای ویژه و گرانروی به‌صورت آزمایشگاهی در محدوده دمایی ۳۰۳-۴۵۳ کلوین اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در محدوده رینولدز ۵۳۸-۵۷، ضریب اصطکاک و عدد ناسلت مربوط به لوله پره‌دار به ترتیب ۵/۶٪ و ۱۱/۳-۴/۵٪ نسبت به لوله صاف بالاتر بوده است. براساس داده‌های آزمایشگاهی، روابط تجربی برای ارزیابی ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی درون لوله پره‌دار در رژیم جریان آرام توسعه داده شد.

در معرفی مایعات یونی مناسب انتقال حرارت، وای و همکاران [۱۰] دو مایع یونی را بر پایه ایمیدازول و حاوی فلز آنتیموان ( $([Cneim][SbF6] (n = 4,5))$ ) طراحی و مشخصه‌یابی کردند. آن‌ها

مایع یونی  $[HMIM] BF_4$  و  $[HMIM] Cl$  و هم‌چنین شورا به نمکی (سیال نمکی بیابان خور و بیابانک اصفهان با چگالی  $1/52$  گرم بر سانتی‌متر مکعب و ترکیب اجزای  $MgCl_2$ ,  $KCl$ ,  $NaCl$  و  $CaCl_2$  به ترتیب با غلظت‌های  $5/5$ ،  $13$ ،  $128$  و  $695$  گرم بر لیتر) و محلول سنگ نمک دریاچه ارومیه به‌عنوان ترکیب‌های یونی با هدایت الکتریکی  $54000 \mu s/cm$  به‌عنوان سیال گرم درون میکرومبدل استفاده شد. با توجه به گرانروی بالای مایعات یونی سنتز شده، از ۱- پروپانول الکل برای رقیق کردن و کاهش گرانروی استفاده شد. مشخصات مایعات یونی به‌کاررفته به‌عنوان سیال گرم درون میکرومبدل در جدول (۱) ارائه شده است.

تعییه شده اندازه‌گیری می‌شود. میزان افت فشار هر یک از جریان‌ها با استفاده از ترانسیدوسرهای فشار در محل ورودی و خروجی ثبت می‌شود. سامانه آزمایشگاهی در شکل (۱) نشان داده شده است. برای تهیه محلول یکنواخت سیال گرم، از یک هیتر استیرر آزمایشگاهی با قابلیت تنظیم دمایی، زمانی و سرعت همزن مغناطیسی استفاده شده است. با توجه به کم‌بودن دبی‌ها در میکرومبدل، یک پمپ سرنگی ساخت شرکت فناوران نانومقیاس با قابلیت نصب ۱۰ سرنگ، هم‌زمان برای برقراری جریان‌های گرم و سرد درون مبدل به‌کار گرفته شده است.

## ۲-۲ مواد استفاده شده

برای انجام آزمایش‌های بررسی عملکرد حرارتی مایعات یونی، از دو



شکل ۱. سامانه آزمایشگاهی میکرومبدل دولوله‌ای طراحی شده.

Figure 1. The designed experimental double-tube micro heat exchanger.

جدول ۱. مشخصات مایعات یونی به‌کاررفته به‌عنوان سیال گرم درون میکرومبدل.

Table 1. Characteristics of the applied hot fluid ionic liquids.

Material	Chemical Formula	Molecular weight (g/mol)	Specify Gravity	Viscosity (cP)	Purity (%)	Color
1-Hexyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ([HMIM] $BF_4$ )	$C_{10}H_{19}BF_4N$	254.08	1.15	310	97-99	yellow
1-Hexyl-3-methylimidazolium chloride ([HMIM] Cl)	$C_{10}H_{19}ClN_2$	202.72	1.05	750	97-99	Bright yellow

$$Q = Q_c = Q_h = U \cdot A \cdot F \cdot LMTD \quad (2)$$

$$U = \frac{Q}{A \cdot LMTD} \quad (3)$$

که در آن  $Q$  میزان تبادل حرارت بین دو جریان گرم و سرد درون میکرومبدل،  $A$  سطح تبادل حرارت (سطح خارجی لوله)،  $U$  ضریب کلی انتقال حرارت و  $LMTD$  اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و یا به عبارت دیگر اختلاف دمای مؤثر بین دو جریان گرم و سرد است و به صورت زیر ارزیابی می‌شود:

$$LMTD = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln \frac{(T_{h1} - T_{c2})}{(T_{h2} - T_{c1})}} \quad (4)$$

شاخص  $F$  باتوجه به این که جریان‌های درون پوسته و لوله کاملاً ناهمسو در نظر گرفته شده است، برابر یک لحاظ شده است. میزان عدد رینولدز هر جریان باتوجه به خواص فیزیکی سیال، سرعت خطی جریان ( $u$ ) و قطر ( $d$ ) مطابق رابطه (۵) ارزیابی می‌شود:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (5)$$

برای محاسبات سمت پوسته از قطر معادل پوسته به شرح زیر استفاده می‌شود:

$$D_h = \frac{4A}{P} = D_2 - D_1 \quad (6)$$

در این رابطه،  $A$  سطح مقطع عبور سیال،  $P$  محیط خیس شده با سیال ضمن عبور از مجرا،  $D_1$  قطر خارجی لوله درونی،  $D_2$  قطر داخلی پوسته است.

## ۳-۲ روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در دو شرایط دمایی ورودی  $60^\circ\text{C}$  و  $70^\circ\text{C}$  سیال گرم در سمت لوله و تحت ده دبی حجمی متفاوت برای سیال‌های سمت لوله و پوسته انجام شده است. دمای سیال سرد ورودی به میکرومبدل در تمام آزمایش‌ها برابر  $20^\circ\text{C}$  بوده است. شرایط لحاظ شده دبی‌های جریان گرم ( $Q_h$ ) و سرد ( $Q_c$ ) باتوجه به امکان تنظیم مقدار دبی‌های دو جریان با پمپ سرنگی بوده و در جدول (۲) ارائه شده است. آزمایش‌ها با استفاده از دو مایع یونی، محلول شورا به نمکی، محلول آب نمک دریاچه ارومیه و آب شهری به عنوان سیال گرم با دماهای مشخص و آب شهری به عنوان سیال سرد انجام شد. تأمین دبی جریان‌های گرم و سرد درون میکرومبدل با استفاده از پمپ‌های سرنگی انجام شده است. آزمایش‌ها به صورت جریان ناهمسوی سیال گرم درون میکرولوله و جریان سرد درون پوسته مبدل انجام شد و دماهای ورود و خروج جریان‌های گرم و سرد تا رسیدن به حالت پایا ثبت شد.

## ۳. تئوری محاسبات

با فرض نبود اتلاف حرارت به محیط باتوجه به عایق بودن سامانه، موازنه انرژی بین دو سیال گرم و سرد به صورت زیر است:

$$Q_h = (\dot{m}C_p)_h (T_{h1} - T_{h2}) = Q_c = (\dot{m}C_p)_c (T_{c2} - T_{c1}) \quad (1)$$

$\dot{m}$  و  $C_p$  بیانگر دبی جرمی و گرمای ویژه است و زیرنویس‌های  $C$  و  $h$  به ترتیب مربوط به جریان‌های سرد و گرم است. اندیس‌های ۱ و ۲ نیز به ترتیب بیانگر موقعیت‌های ورود و خروج هر جریان است. با داشتن دبی حجمی و چگالی سیال، دبی جرمی قابل ارزیابی است. ضریب کلی انتقال حرارت براساس رابطه کلی انتقال حرارت مطابق زیر ارزیابی می‌شود:

جدول ۲. دبی‌های حجمی در نظر گرفته شده برای سیال‌های گرم و سرد درون میکرومبدل.

Table 2. The considered volume flow rates of the hot and cold fluid in the micro heat exchanger.

$Q_h$ (mL/min)	0.5	0.8	1.0	1.3	1.5	2.0	2.5	2.8	3.0	3.3
$Q_c$ (mL/min)	0.6	0.7	1.2	1.6	1.8	2.8	3.3	3.5	3.7	3.8

نسبت داد. در دبی‌های حجمی بالاتر، اثر حرکت توده‌ای سیال در افزایش نرخ انتقال حرارت بیشتر است و لذا، در دبی‌های یکسان، درصد اختلاف ضرایب کلی انتقال حرارت حاصل شده برای سیالات مختلف کمتر است. با افزایش دبی جریان سیال گرم به بیش از ۱/۵ mL/min، روند رشد ضریب کلی انتقال حرارت برای تمام سیالات افزایش یافته است که گویای غالب بودن حرکت توده سیال و افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به‌واسطه آن است. ضریب کلی انتقال حرارت مربوط به شورا به نمکی نسبت به سیالات دیگر بیشتر است، زیرا یون‌های قوی‌تر در این محلول سبب ضریب هدایت حرارتی بیشتر شده است. در نتیجه، ضریب هدایت حرارتی بالاتر، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیز بیشتر شده، باعث افزایش ضریب کلی انتقال حرارت بالاتر می‌شود. لازم به ذکر است که عملکرد حرارتی محلول آب نمک دریاچه ارومیه و محلول شورا به نمکی استفاده شده ضمن رقیق کردن آن‌ها برای رسیدن به ضریب هدایت الکتریکی یکسان، مقایسه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که ضریب کلی انتقال حرارت برای مایعات یون  $[HMIM] BF_4$  و  $[HMIM] Cl$  در مرتبه بع از شورا به نمکی بوده و از محلول نمک دریاچه ارومیه بالاتر است. بالاتر بودن ضریب کلی انتقال حرارت این دو مایع یونی را می‌توان به وجود یون‌های قوی‌تر (هادی‌تر) آن‌ها نسبت به یون‌های موجود در نمک کلرید سدیم نسبت داد. سرانجام، ضریب کلی انتقال حرارت در حالت استفاده از آب به‌عنوان سیال گرم و سرد، با توجه به یون‌های ضعیف آن از مایعات دیگر کمتر است. برای مقایسه نسبی اثر نوع مایع یونی به‌کاررفته درون میکرومبدل بر بهبود انتقال حرارت، نسبت مقدار ضریب کلی انتقال حرارت هر یک از مایعات به‌کاررفته به ضریب کلی انتقال سیال پایه (آب شهری) برای دمای ورودی جریان گرم برابر  $60^\circ C$  محاسبه شده که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

همان‌گونه که نتایج جدول نشان می‌دهد، در تمام دبی‌های مورد آزمایش، بهترین عملکرد حرارتی به ترتیب مربوط به شورا به نمکی، مایع یونی  $HMIM-BF_4$ ، مایع یونی  $HMIM-Cl$  و محلول آب نمک دریاچه ارومیه است.

میزان ضریب اصطکاک هر یک از جریان‌ها با توجه به افت فشار اندازی گیری شده با استفاده از رابطه داریابی - ویسباخ مطابق رابطه (۷) ارزیابی می‌شود:

$$\Delta P = f \frac{l}{d} \left( \rho \frac{u^2}{2} \right) \rightarrow f = \frac{\Delta P \times 2 \times d}{\rho \times l \times u^2} \quad (7)$$

که در آن،  $f$  ضریب اصطکاک،  $\Delta P$  افت فشار اندازه‌گیری شده جریان،  $d$  قطر لوله و یا قطر معادل پوسته،  $l$  طول مبدل و  $u$  سرعت خطی سیال درون لوله و یا پوسته مبدل است که براساس دبی حجمی در نظر گرفته شده و سطح مقطع عبور سیال برای هر یک از سیالات سمت لوله و پوسته ارزیابی می‌شود.

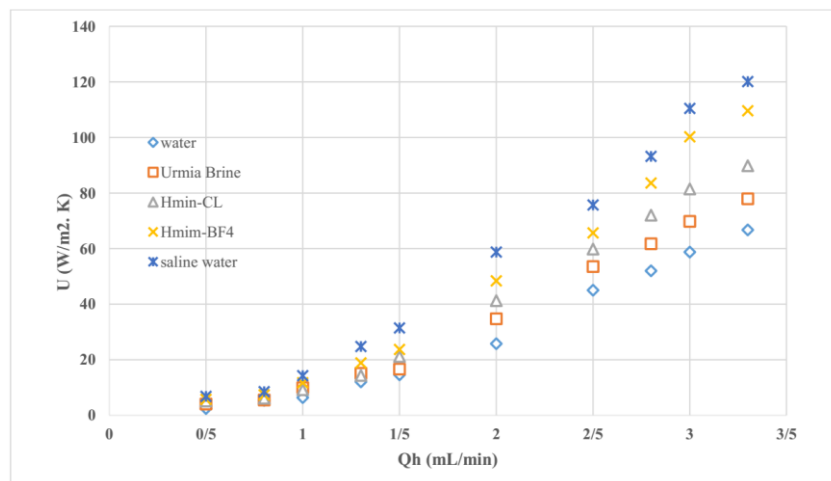
#### ۴. بررسی و تحلیل نتایج

##### ۴-۱ بررسی اثر نوع سیال بر ضریب کلی انتقال حرارت درون

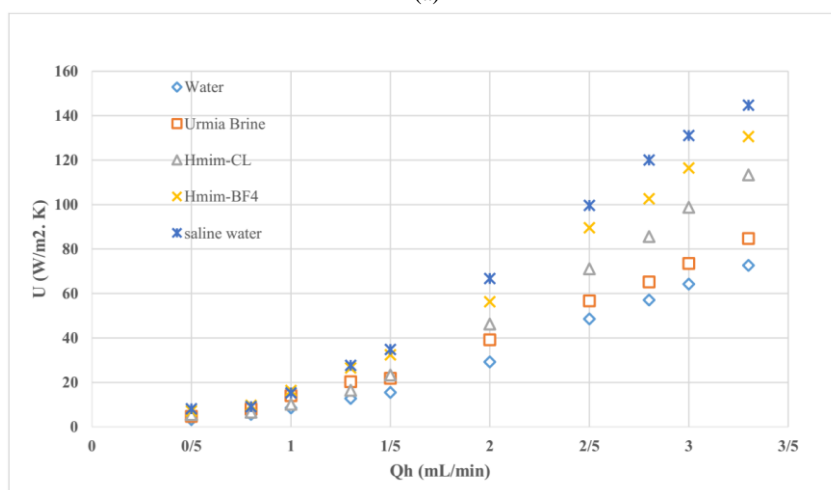
##### میکرومبدل

برای بررسی عملکرد حرارتی مایعات یونی مورد استفاده، ضریب کلی انتقال حرارت در هر یک از آزمایش‌ها ارزیابی شد. در شکل (۲)، تغییرات ضریب کلی انتقال حرارت بر حسب دبی حجمی سیال گرم در دو دمای ورودی  $60^\circ C$  و  $70^\circ C$  سیال گرم ارائه شده است. افزایش ضریب کلی انتقال حرارت با افزایش دبی جریان سیال گرم در تمام آزمایش‌ها قابل انتظار بوده است.

برای کلیه سیالات در نظر گرفته شده و در دبی‌های مختلف، ضریب کلی انتقال حرارت در دمای بالاتر جریان گرم ورودی ( $70^\circ C$ ) نسبت به دمای پایین‌تر ( $60^\circ C$ ) بیشتر بوده که دلیل آن را می‌توان به تحرک یونی بیشتر و در نتیجه، افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و به تبع آن ضریب کلی انتقال حرارت نسبت داد. اگرچه تفاوت ضریب کلی انتقال حرارت مایعات یونی مختلف در دبی‌های بالاتر جریان گرم، مطابق نمودارها نمایان‌تر است، ولی نکته حائز اهمیت آن است که درصد اختلاف بین ضریب کلی انتقال حرارت ارزیابی شده برای مایعات یونی مختلف در دبی‌های حجمی پایین‌تر سیال گرم، نسبت به دبی‌های حجمی بالاتر، بیشتر است که این موضوع را می‌توان به نوع یون‌های مربوطه هر یک از سیالات



(a)



(b)

شکل ۲. ضریب کلی انتقال حرارت برحسب دبی حجمی جریان سیالات گرم تحت شرایط دماهای ورودی سیال گرم (a) ۶۰ و (b) ۷۰ °C.

Figure 1. The overall heat transfer coefficient versus volume flow rate of the hot fluid at inlet temperature of (a) 60 , and (b) 70 °C for the hot fluid.

جدول ۳. مقادیر نسبی ضریب کلی انتقال حرارت نسبت به سیال پایه آب برای مایعات یونی به کاررفته در دبی‌های حجمی مختلف سیال گرم برای دمای ورودی جریان گرم ۶۰ °C.

Table 3. The relative values of the overall heat transfer coefficient compared to the base fluid (water) for ionic liquids used at different volumetric flow rates of the hot fluid for an inlet temperature of the hot flow of 60 °C.

Qh (mL/min)	(Hmim-BF4)	(Hmim-Cl)	(saline water)	(Urmia Brine)
0.5	2.375	2.12	2.83	1.67
0.8	1.38	1.15	1.60	1.04
1	1.86	1.46	2.25	1.57
1.3	1.57	1.19	2.06	1.26
1.5	1.63	1.45	2.16	1.14
2	1.89	1.60	2.28	1.35
2.5	1.46	1.33	1.68	1.19
2.8	1.6	1.38	1.79	1.19
3	1.71	1.39	1.88	1.19
3.3	1.64	1.35	1.80	1.18

### ۲-۴ بررسی ضریب اصطکاک سیالات مختلف درون میکرومبدل

ضمن انجام آزمایش‌های مربوط به تبادل حرارت، افت فشار درون لوله میکرومبدل با استفاده از ترانسیدویسرهای فشار اندازه‌گیری شد و براساس رابطه (۷) ضریب اصطکاک برای سیالات مختلف به کاررفته در دبی‌های مختلف برای دمای ورودی جریان گرم  $60^{\circ}\text{C}$  ارزیابی شد که نتایج آن در شکل (۳) ارائه شده است.

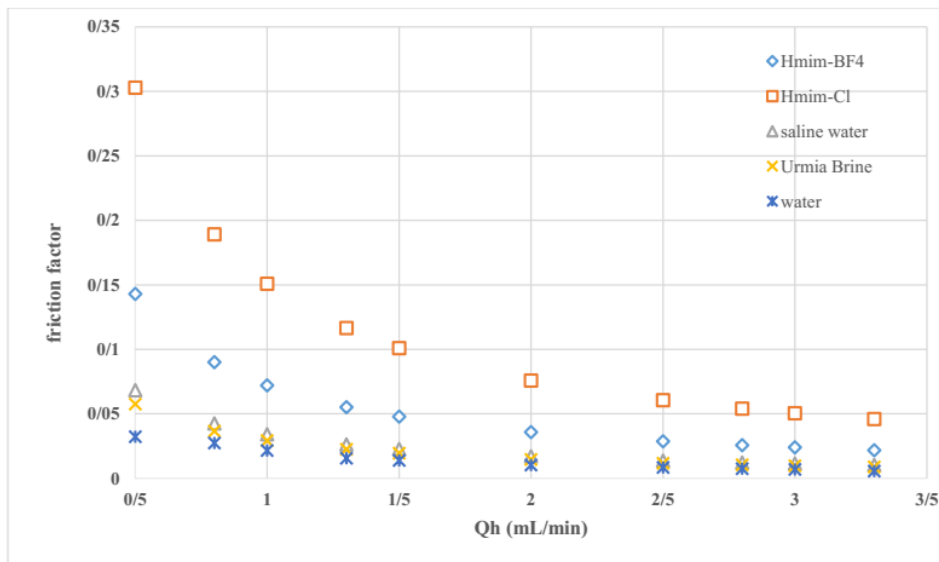
روند کاهشی ضریب اصطکاک با افزایش دبی جریان سیال گرم درون لوله و یا به عبارت دیگر افزایش عدد رینولدز برای تمام سیالات به کاررفته مشاهده می‌شود. در تمام آزمایش‌های انجام شده، بیشترین ضریب اصطکاک به ترتیب مربوط به مایعات یونی  $[\text{HMIM}] \text{Cl}$  و  $[\text{HMIM}] \text{BF}_4$ ، محلول شورابه نمکی، محلول آب نمک دریاچه ارومیه و آب شهری است. مقادیر بالای ضریب اصطکاک مایعات یونی را می‌توان به گرانروی بالای آن‌ها (جدول (۱)) نسبت به دیگر سیالات مورد استفاده نسبت داد. در این دو نوع مایع یونی، روند کاهشی ضریب اصطکاک با افزایش دبی نسبت به مایعات دیگر مشهودتر بوده که به معنای تمایل به غلبه بیشتر نیروی اینرسی بر نیروی گرانروی برای این دو مایع یونی در دبی‌های بالاتر است. مقادیر ضریب اصطکاک ارزیابی شده برای شورابه نمکی و محلول آب نمک دریاچه ارومیه در محدوده مشابهی است و بسیار کمتر از مقادیر

مربوطه برای دو مایع یونی  $[\text{HMIM}] \text{Cl}$  و  $[\text{HMIM}] \text{BF}_4$  است. لازم به ذکر است که در تمام دبی‌های به کاررفته، ضریب اصطکاک ارزیابی شده برای شورابه نمکی اندکی بالاتر از مقدارهای مشابه برای محلول آب نمک دریاچه ارومیه است. سرانجام، کمترین مقادیر ضریب اصطکاک در دبی‌های مختلف مربوط به آب شهری بوده که گرانروی آن (محدوده  $1 \text{ cP}$ ) بسیار پایین‌تر از مایعات یونی به کاررفته است.

### ۳-۴ بررسی عملکرد حرارتی - هیدرولیکی نوع سیال درون میکرومبدل

باتوجه به تقابل افزایش ضریب کلی انتقال حرارت به عنوان یک نتیجه مطلوب و افزایش افت فشار به عنوان یک نتیجه نامطلوب درون مبدل‌های حرارتی، در این مطالعه شاخص عملکرد حرارتی - هیدرولیکی  $^1 \text{ (THP)}$  به عنوان عاملی برای بررسی این تقابل معرفی می‌شود که عملکرد مبدل را ضمن بهبود انتقال حرارت و بررسی افت فشار مطالعه می‌کند. شاخص عملکرد حرارتی - هیدرولیکی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$\text{Thermal-Hydraulic Performance (THP)} = (U/U_0) / (f/f_0)^{0.33} \quad (8)$$



شکل ۳. ضریب اصطکاک برحسب دبی جریان سیال گرم درون لوله میکرومبدل برای سیالات مختلف.

Figure 3. The friction coefficient in terms of the flow rate of the hot fluid inside the micro heat exchanger for different fluids.

<sup>1</sup> Thermal-Hydraulic Performance (THP)

مختلف در دبی‌های مختلف سیال‌های گرم و هم‌چنین، دو دمای ورودی سیال گرم به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج ضریب کلی انتقال حرارت ارزیابی شده نشان داد که بهترین عملکرد حرارتی به ترتیب مربوط به شوراۃ نمکی، مایع یونی  $[HMIM] BF_4$ ، مایع یونی  $[HMIM] Cl$  و محلول آب‌نمک دریاچه ارومیه است. ضریب اصطکاک در تمامی آزمایش‌ها براساس افت فشار اندازه‌گیری شده سیال سمت لوله، ارزیابی و برای بررسی تقابل انتقال حرارت و افت فشار، مشخصه عملکرد حرارتی- هیدرولیکی معرفی و برای حالت‌های مختلف ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد حرارتی- هیدرولیکی به ترتیب مربوط به محلول شوراۃ نمکی، محلول آب‌نمک دریاچه ارومیه، مایعات یونی  $[HMIM] BF_4$  و  $[HMIM] Cl$  بوده است. شوراۃ نمکی با بهترین عملکرد حرارتی، بهترین عملکرد حرارتی- هیدرولیکی را دارد. اگر چه مایعات یونی دارای عملکرد حرارتی بهتری نسبت به محلول آب‌نمک دریاچه ارومیه بوده‌اند، ولی با توجه به ایجاد افت فشار بیشتر، عملکرد حرارتی- هیدرولیکی آن‌ها در مرتبه پایین‌تری قرار دارد. مایع یونی  $[HMIM] BF_4$  نسبت به مایع یونی  $[HMIM] Cl$  هم عملکرد حرارتی بهتر و هم افت فشار کمتری را در تمام دبی‌ها داشته است که منجر به عملکرد حرارتی- هیدرولیکی بهتر آن شده است. نتایج تحقیق بیانگر آن است که در ارزیابی عملکرد میکرومبدل‌های حرارتی با سیالات مختلف، عملکرد حرارتی بهتر به تنهایی کافی نیست و باید عملکرد مبدل از نقطه نظر افت فشار نیز بررسی شود که بتوان بر مبنای یک معیار مناسب کارایی مبدل را بررسی کرد.

در این رابطه،  $U$  و  $f$  به ترتیب ضریب کلی انتقال حرارت و ضریب اصطکاک است. زیر نویس صفر ( $0$ ) مربوط به حالت پایه استفاده از آب شهری است. مقادیر حساب شده مربوط به ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی برای تمام آزمایش‌های انجام شده برای دمای ورودی جریان گرم برابر  $60^\circ C$  در جدول (۴) ارائه شده است. همان گونه که از رابطه برمی آید، این ضریب اثرات هم‌زمان تغییر نرخ انتقال حرارت و هم‌چنین، تغییر میزان ضریب اصطکاک را برای مایعات مختلف در نظر گرفته شده به عنوان سیال گرم درون میکرومبدل، نسبت به سیال پایه آب شهری در نظر گرفته است. نتایج جدول نشان می‌دهد که در تمام دبی‌های به کار رفته در آزمایش‌ها، بهترین عملکرد حرارتی- هیدرولیکی به ترتیب مربوط به محلول شوراۃ نمکی، مایع یونی  $[HMIM] BF_4$ ، محلول آب‌نمک دریاچه ارومیه و مایع یونی  $[HMIM] Cl$  است. همان گونه که در جدول (۳) بیان شد شوراۃ نمکی بهترین عملکرد حرارتی را داشته که در اینجا نیز بهترین عملکرد حرارتی- هیدرولیکی را دارد. حال آن‌که، مایعات یونی به کار رفته اگر چه دارای عملکرد حرارتی بهتری نسبت به محلول آب‌نمک دریاچه ارومیه هستند، ولی مایع یونی  $[HMIM] Cl$  با توجه به ضریب اصطکاک بالاتر (و یا به عبارت دیگر افت فشار بیشتر)، عملکرد حرارتی- هیدرولیکی آن‌ها در مرتبه پایین‌تری قرار دارد. مایع یونی  $[HMIM] BF_4$  نسبت به مایع یونی  $[HMIM] Cl$  هم عملکردی حرارتی بهتر و هم افت فشار کمتری را در تمام دبی‌ها داشته است که منجر به عملکرد حرارتی- هیدرولیکی بهتر آن شده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

تبادل حرارت درون میکرومبدل دولوله‌ای با استفاده از مایعات یونی

جدول ۴. ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی برای مایعات یونی مختلف نسبت به سیال پایه آب در دبی‌های متفاوت سیال گرم.

Table 4. The thermal-hydraulic performance coefficient for different ionic liquids compared to the base fluid (water) at varying flow rates of the hot fluid.

Qh (mL/min)	(Hmim-BF4)	(Hmim-CL)	(saline water)	(Urmia Brine)
0.5	1.45	1.01	2.21	1.38
0.8	0.92	0.60	1.39	0.94
1	1.25	0.77	1.94	1.42
1.3	1.03	0.61	1.73	1.11
1.5	1.08	0.75	1.84	1.02
2	1.25	0.83	1.94	1.20
2.5	0.97	0.69	1.43	1.07
2.8	1.07	0.72	1.52	1.06
3	1.13	0.72	1.59	1.06
3.3	1.05	0.67	1.47	1.00

## مراجع

- [1] Valkenburg, M. E. V., Vaughn, R. L., Williams, M., & Wilkes, J. S. (2005). Thermochemistry of ionic liquid heat-transfer fluids, *Thermochimica Acta*, 425 (1-2), 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2004.11.013>
- [2] Minea, A. A., & Cherecheș E. I. (2024). Experimental studies on thermal conductivity and heat transfer of 1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ionic liquid and its nanocolloids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 154, 107406. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107406>
- [3] Paul, T. C., Morshed, A. K. M. M., Fox, E. B., Visser, A. E., Bridges, N. J., & Khan, J. A. (2014). Buoyancy driven heat transfer behavior of [C4mim][NTf2] ionic liquid: An experimental study, *Applied Thermal Engineering*, 66 (1-2), 534-540.
- [4] Chen, H. S., He, Y. R., Zhu, J. W., Alias, H., Ding, Y. L., Nancarrow, P., Hardacre, Ch., Rooney, D., & Tan, C. (2008). Rheological and heat transfer behaviour of the ionic liquid, [C4mim][NTf2], *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29 (1), 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.002>
- [5] Kedzierski, M. A., & Park K. J. (2018). Horizontal convective boiling of R134A, R1234YF/R134A, and R1234ZE(E) within a micro-fin tube, *Journal of Enhanced Heat Transfer* 88 (4), 333-346. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.02.021>
- [6] Eiamsa-ard, S., & Wongcharee, K. (2012). Single-phase heat transfer of CuO/water nanofluids in micro-fin tube equipped with dual twisted-tapes, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 39 (9), 1453-1459. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.08.007>
- [7] Zamzamian, S. A. H, Pazouki, M., Tajik, M. (2014). "Experimental study of forced convection heat transfer of nanofluid in double tube and plate heat exchangers", *Iranian Chemical Engineering Journal*, 14 (80), 6-13, In Persian.
- [8] Sajadi, S. M., Tavakoli, A. (2012). "Calculation of conduction heat transfer coefficient of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid using different models, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 18 (104), 22-30, In Persian.
- [9] He, G. D., Fang, X. M., Xu, T., Zhang, Zh. G., & Gao, X. N. (2015). Forced convective heat transfer and flow characteristics of ionic liquid as a new heat transfer fluid inside smooth and microfin tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.094>
- [10] Wei, J., Ren, C., Zhang, Y., Liang, K., Fang, D., & Gao, P. (2023). A strategy of imidazole ionic liquids containing metallic element [Cneim] [SbF6] (n = 4,5) as innovative media in sustainable heat transfer processes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 140, 106541. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106541>
- [11] Rahimi, M, Shabaniyan, S. R., & Alsairafi, A. A. (2009). Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48, 762-770. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.09.007>