

# بررسی تجربی اثر نوع سطح بر مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش استخری در حضور نانوسیالات با سیال پایه هیبریدی

آرمین دلالی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مرتضی خیاط\* (استادیار)

مسعود زارع (استادیار)

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی تهران واحد علوم و تحقیقات

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۳۹۹)  
دوری ۳-۲، شماره ۲، ص. ۹۵-۸۳

در این مطالعه اثر سطح میکروساختار شده برنجی و اثرات رسوب نانوسیالات در فرایند جوشش استخری بر مشخصه‌های انتقال حرارت بررسی شده است؛ سیالات پایه شامل: آب دیونیزه‌ی خالص، ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول که با ذرات نانولوله‌های کربنی چندجداره‌ی پایه‌ی OH در دو درصد حجمی ۲۵٪ و ۱٪ ترکیب شده‌اند. شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت در جوشش سیالات پایه روی سطح میکروساختار شده نسبت به سطح صیقلی افزایش قابل ملاحظه‌ی یافت. در آزمایشات جوشش روی سطح میکروساختار شده در حضور نانوسیالات با افزایش غلظت نانوسیال، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت افزایش یافته است. همچنین در سطح میکروساختار شده رسوب یافته توسط نانو ذرات، این دو پارامتر به ترتیب نسبت به سطح میکروساختار شده‌ی بدون رسوب افزایش و کاهش یافته است. در کلیه‌ی آزمایشات جوشش استخری سیالات پایه هیبریدی، با افزایش غلظت اتیلن‌گلیکول، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت کاهش یافته است.

**واژگان کلیدی:** جوشش استخری، شار حرارتی بحرانی، میکروساختار، نانوسیالات پایه هیبریدی، رسوب نانوذرات.

armindallali@gmail.com  
mkhayat@srbiau.ac.ir  
m.zareh@srbiau.ac.ir

## ۱. مقدمه

شدن گرادیان دما در سیال، باعث افزایش چشم‌گیر ضریب انتقال حرارت می‌شود. اصلاح سطح جوشش نیز می‌تواند به صورت تغییر در مورفولوژی سطح به واسطه ایجاد ساختارهای منظم مانند میکروفین‌ها، حفره‌ها، کانال‌ها و شیارهای روی سطح و یا ایجاد ساختارهای نامنظم مانند سطوح متخلخل با استفاده از رسوب نانو ذرات، فیبرهای گرافیتی باشد. اصلاح هندسی سطح، نحوه‌ی عملکرد سطح در برخورد با سیال مایع یا بخار را به صورت تغییر در خصوصیات مثل ترشوندگی، چسبندگی و جذب کنندگی تحت تأثیر قرار می‌دهد و بر مشخصه‌های انتقال حرارت جوششی اثر می‌گذارد. در طی سده گذشته، تحقیقات گسترده‌ی برای افزایش انتقال حرارت جوششی به وسیله‌ی اصلاح خواص سیال و سطح جوشش انجام گرفته که این اصلاحات به منظور بهبود شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت به طور تومانی انجام شده است.

سرافراز و همکاران<sup>[۱]</sup> انتقال حرارت جوشش نانو سیالات  $ZrO_2$  با پایه ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول را در غلظت‌های حجمی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱٪، به صورت تجربی بررسی کردند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جوشش استخری تا ۱۲٪ در حجم ۱٪ افزایش می‌یابد. کاماتچی و همکاران<sup>[۲]</sup>

امروزه در صنعت سرمایش و گرمایش، با توجه به مسئله‌ی بحران انرژی و مسائل زیست‌محیطی، تمام تلاش محققین بر این است که روش‌هایی اقتصادی و سازگار با محیط زیست در پیش گرفته شود. استفاده از پدیده‌ی «جوشش» موضوعی است که برای افزایش نرخ انتقال حرارت بدون افزایش سطح انتقال حرارت به کار می‌رود و از پرکاربردترین فرایندهای انتقال حرارت در صنعت به شمار می‌رود. در واقع به دلیل بالا بودن گرمای نهان سیال در طی فرایند جوشش، می‌توان بارهای حرارتی زیادی را از سطوح کوچک جامد دفع کرده و به این طریق ابعاد تجهیزات و قطعات را کاهش داد. از جمله روش‌های غیرفعال برای بهبود انتقال حرارت جوششی، می‌توان به اصلاح خواص ترموفیزیکی سیال یا سطح جوشش و یا هر دو است. یکی از راه‌های اصلاح خصوصیات ترموفیزیکی سیال، استفاده از نانوسیالات به عنوان سیال جوشش است. در واقع افزودن نانوذرات به سیال پایه، به دلایلی همچون افزایش سطح انتقال حرارت، افزایش ظرفیت گرمایی سیال، افزایش هدایت گرمایی مؤثر، یکنواخت

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۹/۳/۱۸، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۲۴.

DOI:10.24200/J40.2020.55240.1546

به بررسی تجربی افزایش شار حرارتی بحرانی در انتقال حرارت جوشش استخري با نانوسيال پایه آب اکسيد گرافيت کاهش یافته (rGO) در غلظت های مختلف  $0.3 \text{ gr/lit}$  و  $0.1, 0.01$  نانوسيال پرداختند. نتایج حاصله حاکی است که افزایش شار حرارتی بحرانی بین  $14.5\%$  تا  $24.4\%$  بسته به غلظت، متغیر است. سرفراز و هرمزی<sup>[3]</sup> خصوصیات انتقال حرارت جوششی نانوسيال پایه آب حاوی نانولوله های کربنی چندجداره را در درصد های وزنی  $0.1\%$  و  $0.3\%$ ، روی سطوح اصلاح شده ی میکرو فین دار به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت جوششی برای سطوح میکرو فین به میزان  $56\%$  و  $77\%$  به ترتیب برای درصد های وزنی  $0.1\%$  و  $0.3\%$  افزایش یافته است. همچنین رسوب نانولوله های کربنی روی سطح، باعث کاهش زاویه ی تماس استاتیک و افزایش ترشوندگی سطح می شود. در این حالت، شار حرارتی بحرانی تا  $95\%$  در درصد وزنی  $0.3\%$  افزایش می یابد. سیلوگلو<sup>[4]</sup> به طور تجربی انتقال حرارت جوشش هسته یی با استفاده از یک نانوسيال پایه آب حاوی نانو ذرات  $\text{SiO}_2$  را بررسی کرد و نشان داد که شار حرارتی بحرانی تا  $45\%$  با افزایش غلظت نانوذرات، افزایش یافته است. وانگ و همکاران<sup>[5]</sup> شار حرارتی بحرانی انتقال حرارت جوششی نانوسيال پایه آب حاوی نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  را در یک لوله ی عمودی با غلظت های مختلف به صورت تجربی بررسی کردند. آنها نشان دادند که شار حرارتی بحرانی تا  $18\%$  در مقایسه با سیال پایه افزایش یافته است. کومار و همکاران<sup>[6]</sup> شار حرارتی بحرانی نانوسیالات پایه آب اکسید فلزی  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{CuO}$  را با غلظت حجمی متغیر  $0.1\%$  تا  $0.8\%$  در پدیده ی جوشش استخري به صورت تجربی بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش غلظت نانوذرات، شار حرارتی بحرانی در غلظت مطلوب خود افزایش یافته و سپس شروع به کاهش می کند. همچنین شارهای حرارتی بحرانی نانوسیالات های  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{CuO}$  به ترتیب بیش از  $13\%$ ،  $12\%$  و  $51\%$  نسبت به سیال پایه آب افزایش داشته اند. زینعلی هریس<sup>[7]</sup> انتقال حرارت جوشش استخري نانوسیال  $\text{CuO}$  با پایه  $40\%$  آب -  $60\%$  اتیلن گلیکول را به صورت تجربی بررسی کرد و نشان داد که با افزایش غلظت نانوذرات، افزایش قابل توجهی در انتقال حرارت جوششی به دست می آید؛ در غلظت حجمی  $0.5\%$ ، شار حرارت بحرانی تا  $55\%$  افزایش می یابد. روشی و همکاران<sup>[8]</sup> انتقال حرارت جوشش هسته یی امسفریک نانوسیال  $\text{Al}_2\text{O}_3$  با پایه  $50\%$  آب -  $50\%$  اتیلن گلیکول را بر روی سطح استوانه یی مسی به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد، بیشینه ی افزایش، با غلظت حجمی  $0.75\%$  در ضریب انتقال حرارت جوششی،  $64\%$  است. هی و همکاران<sup>[9]</sup> انتقال حرارت جوشش استخري نانوسیال  $\text{ZnO}$  با سیال پایه هیبریدی  $5\%$  آب -  $95\%$  اتیلن گلیکول،  $15\%$  آب -  $85\%$  اتیلن گلیکول و  $25\%$  آب -  $75\%$  اتیلن گلیکول با غلظت های مختلف نانوذرات به طور تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که شار حرارتی بحرانی برای نانوسیالات در مقایسه با آب دیونیزه افزایش یافته است. همچنین هم در جوشش سیالات هیبریدی و هم نانوسیالات پایه هیبریدی، با افزایش درصد حجمی آب، شار حرارتی بحرانی افزایش یافته است.

در خصوص تغییر مورفولوژی سطح جوشش به واسطه ی رسوب نانوذرات یا ایجاد میکروکانال روی سطح و تأثیر آنها بر مشخصه های انتقال حرارت جوششی نیز تحقیقات زیادی صورت گرفته است. احمد و حامد<sup>[10]</sup> به بررسی تجربی رسوب نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  روی سطح تخت مسی و تأثیر آن روی ضریب انتقال حرارت جوششی در غلظت های مختلف پرداختند. آنها نشان دادند که میزان و یکنواختی رسوب ذرات بستگی به غلظت نانوسیال دارد. رسوب ذرات در کم ترین غلظت نانوسیال ها در سرعت های پایین اتفاق می افتد و موجب افزایش میزان انتقال حرارت می شود. کیومورا و همکاران<sup>[11]</sup> به بررسی تجربی اثر زبری یک سطح صاف مسی

و رسوب نانوذرات  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  بر روی زاویه ی تماس، تر شدن سطح و ضریب انتقال حرارت جوششی در پدیده ی جوشش استخري پرداختند. نتایج نشان داد بالاترین ضریب انتقال حرارت برای سطح با رسوب نانوذرات در غلظت های کم جرم به دست آمد. علاوه بر این، با افزایش غلظت نانو سیال، زبری سطح نیز افزایش می یابد و غلظت های بالاتر نانوسیال، زاویه ی تماس آب روی سطح پوشش را کاهش می دهد. نتو و همکاران<sup>[12]</sup> با اضافه کردن نانو ذرات  $\text{CNT}$  و  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  به آب مقطر به طور جداگانه و با غلظت های حجمی  $0.2\%$  و  $0.1\%$  به بررسی اثر رسوب نانوذرات بر روی مشخصه های انتقال حرارت پرداختند. نتایج نشان داد با افزودن نانوذرات به سیال پایه، شار حرارتی بحرانی افزایش می یابد. همچنین با رسوب نانوذرات روی سطح و ایجاد یک لایه ی متخلخل، با افزایش ترشوندگی سطح به واسطه ی رسوب نانوذرات، شار حرارتی بحرانی برای همه ی سطوح رسوب یافته، بین  $26\%$  تا  $37\%$  افزایش می یابد. محبی و خیاط<sup>[13]</sup> اثر رسوب نانوذرات هیبریدی  $70\%$   $\text{TiO}_2$  -  $30\%$   $\text{MW CNT}$  در سیال پایه آب را در غلظت های مختلف، روی سطوح جوشش مسی میکروکانال شده با کانال های مستطیلی و دوزنقه یی، بر شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت در جوشش استخري به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد در جوشش نانو سیالات روی هر دو سطح، با افزایش غلظت، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت افزایش یافته است. همچنین سطح با میکروکانال های دوزنقه یی عملکرد بهتری نسبت به میکروکانال های مستطیلی داشته است.

محمدی و خیاط<sup>[14]</sup> انتقال حرارت جوشش استخري آب دیونیزه روی چهار سطح زبر با جهت گیری های مختلف و یک سطح میکروکانال شده با کانال های دوزنقه یی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که عامل زبری سطح باعث به تعویق افتادن اتصال حباب ها شده و شار حرارتی بحرانی اندکی افزایش می یابد. همچنین با ایجاد یک سطح میکروکانال، می توان بدون اضافه کردن هیچ گونه ذرات اضافی به سیال پایه، شار حرارتی را تا  $131\%$  و ضریب انتقال حرارت را تا  $211\%$  افزایش داد. جایکومار و کندلیکار<sup>[15]</sup> جوشش آب دیونیزه روی سطوح مسی دارای میکروکانال با ابعاد مختلف را بررسی کردند. نتایج حاصله نشان داد که هرچه پهنای کانال اصلی افزایش یابد، هسته زایی بیشتر صورت می گیرد و باعث کاهش شار حرارتی بحرانی می شود. همچنین میکروکانال نازک تر، تأثیر بهتری روی شار حرارتی بحرانی داشت. والونج و ساتیاب هاما<sup>[16]</sup> با ایجاد میکروکانال های پله یی، مستطیلی و سهموی روی سطح دایروی از جنس مس به بررسی اثر تغییر هندسه ی میکروکانال بر مشخصه های جوشش استخري پرداختند. آن ها با بررسی قطر و فرکانس جدایی حباب به این نتیجه رسیدند که قطر جدایی حباب تحت تأثیر شار حرارتی و پروفیل میکروکانال هاست. در واقع میکروکانال های پله یی که عرض دهانه و مساحت سطح خیس شده بیشتری دارند، بهتر می توانند تغذیه ی زیر لایه ی حباب را تضمین کنند. همچنین کانال های سهموی و پله یی نسبت به کانال مستطیلی، به ترتیب  $38/6\%$  و  $169\%$  بهبود انتقال حرارت داشته اند. سوچیت کومار و همکاران<sup>[17]</sup> به طور تجربی اثر اندازه و گام سطوح میکروساختار شده با الگوی مربعی را بر عملکرد انتقال حرارت جوشش استخري در سطح استوانه مسی بررسی کردند. نتایج نشان داد بالاترین ضریب انتقال حرارت جوششی مربوط به الگوی آب گریز مربعی با ضلع  $2$  میلی متر است. ژو و همکاران<sup>[18]</sup> به بررسی تجربی رفتارهای حباب و عملکرد انتقال حرارت در سطوح میکرو/نانوساختار پرداختند. نتایج نشان داد ضریب انتقال حرارت جوششی و شار حرارتی بحرانی بر روی سطح هیبرید میکرو/نانوساختار افزایش می یابد.

در تحقیق حاضر، اثر ترکیب سازوکارهای مختلف شامل ایجاد میکروساختار، استفاده از نانوسیالات با سیال پایه هیبریدی و نیز رسوب نانوذرات بر سطح میکروساختار بر مشخصه های انتقال حرارت جوشش استخري به صورت تجربی مطالعه شده



شکل ۱. دستگاه آزمایش جوشش استخری و نمای درپوش.



شکل ۲. کارتریج کامل شامل بلوک برنجی و کلاهک به همراه گرم‌کن‌های فشنگی ۳۵۰ وات.

فشنگی است. گرم‌کن‌های فشنگی مورد استفاده در این دستگاه از سیم نیکل - کروم فتری که درون المنت حرارتی همراه با عایق نسوز است، ساخته شده است. در این آزمایشات از ۵ گرم‌کن هر کدام با قدرت ۳۵۰ وات استفاده شده است. در شکل ۲، کارتریج کامل شامل بلوک برنجی و کلاهک به همراه گرم‌کن‌های فشنگی نشان داده شده است. برای جلوگیری از اتلاف حرارت، در مکان‌های قرارگیری گرم‌کن‌ها در کارتریج و سوراخ‌های تعبیه شده برای قرارگیری ترموکوپل‌ها، از خمیر سیلیکون استفاده شده است. علاوه بر آن، برای آب‌بندی در قطعات بزرگ و اتصالات مانند پیرکس و فولاد زیرین آن و نیز در فاصله‌ی بین کارتریج و عایق حرارتی تفلون، از چسب‌های سیلیکونی با مقاومت حرارتی  $300^{\circ}\text{C}$  استفاده شده است.

عایق حرارتی تفلون نسوز (PTFE) یکی از بخش‌های بسیار مهم دستگاه است که به صورت یک قرص با قطر ۱۴ سانتی‌متر و ضخامت ۳ سانتی‌متر بوده و برای عایق‌بندی حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روی جداری این قطعه، سوراخ‌هایی با قطر ۳ میلی‌متر برای عبور ترموکوپل‌ها و در راستای محل قرارگیری ترموکوپل‌ها روی کارتریج، ایجاد شده که ترموکوپل‌ها از آن عبور کرده و به کارتریج متصل می‌شوند. ترموکوپل‌های مورد استفاده در این دستگاه، از نوع تیپ  $k$  فلکسی است و حساسیت این ترموکوپل‌ها، ۴۱ میکرو ولت بر درجه سانتی‌گراد بوده و محدوده‌ی دمایی  $200^{\circ}\text{C}$  تا  $1350^{\circ}\text{C}$  را پوشش می‌دهد. سه عدد ترموکوپل به کارتریج

است. آزمایشات روی سطوح جوشش برنجی دایروی صیقلی، میکرو ساختار شده و میکروساختار شده‌ی رسوب‌یافته توسط نانوذرات، در حضور آب دیونیزه‌ی خالص،  $70\%$  آب -  $30\%$  اتیلن‌گلیکول،  $50\%$  آب -  $50\%$  اتیلن‌گلیکول،  $30\%$  آب -  $70\%$  اتیلن‌گلیکول که با نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCVT - OH) با سیالات پایه فوق‌الذکر در دو غلظت حجمی  $0.25\%$  و  $0.1\%$  ترکیب شده‌اند. در واقع نوآوری تحقیق حاضر، بررسی اثر رسوب نانوذرات روی میکروساختاری با طرح خاص است. لازم به ذکر است حالت پایا در آزمایشات، زمانی حاصل شده که دمای خوانده شده توسط ترموکوپل‌ها، در یک بازه زمانی  $10^{\circ}$  دقیقه‌ای، تغییراتی کم‌تر از  $2^{\circ}\text{C}$  را نشان دهند. همچنین همه آزمایشات جوشش استخری در شرایط فشار محیطی ۸۶ kPa، دمای  $30^{\circ}\text{C}$  و دمای جوشش آب  $92/5^{\circ}\text{C}$  انجام گرفته‌اند.

## ۲. نحوه‌ی انجام آزمایشات

### ۲.۱. دستگاه آزمایش جوشش استخری

دستگاه جوشش استخری مورد استفاده در این تحقیق، شامل بخش سازه و پایه‌های نگهدارنده و محفظه‌ی آزمایش است (شکل ۱) که بخش‌های داده‌پردازی، نورپردازی، انتقال قدرت و حرارت در قسمت بالا و زیر محفظه آزمایش تعبیه شده‌اند. محفظه‌ی آزمایش یک پیرکس دارای قطر، ارتفاع و ضخامت به ترتیب  $300$ ،  $200$  و  $5$  میلی‌متر است. همچنین برای جلوگیری از اتلاف حرارت، بخش بیرونی پیرکس، با یک لایه پشم شیشه، دو لایه پلاستیک عایق حرارتی و یک لایه چسب آلومینیومی عایق تشعشع، پوشانده شده است. روی پیرکس، یک درپوش تعبیه شده که از جنس شیشه‌ی نشکن با ابعاد  $300 \times 300$  میلی‌متر مربع است و روی آن، گیج فشار از جنس استیل و شیر اطمینان وجود دارد. همچنین برای عبور لوله‌ی مخزن آب خنک‌کن، پیش‌گرم‌کن آب و ترموکوپل، حفره‌هایی روی درپوش مخزن ایجاد شده است.

از گیج فشار برای نمایش فشار درون مخزن استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که همه‌ی آزمایشات در فشار اتمسفر صورت گرفته‌اند. این گیج محدوده‌ی فشار بین صفر تا  $12$  اتمسفر را نمایش می‌دهد. همچنین برای جلوگیری از لرزش عقربه‌ی آن، محفظه‌ی گیج از روغن گلیسرین پر شده است. از بخش بالایی مخزن و از طریق منافذ موجود بر روی درپوش مخزن، پیش‌گرم‌کن میله‌ی M شکل با توان  $500$  وات، وارد مخزن شده و درون سیال قرار می‌گیرد تا سیال عامل را تا دمای اشباع آن در فشار ۱ اتمسفر گرم کند. در بخش زیرین دستگاه، کندانسور با لوله‌های مارپیچ از جنس برنج با قطر  $10$  و طول  $15$  سانتی‌متر قرار گرفته، که قطر داخلی حلقه‌ها ۸ سانتی‌متر است. این لوله‌ی مارپیچ برای خنک‌سازی و میعان بخار آب داخل مخزن به کار می‌رود تا سطح سیال همواره در یک ارتفاع معین بماند و از ایجاد خطا جلوگیری شود.

کارتریج مورد استفاده در این دستگاه شامل بلوک و کلاهک از جنس برنج یا اصطلاحاً برنج  $280$  (آلیاژ  $60\%$  مس -  $40\%$  روی) است با چگالی  $8/73 \text{ gr/cm}^3$ ، نقطه‌ی ذوب  $900^{\circ}\text{C}$  تا  $940^{\circ}\text{C}$ ، ضریب انبساط حرارتی  $19 \mu\text{m/m.K}$  و ضریب هدایت حرارتی  $125 \text{ W/m.K}$  که به شکل یک استوانه با دو سطح مقطع با ابعاد مختلف است. ارتفاع کل کارتریج  $125$  میلی‌متر و قطر بخش بالایی و پایینی به ترتیب  $25$  و  $100$  میلی‌متر است. از سطح مقطع بالایی به عنوان سطح جوشش استفاده می‌شود و روی بخش بالایی که کلاهک دارد، سه سوراخ با قطر  $2$  و فاصله  $7$  میلی‌متر از یکدیگر، برای تعبیه ترموکوپل‌ها ایجاد شده است. در بخش زیرین کارتریج، ۵ سوراخ با قطر  $10$  و عمق  $80$  میلی‌متر ایجاد شده، که محل قرارگیری گرم‌کن‌های

جدول ۱. مشخصات نانوذره.

نوع نانوذره	MW CNT – OH
رنگ	سیاه
ابعاد (nm)	قطر خارجی ۲۰-۳۰ قطر داخلی ۵-۱۰ طول: ۱۰-۳۰
چگالی (gr/cm <sup>۳</sup> )	۲۱
ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	۳۰۰۰



الف) سطح برنجی صیقلی؛ ب) سطح برنجی میکرو ساختار شده.

شکل ۳. سطوح جوش.

متصل می‌شود و یک عدد ترموکوپل درون مخزن حاوی سیال قرار می‌گیرد تا دمای آب را اندازه‌گیری کند. برای پر کردن فاصله‌ی مابین سطح پایینی کارتريج برنجی تا سطح زیرین عایق حرارتی تفلون یک ورقی به ضخامت ۶ میلی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر از جنس سنگ میکا که به‌عنوان ماده‌ی نسوز و عایق الکتریکی با ضریب هدایت حرارتی (۵۷/۰ - ۶۳/۰ W/m.K) به کار می‌رود، تعبیه شده است. با توجه به این که باید انتقال حرارت در طول کارتريج به‌صورت یک‌بعدی باشد، لازم است اطراف کارتريج به خوبی عایق‌بندی شود تا از اتلاف حرارت جلوگیری شود. بنابراین ابتدا اطراف کارتريج توسط پشم شیشه با ضریب هدایت حرارتی W/m.K ۴/۰ و تحمل دمایی ۷۵۰°C پوشانده شده است. سپس یک لایه عایق حرارتی تفلون با ضخامت ۵ میلی‌متر روی پشم شیشه بسته شده و بعد یک لایه‌ی دیگر پشم شیشه روی عایق حرارتی تفلون پوشیده می‌شود و در آخر، یک عایق الاستومری روی کل مجموعه قرار گرفته و محکم بسته می‌شود. همه آزمایشات جوشش استخری روی سطوح برنجی دایروی شکل با قطر ۲۵ میلی‌متر انجام گرفته است. این سطوح برنجی، به‌صورت یک سطح صیقلی و یک سطح میکروساختار شده‌اند که براساس طرح گودا<sup>[۱۹]</sup> ایجاد شده است. در طرح گودا از دو دسته میکروکانال‌های اصلی و متقاطع بهره گرفته شده است. میکروکانال‌های اصلی دارای عرض و عمق ۴۰۰ و ۴۵۰ میکرومتر و با فاصله‌ی ۲۰۰ میکرومتر از هم قرار دارند و میکروکانال‌های متقاطع نیز با همین ابعاد و با زاویه ۳۰ درجه نسبت به میکروکانال‌های اصلی بریده شده‌اند تا در نهایت الگویی منظم و تفکیک شده به‌صورت میکروساختار ایجاد شود. در شکل ۳ نمایی از سطوح جوش در تحقیق حاضر نشان داده شده است.

## ۲.۲. ساخت نانو سیال پایه هیبریدی

سیال‌های مورد استفاده برای آزمایشات جوشش استخری تحقیق حاضر، آب دیونیزه، سیالات هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول با درصدهای حجمی ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول و نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره پایه OH با سیالات پایه یاد شده‌اند. نانو سیالات با پایه‌های مختلف در دو غلظت حجمی ۲۵٪ و ۱٪ ساخته شده‌اند. همچنین از سورفکتانت سفیدرنگ سدیم دودسیل سولفات (SDS) با چگالی ۱۰/۱ gr/cm<sup>۳</sup> و وزن مولکولی ۲۸۸/۳۸ gr/mol به‌عنوان تثبیت‌کننده برای جلوگیری از تجمع نانوذرات در طولانی مدت استفاده شده است. مشخصات نانوذرات مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

برای محاسبه‌ی وزن مورد نیاز نانوذره جهت رسیدن به غلظت مورد نظر نانوسیال در یک لیتر سیال پایه آب دیونیزه یا سیالات پایه هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول با



شکل ۴. رسوب نانوذرات MW CNT – OH در سیالات پایه مختلف با غلظت‌های حجمی ۲۵٪ و ۱٪.

درصدهای ترکیبی مختلف، از رابطه‌ی ۱ استفاده شده است.

$$m = \frac{\rho_{np} V_{nf} (\varphi \times 10^{-2})}{(1 - \varphi \times 10^{-2})} \quad (1)$$

طبق رابطه‌ی ۱ جرم مورد نیاز نانوذرات و سورفکتانت برای ساخت نانوسیال در غلظت‌های حجمی متفاوت، در جدول ۲ ارائه شده است.

شکل ۴، میزان رسوب‌گذاری ذرات درون محلول‌های مختلف را با گذشت زمان نشان می‌دهد. نانو سیالات پس از گذشت یک روز، از پایداری مناسبی برخوردار می‌باشند ولی پس از گذشت ۲ روز، ته‌نشینی در نانو سیالات با سیال پایه ترکیبی آب و اتیلن گلیکول آغاز می‌شود. لازم به ذکر است تمامی آزمایشات در فاصله‌ی زمانی کمتر از ۲۴ ساعت پس از ساخت نانو سیالات انجام شده است.

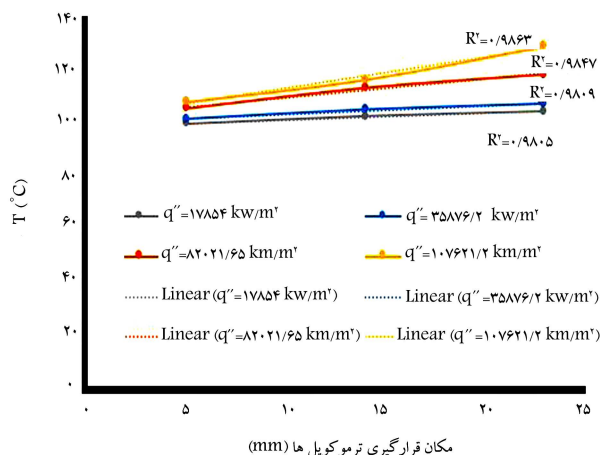
به منظور بررسی تخلخل و قطر نانوذره از تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شده است. در شکل ۵ تصاویر گرفته شده از نانولوله‌های کربنی نشان داده شده که قطر خارجی آنها در حدود ۲۰ تا ۳۰ نانومتر به دست آمده است.

## ۳.۲. نحوه‌ی انجام آزمایشات و آنالیز خطای داده‌ها

آزمایشات صورت گرفته در تحقیق حاضر، در ناحیه‌ی جوشش هسته‌یی هستند. ابتدا مخزن پیرکس توسط یک لیتر سیال کاری پر می‌شود و پیش‌گرم‌کن با توان ۵۰ وات روشن شده تا آب درون مخزن تا دمای اشباع آب (۹۲/۵°C) در فشار (۸۶ kPa)

جدول ۲. جرم مورد نیاز نانو ذرات و سورفکتانت در نانو سیالات با سیالات پایه و غلظت‌های حجمی متفاوت.

سیال پایه	درصد حجمی نانو سیال	جرم CNT - OH (gr)	جرم SDS (gr)
آب دیونیزه یا ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتانین گلیکول یا ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتانین گلیکول یا ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتانین گلیکول	۲۵٪ / ۱٪	۵۴۵۱ / ۱۲	۲۵۲۵ / ۱



شکل ۷. تغییرات خطی دمای ترموکوپل‌ها برحسب مکان قرارگیری.

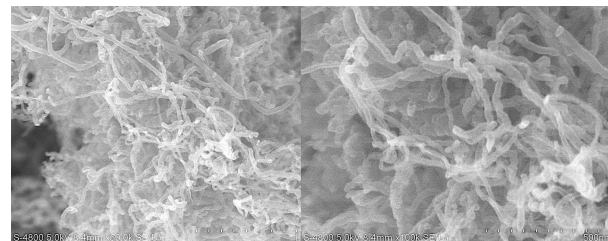
را از رابطه‌ی ۲ پیش‌بینی کرد. با توجه به شکل ۶، فاصله‌ی مرکز ترموکوپل ۱ تا مرکز معادل ۵ میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز ترموکوپل ۲ و ۳ از یکدیگر ۹ میلی‌متر است. پس با مشخص بودن دماهای  $T_1$ ،  $T_2$  و  $T_3$ ، معادله‌ی خطی ساخته می‌شود که با استفاده از عرض از مبدأ و شیب این خط، دمای  $T_s$  تخمین زده می‌شود.

$$q''_{3-2} = q''_{1-s} \rightarrow T_s = \frac{5}{9}(T_2 - T_3) + T_1 \quad (2)$$

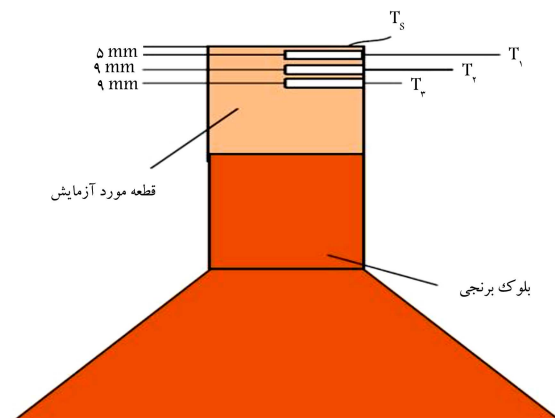
ضریب انتقال حرارت جوششی نیز مطابق رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید.

$$h = \frac{q''}{T_s - T_{sat}} \quad (3)$$

به‌منظور تأیید عایق‌بندی مناسب کارتریج برای اطمینان از فرض انتقال حرارت یک‌بعدی، در چهار شار حرارتی مختلف، تغییرات دمای سه ترموکوپل برحسب موقعیت قرارگیری آن‌ها روی کارتریج، در شکل ۷ نشان داده شده و با روش حداقل مربعات، میزان انحراف بیشتر از ۰/۹۷٪ محاسبه شده است؛ هر قدر میزان آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی ناچیز بودن اتلاف حرارت در طول آزمایشات است. بنابراین نحوه‌ی عایق‌بندی و نیز فرض یک‌بعدی بودن انتقال حرارت صحیح است. در پژوهش‌ها و مطالعات آزمایشگاهی، همواره خطای ناشی از شرایط محیط آزمایشگاه و دستگاه‌های اندازه‌گیری باعث اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر واقعی می‌شود. این خطاها می‌تواند ناشی از مواردی مانند ثابت در نظر گرفتن ضریب هدایت حرارتی برای محاسبه‌ی دمای سطح، خواندن دمای ترموکوپل‌ها، تئوری‌های هندسی در ایجاد میکروساختار، ثابت در نظر گرفتن فشار محیطی مؤثر بر سیال درون مخزن و درصد حجمی نانوسیال‌ها ایجاد شود. مطابق نظریه‌ی بخش خطاها به روش سری تیلور،<sup>[۲۰]</sup> برای محاسبه‌ی عدم قطعیت نتایج حاصل از اندازه‌گیری چندمتغیره با درصد اطمینان بالای ۰/۹۵٪، عدم قطعیت شار حرارتی،



شکل ۵. تصاویر SEM نانولوله‌های کربنی.



شکل ۶. شماتیک قرارگیری ترموکوپل‌ها داخل کارتریج برنجی.

گرم شود. سپس به مدت ۱۵ دقیقه در این دما می‌جوشد تا سیال درون مخزن گاز زدایی شود. پس از آن گرم‌کن‌های اصلی روشن شده تا شار حرارتی به سطح و سیال اعمال شود. همچنین دمای سیال درون مخزن همواره در دمای اشباع نگه داشته می‌شود. دماهای سه ترموکوپل متصل به کارتریج و نیز دمای سیال درون مخزن با استفاده از ترموستات ۴ TM به‌صورت ثانیه‌ی در رایانه ثبت می‌شود. در طول آزمون بعد از هر بار رسیدن به شرایط پایا (تغییر دمای ترموکوپل‌ها کم‌تر از ۰/۲°C در هر ۱۰ دقیقه)، ولتاژ منبع تغذیه به‌صورت پله‌های ۱۰ ولتی تا رسیدن به شار حرارتی بحرانی، افزایش می‌یابد. مشخصه‌ی رسیدن به این نقطه، افزایش تراکم فشار روی سطح جوشش و افزایش ناگهانی دمای ترموکوپل نزدیک سطح است که به علت عدم تماس سیال خنک با سطح جوشش و خشک شدن سطح، پرش دمای ناگهانی رخ می‌دهد. با عایق‌کاری مناسب اطراف کارتریج برنجی، می‌توان از انتقال حرارت شعاعی به محیط صرف نظر کرد و انتقال حرارت را به‌صورت یک‌بعدی در نظر گرفت. شماتیک قرارگیری ترموکوپل‌ها داخل کارتریج در شکل ۶ نشان داده شده است.

با توجه به این که شار حرارتی توسط گرم‌کن‌های فشنگی زیر کارتریج ایجاد می‌شود، به‌ازای هر شار ثابت می‌توان با استفاده از قانون فوریه و در نظر گرفتن ضریب ثابت هدایت حرارتی میانگین ۱۳۱/۳۳ W/m.K برای برنج، دمای سطح



جدول ۳. محاسبه‌ی عدم قطعیت داده‌های آزمایش.

پارامتر	عدم قطعیت
جریان (I)	$\pm 1^\circ\%$
ولتاژ (V)	$\pm 1^\circ\%$
دمای ترموکوپل‌ها (K)	$\pm 1^\circ\%$
تولرانس ایجاد میکروکانال	تا $15^\circ\%$

اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره و ضریب انتقال حرارت از روابط ۴ تا ۶ به دست می‌آید.

$$q'' = f(K, \Delta T, \Delta Z)$$

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_r - T_i}}{T_r - T_i}\right)^2 + \left(\frac{U_{Z_r - Z_i}}{Z_r - Z_i}\right)^2 + \left(\frac{U_K}{K}\right)^2} \quad (4)$$

$$T_s = f(Z_i, q'', K)$$

$$\frac{U_{\Delta T_s}}{\Delta T_s} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_i - T_{sat}}}{T_i - T_{sat}}\right)^2 + \left(\frac{U_{Z_i}}{Z_i}\right)^2 + \left(\frac{U_K}{K}\right)^2} \quad (5)$$

$$h = f(q'', \Delta T)$$

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_{q''}}{q''}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T_s}}{\Delta T_s}\right)^2} \quad (6)$$

مقادیر عدم قطعیت داده‌های جریان، ولتاژ، دمای ترموکوپل‌ها و سوراخ‌های محل قرارگیری آن‌ها در جدول ۳، ذکر شده است. همچنین عدم قطعیت مساحت سطح کارتریج  $1^\circ\% / 0.1^\circ\%$  است.

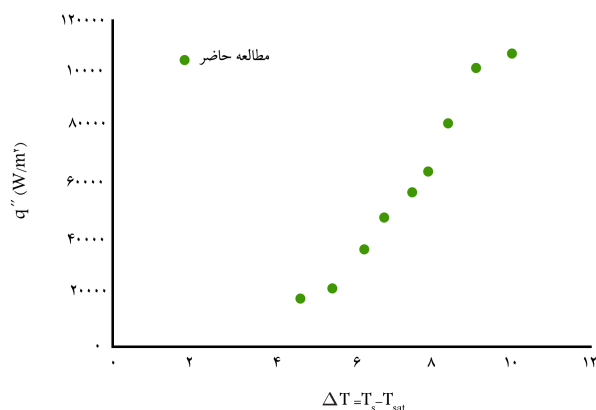
### ۳. نتایج

#### ۳.۱. جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح صیقلی برنجی

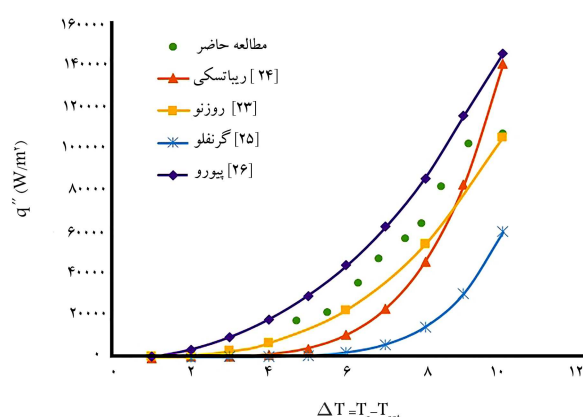
ابتدا آزمایش جوشش آب دیونیزه شده روی سطح دایروی صیقلی از جنس برنج و با قطر ۲/۵ سانتی‌متر انجام شده است. در شکل ۸ تغییرات شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره نشان داده شده است. از آنجا که شیب این منحنی نشان‌گر ضریب انتقال حرارت جوششی است، این ضریب در انتهای منحنی نزدیک به شار حرارتی بحرانی، کاهش می‌یابد که علت آن را می‌توان تولید حباب‌های بزرگ عایق‌کننده‌ی حرارتی روی سطح در شارهای حرارتی بالا دانست. طبق این شکل فرایند هسته‌زایی در اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره  $4/7^\circ\text{C}$  آغاز شده است. در این حالت شار حرارتی بحرانی  $107621/21 \text{ W/m}^2$  و بیشترین ضریب انتقال حرارت  $11244/15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  در اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره  $10^\circ\text{C}$  به دست آمده است. برای بررسی صحت داده‌های به دست آمده، نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر محققان و روابط تجربی دارای اعتبار مقایسه شده است. بر اساس رابطه‌ی تجربی زور<sup>[۲۱]</sup>، شار حرارتی بحرانی به‌ازای  $0/15^\circ\text{C}$  ضریب اصلاح سطح پیشنهاد داده شده توسط پیورو<sup>[۲۲]</sup> در فرایند جوشش از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید.

$$q''_{\max} = C_{sf} h_{fg} \rho_g^{0.5} [\sigma g (\rho_f - \rho_g)]^{1/4} \quad (7)$$

با جایگذاری خواص آب یون‌زدایی شده‌ی خالص در رابطه‌ی ۷، مقدار شار حرارتی بحرانی  $116/3 \text{ kW/m}^2$  به دست می‌آید که میزان خطا در مقایسه با شار حرارتی بحرانی آب دیونیزه خالص روی سطح صیقلی برنجی در تحقیق حاضر که



شکل ۸. نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای سطح صیقلی برنجی در حضور آب دیونیزه.

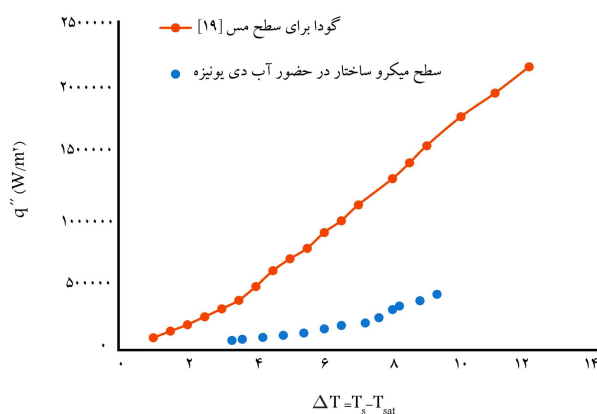


شکل ۹. نمودار مقایسه‌ی شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای سطح صیقلی برنجی در حضور آب دیونیزه.

مقدار آن  $107/6 \text{ kW/m}^2$  است،  $6/1^\circ\text{C}$  است. همچنین بر اساس رابطه تجربی روزنو<sup>[۲۳]</sup>، شار حرارتی بحرانی در فرایند جوشش با در نظر گرفتن  $0/15^\circ\text{C}$  و  $n = 0/81$  از رابطه ۸ به دست می‌آید.

$$q''_{\max} = \mu_f h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_f - \rho_g)}{\sigma} \right]^{0.5} \left( \frac{c_{pf} \Delta T_{sat}}{C_{sf} h_{fg} \text{Pr}_f^n} \right)^3 \quad (8)$$

با جایگذاری خواص آب دیونیزه خالص در رابطه‌ی ۸، مقدار شار حرارتی بحرانی  $105/3 \text{ kW/m}^2$  به دست می‌آید که میزان خطا در مقایسه با شار حرارتی بحرانی آب یون‌زدایی شده خالص در تحقیق حاضر، معادل  $2/1^\circ\text{C}$  است. در شکل ۹، نمودار جوشش تحقیق حاضر با برخی رابطه‌های تجربی ارائه شده توسط محققان دیگری چون روزنو<sup>[۲۳]</sup>، ریباتسکی<sup>[۲۴]</sup>، گرنفلو<sup>[۲۵]</sup>، پیورو<sup>[۲۶]</sup> مقایسه شده است که به جز رابطه‌ی گرنفلو با دیگر روابط تجربی تطابق خوبی بین داده‌ها برقرار است. برای بررسی دقت داده‌های اندازه‌گیری شده، آزمون تکرارپذیری برای کلیه‌ی آزمون‌های تحقیق حاضر در دو روز مختلف انجام شده که به‌عنوان نمونه، نمودار تکرارپذیری جوشش آب دیونیزه روی سطح صاف و صیقلی برنجی در شکل ۱۰ نشان داده شده است؛ میزان خطا در شار حرارتی بحرانی  $4^\circ\%$  بوده که نشان از دقت داده‌های اندازه‌گیری شده دارد.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نمودارهای شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای سطوح مربعی مسی گودا [۱۹] و دایروی برنجی تحقیق حاضر با طرح میکروساختار یکسان در حضور آب دیونیزه‌ی خالص.

جدول ۴. بیشترین درصد عدم قطعیت مشخصه‌های انتقال حرارت در جوشش آب دیونیزه روی سطوح صیقلی و میکروساختار شده برنجی.

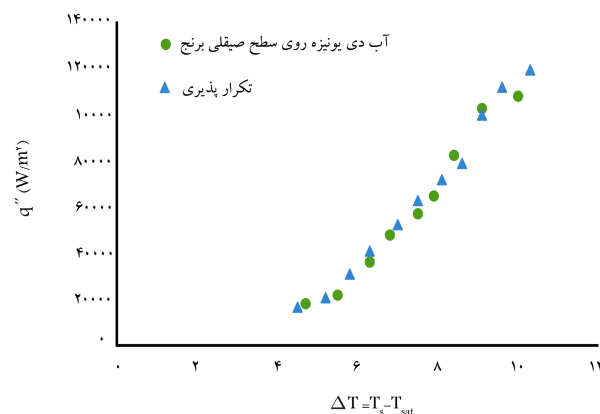
→ نوع سطح	صیقلی برنجی	میکروساختار برنجی
عدم قطعیت شار حرارتی	۳/۵۲٪	۷/۹٪
عدم قطعیت اختلاف دمای سوپر هیت دیواره	۴/۱۲٪	۶/۶۳٪
عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت جوششی	۵/۰۲٪	۱۰/۰۲٪

شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای سطوح مربعی مسی گودا [۱۹] و دایروی برنجی تحقیق حاضر با طرح میکروساختار یکسان در حضور آب دیونیزه‌ی خالص مقایسه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، برای طرح میکروساختار یکسان، با توجه به تفاوت خواص مس و برنج به‌خصوص تفاوت در ضریب انتقال حرارت هدایتی که مس حدود ۳ برابر بیشتر از برنج است، شار حرارتی بحرانی آب یونزدایی شده‌ی خالص روی سطح برنجی کم‌تر از سطح مسی است و کلاً در اختلاف دماهای فوق‌گرم دیواره‌ی یکسان، شار حرارتی سطح برنجی پایین‌تر است.

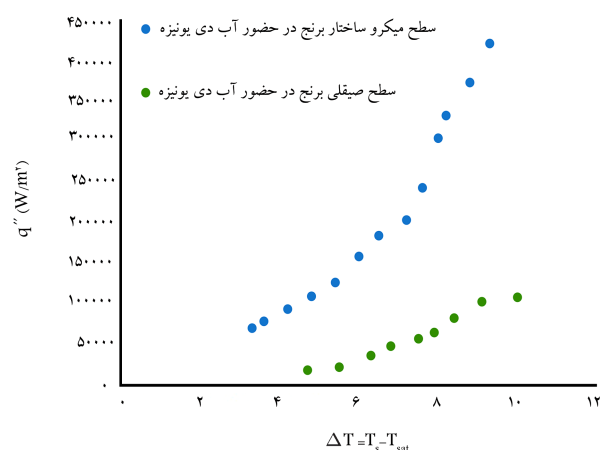
طبق روابط ۴ تا ۶، بیشترین درصد عدم قطعیت پارامترهای شار حرارتی، اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره و ضریب انتقال حرارت جوششی برای جوشش آب دیونیزه روی سطوح صیقلی و میکروساختار شده برنجی در جدول ۴ گزارش شده است. اختلاف داده‌های عدم قطعیت بین حالت صیقلی و میکروساختار معرف تفاوت در مقادیر شار حرارتی است که در حالت میکروساختار در اختلاف دمای کمتر و با شار حرارتی بیشتر نسبت به حالت صیقلی به شار حرارت بحرانی می‌رسد.

### ۳.۳. جوشش سیال هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول روی سطح صیقلی برنجی

با هدف بررسی حضور ترکیب آب و اتیلن‌گلیکول به عنوان سیال پایه جوشش و همچنین اثر تغییر درصد حجمی محلول، آزمایشات جوشش هسته‌ای در درصد‌های حجمی ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول انجام شده‌اند. تغییرات شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره و مقایسه‌ی آنها با نتایج آب دیونیزه‌ی خالص، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. برای



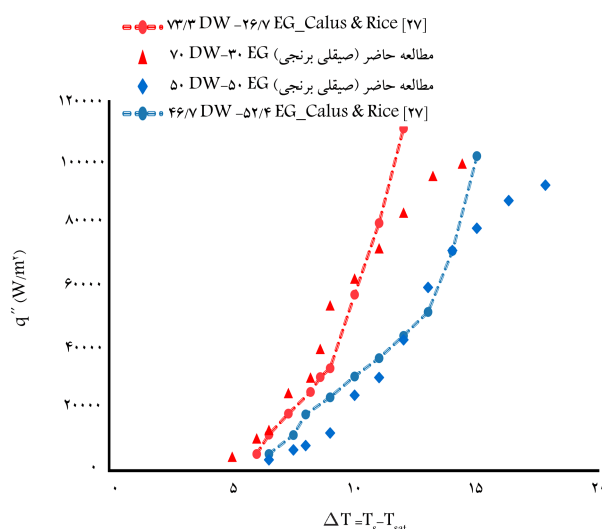
شکل ۱۰. نمودار تکرارپذیری جوشش آب دیونیزه روی سطح صیقلی برنجی.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی نمودارهای شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای سطوح صیقلی و میکروساختار برنجی در حضور آب دیونیزه.

### ۲.۳. جوشش آب دیونیزه خالص روی سطح میکروساختار برنجی

در این قسمت نتایج آزمایش جوشش استخری آب دیونیزه خالص طبق رویه‌ی آزمایش قبلی، روی سطح میکروساختار ارائه شده است. نمودار تغییرات شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای آب دیونیزه‌ی خالص در سطح میکروساختار و مقایسه‌ی آن با سطح صیقلی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این حالت شار حرارتی بحرانی  $420486/28 \text{ W/m}^2$  و بیشترین ضریب انتقال حرارت  $45213/57 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  در اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره  $9/3^\circ \text{C}$  به دست آمده است. چنان‌که در شکل مشاهده می‌کنید، سطح میکروساختار در مقایسه با سطح صاف، اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره‌ی کمتری در شار حرارتی بحرانی دارد. به این دلیل که در سطح میکروساختار، دمای قسمت بالای ساختارها به عنوان دمای دیواره محسوب می‌شود ولی در سطح صاف دمای دیواره همان دمای سطح جوشش است. کمتر بودن دمای دیواره در سطح میکروساختار نسبت به سطح صاف، موجب کمتر شدن اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره می‌شود. با افزایش دمای دیواره، جوشش آغاز می‌شود و وقتی اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره خیلی پایین باشد، انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی آزاد رخ می‌دهد. نتایج حاصله نشان می‌دهد شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوششی سطح میکروساختار نسبت به سطح صیقلی  $290/7\%$  و  $302/1\%$  افزایش یافته‌اند. همچنین در سطح میکروساختار شروع هسته‌زایی در دماهای پایین‌تری نسبت به سطح صیقلی، اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۲ نمودارهای



شکل ۱۴. نمودار مقایسه‌ی شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای طرح صیقلی برنجی تحقیق حاضر با نظریه‌ی کالوس و رایس در حضور سیالات پایه ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول.

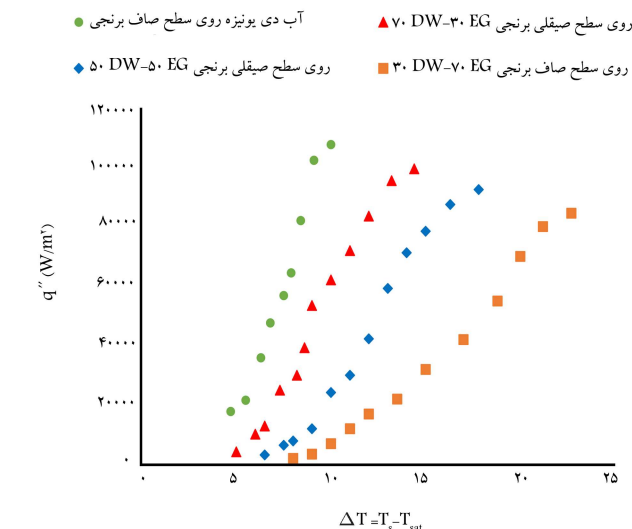
مقایسه‌ی شار حرارتی دو سیال پایه هیبریدی ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول تحقیق حاضر، با نظریه‌ی کالوس و رایس نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مطابقت خوبی بین داده‌ها برقرار است. اختلاف اندک در مقادیر شار حرارتی نزدیک به شار حرارت بحرانی نیز به علت کاربرد معادله‌ی نظری و پارامترهایی از  $\alpha$  و  $D$  است که در این مطالعه از آن استفاده نشده است.

$$\left[ \frac{NU}{K_p^{1/4}} \right] \left[ \frac{T_{sat}}{T_{sat} - w} \right]^{1/4} = E \left[ \frac{Pe}{1 + |y^* + x| \left( \frac{\alpha}{D} \right)^{1/5}} \right]^{1/4} \quad (9)$$

### ۴.۳. جوشش سیال هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول روی سطح میکروساختار برنجی

با هدف بررسی حضور ترکیب آب و اتیلن‌گلیکول به عنوان سیال پایه و همچنین اثر تغییر درصد حجمی محلول، آزمایشات جوشش هسته‌ای در درصد‌های حجمی ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول روی سطح میکروساختار انجام شده که به ترتیب شارهای حرارتی بحرانی ۴۲۴/۳، ۲۴۲۶۸/۵۳، ۳۰۰، ۲۵۱۸/۷ و ۲۵۱۸/۷ W/m<sup>2</sup> بیشترین ضرایب انتقال حرارت جوششی به ترتیب ۱۴۲۷۵/۵۶، ۲۱۴۵۸/۸۸ و ۱۴۲۷۵/۵۶ K و ۹۴۱۹/۴۷ W/m<sup>2</sup> در اختلاف دماهای فوق‌گرم دیواره به ترتیب ۱۳/۹، ۱۷/۱ و ۲۱/۵ °C به دست آمده است.

در شکل ۱۵ نمودار مقایسه‌ی تغییرات شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای سیالات فوق در دو حالت میکروساختار و سطح صیقلی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در سطح میکروساختار و سیال پایه با درصد اتیلن‌گلیکول کمتر، شروع جوشش در اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره پایین‌تر رخ می‌دهد که موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. در سطح میکروساختار با شروع جوشش هسته‌ای، پویایی حباب‌ها تا حد زیادی تحت تأثیر ساختار دیواره‌ی جانبی قرار می‌گیرد. ساختار میکروکانال موجود باعث ایجاد سایت‌های هسته‌زایی فعال حباب می‌شود. علاوه بر این، گوشه‌های تیز در سطح میکروساختار به عنوان سایت‌های هسته‌زایی فعال، باعث کاهش دمای هسته‌زایی برای هسته‌های ناهمگن می‌شود و

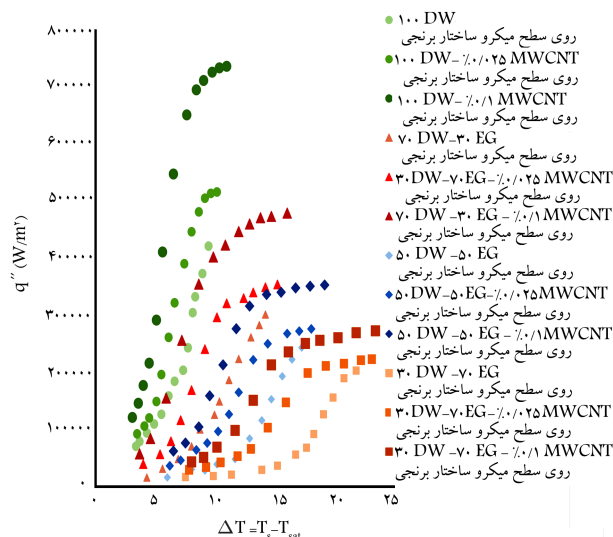


شکل ۱۳. نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای سطح صیقلی برنجی در حضور سیال هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول در درصد‌های حجمی مختلف و مقایسه آن با آب دی‌یونیزه خالص.

حالت ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول شار حرارتی بحرانی ۹۹۴۷۸/۲۶ W/m<sup>2</sup> با بیشترین ضریب انتقال حرارت ۷۲۳۳/۰۴ W/m<sup>2</sup>.K در اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره ۱۴/۴ °C، برای حالت ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول، شار حرارتی بحرانی ۹۲۴۵۱/۲۵ W/m<sup>2</sup> با بیشترین ضریب انتقال حرارت ۵۳۶۶/۰۶ W/m<sup>2</sup>.K در اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره ۱۷/۸ °C و برای حالت ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول، شار حرارتی بحرانی ۸۴۵۲۳/۶۶ W/m<sup>2</sup> با بیشترین ضریب انتقال حرارت ۳۷۲۳/۵ W/m<sup>2</sup>.K در اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره ۲۲/۷ °C به دست آمده است.

مطالعات نظری و تجربی مختلف نشان می‌دهند که در اکثر موارد، ضریب انتقال حرارت محلول کم‌تر از مقدار آن برای اجزای خالص همان محلول در شار حرارتی یکسان است. عمده‌ترین علت آن تبخیر جزء فرارتر در محلول است که موجب گرادیان معکوس غلظت و انتقال جرم معکوس می‌شود. در واقع مقداری از حرارت صرف انتقال جرم معکوس می‌شود. در انجام آزمایشات محلول آب - اتیلن‌گلیکول ابتدا سیال پایه ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، سپس سیال پایه ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و نهایتاً سیال پایه ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول از ناحیه‌ی جابه‌جایی آزاد وارد ناحیه‌ی جوشش هسته‌ای شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد در حجم ثابتی از سیال پایه، با کاهش درصد حجمی اتیلن‌گلیکول، شار حرارتی افزایش می‌یابد. افزایش انتقال حرارت تا حدی ناشی از هدایت حرارتی بهتر آب است. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش درصد حجمی اتیلن‌گلیکول در سیال پایه، دمای فوق‌گرم دیواره افزایش می‌یابد. آغاز جوشش در دمای فوق‌گرم پایین باعث بالا رفتن ضریب انتقال حرارت می‌شود. بنابراین سیال پایه ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول کم‌ترین ضریب انتقال حرارت و آب خالص بیشترین ضریب انتقال حرارت را دارد. قابل ذکر است که در همه‌ی آزمایشات و برای هر درصد حجمی از اتیلن‌گلیکول، در ناحیه‌ی جابه‌جایی طبیعی با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش چشمگیری می‌یابد در حالی که در منطقه‌ی جوشش هسته‌ای، با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت به تدریج افزایش می‌یابد. برای صحت‌سنجی، نتایج به دست آمده از آزمایشات محلول آب و اتیلن‌گلیکول تحقیق حاضر، با نظریه‌ی کالوس و رایس [۲۷] که مربوط به محلول‌های دو جزئی طبق رابطه‌ی ۹ است، مقایسه شده است. در شکل ۱۴

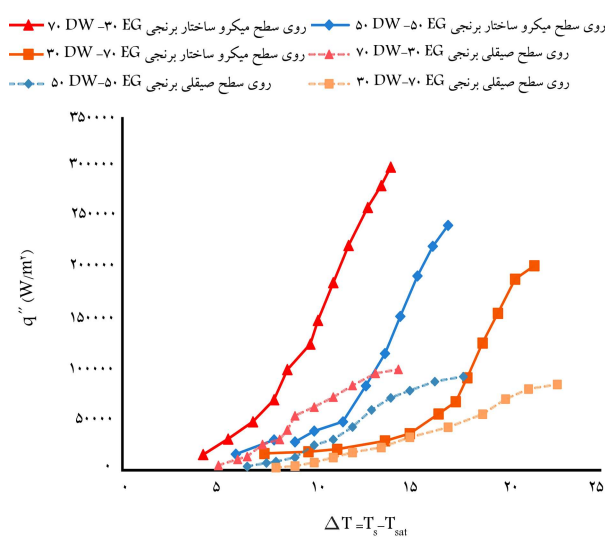




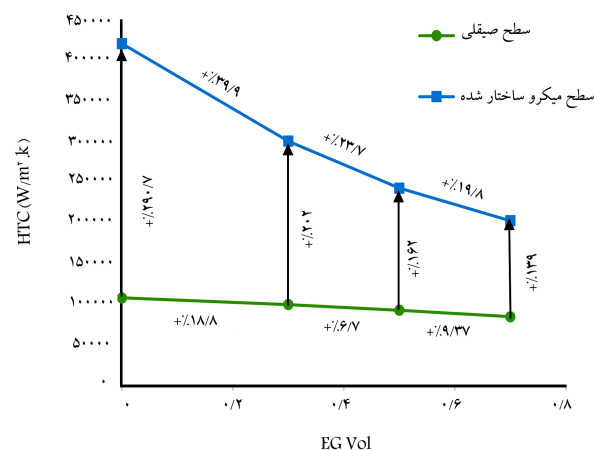
شکل ۱۷. نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای سطح میکروساختار برنجی در حضور نانو سیال با غلظت‌های حجمی مختلف با پایه آب دیونیزه و پایه هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول.

به عنوان سیال جوشش، آزمایشات جوشش هسته‌ای روی سطح میکروساختار انجام شده‌اند. در جوشش نانوسیالات OH - MW CNT با غلظت ۰/۲۵٪ با پایه آب دیونیزه، ۰/۷٪ آب - ۰/۳٪ اتیلن‌گلیکول، ۰/۵٪ آب - ۰/۵٪ اتیلن‌گلیکول و ۰/۳٪ آب - ۰/۷٪ اتیلن‌گلیکول شارهای حرارتی بحرانی به ترتیب ۵۱۵۴۲۰/۵، ۳۵۳۱۹۶/۲۶، ۲۷۴۴۵۵/۳۲ و ۲۲۲۳۵۸/۲ W/m² و بیشترین ضرایب انتقال حرارت جوششی به ترتیب ۱۷۵۵۶/۱، ۲۹۶۶۲/۹، ۵۶۰۳۳/۶ و ۱۱۳۱۹/۴ W/m².K در اختلاف دماهای فوق‌گرم دیواره به ترتیب ۱۷/۸، ۱۴/۹، ۱۰ و ۲۲/۸°C به دست آمده است. همچنین در جوشش نانوسیالات OH - MW CNT با غلظت ۰/۱٪ با پایه آب دیونیزه، ۰/۷٪ آب - ۰/۳٪ اتیلن‌گلیکول، ۰/۵٪ آب - ۰/۵٪ اتیلن‌گلیکول و ۰/۳٪ آب - ۰/۷٪ اتیلن‌گلیکول شارهای حرارتی بحرانی به ترتیب ۷۳۵۴۶۵/۸، ۴۷۸۳۳۵/۸، ۳۵۳۲۲۸/۹ و ۲۷۲۲۳۰/۱ W/m² و بیشترین ضرایب انتقال حرارت جوششی به ترتیب ۲۴۸۴۰/۳، ۴۱۶۴۶/۳، ۸۶۷۲۳/۲ و ۱۴۷۸۲/۱ W/m².K در اختلاف دماهای فوق‌گرم دیواره به ترتیب ۱۸/۹، ۱۵/۸، ۱۰ و ۲۳/۱°C به دست آمده است.

در شکل ۱۷ نمودار تغییرات شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای هر دو غلظت حجمی از نانوسیال با سیالات پایه مختلف و مقایسه‌ای آن با حالت بدون حضور نانوذرات نشان داده شده است. چنان‌که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، حضور نانوسیال حاوی MW CNT - OH در فرایند جوشش، باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت می‌شود. وجود مولکول‌های OH در ساختار نانوذره مورد استفاده در این آزمایش‌ها، یکی از مؤثرترین عوامل در افزایش شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت است. این مولکول به علت بار الکتریکی که دارد، مانع به هم چسبیدن نانولوله‌ها در سیال پایه می‌شود و نانولوله‌ها به صورت معلق در سیال پایه باقی می‌مانند. همین مسئله از پدید آمدن کلوخه‌های نانوذره در سیال پایه جلوگیری می‌کند و هر نانولوله می‌تواند آزادانه در فرایند انتقال حرارت دخیل باشد. نرخ افزایش شار حرارتی در اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره به مراتب پایین‌تر و نزدیک به شروع هسته‌زایی رخ می‌دهد ولی در دماهای نزدیک به شار حرارتی بحرانی این افزایش با شیب کم‌تری رخ می‌دهد و باعث کاهش ضریب انتقال حرارت شده که این کاهش به دلیل رسوب نانوذرات روی سطح است. همچنین



شکل ۱۵. نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره برای سطح میکروساختار برنجی در حضور سیال هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول در درصد‌های حجمی مختلف و مقایسه‌ای آن با حالت سطح صیقلی برنجی.



شکل ۱۶. تغییرات شار حرارتی بحرانی جوشش هسته‌ای سیال پایه هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول برحسب درصد حجمی اتیلن‌گلیکول روی سطوح جوشش صیقلی و میکروساختار برنجی.

در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین طبق شکل ۱۵، افزایش قابل ملاحظه‌ای در شار حرارتی بحرانی برای سطح میکروساختار نسبت به سطح صیقلی مشاهده می‌شود که این افزایش در سیال پایه‌ای که مقدار کمتری اتیلن‌گلیکول دارد، بیشتر است.

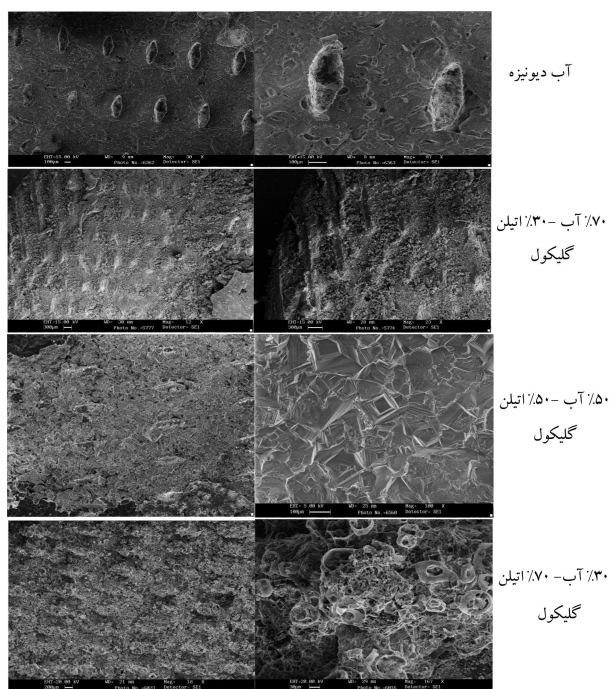
در شکل ۱۶ خلاصه نتایج کمی مربوط به شار حرارتی بحرانی جوشش هسته‌ای سیال پایه هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول برحسب درصد حجمی اتیلن‌گلیکول را روی سطوح جوشش صیقلی و میکروساختار برنجی نشان می‌دهد.

### ۵.۳. جوشش نانوسیال پایه هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول روی سطح میکروساختار برنجی

با هدف بررسی حضور نانوسیالات با سیال پایه آب دیونیزه و سیال پایه هیبریدی آب و اتیلن‌گلیکول حاوی MW CNT - OH در دو غلظت حجمی ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪



شکل ۱۸. نمای کلی از سطح میکروساختار رسوب یافته.



شکل ۱۹. تصاویر SEM گرفته شده از سطوح میکروساختار رسوب یافته برای نانوسیال MWCNT - OH با غلظت حجمی ۰/۱٪ در سیالات پایه مختلف.

در اختلاف دماهای فوق‌گرم دیواره به ترتیب ۲۲، ۲۹/۳، ۳۴/۵ و ۴۰/۱°C روی سطوح رسوب یافته آزمایشات قسمت قبل به دست آمده است. در شکل ۱۸ نمای کلی از سطح میکروساختار رسوب یافته نشان داده شده است و در شکل ۱۹ نیز تصاویر SEM گرفته شده از سطوح میکروساختار رسوب یافته، برای نانوسیال MWCNT - OH با غلظت حجمی ۰/۱٪ در سیالات پایه مختلف نشان داده شده است.

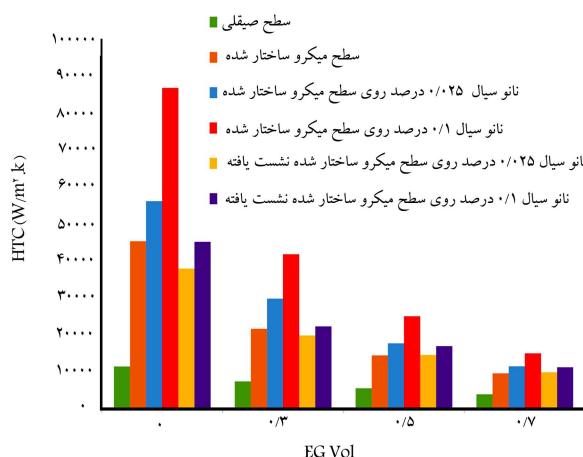
همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، میزان ذرات رسوب یافته در بین کانال‌های ایجاد شده روی سطح با افزایش غلظت اتیلن‌گلیکول در سیال پایه، افزایش می‌یابد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نمودار تغییرات شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره به ترتیب برای غلظت حجمی ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ از نانوسیال با سیالات پایه مختلف روی سطح میکروساختار رسوب یافته و مقایسه آن با حالت بدون رسوب را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در سطوح جوشش رسوب یافته توسط نانوذرات، نمودارهای جوشش نانوسیالات نسبت به حالت بدون رسوب، به سمت راست و اختلاف دماهای فوق‌گرم دیواره بیشتر حرکت کرده‌اند ولی شار حرارت بحرانی افزایش یافته است. در واقع با رسوب ذرات بر روی سطوح

افزایش غلظت نانوسیال نیز باعث بهبود عملکرد حرارتی و افزایش قابل ملاحظه‌ای در شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت می‌شود.

نتایج حاصله نشان می‌دهد برای نانوسیال با سیال پایه آب دیونیزه با غلظت‌های ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ به ترتیب ۲۲/۵۷٪ و ۷۴/۹٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی و ۲۵/۰۳٪ و ۹۱/۱۸٪ افزایش در ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به حالت بدون نانوسیال روی سطح میکروساختار شده به دست آمده است. برای نانوسیال با سیال پایه ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول با غلظت‌های ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ به ترتیب ۱۷/۵۶٪ و ۵۹/۲۲٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی و ۳۸/۲۳٪ و ۹۴/۰۷٪ افزایش در ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به حالت بدون نانوسیال روی سطح میکروساختار شده به دست آمده است. برای نانوسیال با سیال پایه ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول با غلظت‌های ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ به ترتیب ۱۳/۵٪ و ۴۵/۱۸٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی و ۲۲/۹۸٪ و ۷۴٪ افزایش در ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به حالت بدون نانوسیال روی سطح میکروساختار شده به دست آمده است و برای نانوسیال با سیال پایه ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول با غلظت‌های ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ به ترتیب ۹/۷۹٪ و ۳۴/۴۲٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی و ۲۰/۱۷٪ و ۵۶/۹۳٪ افزایش در ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به حالت بدون نانوسیال روی سطح میکروساختار شده به دست آمده است. در آزمایشات این بخش نیز وجود اتیلن‌گلیکول، به علت بالا بردن دمای جوشش باعث کاهش عملکرد حرارتی شده و این روند کاهش با افزایش درصد حجمی اتیلن‌گلیکول در سیال‌های پایه هیبریدی، بیشتر می‌شود.

### ۶.۳. جوشش نانوسیال پایه هیبریدی آب - اتیلن‌گلیکول روی سطح میکروساختار برنجی رسوب یافته

در این بخش از آزمایشات، برای بررسی اثر رسوب نانوذرات، سطوح میکروساختار رسوب‌یافته ناشی از جوشش هرکدام از نانوسیالات که شامل پایه آب خالص دیونیزه، ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول در دو غلظت حجمی نانوسیال ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ بودند، به عنوان سطح جوشش جدید در نظر گرفته می‌شود. بدین صورت که مخزن حاوی نانوسیال رسوب یافته تخلیه شده و توسط آب مقطر و استون کاملاً تمیز می‌شود تا نانوذرات درون مخزن باقی نماند. سپس همان نانوسیال با مشخصه‌ی قبلی مجدداً تهیه شده و داخل مخزن قرار داده می‌شود تا آزمون‌های جوشش استخری روی سطح رسوب یافته انجام شود. طبق مشاهدات بصری، بیشترین رسوب در تقاطع و گوشه‌های میکروکانال‌های تغذیه‌کننده اتفاق می‌افتد. جوشش نانوسیالات MWCNT - OH با غلظت ۰/۲۵٪ با پایه آب دیونیزه، ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول شارهای حرارتی بحرانی به ترتیب ۵۸۲۱۲۹/۳، ۴۲۶۲۳۱/۶، ۳۳۵۱۸۰/۳ و ۳۰۳۷۱۰/۵ W/m<sup>2</sup> و بیشترین ضرایب انتقال حرارت جوششی به ترتیب ۳۷۷۵۱/۷، ۱۹۶۴۰، ۱۴۳۸۵ و ۹۶۸۵/۶ W/m<sup>2</sup>.K در اختلاف دماهای فوق‌گرم دیواره به ترتیب ۱۶/۱، ۲۱/۹، ۲۵ و ۳۲°C روی سطوح رسوب یافته آزمایشات قسمت قبل به دست آمده است. همچنین جوشش نانوسیال MWCNT - OH با غلظت ۰/۱٪ با پایه آب دیونیزه، ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول شارهای حرارتی بحرانی به ترتیب ۸۷۵۱۰۳/۵، ۶۳۰۲۵۶/۲ و ۴۹۷۸۱۰/۳ و بیشترین ضرایب انتقال حرارت جوششی به ترتیب ۴۵۰۴۳/۲، ۲۲۱۳۰، ۱۶۷۹۱ و ۱۱۰۲۱ W/m<sup>2</sup>.K



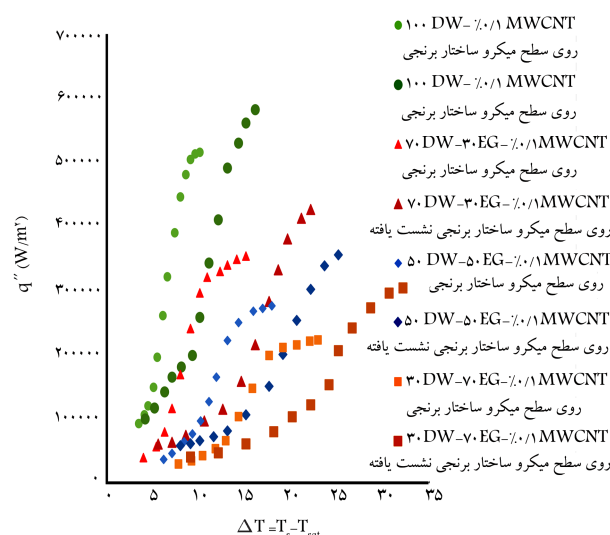
شکل ۲۲. تغییرات ضریب انتقال حرارت جوششی برحسب درصد حجمی اتیلن گلیکول برای کلیه آزمایشات انجام شده.

در حضور سطح میکروساختار شده رسوب یافته با غلظت های ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ به ترتیب ۱۲/۹٪ و ۱۸/۹۸٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی و ۳۳/۲۲٪ و ۴۸/۰۶٪ کاهش در ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به حالت بدون رسوب روی سطح میکروساختار شده به دست آمده است. برای نانوسیال با سیال پایه ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن گلیکول در حضور سطح میکروساختار شده رسوب یافته با غلظت های ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ به ترتیب ۲۰/۶۷٪ و ۳۱/۷۶٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی و ۳۳/۷۹٪ و ۴۸/۸۶٪ کاهش در ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به حالت بدون رسوب روی سطح میکروساختار شده به دست آمده است.

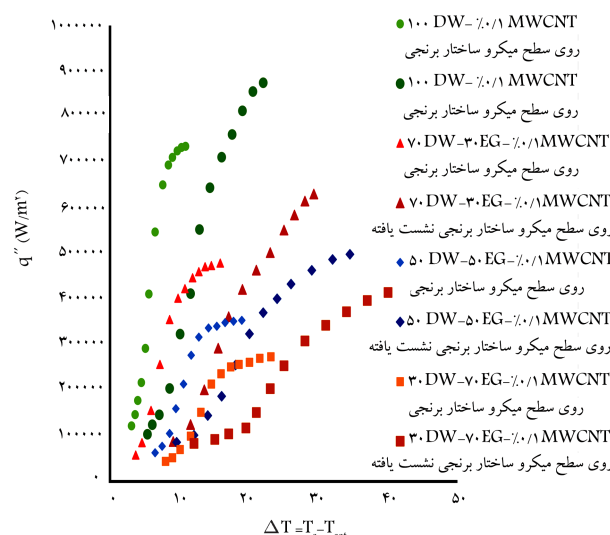
برای نانوسیال با سیال پایه ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن گلیکول در حضور سطح میکروساختار شده رسوب یافته با غلظت های ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ به ترتیب ۲۸/۹۴٪ و ۴۱/۲۹٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی و ۱۸/۰۶٪ و ۳۲/۴٪ کاهش در ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به حالت بدون رسوب روی سطح میکروساختار شده به دست آمده است و برای نانوسیال با سیال پایه ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن گلیکول در حضور سطح میکروساختار شده رسوب یافته با غلظت های ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ به ترتیب ۳۶/۵۸٪ و ۵۱/۹۸٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی و ۱۴/۳۳٪ و ۲۵/۴۴٪ کاهش در ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به حالت بدون رسوب روی سطح میکروساختار شده به دست آمده است. همچنین در شکل ۲۲ نمودار میلیه تغییرات ضریب انتقال حرارت جوششی برحسب درصد حجمی اتیلن گلیکول، برای تمامی آزمایشات انجام شده در این تحقیق نشان داده شده است.

#### ۴. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر انواع سطح که به سه صورت صیقلی، میکروساختار و میکروساختار رسوب یافته برنجی است، بر شار حرارتی بحرانی در پدیده جوشش استخری آب دیونیزه خالص، سه سیال هیبریدی آب - اتیلن گلیکول با درصد های حجمی مختلف و نانوسیالات با سیال پایه هیبریدی حاوی نانولوله های کربنی چندجداره پایه oH در دو غلظت حجمی ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. سیال پایه هیبریدی شامل ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن گلیکول، ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن گلیکول است. در ابتدا آزمایش جوشش استخری



شکل ۲۰. نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق گرم دیواره برای سطوح میکروساختار رسوب یافته و بدون رسوب برنجی در حضور نانو سیال MWCNT - OH با غلظت حجمی ۰/۲۵٪ با سیالات پایه مختلف.



شکل ۲۱. نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دمای فوق گرم دیواره برای سطوح میکروساختار رسوب یافته و بدون رسوب برنجی در حضور نانو سیال MWCNT - OH با غلظت حجمی ۰/۱٪ با سیالات پایه مختلف.

جوشش، شروع هسته زایی به دلیل مقاومت زیاد در برابر ذرات رسوب یافته در ابتدای آزمایش، در دماهای بالاتری اتفاق می افتد که باعث تأخیر در رشد حباب ها و جدا شدن آنها از سطح می شود و به دنبال آن باعث کاهش نرخ انتقال حرارت می شود. ولی پس از گذشت مدتی، حل شدن ذرات رسوب یافته در سیال، باعث افزایش چگالی سایت های هسته زایی و افزایش شار حرارتی نسبت به سطح بدون رسوب می شود. به طور کلی در آزمایشات روی سطح رسوب یافته، با توجه به مقاومت اولیه ذرات رسوب یافته و این که در اختلاف دماهای فوق گرم بالاتری رخ می دهد، نرخ انتقال حرارت به طور محسوسی کاهش می یابد. همچنین روند کاهش شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت جوششی با افزایش درصد حجمی اتیلن گلیکول در سیال های پایه هیبریدی، بیشتر می شود.

نتایج حاصله حاکی از آن است که در نانوسیال با سیال پایه آب دیونیزه

آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح صیقلی برنجی انجام شده است. برای بررسی تکرارپذیری، آزمایشات در دو نوبت و در دو روز مختلف انجام گرفته، که خطای نتایج بسیار ناچیز بود. سپس آزمایشات جوشش استخري سه سیال پایه هیبریدی ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول روی سطح صیقلی برنج انجام گرفته است. با افزایش درصد اتیلن‌گلیکول در سیالات پایه، اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره افزایش می‌یابد. آغاز جوشش در اختلاف دمای فوق‌گرم پایین‌تر باعث بالا رفتن ضریب انتقال حرارت جوششی می‌شود.

به علت کوچک بودن سطح انتقال حرارت و کمبود حفره‌ها و سایت‌های هسته‌زایی، برای مهندسی کردن سطح جوشش، یک سطح میکروساختار از ترکیب میکروکانال‌های اصلی و متقاطع مشابه که با زاویه ۳۰ درجه نسبت به هم قرار دارند، توسط ماشین‌کاری برش تخلیه الکتریکی، روی سطح دایروی برنجی ایجاد شده است. هرکدام از میکروکانال‌های اصلی و متقاطع شامل ۴۰ کانال با عرض ۴۰۰ میکرومتر، عمق ۴۵۰ میکرومتر و با فاصله ۲۰۰ میکرومتر هستند. سپس آزمایش جوشش استخري آب دیونیزه خالص و حالت‌های ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول، روی سطح میکروساختار شده برنجی انجام شده است. نتایج حاصله نشان‌گر عملکرد بهتر سطح میکروساختار نسبت به سطح صیقلی است. در واقع با ایجاد میکروساختارها روی سطح جوشش، مسیر حباب‌های داغ بالارونده و سیال سرد پایین‌رونده تفکیک شده و عملکرد خنک‌کاری سطح دچار اختلال نمی‌شود؛ سطح جوشش میکروساختار با ایجاد سطح اضافی باعث بیشتر شدن ضریب انتقال حرارت نسبت به سطح صیقلی می‌شود. همچنین در میکروساختارها به علت وجود خاصیت موینگی، سیال به درون کانال‌ها کشیده شده و باعث خنک‌کاری و تغذیه‌ی سایت‌های هسته‌زایی می‌شود و در نتیجه اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره کاهش یافته و نیز تأخیر در وقوع شار حرارتی بحرانی ایجاد می‌شود. طبق نتایج، در حجم ثابتی از سیال پایه، با کاهش درصد حجمی اتیلن‌گلیکول، شار حرارتی بحرانی افزایش می‌یابد.

با وجود بهبود ساختار سطح جوشش، اثر نانوسیالات نیز به عنوان سیال جوشش بر مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش استخري بررسی شده است. جوشش نانوسیالات MW CNT - OH با غلظت ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ با پایه آب دیونیزه، ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول صورت گرفت. طبق نتایج با افزایش غلظت نانوسیال، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت افزایش یافته است. همچنین روند کاهش شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت و افزایش اختلاف دمای فوق‌گرم دیواره با افزایش درصد حجمی اتیلن‌گلیکول همراه است.

پس از جوشش نانوسیالات تا رسیدن به شارحرارتی بحرانی، برای بررسی اثر رسوب نانوذرات روی سطح جوشش، نانوسیالات از مخزن تخلیه شده و مخزن برای خارج کردن ذرات باقی مانده تمیز شده سپس آزمایشات جوشش با همان نانوسیالات MW CNT - OH در دو غلظت حجمی ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ با پایه آب دیونیزه، ۷۰٪ آب - ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول، ۵۰٪ آب - ۵۰٪ اتیلن‌گلیکول و ۳۰٪ آب - ۷۰٪ اتیلن‌گلیکول روی سطوح رسوب‌یافته انجام گرفته است. نتایج حاکی از آن است که با رسوب نانوذرات روی سطوح جوشش، شروع هسته‌زایی به دلیل مقاومت زیاد در برابر ذرات رسوب یافته در ابتدای آزمایش، در دماهای بالاتری اتفاق می‌افتد که باعث تأخیر در رشد حباب‌ها و جدایش آنها از سطح می‌شود و به دنبال آن نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد. ولی پس از گذشت مدتی، با حل شدن ذرات

رسوب یافته در سیال، چگالی سایت‌های هسته‌زایی افزایش یافته و باعث افزایش شار حرارتی می‌شود. همچنین وجود اتیلن‌گلیکول باعث کاهش عملکرد حرارتی به علت افزایش دمای جوشش می‌شود و با افزایش درصد حجمی اتیلن‌گلیکول، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوششی کاهش می‌یابد. در واقع در تحقیق حاضر با ترکیب سازوکارهای اصلاح سطح و نیز افزایش هدایت حرارتی سیال پایه، به بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت کمک شده است.

### فهرست علائم

$h_{fg}$ : آنتالپی اشباع (kJ/kg)؛
$m$ : جرم (kg)؛
$T$ : دما (K)؛
$q''$ : شار حرارتی ( $W/m^2$ )؛
$h$ : ضریب انتقال حرارت جوششی ( $W/M^2.K$ )؛
$C$ : ضریب ثابت؛
$n$ : ضریب ثابت؛
$E$ : ضریب ثابت متناسب با جنس سطح و نوع محلول؛
$K$ : ضریب هدایت حرارتی ( $W/m.K$ )؛
$c_p$ : ظرفیت گرمایی در فشار ثابت (kJ/kg.K)؛
$Pr$ : عدد بی بعد پراشتل؛
$Pe$ : عدد بی بعد پکلت؛
$Nu$ : عدد بی بعد ناسلت؛
$U$ : عدم قطعیت؛
$D$ : قابلیت انتشار جرم؛
$x$ : کسر جرمی از جزء سبک‌تر؛
$y^*$ : کسر جرمی از جزء سبک‌تر در تعادل با فاز مایع؛
$Z$ : موقعیت ترموکوپل‌ها در کارتریج گرم‌کن (mm).

### علائم یونانی

$\rho$ : چگالی ( $kg/m^3$ )؛
$\varphi$ : درصد حجمی نانو ذرات؛
$\alpha$ : قابلیت انتشار حرارتی؛
$\sigma$ : کشش سطحی (N/m)؛
$\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی (Pa.S).

### زیرنویس‌ها

$sat$ : اشباع؛
$w$ : اشباع آب؛
$g$ : بخار؛
$f$ : جامد - مایع؛
$p$ : ذره؛
$s$ : سطح جوشش؛
$np$ : نانوذرات؛
$f$ : مایع؛
$nf$ : نانوسیال.

## منابع (References)

- Sarafraz, M.M., Kiani, T. and Hormozi, F. "Critical heat flux and pool boiling heat transfer analysis of synthesized zirconia aqueous nano-fluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **70**, pp. 75-83 (2016).
- Kamatchi, R., Venkatachalapathy, S. and Nithya, C. "Experimental investigation and mechanism of critical heat flux enhancement in pool boiling heat transfer with nanofluids", *Heat and Mass Transfer*, **52**, pp. 2357-2366 (2016).
- Sarafraz, M.M. and Hormozi, F. "Experimental investigation on the pool boiling heat transfer to aqueous multi-walled carbon nanotube nanofluids on the micro-finned surfaces", *Int. J. Therm. Sci.* **100**, pp. 255-266 (2016).
- Ciloglu, D. "An Experimental investigation of nucleate pool boiling heat transfer of nanofluids from a hemispherical surface", *Heat Transf. Eng.*, **38**, pp. 919-930 (2017).
- Wang, Y., Deng, K., Wu, J. and et al. "The characteristics and correlation of nanofluid flow boiling critical heat flux", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **122**, pp. 212-221 (2018).
- Kumar, N., Urkude, N. and Sonawane, S.S. "Experimental study on pool boiling and critical heat flux enhancement of metal oxides based nanofluid", *Energy*, **84**, pp. 219-238 (2018).
- Zeinali Heris, S. "Experimental investigation of pool boiling characteristics of low-concentrated CuO/ ethylene glycol-water nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **38**, pp. 1470-1473 (2011).
- Raveshi, M.R., Keshavarz, A., Mojarad, M.S. and et al. "Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina-water-ethylene glycol nanofluids", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **44**, pp. 805-814 (2013).
- He, Y., Li, H., Hu, Y. and et al. "Boiling heat transfer characteristics of ethylene glycol and water mixture based ZnO nanofluids in a cylindrical vessel", *Int. J. Heat and Mass Transf.*, **98**, pp. 611-615 (2016).
- Ahmed, O. and Hamed, M.S. "Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling of nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, pp. 3423-3436 (2012).
- Kiyomura, I.S., Manetti, L.L., da Cunha, A.P. and et al. "An analysis of the effects of nanoparticles deposition on characteristics of the heating surface and ON pool boiling of water", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, pp. 459-468 (2016).
- Rainho Neto, A., Oliveira, J.L.G. and Passos, J.C. "Heat transfer coefficient and critical heat flux during nucleate pool boiling of water in the presence of nanoparticles of alumina, maghemite and CNTs", *Applied Thermal Engineering*, **111**, pp. 1493-1506, (2016).
- Mohebbi, M. and Khayat, M. "Effect of dynamic parameters and fluid impurities on abrasion of centrifugal compressor impeller of the gas transmission center using experimental and analytical methods", *Modares Mechanical Engineering*, **11**, pp. 2653-2666 (In Persian) (2019).
- Mohammadi, M. and Khayat, M. "Experimental investigation of the effect of roughness orientation of surface on motion of bubbles and critical heat flux", *Modares Mechanical Engineering*, **99**(9), pp. 9-99 (In Persian) (2017).
- Jaikumar, A. and Kandlikar, S. "Ultra-high pool boiling performance and effect of channel width with selectively coated open microchannels", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **95**, pp. 795-805 (2016).
- Walunj, A. and Sathyabhama, A. "Comparative study of pool boiling heat transfer from various microchannel geometries", *Applied Thermal Engineering*, **128**, pp. 672-683 (2017).
- Sujith Kumar, C.S., Yao, W.C., Mario, R.M. and et al. "Experimental investigation on the effect of size and pitch of hydrophobic square patterns on the pool boiling heat transfer performance of cylindrical copper surface", *Inventions*, **12**, pp. 241-256 (2018).
- Zhou, J., Liu, B., Qi, B. and et al. "Experimental investigations of bubble behaviors and heat transfer performance on micro/ nanostructure surfaces", *International Journal of Thermal Sciences*, **135**, pp. 133-147 (2019).
- Gouda, R.K., Pathak, M. and Kaleem Khan, M. "Pool boiling heat transfer enhancement with segmented finned microchannels structured surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **127**, pp. 39-50 (2018).
- Taylor, J.R., *An Introduction to Error Analysis, University Science Books*, Sausalito, California (1997).
- Zuber, N., Tribus, M. and Westwater, J.W. "The hydrodynamic crisis in pool boiling of saturated and subcooled liquids, in: international developments in heat transfer", *Proceedings of the Int. Heat Transfer Conference*, Boulder, USA, pp. 230-236 (1961).
- Pior, I. "Boiling heat transfer characteristics of thin liquid layers in a horizontally flat two-phase thermosyphon", *Preprints of the 10th International Heat Pipe Conference*, Stuttgart, Germany, Paper H1-5, September (1997).
- Rohsenow, W. "A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling Liquids", *W. M., Trans. ASME*, **74**, pp.969-976 (1952).
- Ribastky, G. and Saiz Jabardo, J.M. "Experimental study of nucleate boiling of refrigerants on cylindrical surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**, pp. 4439-4451 (2003).
- Taboas, F. and Gorenflo, R. "Pool boiling of ammonia/water and its pure component comparison data in literature with predictions of standard correlation", *International Journal of Refrigeration*, **30**, pp. 778-788 (2007).
- Pioro, I., Rohsenow, W. and Doerffer, S.S. "Nucleate pool-boiling heat transfer. II: assessment of prediction methods", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, pp. 5045-5057 (2004).
- Calus, Rice, W.F. "Pool boiling-binary liquid mixtures", *Chemical Engineering Science*, **27**, pp. 1687-1697 (1972).