

جوشش استخري نانوسيال آب - SiO₂ و بررسی

مشخصات جوشش و زبری سطح

فائزه رستمیان^۱، نسرین اعتصامی^{۲*}، محسن نصر اصفهانی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۲۳

پیام‌نگار: netesami@cc.iut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش رفتار جوشش استخري نانوسيال آب/ سيلیکا روی سطوحی با زبری‌های مختلف ناشی از پوشش دادن نانوذرات، بررسی شده است. آزمایش‌ها روی سطح مسی با صفحه تخت دایره‌ای شکل انجام شده‌اند. به منظور بررسی اثر غلظت نانوسيال بر شار گرمایی بحرانی و ضریب انتقال حرارت، سه غلظت ۰/۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱ درصد حجمی تهیه، و به ترتیب، ۵۲، ۶۷ و ۸۷ درصد افزایش در شار حرارت بحرانی و ۱۱۴، ۱۴۲ و ۷۴ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت مشاهده شد. سپس برای بررسی تغییرات زبری سطح در طول زمان، جوشش مکرر آب بر سطح پوشش داده شده با نانوذرات در دو بازه زمانی ۱۲ دقیقه و بازه شار بحرانی انجام و مشاهده شد که در خلال جوشش‌های متوالی آب بدون یون، زبری سطح در هر دو بازه ثابت می‌ماند. با جوشش آب بدون یون روی سطح پوشش داده شده در این دو بازه، نیز مشخص شد که ضریب انتقال حرارت و شار گرمایی بحرانی نسبت به سطح صیقلی افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: جوشش استخري، نانوسيال، شار گرمایی بحرانی، جوشش هسته‌ای، ضریب انتقال گرما، زبری سطح، بازه‌های زمانی جوشش.

۱. مقدمه

به‌شمار می‌آید. برای تأمین انرژی در آینده، بازده تبدیل انرژی باید افزایش یابد. انواع تجهیزات انرژی پیشرفته، سیستم‌های الکترونیکی و راکتورهای هسته‌ای برای دریافت بهتر انرژی ورودی و جلوگیری از هدر رفت گرما، به منظور دستیابی به بار انرژی بالاتر و بازده بیشتر، به سازوکارهای انتقال گرمایی پر بازده وابسته‌اند. آهنگ بالاتر سرمایه‌گذاری می‌تواند به افزایش بازده سامانه تبدیل انرژی، فراهم

جوشش هسته‌ای یکی از مؤثرترین سازوکارهای انتقال گرما شناخته شده است. در بسیاری از تجهیزات انتقال گرما که به آهنگ بسیار بالای انتقال گرما نیاز است، جوشش هسته‌ای سازوکار به‌کار رفته

* اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی

تأثير تعدادی از این عوامل بر مشخصات جوشش نانوسيال به طور خلاصه درج شده است.

پژوهشگران ایرانی نیز در زمینه جوشش نانوسيالات کارهای زیادی انجام داده‌اند. نتایج جوشش استخري نانوسيال آب/ آلومينا که توسط شاهرادی و همکاران [۱۲] روی گرمکن صفحه مسی دایره‌ای شکل انجام شد، حاکی از این بود که با افزایش غلظت نانوذرات (در محدوده کمتر از ۰/۱ درصد حجمی) ضریب انتقال گرما کاهش می‌یابد. برای غلظت‌های بالاتر از ۰/۰۰۱ درصد حجمی، ضریب انتقال گرما نسبت به آب خالص کاهش می‌یابد، ولی برای غلظت ۰/۰۰۱ درصد حجمی، ضریب انتقال گرما بیشتر از آب خالص است. همچنین، بنابراین نتایج، افزودن نانوذرات به آب باعث افزایش شار گرمای بحرانی می‌شود. تجزیه و تحلیل عکس‌برداری میکروسکوپی توان هسته‌ای سطح، قبل و بعد از جوشش نانوسيال، ۰/۰۲ درصد حجمی را نشان داد که زبری متوسط سطح پس از جوشش نانوسيال از ۵/۱ نانومتر به ۳۷۶ نانومتر افزایش می‌یابد. افزایش زبری سطح باعث افزایش ترشوندگی، و در نتیجه افزایش شار گرمای بحرانی می‌شود. سرفراز و هرمزی [۱۳] با بهره‌گیری از نانوسيال

آمدن بار انرژی بیشتر و نیز افزایش توانایی سیستم انجامد. علاوه بر این، وقتی فناوری میکرو مکانیکی پیشرفته و میکرو الکتريکی و ابزارهای نوری به سمت کوچکتر شدن ابعاد گرایش دارند، اتلاف گرما به مسئله بسیار مهمی تبدیل می‌شود که عملکرد را تضعیف می‌کند. از این‌رو پژوهشگران به سازوکارهای انتقال انرژی مدرن و نامتعارف رو آورده‌اند. مطالعه‌های مقدماتی روی جوشش هسته‌ای نشان می‌دهد که با کنترل سازوکار جوشش به کمک نانوسيال و بهره‌گیری از سطوح نانساختار، می‌توان در فناوری سرمایه‌ش به پیشرفت‌هایی دست یافت.

با پیشرفت نانوفناوری، چوبی [۱] استفاده از نانوذرات را برای معلق سازی درون سیال پیشنهاد کرد و پی بردند که این‌کار باعث افزایش رسانایی گرمایی و افزایش انتقال گرما می‌شود. در این راستا، به استفاده از نانوذرات در پدیده جوشش نیز توجه کردند و مطالعه‌های گسترده‌ای در زمینه استفاده از نانوسيالات در جوشش انجام شد. عوامل بسیاری بر مشخصات جوشش نانوسيال تأثیر می‌گذارند، از جمله جنس و ابعاد نانوذره، غلظت نانوذره، اندازه و هندسه گرمکن، زبری سطح گرمکن و فشار سیستم. در جدول (۱)

جدول ۱. مطالعات اخیر در زمینه جوشش استخري نانوسيالات.

پژوهشگران	نوع و غلظت نانو ذره	تغییرات شار گرمای بحرانی	تغییرات ضریب انتقال گرما	مشخصات گرمکن	آنالیز انجام شده روی سطح گرمکن
لیو و همکاران [۲]	Cu/آب ۰/۱-۲wt.%	۵۰٪ افزایش	افزایش	صفحه تخت مسی با شیار	AFM ^۱
کورسی و کیم [۳]	اتانول/Al ₂ O ₃ (۰/۰۰۱-۱۰ vol.%)	۲۵٪ افزایش	بدون تغییر	صفحه تخت مسی	اندازه‌گیری زاویه تماس
نارایان و همکاران [۴]	آب/Al ₂ O ₃ ۰/۵-۲wt.%	مطالعه نشده	افزایش	صفحه عمودی با زبری‌های متفاوت	عکسبرداری با دوربین دقیق
کاتیراوان و همکاران [۵]	Cu/آب ۰/۲۵-۱ wt.%	مطالعه نشده	کاهش	فولاد ضد زنگ	بدون آنالیز
کوارک و همکاران [۶-۸]	آب/الماس، Al ₂ O ₃ , CuO < ۱ gr/L	۸۰٪ افزایش	کاهش	صفحه تخت مسی مربعی	عکسبرداری نوری
وانگ وایز و همکاران [۹]	آب/TiO ₂ ۰/۰۰۰۱ vol.%	مطالعه نشده	افزایش	صفحه تخت آلومینمی و مسی	بدون آنالیز
چوبکار و همکاران [۱۰]	آب/ZrO ₂ ۰/۰۰۵-۰/۰۵ vol.%	مطالعه نشده	افزایش در غلظت‌های پایین	بلوک مسی	نیمرخ‌سنجی
روشی و همکاران [۱۱]	آب -EG /Al ₂ O ₃ ۰/۰۵-۱ vol.%	مطالعه نشده	افزایش	صفحه تخت مسی	زبری سنجی

1. Atomic Force Microscopy

تأثیر پارامترهای مختلفی چون نوع و غلظت نانوسیال، چگونگی سطح جوشش و زبری آن بر مشخصات جوشش، از جمله شار گرمای بحرانی^۱ و ضریب انتقال گرمای جوشش^۲ انجام گرفته است و در بسیاری از آن‌ها نیز با توجه به شرایط، نتایج متفاوتی در راستای افزایش یا کاهش ضریب انتقال گرما گزارش شده است که نشان از پیچیدگی سازوکار جوشش و متأثر شدن آن از پارامترهای متعدد است. اما اکثر نتایج حاکی از افزایش شار گرمای بحرانی ناشی از جوشش نانوسیال در بازه‌های مختلف جوشش و چگونگی رسوب گذاری نانوذرات روی سطح در طول زمان جوشش، هیچ‌گونه مطالعه‌ای گزارش نشده است. از این‌رو، در این پژوهش هدف آن است که تغییرات زبری سطح جوشش در خلال زمان جوشش نانوسیال بررسی و اثر این تغییرات بر مشخصات جوشش مطالعه شود.

۲. مواد و روش آزمایش

۲-۱ مواد

در این پژوهش برای تهیه نانوسیال آب/سیلیکا از روش دو مرحله‌ای سود جستن^۳ به این ترتیب که نانوذره سیلیکا با میانگین قطر ذرات ۷ تا ۱۴ نانومتر که از شرکت آلمانی (Plasma Chem GmbH) با خلوص ۹۹/۸ درصد خریداری شده بود، به آب بدون یون به عنوان سیال پایه افزوده شد. برای پایدار کردن نانوسیال، از دستگاه فراصوتی مدل UP400S ساخت شرکت هیلشر^۳ و همزن مکانیکی استفاده شد. به این ترتیب که، نانوذرات طی سه مرحله به آب بدون یون اضافه می‌شد و پس از هر مرحله، ابتدا به مدت ۲۰ دقیقه تحت همزن مکانیکی با دور ۱۵۰۰ rpm و سپس به مدت ۲۰ دقیقه تحت دستگاه فراصوتی با شدت ۶۰ و بسامد ۰/۵ قرار می‌گرفت. در مجموع، به مدت ۲ ساعت تحت همزن و تأثیر فراصوت قرار می‌گرفت. نانوسیال در غلظت‌های ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱ درصد حجمی به روش یادشده در بالا تهیه و به کار گرفته شد.

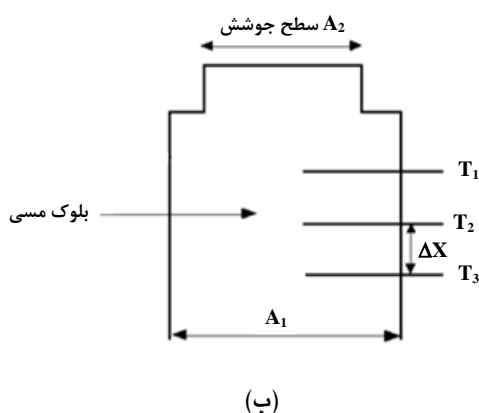
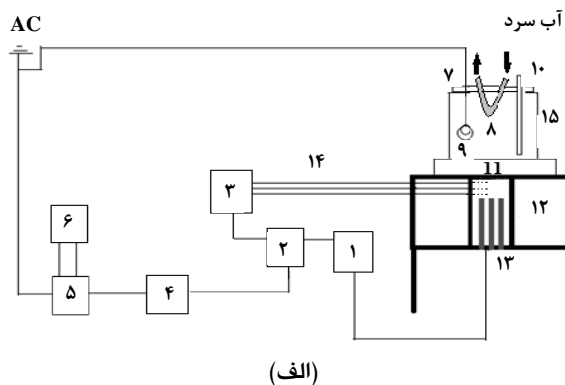
۲-۲ شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در یک دستگاه طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه

آلومینا/ اتیلن گلایکول در ابعاد ۴۵ تا ۵۰ نانومتر، اثر غلظت نانوسیال را بر ضریب انتقال گرما بررسی کردند. بنابر اظهارات آنها، هنگامی که غلظت نانوسیال افزایش می‌یابد ضریب انتقال گرما کاهش می‌یابد. علت این پدیده را ته‌نشینی نانوذرات روی سطح اعلام کردند. این ته‌نشینی نانوذرات بر سطح، ضریب انتقال گرما را به خاطر تغییر در ویژگی ترکنندگی و تغییر در تعداد مکان‌های فعال تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج آنان نشان داد که ته‌نشینی نانوذرات باعث کاهش تعداد مکان‌های فعال روی سطح می‌شود. احمد و حامد [۱۴] با استفاده از نانوذره آلومینا با اندازه ذرات ۴۰ تا ۵۰ نانومتر، آزمایش‌های خود را روی سطح افقی یک گرمکن از جنس مس که درون آن سه گرمکن فشنگی جاسازی شده بود، انجام دادند. این پژوهشگران به منظور بررسی اثر غلظت نانوذرات بر روند افزایش انتقال گرما، از نانوسیال با غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۱ و ۱ درصد حجمی بهره بردند و سپس نتایج خود را با آب خالص مقایسه کردند. نانوسیال با غلظت ۰/۰۱ درصد حجمی در دمای مازاد ۱۵°C حدود ۳۵ درصد افزایش بروز داد. در غلظت ۰/۱ درصد حجمی نیز نسبت به آب خالص افزایش دیده شد. در حالی که برای غلظت ۰/۵ درصد حجمی در دمای مازاد ۱۵°C، حدود ۴۵ درصد کاهش در انتقال گرما پیش آمد. بررسی زینالی [۱۵] روی جوشش استخری نانوسیال اکسید مس در مخلوط آب و اتیلن گلیکول با نسبت ۶۰ به ۴۰ و با بهره‌گیری از گرمکن فشنگی استوانه‌ای با قطر ۷ میلی‌متر صورت گرفت. نتایج نشان داد در محدوده غلظت ۰/۱ تا ۰/۵ درصد حجمی، با افزایش غلظت، ضریب انتقال گرما افزایش می‌یابد و در غلظت ۰/۵ درصد حجمی حدود ۵۵ درصد افزایش ضریب انتقال گرما مشاهده می‌شود. فخار [۱۶] به بررسی جوشش استخری نانوسیال آب/سیلیسیم پرداخت. او آزمایش‌های خود را با سود جستن از یک سیم نیکل-کروم به قطر ۰/۴ میلی‌متر که به صورت افقی در سیال قرار می‌گرفت، انجام داد. نتایج نشان داد که نانوسیال ۰/۵ درصد حجمی نسبت به آب خالص افزایش چشمگیری (حدود ۶۰ درصد) در شار گرمای بحرانی بروز می‌دهد. اما در توان‌های کمتر از شار گرمای بحرانی، اختلاف چشمگیری مشاهده نمی‌شود. همچنین، در دماهای نزدیک به نقطه ذوب سیم یک لایه جوش پایدار در نانوسیالات دیده می‌شود.

از سابقه تحقیقات انجام شده برمی‌آید که اکثر پژوهش‌ها در راستای

1. CHF
2. BHTC
3. Hielscher



شکل ۱. (الف) نمودار دستگاه آزمایشگاهی: ۱- کلید روشن/ خاموش؛ ۲- نمایشگر؛ ۳- ترموستات؛ ۴- آمپرسنج؛ ۵- کاهنده؛ ۶- ولتسنج؛ ۷- درپوش تفلونی؛ ۸- چکالنده؛ ۹- پیش گرمکن؛ ۱۰- دماسنج؛ ۱۱- تفلون؛ ۱۲- آجر نسوز؛ ۱۳- گرمکنهای فشنگی؛ ۱۴- ترموکوپل؛ ۱۵- محفظه جوشش؛ (ب) نمایی از ترموکوپل‌های جاسازی شده درون بلوک مسی.

یکبار تا منطقه جوشش هسته‌ای (۱۲ دقیقه پس از شروع جوشش) و بار دیگر تا منطقه شار گرمای بحرانی، روی سطح گرمکن جوشانده شد و پس از جوشش در هر دو منطقه، زبری سطح اندازه‌گیری شد. سپس آب بدون یون روی سطح پوشش داده شده در هر دو حالت رسیدن به شار گرمای بحرانی تحت جوشش قرار گرفت و پس از جوشش آب، زبری سطح مجدداً اندازه‌گیری شد. به همین ترتیب، سه مرتبه دیگر آب بدون یون روی سطح گرمکن جوشیده شد و بعد از هر بار جوشش، زبری سطح گرمکن را ارزیابی می‌کردند.

۲-۳ روش محاسبه

برای ترسیم منحنی‌های جوشش، به شار گرمایی و دمای مازاد که در واقع اختلاف دمای سطح جوشش و دمای جوشش اشباع سیال است، نیاز داریم. دمای جوشش اشباع نانوسیال در آزمایش‌های

اجرای شده است. دستگاه طراحی شده از توانایی ایجاد شارهای گرمایی بسیار زیاد بر روی سطح مشخص برخوردار است. از این‌رو، آزمایش در تمامی مناطق جوشش از جوشش هسته‌ای تا رسیدن به شار گرمای بحرانی امکان پذیر است. این دستگاه شامل یک استوانه توپر مسی با قطر ۳۰ میلی‌متر است که درون آن چهار گرمکن فشنگی^۱ با مجموع توان ۱/۷ kW جاسازی شده است که با عایق‌بندی مناسب در قسمت سطح جانبی و انتهای استوانه مسی، گرمای تولید شده توسط گرمکن‌ها به سطح تحت جوشش منتقل می‌شود. ترموکوپل‌ها نیز در درون این بلوک مسی قرار گرفته‌اند تا به کمک آنها دمای سطح جوشش محاسبه شود. دمای سیال در حال جوشش نیز از طریق دماسنج نصب شده در محفظه جوشش اندازه‌گیری می‌شود. استخر جوشش نیز یک شیشه استوانه‌ای مقاوم در برابر گرما، به قطر ۱۱ و طول ۲۵ سانتی‌متر است. تغییرات شار گرمایی و اندازه‌گیری آن به کمک مدار الکتریکی تعبیه شده در دستگاه جوشش انجام می‌شود که شامل کلید روشن و خاموش، فیوز، آمپرسنج، ولتسنج و کاهنده (دیمر) است.

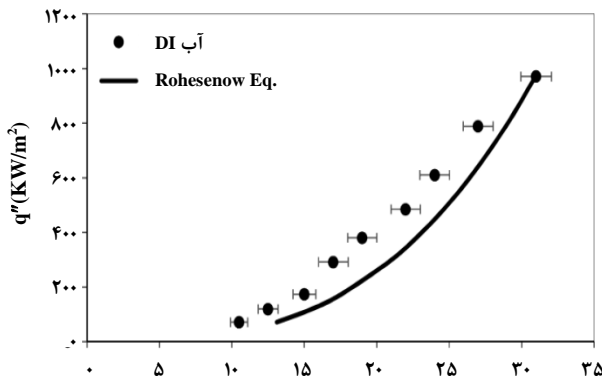
قبل از شروع هر آزمایش، سطح جوشش با برگه سمباده نرم (نمره ۲۰۰۰)، کشیده و سپس با استون تمیز می‌شد. محفظه جوشش را نیز با آب مقطر می‌شستند و خشک می‌کردند. سپس، ۴۰۰ میلی‌لیتر سیال درون محفظه می‌ریختند. پیش گرمکن برای حذف گازهای اضافی حل شده در سیال و رسیدن به دمای اشباع سیال، درون سیال قرار می‌گرفت. پس از آن پیش گرمکن خارج و گرمکن‌های فشنگی وارد مدار می‌شد. توان ورودی به گرمکن‌ها را کاهنده کنترل می‌شد و با تغییرات ۰/۲ در آمپر، آزمایش ادامه می‌یافت. با هر بار تغییر در آمپر و رسیدن به تعادل دمایی، دماها ثبت می‌شد.

در مجموعه آزمایش‌های اول، به منظور بررسی اثر غلظت، سه غلظت تهیه شده، به ترتیب، از آغاز جوشش تا شار گرمای بحرانی روی سطح تمیز تحت جوشش قرار گرفتند و سپس نتایج آنها با آب بدون یون مقایسه شدند.

مجموعه دوم آزمایش‌ها، به منظور بررسی تغییرات زبری سطح گرمکن در طول زمان و بر اثر جوشش مکرر آب بدون یون روی سطح پوشش داده شده با نانوذرات طراحی شده است. در ابتدا، نانوسیال ۰/۰۷ درصد حجمی آب/سیلیکا در دو آزمایش جداگانه

1. Cartridge Heater

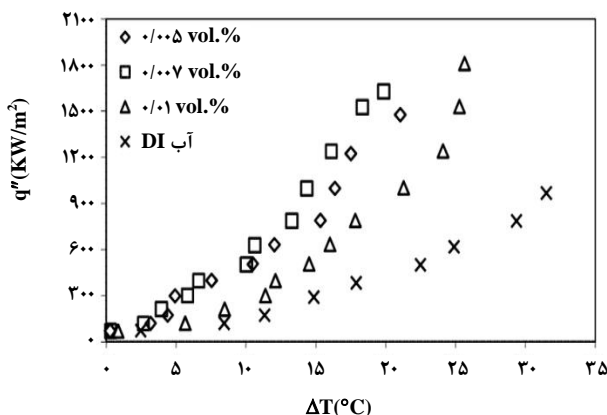
$$q'' = \left(\frac{C_{p,f} \Delta T_e}{h_{fg} C_{s,f} Pr_f^n} \right)^3 h_{fg} \mu_f \sqrt{\frac{g(\rho_f - \rho_v)}{\sigma}} \quad \text{رابطه رزنو} \quad (4)$$



شکل ۲. منحنی جوشش آب بدون یون روی سطح صیقلی در مقایسه با منحنی حاصل از رابطه رزنو.

۳-۱ اثر غلظت نانوذرات روی جوشش نانوسیال

منحنی جوشش نانوسیال آب/سیلیکا برای غلظت‌های ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱ درصد حجمی روی گرمکن مسی با سطح صیقلی شده، در مقایسه با آب بدون یون در شکل (۳) ترسیم شده است. مطابق شکل (۳)، با افزایش غلظت نانوذرات، CHF افزایش می‌یابد. در مورد افزایش CHF می‌توان گفت که پس از جوشش نانوسیال، رسوبی از نانوذرات روی سطح گرمکن می‌نشیند که ترشوندگی سطح را می‌افزاید. افزایش ترشوندگی سطح تشکیل فیلم بخار روی سطح و وقوع CHF را به تعویق می‌اندازد و این موضوع باعث افزایش شار گرمای بحرانی می‌شود.



شکل ۳. منحنی نمایش تغییرات جوشش آب و نانوسیال آب/سیلیکا در غلظت‌های مختلف.

انجام شده، حدود ۹۶°C بود که توسط دامسنجی که در توده سیال قرار می‌گرفت اندازه‌گیری شد. شار گرمایی از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q = KA_1 \frac{T_3 - T_2}{\Delta x} \quad (1)$$

که ضریب رسانش گرمایی، A_1 مساحت سطح مقطع بلوک مسی، T_2 و T_3 دمای ترموکوپل‌ها و Δx فاصله بین ترموکوپل‌هاست. پس از محاسبه شار گرمایی، دمای دیواره از این قرار به دست می‌آید:

$$q = \frac{T_3 - T_w}{\frac{d_1}{A_1 K} + \frac{d_2}{A_2 K}} \quad (2)$$

در این رابطه، K ضریب رسانش گرمایی مس، T_w دمای سطح جوشش، T_3 دمای ترموکوپل و d_1 و d_2 ضخامت دیواره در قسمت‌های بلوک مسی با مساحت سطح مقطع A_1 و A_2 است. ضریب رسانش گرمایی جوشش از این رابطه محاسبه می‌شود:

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

که T_{sat} دمای جوشش اشباع سیال است.

۳. بحث و نتایج

در ابتدا، به منظور بررسی صحت آزمایش‌های انجام شده منحنی جوشش آب بدون یون که در این پژوهش به عنوان سیال پایه به کار رفته، با منحنی حاصل از رابطه رزنو (۴) مقایسه شده است. با توجه به اینکه سطح گرمکن مسی و صیقلی است، مقادیر ثابت C_{sf} و n در رابطه رزنو، به ترتیب، ۱۳/۰ و ۱ قرار داده شده است. جوشش آب خالص سه بار در شرایط یکسان (فشار جوئی، سطح گرمکن صیقلی) انجام شد، تا به این وسیله از تکرار پذیری آزمایش‌ها اطمینان حاصل و خطای آزمایش برآورد شود. سپس منحنی نمایش تغییرات جوشش با نشانگرهای خطا بر حسب انحراف معیار استاندارد ترسیم شد (شکل (۲)). مطابق شکل، تطابق نتایج آزمایشگاهی و رابطه رزنو در شارهای پایین بهتر است اما در شارهای بالا اختلاف افزایش می‌یابد.

اندازه‌گیری و با زبری گرفته شده از سطح صیقلی قبل از شروع جوشش مقایسه شد. در شکل (۶) آنالیز حاصل از زبری سطح جوشش را مشاهده می‌کنید.

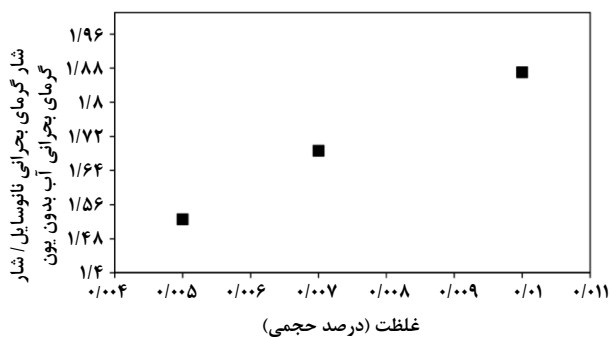
مطابق شکل (۶)، هرچه غلظت نانوسيال افزایش یابد، زبری سطح نیز افزایش می‌یابد. این افزایش در زبری، ناشی از نشست نانوذرات بر روی سطح در طول جوشش است. بنابر نتایج نارایان و همکاران [۴]، در حالتی که نسبت زبری متوسط سطح به قطر متوسط ذرات (Ra/d_p) بزرگتر از یک باشد، افزایش ضریب رسانش حرارت برای نانوسيال چشمگیر است. با توجه به این که در پژوهش حاضر، قطر متوسط نانوذرات سیلیکا برابر ۷ تا ۱۴ نانومتر است، این نسبت برای سطح اولیه جوشش، طبق نتایج آنالیز سطح در شکل (۶)، از یک بزرگتر است. این تغییرات ایجاد شده در زبری سطح در طول جوشش، افزایش ضریب انتقال گرما در شکل (۵) را توجیه می‌کند. همچنین دلیل افزایش کمتر BHTC در غلظت ۰/۰۱ درصد حجمی را می‌توان به ضخامت ایجاد شده از رسوب نانوذرات روی سطح و برقرار شدن مقاومت گرمایی ربط داد. هرچه غلظت نانوسيال بیشتر باشد، لایه نانوذرات روی سطح با سرعت بیشتری رشد می‌کند و با توجه به این که برای غلظت ۰/۰۱ درصد حجمی، غلظت بیشتر از سایر حالت های قبل است، پس لایه زودتر ضخیم می‌شود و این عامل باعث افت BHTC نسبت به غلظت‌های کمتری شود.

۲-۳ بررسی مشخصات جوشش آب و تغییرات زبری سطح

گرمکن بر اثر جوشش متوالی آب بدون یون روی سطح پوشش داده شده با نانوذرات در نواحی مختلف جوشش

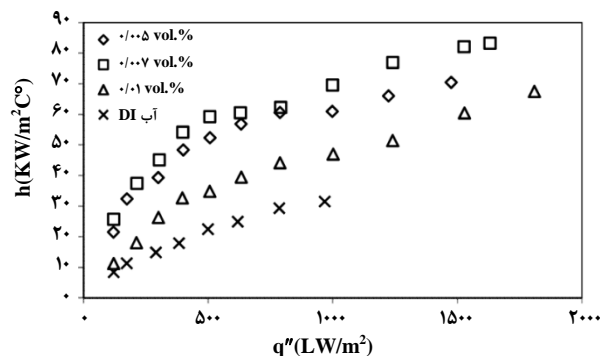
در شکل (۷) سطح گرمکن تا منطقه جوشش هسته‌ای (۱۲ دقیقه پس از شروع جوشش) با نانوسيال ۰/۰۰۷ درصد حجمی، که بهترین نتایج انتقال گرما را نشان داد، تحت جوشش قرار گرفت و پوششی از نانوذرات روی سطح آن نشسته شد. سپس، آب بدون یون به طور متوالی (چهار بار، هر بار آب بدون یون تازه) تا شار گرمایی بحرانی روی این سطح پوشش داده شده جوشانده شد. مطابق شکل، داده‌های جوشش آب در هر چهار چرخه بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند. در شکل (۷) همچنین مشاهده می‌کنیم که منحنی‌های جوشش آب بدون یون روی سطح پوشیده شده با نانوذرات نسبت به منحنی جوشش آب بدون یون روی سطح صیقلی، از ضریب انتقال

در شکل (۴)، نسبت CHF نانوسيال به CHF آب بدون یون در غلظت‌های مختلف نانوسيال را مشاهده می‌کنید، که به ترتیب، برای غلظت‌های ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱ درصد حجمی، ۵۲، ۶۷ و ۸۷ درصد افزایش CHF را برای نانوسيال نشان می‌دهد.



شکل ۴. نسبت CHF نانوسيال آب/ سیلیکا به CHF آب بدون یون در غلظت‌های مختلف.

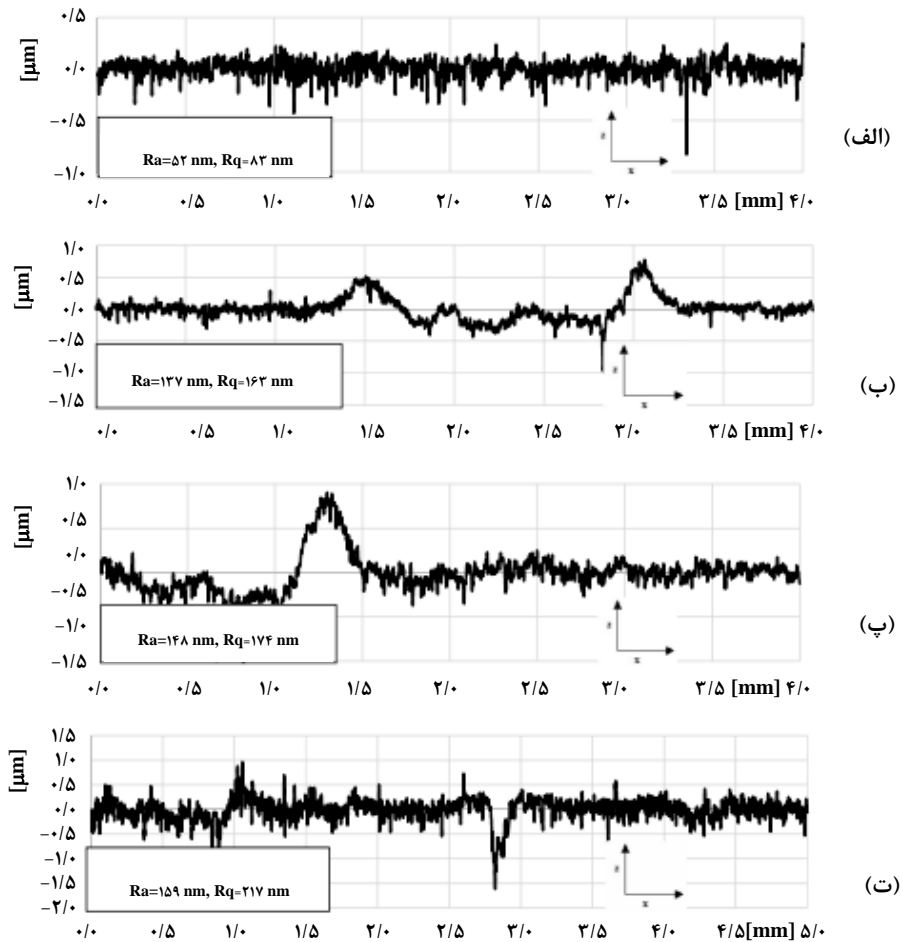
در شکل (۵) نمودار ضریب انتقال گرما نسبت به شار گرمایی برای غلظت‌های مختلف نانوسيال و آب بدون یون را مشاهده می‌کنید. برای همه غلظت‌ها، BHTC نسبت به آب بدون یون افزایش یافته است. افزایش BHTC نانوسيال نسبت به آب بدون یون، برای غلظت‌های ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱ درصد حجمی، به ترتیب، ۱۱۴، ۱۴۲ و ۷۴ درصد است.



شکل ۵. نمودار ضریب انتقال گرما بر حسب شار گرمایی برای آب بدون یون و نانوسيال با غلظت‌های مختلف.

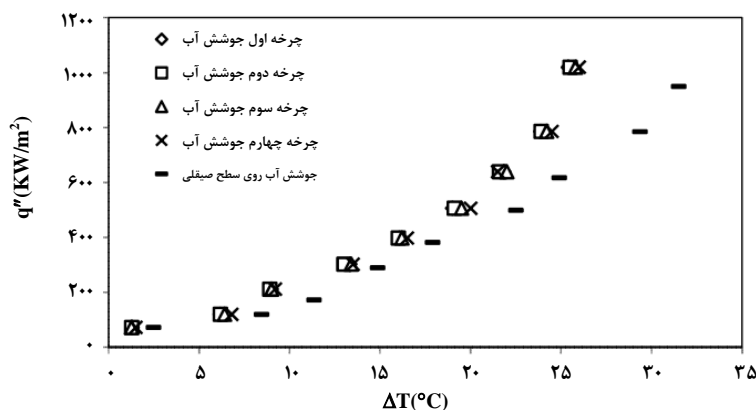
به منظور بررسی دقیق سطح، پس از جوشیده شدن نانوسيال روی سطح صیقلی و رسیدن به شار بحرانی، با استفاده از دستگاه زبری سنج مدل sj-210^۱ با حساسیت ۰/۰۰۲ میکرومتر، زبری سطح

1. Portable Surface Roughness Tester, SurfTest sj-210 Series



شکل ۶. آنالیز زبری سطح گرمکن. (الف) زبری سطح صیقلی قبل از جوشش؛ (ب) زبری سطح گرمکن بعد از شار بحرانی برای غلظت ۰/۰۰۵ درصد حجمی؛ (پ) زبری سطح گرمکن بعد از شار بحرانی برای غلظت ۰/۰۰۷ درصد حجمی؛ (ت) زبری سطح گرمکن بعد از شار بحرانی برای غلظت ۰/۰۱ درصد حجمی.

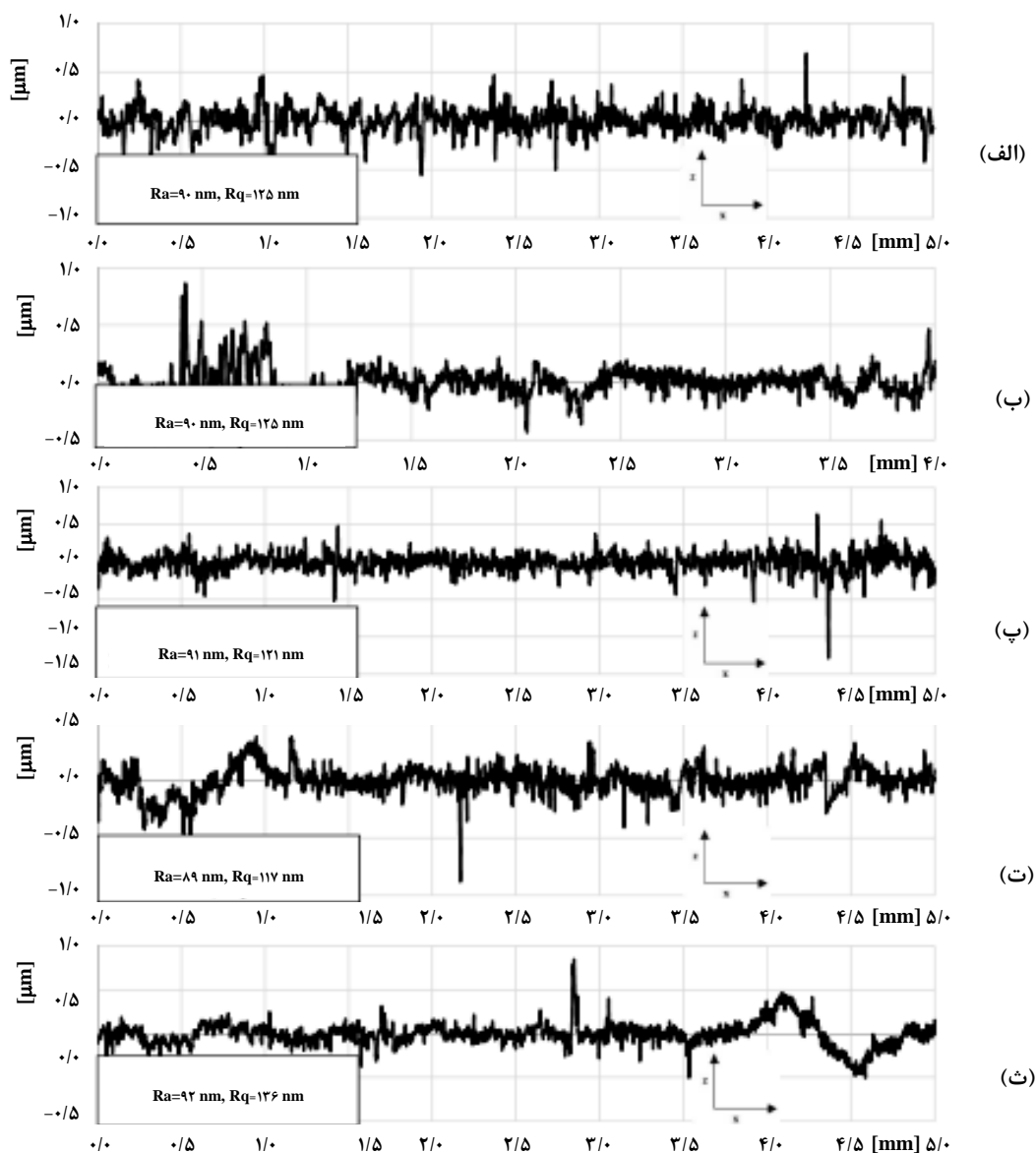
گرمای بالاتری برخوردارند. شار گرمای بحرانی برای منحنی‌های جوشش آب بدون یون روی سطح پوشیده شده با نانوذرات نسبت به سطح صیقلی نیز به میزان ۷ درصد افزایش داشته است.



شکل ۷. جوشش متوالی آب بر روی سطح پوشش داده شده با نانوذرات ۰/۰۰۷ درصد حجمی تا منطقه جوشش هسته‌ای.

در واقع، وقوع جوشش هسته‌ای بر روی سطح گرمکن باعث شده که نانوذرات از چسبندگی خوبی برخوردار شوند و در حین جوشش‌های متوالی به راحتی از سطح جدا نشوند. همچنین، ثابت ماندن زبری سطح گرمکن بعد از جوشش‌های متوالی آب نیز دلیلی بر تغییر نکردن مشخصات در منحنی‌های جوشش آب در شکل (۷) است.

برای بررسی تغییرات ایجاد شده بر زبری سطح گرمکن پوشش داده شده پس از هر بار جوشش آب روی آن، زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری سنج اندازه‌گیری و با زبری سطح پوشش داده شده اولیه مقایسه شد. مطابق شکل (۸)، اعداد حاصل از اندازه‌گیری زبری سطح نشان می‌دهد که زبری در دفعات متوالی جوشش آب، $90 \pm 2 \text{ nm}$ بوده است و به نظر می‌رسد که زبری تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۸. آنالیز زبری سطح گرمکن. (الف) زبری سطح پوشش داده شده در منطقه جوشش هسته‌ای قبل از جوشش آب؛ (ب) زبری سطح گرمکن بعد از اولین چرخه جوشش آب؛ (پ) زبری سطح گرمکن بعد از دومین چرخه جوشش آب؛ (ت) زبری سطح گرمکن بعد از سومین چرخه جوشش آب؛ (ث) زبری سطح گرمکن بعد از چهارمین چرخه جوشش آب.

جدول ۲. مقایسه زبری سطح، قبل و بعد از جوشش آب بدون یون در بازه زمانی شار بحرانی.

نمونه	زبری سطح بعد از جوشش آب	زبری سطح پوشش داده شده
چرخه اول جوشش آب	۱۴۸	۱۴۸
چرخه دوم جوشش آب	۱۴۷	۱۴۸
چرخه سوم جوشش آب	۱۵۰	۱۴۸
چرخه چهارم جوشش آب	۱۴۹	۱۴۸

۴. نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه آزمایشگاهی، اثر جوشش نانوذرات آب/سیلیکا بر شار گرمای بحرانی، ضریب انتقال گرما و زبری سطح در نواحی مختلف جوشش بررسی شد. در آزمایش‌هایی که به بررسی اثر غلظت نانوذرات بر روی مشخصات جوشش پرداخته شد، از بین سه غلظت ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱ درصد حجمی، غلظت ۰/۰۱ درصد حجمی از بیشترین افزایش در شار گرمای بحرانی برخوردار بود که حدود ۸۷ درصد بود. همچنین، غلظت ۰/۰۰۷ درصد حجمی بیشترین افزایش را در ضریب انتقال حرارت داشت که ۱۴۲ درصد بود.

در چرخه‌های متوالی جوشش آب بدون یون، ضریب انتقال گرما برای سطوحی افزایش یافت که تا منطقه زمانی جوشش هسته‌ای (۱۲ دقیقه پس از شروع جوشش) و منطقه شار بحرانی پوشش داده شده بود. همچنین، شار گرمای بحرانی برای سطحی که تا منطقه جوشش هسته‌ای پوشش داده شده بود، به میزان ۷ درصد و برای سطحی که تا منطقه شار بحرانی پوشش داده شده بود به میزان ۹ درصد افزایش بروز داد.

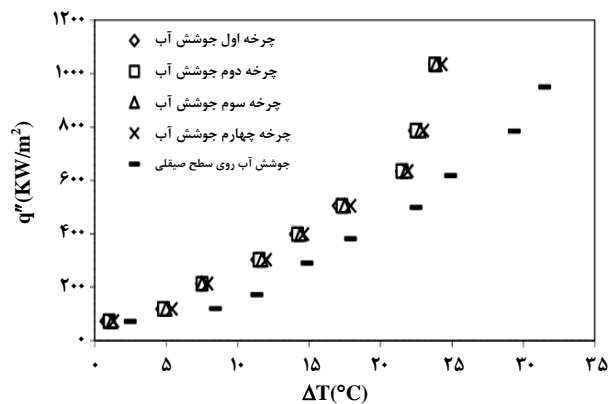
اندازه‌گیری زبری سطح پس از ایجاد پوشش در دو منطقه زمانی نشان داد که زبری سطح پوشش داده شده تا منطقه شار بحرانی نسبت به سطح پوشش داده شده تا منطقه جوشش هسته‌ای بیشتر است. اما پس از جوشش متوالی آب بر روی این سطوح پوشش داده شده در هر دو بازه، زبری سطح تغییری نیافت.

نمادها

$C_{p,f}$ گرمای ویژه در فشار ثابت، [J/(kg. K)]

h ضریب رسانش حرارت جابجایی، [w/(m².k)]

مجموعه آزمایش‌های زیر، برای حالتی انجام شد که نانوسیال ۰/۰۰۷ درصد حجمی تا منطقه شار بحرانی روی سطح گرمکن جوشیده و سطح با نانوذرات پوشیده شود، و مجدداً چهار بار آب بدون یون روی این سطح پوشش داده شده تا این‌که شار بحرانی جوشانده شد. مشابه قسمت قبل، داده‌های جوشش آب بدون یون در هر چهار مرحله ترسیم شد. مطابق شکل (۹)، در این حالت نیز منحنی‌های جوشش چرخه‌های متوالی آب بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند. همچنین، با مقایسه مجموعه منحنی‌های جوشش آب روی سطح پوشش داده شده در شرایط شار بحرانی در شکل (۹)، با مجموعه منحنی‌های جوشش آب روی سطح پوشش داده شده در شرایط جوشش هسته‌ای در شکل (۷) مشخص می‌شود، که ضریب انتقال گرمای آب بدون یون در اثر پوشش ایجاد شده روی سطح گرمکن در محدوده شار بحرانی، افزایش بیشتری یافته است. مثلاً، در شار ثابت ۵۰۰ KW/m²، مقدار دمای مازاد در شکل (۹)، ۱۷°C و در شکل (۷)، ۱۹°C است. اعداد ناشی از اندازه‌گیری زبری سطح را در جدول (۲) درج کرده‌ایم که زبری در دفعات متوالی پس از جوشش آب، ۱۴۸±۲nm بوده است. در واقع، افزایش زبری سطح بر اثر پوشش ایجاد شده در محدوده شار بحرانی باعث ایجاد مکان‌های هسته‌زایی بیشتری شده که این پدیده ضریب انتقال گرما را تحت تأثیر قرار داده و موجب افزایش آن شده است. همچنین، شار گرمای بحرانی برای سطح پوشش داده شده در شکل (۹) نسبت به سطح صیقلی، ۹ درصد افزایش بروز داده است که به دلیل افزایش یافتن خاصیت ترکنندگی ناشی از ایجاد رسوب روی سطح بوده است.



شکل ۹. جوشش متوالی آب بر روی سطح پوشش داده شده با نانوذرات ۰/۰۰۷ درصد حجمی تا منطقه شار بحرانی.

- [4] Narayan, G. P., Anoop, K. B., Das, S. K., "Mechanism of enhancement/deterioration of boiling heat transfer using stable nanoparticle suspensions over vertical tubes", *J. App. Phys.*, Vol. 102, (2007). رسانش گرمایی، [w/(m.k)]
- [5] Kathiravan, R., Kumar, R., Gupta, A., Chandra, R., "Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1673-1681, (2010). شار گرما، (w/m²)
- [6] Kwark, S. M., Kumar, R., Moreno, G., Yoo, J., You, S. M., "Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 972-981, (2010). انتالپی تبخیر، (J/kg)
- [7] Kwark, S. M., Moreno, G., Kumar, R., Moon, H., You, S. M., "Nanocoating characterization in pool boiling heat transfer of pure water", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 4579-4587, (2010). شتاب گرانشی، (m/s²)
- [8] Kwark, S. M., Amaya, M., Kumar, R., Moreno, G., You, S. M., "Effects of pressure, orientation, and heater size on pool boiling of water with nanocoated heaters", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 5199-5208, (2010). مساحت سطح مقطع، (m²)
- [9] Suriyawong, A., Wongwises, S., "Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO₂-water nanofluids at very low concentrations", *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 34, pp. 992-999, (2010). دمای ترموکوپل، (K)
- [10] Chopkar, M., Das, A. K., Manna, I., Das, P. K., "Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO₂-water nanofluids from a flat surface in a pool", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 99-1004, (2008). دمای جوشش اشباع سیال، (K)
- [11] Raveshi, M. R., Keshavarz, A., Salemi Mojarrad, M., Amiri, Sh., "Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina-water-ethylene glycol nanofluids", *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 44, pp. 805-814, (2013). دمای دیواره، (K)
- [12] Shahmoradi, Z., Etesami, N., Nasr Esfahany, M., "Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 113-120, (2013). فاصله بین ترموکوپل‌ها، (m)
- [13] Sarafraz, M. M., Hormozi, F., "Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of dilute Al₂O₃-ethyleneglycol nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, pp. 96104, (2014). ضخامت دیواره، (m)
- [14] Ahmed, O., Hamed, M. S., "Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling of nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 3423-3436, (2012). ثابت برهم‌کنش سطح و مایع در رابطه رزنو (۴)
- [15] Zeinali, H. S., "Experimental investigation of pool boiling characteristics of low concentration cuo/ethylene glycol-water", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1470-1473, (2011).

نمادهای یونانی

ρ_f چگالی مایع، (kg/m³)

ρ_v چگالی بخار، (kg/m³)

σ کشش سطحی، (N/m)

μ_f لزجیت مایع اشباع، [kg/(m.s)]

زیروندها

f مایع

v بخار

sat حالت اشباع

w دیواره

اعداد بدون بعد

Pr عدد پранتل

مراجع

- [1] Yu, W., France, D. M., Choi, S. U. S., Routbort, J. L., "Review and National Laboratory", Technical Report, ANL/SED/07-9, (2007).
- [2] Liu, Z., Xiong, J., Bao, R., "Boiling heat transfer characteristics of nanofluids in a flat heat pipe evaporator with micro-grooved heating surface", *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 33, pp. 1284-1295, (2007).
- [3] Coursey, J. S., Kim, J., "Nanofluid boiling, the effect of surface wettability", *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 1577-1585, (2008).

[۱۶] فخار، ا. "بررسی انتقال حرارت جوشش استخری در نانوسیالات با آب/سیلیسیم"، دومین همایش ملی نانومواد و نانو تکنولوژی، دانشگاه آزاد نجف آباد، اردیبهشت ۸۹.