

## تأثیر نانوسیالات در بهبود فرایند جوشش استخری

امیر میرزا قیطاقی\*

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه علم و صنعت ایران

a\_m\_gheitaghy@mecheng.iust.ac.ir

حمید صفاری

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه علم و صنعت ایران

saffari@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۱۰

## چکیده

طی سالیان اخیر، افزودن نانوذرات معلق در سیالات خنک‌کننده به‌عنوان راهکاری برای بهبود خواص حرارتی سیستم‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هرچند هنوز هم نظری قطعی دربارهٔ ساوکار بهبود انتقال حرارت برای نانوذرات داخل سیال ارائه نشده است، اما پژوهشگران آزمایشات متعددی دربارهٔ قابلیت کاربرد آنها انجام داده‌اند و نانوسیالات را نسل آیندهٔ سیالات خنک‌کننده می‌دانند. از جمله زمینه‌های مهم انتقال حرارت که با نرخ‌های بالای شار سروکار دارد، جوشش است. علاوه بر پیچیدگی‌های رفتار نانوسیال، ساوکار فرایند جوشش نیز هنوز به‌درستی درک نشده است. طی یک دههٔ گذشته، مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای دربارهٔ جوشش نانوسیالات با تغییر پارامترهای جنس و زبری و ترشوندگی سطح گرمکن، جنس و اندازه و شکل نانوذرات، نوع سیال پایه و شرایط فشار و دما، زمان و روند انجام آزمایش و جز این‌ها انجام شده است. در این مقاله، ابتدا مفهوم بهبود جوشش استخری و نتایج حاصل از تأثیر نانوسیالات بر شار حرارتی بحرانی و انتقال حرارت جوششی مرور می‌شود. سپس، دلایل افزایش قطعی شار حرارتی بحرانی (البته با مقادیر متفاوت) و نتایج متناقض انتقال حرارت جوششی با توجه به پارامترهای زیاد دخیل در فرایند مانند تغییر در خواص سطح گرمکن و خواص فیزیکی سیال پایه بررسی می‌شود. در پایان، مسیر آیندهٔ تحقیقات در این زمینه با توجه به ابهامات موجود و تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز برای بررسی دقیق‌تر فرایند جوشش نانوسیالات ارائه می‌گردد.

واژگان کلیدی: نانوسیال، شار بحرانی، انتقال حرارت، جوشش استخری

## ۱. مقدمه

دارد. بیش از ۹۰ درصد از این انرژی توسط موتورهای گرمایی تولید می‌شود [۱]. از میان چالش‌های متعددی که در تأمین تقاضای روزافزون جهان برای انرژی پایدار با آنها

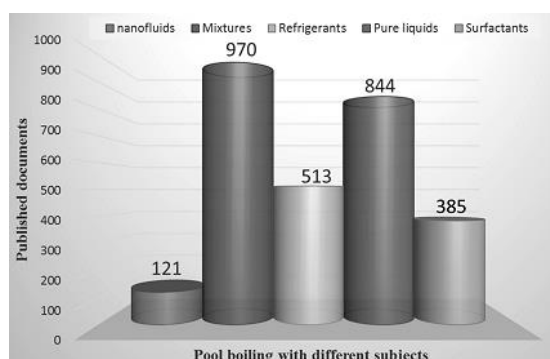
امروزه درخواست کنونی انرژی کل دنیا حدود ۱۳ تراوات تخمین زده می‌شود و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ م به ۳۰ تراوات برسد. انرژی گرمایی نقشی اولیه در این انرژی کلی



مواجه است، بهبود انتقال حرارت همراه تغییر فاز چند دهه است که طالیهدار تحقیقات مهندسی است. آهنگ بالای انتقال گرما، همزمان با تغییر فاز، جزء جدانشدنی مصارف صنعتی و انرژی است؛ اما تغییر فاز ذاتاً با بازدهای پایین ترمودینامیکی در شارهای حرارتی کم و ناپایداریهای شدید در شارهای حرارتی زیاد همراه است. بنابراین تلاش برای بهبود بازده و افزایش پایداری در فرایندهای انتقال حرارت دو فاز از جمله جوشش ادامه دارد.

وقتی گرما به سطح جامد در تماس با مایع اعمال شود، اگر دمای دیواره به اندازه کافی به دمایی بالاتر از دمای اشباع مایع برسد، فرایند جوشش اشباع روی دیواره رخ می‌دهد. این دیواره گرم می‌تواند یک چیپ الکترونیکی، بویلر، اواپراتور، فلز گداخته و جز این‌ها باشد. در برخی از کاربردها، هدف افزایش دمای سیال و در برخی دیگر، کاهش دمای سطح گرم است. مهم این است که انتقال حرارت جوششی می‌تواند شار حرارتی زیادی را در اختلاف دمای کم بین سیال با سطح جابه‌جا کند. اهمیت اقتصادی فرایند جوشش در کاربردهایی چون تولید قدرت، فرایندهای شیمیایی و پتروشیمی، خنک‌کاری، تهویه و تبرید و جز این‌ها به همراه پیچیدگی این فرایند، توجه پژوهشگران را به خود جلب می‌نماید. با اینکه محققان هنوز به سازوکار فرایند جوشش به‌طور کامل دست نیافته‌اند، اما همواره به دنبال روش‌هایی برای بهبود فرایند جوشش بوده‌اند. بهبود فرایند جوشش علاوه بر افزایش بازده انرژی سیستم، سبب کوچک‌سازی تجهیزات، افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی می‌گردد. در شکل ۱، تعداد مقالات چاپ‌شده در مجلات بین‌المللی که از سیالات گوناگون به‌منظور بررسی آزمایشگاهی فرایند جوشش استفاده کرده‌اند، ارائه شده است. از روش‌های جدید بهبود فرایند جوشش با ظهور فناوری نانو، می‌توان به استفاده از نانوسیال اشاره کرد که هنوز هم با توجه به حجم مقالات کم، می‌تواند جای بررسی دقیق‌تر داشته باشد. طی دو دهه اخیر که استفاده از نانوسیالات رایج شده است، سازوکارهای احتمالی برای بهبود خواص فیزیکی نانوسیال

را مربوط به عواملی چون حرکت براونی ذرات، ارتعاشات شبکه‌ای فوتون‌ها، خوشه‌ای شدن نانوذرات و ایجاد لایه مایع در فصل مشترک مایع و ذره جامد دانسته‌اند. اما در فرایند جوشش نانوسیال، علاوه بر تأثیر تغییر خواص فیزیکی، رسوب نانوذرات روی سطح سبب تغییر چگالی سایت‌های هسته‌زایی فعال، زبری سطح، ترشوندگی و زوایای تماس پیشرو و پسرو می‌گردد. با توجه به پارامترهای زیاد وابسته و ناشناخته بودن رفتار، پژوهشگران پس از یک دهه مطالعات هنوز بر افزایش یا کاهش ضریب انتقال حرارت جوششی به اتفاق نظر نرسیده‌اند و گزارش‌های ضدونقیض وجود دارد. اغلب آزمایشات به افزایش شار حرارتی بحرانی جوشش رسیده‌اند، اما در این حالت هم مقدار افزایش ثابتی را گزارش ننموده‌اند. اغلب این افزایش شار بحرانی را به تشکیل لایه ذرات روی سطح گرمکن نسبت داده‌اند و براساس آن سازوکارهای مؤثر را توجیه نموده‌اند [۳].



شکل ۱. تعداد مقالات چاپ‌شده

در مورد مطالعه آزمایشگاهی انواع سیالات در جوشش [۲]

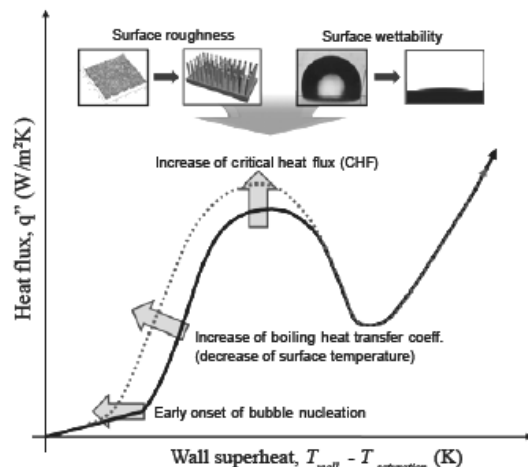
چون این افزایش بیش از حد شار بحرانی، قابل توجیه به‌وسیله بهبود خواص ترموفیزیکی سیال توسط نانوذرات نیست، بیشتر تحقیقات جدید روی بررسی تأثیر ساختار سطح روی فرایند جوشش معطوف شده است. با ایجاد ساختارهای میکرو و نانو روی سطوح توسط فرایندهای مختلف از جمله جوشش نانوسیال می‌توان میزان ترشوندگی و هسته‌های جوششی سطوح را کنترل کرد؛ که

این امر محور تحقیقات جدید می‌باشد. با تولید سطوح آبدوست با زاویهٔ ترشوندگی زیاد می‌توان حد شار حرارتی بحرانی در فرایند جوشش را افزایش داد.

در این مقاله، ابتدا فرایند جوشش استخری و مفهوم بهبود آن تشریح می‌شود. سپس نتایج تحقیقات در زمینهٔ تأثیر استفاده از نانوسیالات گوناگون در شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوششی مرور می‌شود. به‌منظور پیش‌بینی عملکرد، پارامترهای مؤثر نانوسیال در فرایند جوشش بررسی و ابهامات موجود در این زمینه برای ادامه تحقیقات ارائه می‌شود. در پایان، تجهیزات پیشرفتهٔ مورد نیاز برای بررسی فرایند جوشش نانوسیالات معرفی می‌گردد.

## ۲. مفهوم بهبود انتقال حرارت جوشش استخری

منحنی جوشش استخری، نمایانگر مقدار شار حرارتی وارده به سطح گرمکن برحسب دمای سوپرهیت سیال (اختلاف دمای سطح گرم با دمای اشباع در فشار سیستم) می‌باشد. بهبود منحنی جوشش را می‌توان در سه بخش شروع سریع‌تر فرایند جوشش در سوپرهیت‌های کمتر، افزایش ضریب جابه‌جایی در جوشش هسته‌ای<sup>۱</sup> و افزایش شار حرارتی ماکزیمم<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی نمود. در شکل ۲ منحنی کیفی بهبود یافتهٔ جوشش به‌صورت خط‌چین مشاهده می‌شود.



شکل ۲. تغییر در منحنی جوشش استخری به‌واسطهٔ بهبود فرایند [۴]

از لحاظ ترمودینامیکی، نخستین معیار عملکرد انتقال حرارت همراه تغییر فاز، بیشینهٔ شار حرارتی مبادله‌شده بین سطح جامد و مایع است. برای مایع در حال جوشش، شار حرارتی بحرانی بیشترین شار حرارتی است که قبل از ادغام حباب‌های بخار با هم و تشکیل لایهٔ بخار، که سطح را از مایع جدا کند، می‌تواند مبادله شود. بهبود شار حرارتی بحرانی با شهودی که از قانون اول ترمودینامیک حاصل می‌شود، می‌تواند همان بهینه‌سازی انتقال گرما تلقی شود. معیار دوم عملکرد انتقال حرارت همراه تغییر فاز، ضریب انتقال گرماس (  $q''/\Delta T$  ). به‌طوری‌که  $q''$  شار حرارتی مبادله‌شده بین سطح جامد و سیال و  $\Delta T$  اختلاف دمای آنهاست. در مفهوم قانون دوم ترمودینامیک، ضریب انتقال حرارت معیاری از بازدهٔ ترمودینامیکی انتقال حرارت است. ضریب انتقال حرارت مرتبط با تغییر حالت نوعاً یک تا دو مرتبه بزرگتر از ضریب انتقال حرارت تک‌فاز می‌باشد؛ زیرا گرمای نهان اختلاف دما را کمینه می‌کند. خواصی از یک سطح جامد که ضریب انتقال حرارت را بیشینه می‌کند، به سیال و اختلاف دما بستگی دارد. ضریب انتقال حرارت زیاد در رژیم‌هایی رخ می‌دهد که هر دو فازهای پیوسته و گسسته با سطح جامد در تماس باشند؛ مانند رژیم جوشش هسته‌ای.

## ۳. تأثیر نانوسیالات بر فرایند جوشش

در جدول ۱، نتایج پژوهش‌های گوناگون طی دههٔ اخیر دربارهٔ تأثیر نانوسیالات بر شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوششی خلاصه شده است. بیشتر تحقیقات بر فرایند جوشش نانوسیالات به‌صورت آزمایشگاهی متمرکز بوده و کارهای مهم از سال ۲۰۰۳ م شروع شده است [۵]. آزمایشات نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال در فرایند جوشش سبب افزایش قابل توجهی در شار حرارتی بحرانی می‌شود. در مورد بهبود ضریب انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای نتایج متناقضی حاصل شده است که به‌دلیل عوامل دخیل زیاد در آن مانند خواص سیال (رسانش



حرارتی، کشش سطحی، لزجت، ظرفیت حرارتی، چگالی و آنتالپی مایع و بخار)، خواص سطح جوشش (جنس سطح، هندسه، جهت، ترشوندگی، زبری، همگنی)، خواص فیزیکی سیستم (فشار و دما)، هیدرودینامیک نزدیک سطح (حجم جدایش حباب، فرکانس جدایش، دینامیک نقاط خشک) نمی‌توان نظری قطعی در مورد آن داد [۶]. افزودن نانوذرات به سیال پایه می‌تواند بسیاری از پارامترهای فوق را براساس غلظت و مشخصه‌های نانوسیال مانند اندازه، شکل، پوشش شیمیایی ذره و جز این‌ها نسبت به جوشش با سیال خالص تغییر دهد. بررسی‌ها نشان داده است که تغییر خواص سیال به دلیل وجود نانوذرات به‌تنهایی نمی‌تواند پدیده جوشش و خصوصاً افزایش زیاد شار حرارتی بحرانی را توجیه نماید.

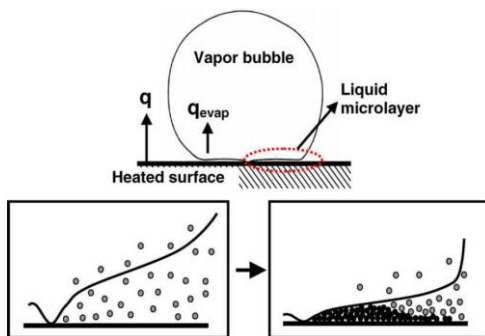
### ۳-۱. کاهش ضریب انتقال حرارت جوشش در برخی حالات

از جمله عوامل انتقال منحنی جوشش نانوسیالات به سمت افزایش سوپرهیت سطح، ایجاد مقاومت رسانشی به دلیل تشکیل میکرو لایه روی سطح گرمکن است. افت دمای تخمینی برای لایه اکسید ۱۰ میکرومتری با تخلخل ۵۰ درصد در حالت شار ۱ مگاوات بر متر مربع به میزان ۱۰ درجه است. تأثیر لایه نانوذرات بر مقاومت الکتریکی هیتز ناچیز است. دلیل دیگر برای تضعیف منحنی جوشش می‌تواند کاهش چگالی نقاط جوشش به دلیل کاهش زاویه تماس باشد. اگرچه بایستی افزایش تعداد میکروکاواک‌ها و در نتیجه نقاط جوشش به دلیل متخلخل شدن سطح را نیز در نظر گرفت. افزایش تعداد میکروکاواک‌ها به دلیل تشکیل لایه متخلخل روی سطح، در برخی حالت‌ها آنقدر نیست که بتواند بر کاهش فعال‌سازی این کاواک‌ها ناشی از ترشوندگی بیشتر غلبه نماید. به همین دلیل در برخی مقالات میزان انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای کاهش می‌یابد. عدم توانایی اندازه‌گیری نقاط تشکیل حباب در نانوسیال‌ها به دلیل

شفاف نبودن اغلب نانوسیالات (البته محلول نانوسیال اکسید آلومینوم در آب شفاف می‌باشد) و نیاز به تجهیزات پیشرفته قطعیت در این زمینه را با مشکل مواجه کرده است. مقایسه میان تحقیقات گوناگون نیز به دلیل گزارش ناکافی تمامی پارامترهای مؤثر در جوشش مانند زبری اولیه سطح، وجود پوشش سطحی، کلوخه شدن نانوذرات، آلودگی سطح و جز این‌ها مشکل می‌باشد [۳۲].

### ۳-۲. افزایش شار حرارتی بحرانی در اغلب حالات

اغلب پژوهشگران بر افزایش شار حرارتی بحرانی در اثر نشست نانوذرات روی سطح گرمکن اتفاق نظر دارند. اما پرسش اساسی در علت نشست نانوذرات است؛ زیرا اگر محلولی پایدار از نانوسیال تهیه شده باشد، نانوذرات آن ته‌نشین نمی‌شوند. پس فرایند جوشش و احتمالاً تشکیل حباب روی نشست ذرات تأثیرگذار است. با تشکیل حباب، نانوذرات در میکرو لایه سیالی زیر حباب به دام افتاده و با تبخیر میکرو لایه، چگالی نانوذرات در آن ناحیه افزایش یافته و احتمال برخورد و کلوخه شدن نانوذرات افزایش یافته و با جدایش حباب و خشک شدن موضعی محل جدایش، این نانوذرات به سطح گرمکن می‌چسبند (شکل ۳).



شکل ۳. سازوکار رسوب نانوذرات در طول فرایند جوشش [۳۳]

این رسوب احتمالاً به دلیل دیفیوژن جرم نانوذرات به داخل سطح نمی‌باشد؛ زیرا فرکانس جدایش حباب‌ها زیاد بوده و ذرات فرصت نفوذ نمی‌یابند. همچنین این فرض که گرمایش سبب تضعیف نیروهای نگه‌دارنده حالت تعلیق

جدول ۱. مطالعات گوناگون در مورد تأثیر نانو سیالات بر انتقال حرارت جوشش و شار حرارتی بحرانی

نوع نانوذرات	تأثیر بر انتقال حرارت جوششی	تأثیر بر شار حرارتی بحرانی	سال، مرجع	محقق
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> on S/S tubes	تضعیف بین ۱۰ تا ۴۰ درصد	-	[۵]، ۲۰۰۳	داس و همکاران <sup>۲</sup>
Au, SiO <sub>2</sub> on Cu surface	بهبود بین ۱۱ تا ۲۱ درصد	بهبود	[۸]، ۲۰۰۳	ویتارانا <sup>۴</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> on Cu surface	بدون تغییر	بهبود تا ۲۰۰ درصد	[۹]، ۲۰۰۳	یو و همکاران <sup>۵</sup>
SiO <sub>2</sub> on NiCr wire	بدون تغییر	بهبود تا ۶۰ درصد	[۱۰]، ۲۰۰۴	وسالو و همکاران <sup>۶</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub>	بهبود تا ۴۰ درصد	بهبود	[۱۱]، ۲۰۰۵	ون و دینگ <sup>۷</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> on S/S plate	تضعیف حدود ۲۰ درصد	بهبود تا ۵۰ درصد	[۱۲]، ۲۰۰۵	بنگ و چانگ <sup>۸</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> on S/S plate	بهبود	-	[۱۳]، ۲۰۰۷	دینگ و همکاران <sup>۹</sup>
carbon nanotubes on S/S tube	بهبود تا ۲۹ درصد	-	[۱۴]، ۲۰۰۷	پارک و جانگ <sup>۱۰</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> on S/S wire	تضعیف	بهبود تا ۸۰ درصد	[۱۵]، ۲۰۰۷	کیم و همکاران <sup>۱۱</sup>
ZrO <sub>2</sub> on Cu surface	بدون تغییر	-	[۱۶]، ۲۰۰۷	چوپکار و همکاران <sup>۱۲</sup>
CuO, SiO <sub>2</sub> on Cu plate	تضعیف	بهبود	[۱۷]، ۲۰۰۸	لیو و لایو <sup>۱۳</sup>
TiO <sub>2</sub> /R-141b on Cu plate	تضعیف	-	[۱۸]، ۲۰۰۹	تریساکسری و وونگ ویس <sup>۱۴</sup>
CuO/R-113	بهبود تا ۳۰ درصد	-	[۱۹]، ۲۰۰۹	پنگ و همکاران <sup>۱۵</sup>
Cu	بهبود	-	[۲۰]، ۲۰۱۰	بودو و همکاران <sup>۱۶</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /water and CMC on S/S heater	بهبود تا ۲۵ درصد	-	[۲۱]، ۲۰۱۰	سلطانی و همکاران
CNT on Cu plate	بهبود	بهبود	[۲۲]، ۲۰۱۰	لیو و همکاران <sup>۱۷</sup>
TiO <sub>2</sub> on Cu surface	بهبود تا ۱۵ درصد	-	[۲۳]، ۲۰۱۰	سوئیپوونگ و وانگ ویس <sup>۱۸</sup>
TiO <sub>2</sub> on Al surface	تضعیف	-	[۲۳]، ۲۰۱۰	سوئیپوونگ و وانگ ویس
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO and diamond on Cu plate	بدون تغییر	بهبود	[۲۴]، ۲۰۱۰	کوارک و همکاران <sup>۱۹</sup>
CNT on copper	تضعیف	بهبود تا ۱۵۰ درصد	[۲۵]، ۲۰۱۱	پارک و همکاران
Diamond and silica on Upward indium-tin-oxide surface	۵۰ درصد تضعیف	۱۰۰ درصد بهبود	[۲۶]، ۲۰۱۱	جرارد و همکاران <sup>۲۰</sup>
ZnO on Copper cylindrical block	بهبود تا ۲۲ درصد	بهبود تا ۱۱۷ درصد	[۲۷]، ۲۰۱۲	کول و دی <sup>۲۱</sup>
Silica on Nichrome wires and ribbons	بهبود تا ۱۹۰ درصد	بهبود تا ۲۷۰ درصد	[۲۸]، ۲۰۱۳	واز کوئر و کومار <sup>۲۲</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> on Flat plate	تضعیف تا ۴۰ درصد	بهبود تا ۴۷ درصد	[۲۹]، ۲۰۱۳	شاهمرادی و همکاران
CNT on Flat plate	بهبود	بهبود ۲۷۴ درصد	[۳۰]، ۲۰۱۴	امیری و همکاران
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ethylene-glycol/water	بهبود تا ۶۴ درصد	-	[۳۱]، ۲۰۱۴	محمدی فرد و همکاران



نانوذرات در سیال می‌گردد را می‌توان با توجه به اینکه ذرات به سطح می‌چسبند تا ته‌نشین شوند، رد نمود. با چسبیدن ذرات به سطح، یک لایه متخلخل ایجاد می‌شود که می‌تواند سبب تغییر در زبری سطح و در نتیجه تعداد سایت‌های فعال هسته‌زایی شود و همچنین موجب تغییر در تعادل نیروها در خط تماس سه فاز، ترشوندگی سطح، ایجاد نیروی موئینگی زیر حباب و بهبود زوایای تماس پسر و پیشرو گردد.

البته سه پارامتر زبری، تخلخل و ترشوندگی که در تحقیقات جدید به‌عنوان موثرترین پارامترها در فرایند جوشش فرض شده‌اند، در این حالت به‌صورت وابسته به یکدیگر تغییر می‌نمایند. در تحقیقات اخیر، آثار مستقل این پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است [۳۴]. مشخصه‌های سطح گرمکن می‌تواند با افزایش ضخامت لایه متخلخل در طول گذر زمان در فرایند جوشش بهبود یابد. ضخامت و ساختار لایه متخلخل به غلظت و مشخصات نانوذره، دمای سطح، نرخ تبخیر، شار حرارتی و زمان و جهت فرایند بستگی دارد. در شکل ۴ تصاویر نشست برخی ذرات روی سیم پس از فرایند جوشش نمایش داده شده است.

#### ۴. پارامترهای مؤثر در فرایند جوشش نانوسیالات

دو عامل مهم در پدیده جوشش نانوسیالات به‌صورت تشکیل لایه متخلخل و زبر نانوذرات روی سطح گرمکن و تأثیر حرکت نانوذرات بر ایجاد حباب و جابه‌جایی آنها می‌باشد. این دو عامل آثار مخالفی بر پدیده جوشش دارند. ذرات معلق در برابر حرکت حباب و جابه‌جایی سیال مقاومت می‌نمایند و این سبب کاهش عملکرد جوشش می‌گردد. از طرف دیگر، ایجاد سطح متخلخل روی گرمکن سبب ترشوندگی بیشتر سطح می‌شود. بدین منظور، بایستی دو عامل مهم در پدیده جوشش نانوسیالات که تشکیل لایه متخلخل و زبر نانوذرات روی سطح گرمکن و تأثیر حرکت نانوذرات بر ایجاد حباب و جابه‌جایی آنها می‌باشد، مورد بررسی قرار گیرد. روابط نظری با استفاده از

تصحیح روابط جوشش سیالات عادی سیال بدون ذرات نانو، با صحنه‌گذاری توسط آزمایش ارائه شده است [۳۶]. در این روابط، عوامل مؤثر در جوشش استخری نانوسیالات به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱. چگالی هسته‌های فعال جوشش وابسته به:

الف) تعداد حفره‌ها که از زبری سطح حاصل می‌شود

ب) ترشوندگی سطح که در فعالیت حفره‌ها تأثیرگذار است

ج) میزان سوپرهیت دیواره که حداقل قطر حفره‌ها برای جوشش را مشخص می‌نماید

۲. ضخامت لایه نانوذرات چسبیده روی سطح گرمکن

به‌صورت مقاومت رسانی در برابر انتقال حرارت

۳. جهت ایجاد گرما (افزایش یا کاهش شارهای حرارتی)

۴. زمان نگهداری در هر مرحله شار و خواص ترموفیزیکی

مؤثر نانوسیال در فرایند جوشش استخری

در ادامه اثر این عوامل بررسی می‌گردد.

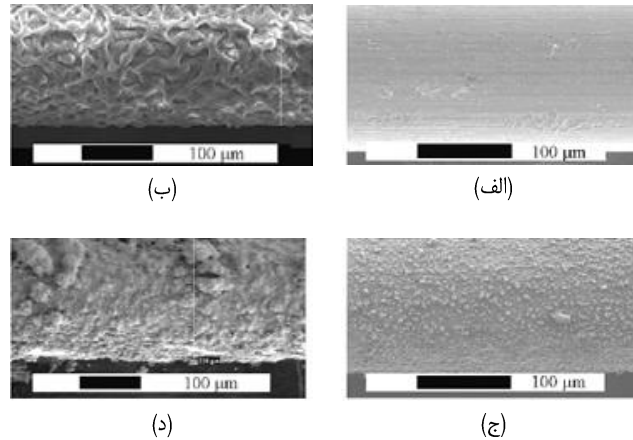
#### ۱-۴. اثر نانوذرات بر چگالی سایت‌های هسته‌زایی

##### فعال

چگالی سایت‌های هسته‌زایی فعال نقش مهمی در انتقال حرارت جوششی دارد. در حالت کلی، این چگالی به پارامترهای زبری سطح، ترشوندگی، سوپرهیت دیواره، خواص ترموفیزیکی سطح و سیال وابسته است. زبری و ترشوندگی، پارامترهای وابسته به یکدیگرند و بررسی تأثیر مستقل آنها بر چگالی هسته‌ها مشکل است. با افزایش ترشوندگی، احتمال پر شدن سایت‌های هسته‌زایی با سیال افزایش یافته و بنابراین چگالی هسته‌های فعال، کاهش می‌یابد. تقویت یا تضعیف انتقال حرارت جوششی نانوسیال به نسبت اندازه ذرات به زبری سطح بستگی دارد. با توجه به این پارامتر، ذرات می‌توانند سطوح حفره‌ها را تقسیم نمایند (چند بخش شدن هسته‌های جوشش و در نتیجه افزایش انتقال حرارت) و یا در حالت دیگر مراکز تشکیل حباب را پر نمایند (کاهش هسته‌های جوشش و تضعیف انتقال حرارت) [۳۷].

برای سطوح گرمکن زبر، رسوب ذرات سبب افزایش میزان ترشوندگی می‌گردد. در غلظت‌های پایین نانوذرات (کمتر از ۰/۵ درصد)، میزان ترشوندگی سطوح زبر با افزایش سوپرهیت دیواره به دلیل افزایش فرکانس جدایش حباب‌ها

و به دنبال آن افزایش نرخ رسوب ذرات افزایش می‌یابد. در غلظت‌های حجمی بیشتر، این فرایند عکس می‌شود و با افزایش سوپرهیت دیواره، ترشوندگی کاهش می‌یابد. کاهش ترشوندگی نشان از کاهش زبری سطح دارد.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از نشست نانوذرات روی سیم پس از فرایند جوشش (الف) سیم معمولی، (ب) اکسید تیتانیوم، (ج) اکسید سیلیسیم، (د) نقره [۳۵]

در سطوح گرمکن صاف، رسوب نانوذرات سبب افزایش زاویه تماس می‌شود. وجود هسته‌های جوشش کمتر سطوح صاف در مقایسه با سطوح زبر، تغییر ترشوندگی کمتری را در غلظت‌های پایین نتیجه می‌دهد. در عوض در غلظت‌های بیشتر نانوذرات، افزایش بیشتر ترشوندگی در دمای سوپرهیت بیشتر دیواره مشاهده می‌گردد. افزایش چگالی نقاط فعال با افزایش غلظت نانوذرات فقط در مقادیر پایین سوپرهیت دیواره دیده می‌شود. در مقادیر بالاتر، افزایش غلظت نانوذرات سبب کاهش چگالی نقاط فعال می‌گردد. چگالی هسته‌های جوشش با رسوب نانوذرات بر روی سطح زبر پوشیده شده با نانوذرات افزایش می‌یابد، اما روی سطح صاف کم می‌شود. آزمایشات نشان می‌دهد جوشش نانوسیال در سطح صاف اغلب عملکرد انتقال حرارتی ضعیف‌تری دارد [۳۸]. کوارک و همکارانش اذعان داشتند غلظت بهینه نانوذرات که در آن شار بحرانی بیشینه می‌گردد و کاهش در انتقال حرارت جابه‌جایی جوشش

ایجاد نمی‌نماید، ۰/۰۲۵ می‌باشد که منطبق بر داده‌های دیگر مطالعات می‌باشد [۲۴].

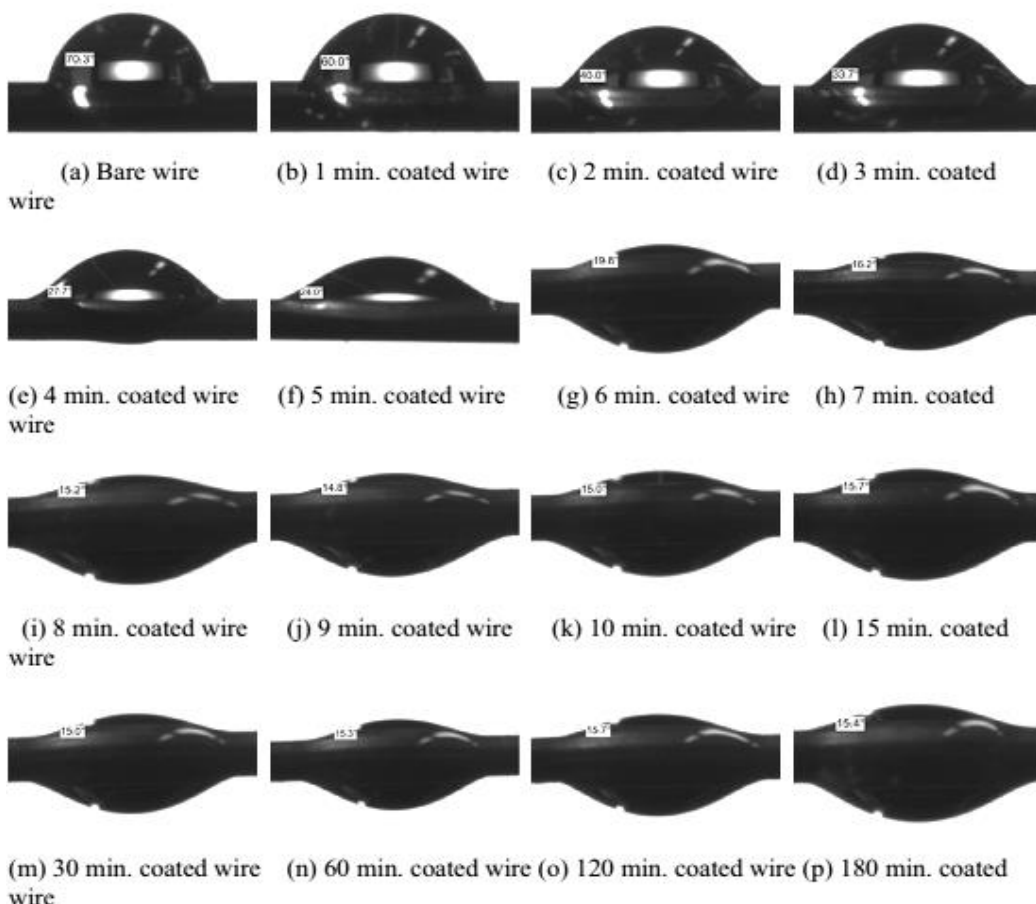
## ۲-۴. اثر جهت اعمال شار، زمان و نرخ فرایند جوشش

دو عامل مهم که به دلیل فرض فرایند حالت پایدار در اغلب آزمایشات جوشش سیال نادیده گرفته می‌شود، زمان هر فرایند جوشش و جهت شار ورودی برای یافتن منحنی جوشش می‌باشد. زمان فرایند در هر مقدار شار بر ضخامت لایه نانوذرات ایجاد شده روی سطح و در نتیجه بر عملکرد انتقال حرارت در آن سطح انرژی تأثیر می‌گذارد. در شکل ۴، کاهش زاویه تماس استاتیکی قطره روی سیم با افزایش زمان‌های مختلف قرارگیری تحت جوشش نانوسیال قرار گرفته، نشان داده شده است. نرخ افزایش شار حرارتی نیز با توجه به تأثیر در زمان فرایند می‌تواند در نشست نانوذرات اثر داشته باشد. در شکل ۵ میزان نشست نانوذرات در



است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شارهای بیشتر و نرخ‌های پایین‌تر، نشست نانوذرات افزایش یافته است.

شارهای حرارتی مختلف (به‌صورت درصدی از شار حرارتی بحرانی) و نرخ‌های افزایش شار متفاوت نمایش داده شده



شکل ۴. کاهش زاویه تماس قطره روی سیم با افزایش زمان جوشش نانوسیال [۳۹]

ورود به حفره‌ها دارند. به‌همین دلیل پیشنهاد شده است روند کاهش شار در آزمایش جوشش به‌کار گرفته شود [۴۱]. عملکرد جوشش روی سطوح پوشیده‌شده توسط نانوذرات به‌دلیل پدیده هیستریزیس در طول زمان تغییر و کاهش می‌یابد.

**۳-۴. اثر پایداری محلول نانوسیالات بر جوشش**  
افزودن واکنش‌دهنده سطحی به‌منظور پایداری بیشتر نانوذرات در سیال، منجر به تغییرات کشش سطحی، لزجت و ترشوندگی می‌گردد که تحلیل نتایج آزمایشات را مشکل می‌سازد؛ زیرا هر واکنش‌دهنده سطحی خواص خاص خود

جهت شار به‌معنای ترتیب افزایش یا کاهش شار حرارتی می‌باشد. پسماند جوشش همان‌طور که قبلاً در جوشش سیالات خالص هم مشاهده شده است، در جوشش نانوسیالات نیز اتفاق می‌افتد که بر فرایند مؤثر است. این پدیده در تفاوت منحنی جوشش در دو حالت افزایش شار و کاهش شار دیده می‌شود. تئوری پسماند جوشش بیان می‌نماید که تمام مراکز هسته‌زایی که در افزایش شار از مقدار کم به زیاد فعال می‌شوند، در جهت عکس تغییرات شار، غیرفعال نمی‌شوند. ظاهراً این به‌دلیل نفوذ مایع در مراکز هسته‌زایی می‌باشد. سیالات با ترشوندگی بالا بیشتر تحت تأثیر هیستریزیس می‌باشند؛ زیرا احتمال بیشتری در



را دارد که بایستی با تجهیزات دقیق بررسی شود. به همین دلیل در اغلب آزمایشات جوشش نانوسیالات به دلیل اهمیت خواص سطحی ذرات، برای پایدارسازی محلول از واکنش‌دهنده سطحی استفاده نمی‌شود. فاکتورهای زیادی چون زمان، دما، غلظت، نوع ذرات، محیط حل، میزان اسیدی بودن در پایداری محلول تأثیرگذار می‌باشد که پایدارسازی ضعیف می‌تواند به انتقال حرارت ضعیف منجر شود. همچنین یکنواخت نبودن پایداری محلول در تمام آزمایشات می‌تواند دلیلی بر تکرارناپذیر شدن آزمایشات و تفاوت نتایج محققان گردد. همچنین طبیعت هر محلول نانوسیال بسته به نانوذره مورد نظر و همچنین جنس گرمکن می‌تواند این تفاوت را ایجاد نماید [۴۲]. بنابراین با توجه به اینکه استفاده از واکنش‌دهنده‌های سطحی، عملکرد انتقال حرارت جوششی را برهم می‌زند و حتی ممکن است محیط انتقال حرارت را آلوده سازد، پیشنهاد می‌گردد واکنش‌دهنده مناسب در غلظت بهینه انتخاب گردد تا خواص حرارتی را بدون تأثیر بر پایداری بهبود بخشد.

#### ۴-۴. اثر خواص حرارتی انتقالی نانوسیال بر جوشش

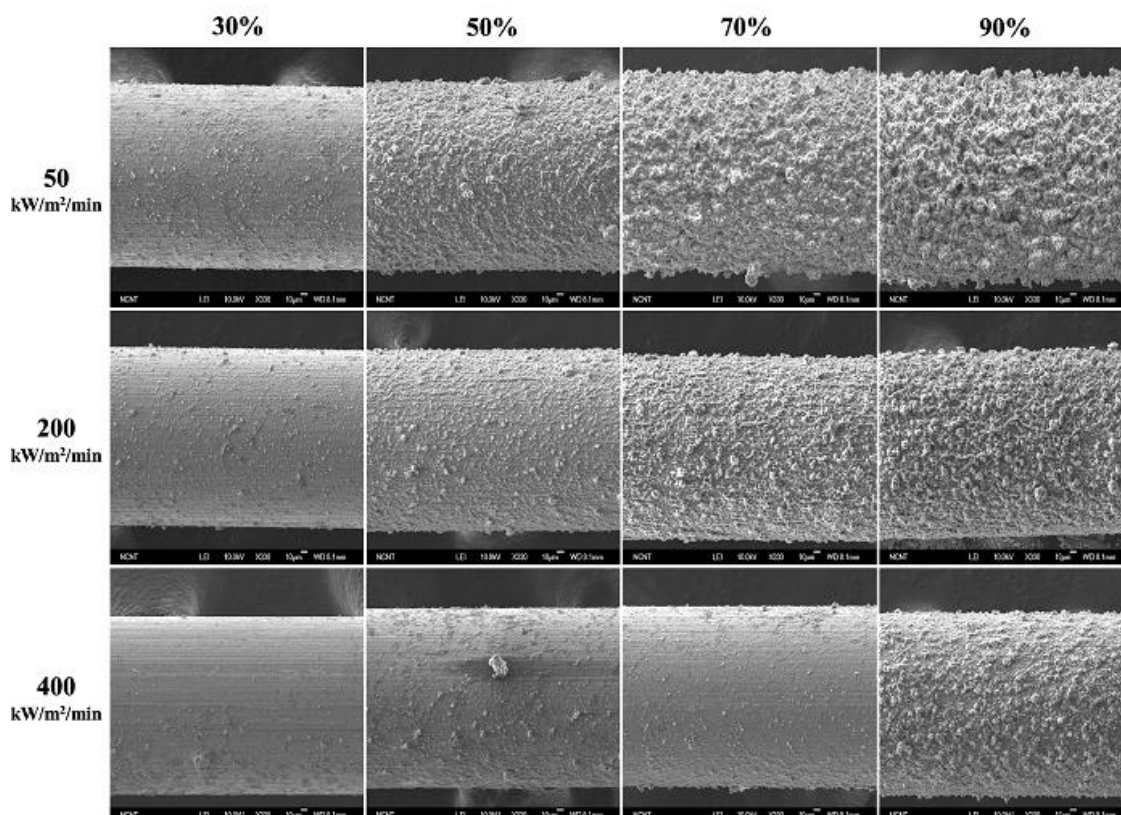
خواص حرارتی انتقالی نانوسیالات مانند رسانش حرارتی، چگالی، گرمای ویژه، لزجت و کشش سطحی نقش مهمی در بهبود انتقال حرارت تک‌فاز دارند. جالب است که بنابر اغلب تحقیقات، بهبود این خواص در نانوسیالات تأثیر چندانی بر عملکرد جوشش استخری ندارند. اگرچه برخی محققان در غلظت‌های کم، تأثیراتی را مشاهده نموده‌اند [۴۳].

#### ۴-۵. اثر ترشوندگی بر انتقال حرارت جوششی

مشاهدات جوشش نانوسیالات منجر به طرح سؤال در مورد تأثیر ترشوندگی سطح روی سازوکار جوشش هسته‌ای شده است. تاکنون پیش‌بینی‌های زیادی برای این تأثیر

توسط مدل‌های کلاسیک به‌عمل آمده است [۴۴-۴۵]. اما داده‌های آزمایشی زیادی جهت صحت‌سنجی موجود نمی‌باشد؛ زیرا تغییر زاویه تماس به‌طوری‌که تمامی پارامترهای دیگر ثابت بماند، مشکل است. تقویت میزان ترشوندگی (کاهش زاویه تماس) را می‌توان با توجه به معادله اصلاح‌شده یانگ به دو عامل افزایش کشش چسبندگی و افزایش زبری سطح (سطح مؤثر تماس سیال - جامد) نسبت داد. تأثیر هر دو عامل بر کاهش زاویه تماس سیال از یک مرتبه می‌باشد [۳۳]. یک روش قدیمی برای بهبود زاویه تماس سیال، استفاده از محلول‌های سطحی می‌باشد. ون دریافت که افزودن سرفکتانت می‌تواند با تغییر ترشوندگی سطح سبب بهبود جوشش گردد [۴۶]. عیب این روش در تغییر همزمان ترشوندگی سطح و کشش سطحی است. بنابراین بهبود جوشش می‌تواند به دلیل کاهش زیاد کشش سطحی نسبت به افزایش ترشوندگی سطح نیز باشد. استفاده از اکسید مس که می‌تواند ترشوندگی سطح را با کنترل مقدار اکسید شدن سطح تغییر دهد نیز روش دیگری برای سنجش تأثیر ترشوندگی است. با این روش، لیاو دریافت که در یک شار حرارتی مشخص، نسبت حجمی بخار نزدیک سطح گرمکن با افزایش زاویه تماس، افزایش می‌یابد، در حالی که ماکزیمم شار حرارتی کاهش می‌یابد [۴۷]. اگرچه اکسید مس توپوگرافی میکرومقیاس سطح را هم که مقیاس مشخصه سایت‌های جوششی می‌باشد، تغییر می‌دهد. روش دیگر که توسط تاکاتا به‌کار گرفته شد، استفاده از فوتوکاتالیست اکسید تیتانیوم بود [۴۸]. وقتی سطح پوشانده شده با اکسید تیتانیوم در معرض تابش فرابنفش قرار بگیرد، کاهش قابل توجه در زاویه تماس حاصل می‌گردد. با این خاصیت، سطوح آب‌دوستی که مشخصه‌های انتقال حرارتی‌شان بهتر از سطوح بدون پوشش بود، ساخته شد. فقط این سطح دارای محدودیت بازه زوایای تماس و پایداری است. زاویه تماس بین صفر تا ۲۰ درجه تغییر نموده و ناپایداری نیز در طول آزمایش مشاهده می‌گردد.





شکل ۵. کاهش زاویه تماس قطره روی سیم با افزایش زمان جوشش نانو سیال [۴۰]

این پوشش غیرپیوسته، ایجاد لایه بخار روی سطح به تأخیر می‌افتد. جنس نانوذرات نیز روی میزان ترشوندگی سطح اثرگذار است. اکسیدهای فلزی، ترشوندگی بیشتری نسبت به فلزات دارند. مواد غیرفلزی عموماً آب‌گریز می‌باشند. در شکل ۶ زاویه تماس قطره روی سطوحی که نانوذرات مختلف روی آن نشانده شده، اندازه‌گیری شده است. به‌طور خلاصه، ترشوندگی سطح پارامتر مهمی در جوشش غیرهمگن است. مطالعات زیادی درخصوص بررسی تأثیر این پارامتر انجام شده است. اگرچه روش‌های مطالعه‌شده برای بهبود ترشوندگی محدودیت‌هایی دارد؛ از جمله اینکه منجر به بهبود دیگر پارامترهای مؤثر مانند توپوگرافی میکرومقیاس و نیروی کشش سطحی و همچنین ناپایداری در زاویه تماس می‌گردد. علاوه بر این، کمبود آزمایشات با مجموعه زیادی از زوایای تماس، فهم کلی این پارامتر را با مشکل مواجه می‌نماید. به‌تازگی مدلی ارائه شده است که شار حرارتی بحرانی و مشخصه‌های

اغلب آزمایش‌ها در انتقال حرارت جوششی مربوط به سطوح ترشونده است. در چند مطالعه سازوکار جوشش هسته‌ای روی سطوح غیرترشونده نیز مطالعه شده است. گریفیس آزمایشی روی حفره‌ای به قطر ۸۰ میکرومتر که توسط فشار سوزن روی سطح ایجاد شده بود، انجام داد [۴۹] و دریافت که حفره غیرترشونده، که با پارافین پوشش داده شده بود، پایداری بیشتری در انتقال حرارت نسبت به نوع ترشونده آن دارد. سطوح حفره پوشش داده شده در دمای سوپرهیت کمتری فعال شده و مدت زمان طولانی‌تری فعال می‌ماندند. اگرچه ضریب انتقال حرارت به‌طور قابل توجهی در حالتی که تمام سطح پوشش داده شده بود، کاهش یافت که به‌دلیل پیوستن حباب‌ها و ایجاد لایه بخار است. هامل روی سطح فولاد ضدزنگ که روی آن تفلون اسپری شده بود، نقاطی به قطر ۲۵۰ میکرومتر یا کمتر با چگالی ۳۰ تا ۶۰ نقطه در سانتی‌مترمربع ایجاد کرد [۵۰]. وی بهبود انتقال حرارت در جوشش آب را مشاهده نمود. با

انتقال حرارت آزمایشات جوشش نانوسیالات گذشته را پیش‌بینی می‌نماید [۵۲].

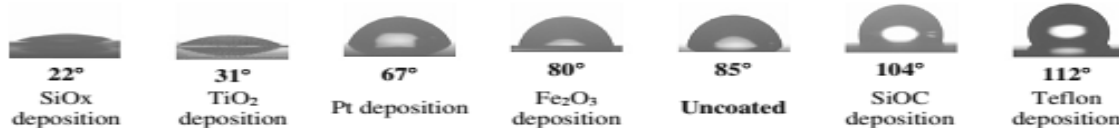
## ۵. تجهیزات مورد نیاز

از جمله عوامل مهم در بررسی تأثیر نانوسیالات بر جوشش، استفاده از تجهیزات دقیق و پیشرفته به‌منظور بررسی تمامی پارامترهایی است که در بررسی‌های اولیه روی فرایند جوشش تأثیرگذار است. هنوز هم پارامترهایی چون تأثیر خواص لایه سیال در فصل مشترک نانوذره و سیال، خواص فیزیکی محلی نانوسیال و تأثیر سورفکتانت و جز این‌ها برای محققان مجهول می‌باشد که نیازمند توسعه تجهیزات آزمایشگاهی در آینده نزدیک است. تجهیزات متداول موردنیاز برای تعیین مشخصه‌های سطح گرمکن و نانوذرات عبارت‌اند از: اندازه‌گیری پروفیل زبری سطح با میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۲۳</sup> یا میکروسکوپ الکترونی<sup>۲۴</sup>؛ اندازه‌گیری سایز نانوذرات با زتاسایزر<sup>۲۵</sup> یا تفرق دینامیک نور<sup>۲۶</sup>؛ مشاهده شکل ذرات با میکروسکوپ الکترونی<sup>۲۷</sup> و میزان ترشوندگی با عکس‌برداری از یک قطره روی سطح<sup>۲۸</sup>. تجهیزات موردنیاز برای تعیین خواص نانوسیال نیز عبارت‌اند از اندازه‌گیری رسانش حرارتی نانوسیال بر اساس نظریهٔ سیم داغ با تجهیزات 3-Omega ، Lambda

meter و KD2 probe؛ اندازه‌گیری لزجت سینماتیک با U-tube capillary viscometer؛ اندازه‌گیری لزجت دینامیک با CVO rheometer و نهایتاً دستگاه لرزانندهٔ فراصوت به‌منظور آماده‌سازی محلول نانوسیال پایدار.

## ۶. نتیجه‌گیری

براساس بررسی کارهای انجام‌شده تاکنون، عدم دسترسی به تجهیزات پیشرفته، هزینهٔ بالای آزمایشات، عدم اتفاق نظر در مورد سازوکارهای افزایش یا کاهش انتقال حرارتی جوششی، کمبود اطلاعات در اغلب کارهای آزمایشی گذشته و پیچیدگی خود فرایند جوشش سیال خالص و جز این‌ها مانع از ارائهٔ رابطه‌ای برای توصیف این فرایند و پیش‌بینی کاربرد عملی نانوسیالات برای بهبود جوشش می‌گردد. همچنین به‌دلیل طبیعت گذرای فرایند جوشش نانوسیال و تشکیل لایهٔ سطحی برحسب زمان، استفاده از نانوسیالات در اغلب کاربردها غیرعملی است. اما در عمل سطوح زبرشده با نانوذرات حتی با سیال آب خالص می‌تواند گزینهٔ مناسب‌تری باشد؛ زیرا باعث افزایش شار حرارتی بحرانی می‌گردد. در نتیجه استفاده از نانوسیالات به‌عنوان روشی ارزان و ساده برای ایجاد پوششی آب‌دوست روی سطح گرمکن پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۶. زاویهٔ تماس قطره روی سطوح با نانوذرات مختلف نشانده شده [۵۱]

## ۷. مأخذ

- [1] Lu, M. C., *Exploring the Limits of Boiling and Evaporative Heat Transfer Using Micro/Nano Structures*, 2010.
- [2] Sarafraz, M.M., F. Hormozi. "Pool boiling heat transfer to dilute copper oxide aqueous nanofluids." *International Journal of Thermal Sciences* 90, 2015, pp. 224-237.
- [3] Wen, D. "Mechanisms of thermal nanofluids on enhanced critical heat flux (CHF)." *Int J Heat Mass Transf*, vol. 51, 2008, pp. 4958-4965.



- [4] Cho, H. H., B. S. Kim. "Nanotechnology on Boiling Heat Transfer for a Next-generation Cooling Technology." *J Material SciEng*, vol. 1, 2012.
- [5] Das, S. K., N. Putrab, W. Roetzel. "Pool boiling characteristics of nano-fluids." *Int J Heat Mass Transf*, vol. 46, 2003, pp. 851-862.
- [6] Wen, D. "Mechanisms of thermal nanofluids on enhanced critical heat flux (CHF)." *Int J Heat Mass Transf*, vol. 51, 2008, pp. 4958-4965.
- [7] Kim, H. M. Kim. "Experimental study of the characteristics and mechanism of pool boiling CHF enhancement using nanofluids." *Heat Mass Transf*, vol. 45, 2009, pp. 991-998.
- [8] Witharana, S. "Boiling of refrigerants on enhanced surfaces and boiling of nanofluids", *MSc. Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden*, 2003.
- [9] You, S.M., Kim J.H., Kim K.H. "Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer." *Appl. Phys. Lett*, 83:3374-3376, 2003.
- [10] Vassallo, P., R. Kumar, S. D'Amico. "Pool boiling heat transfer experiments insilica-water nanofluids." *Int J Heat Mass Transf*, 47(2):407-411, 2004.
- [11] Wen, D., Y. Ding. "Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based -alumina nanofluids." *J Nanoparticle Res*,7:265-274, 2005.
- [12] Bang, I.C., Heung Chang. "Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -water nanofluids from a plain surface in a pool." *Int J Heat Mass Transf*, 48:2407-2419, 2005.
- [13] Ding, Y., "Heat transfer intensification using nanofluids." *KONA*, 25(25):23-38, 2007.
- [14] Park, K.J., D. Jung. "Enhancement of nucleate boiling heat transfer using carbon nanotubes." *Int J Heat Mass Transf*, 50:4499-4502, 2007.
- [15] Kim, S.J., I.C. Banga, J. Buongiorno. "Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux." *Int J Heat Mass Transf*, 50(19-20):4105-4116, 2007.
- [16] Chopkar, M., A.K. Das, I. Manna, P. K. Das. "Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO<sub>2</sub>-water nanofluids from a flat surface in a pool." *Heat Mass Transf*, 44(8):999-1004, 2007.
- [17] Liu Z.h., Liao, L. "Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling." *Int J Heat Mass Transf*, 51(9-10):2593-2602, 2008.
- [18] Trisaksri, V., S. Wongwises. "Nucleate pool boiling heat transfer of TiO<sub>2</sub>-R141b nanofluids." *Int J Heat Mass Transf*, 52(5-6):1582-1588, 2009.
- [19] Peng, H., G. Dinga, W. Jianga, H. Hua, Y. Gao. "Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube." *Int J Refrigeration*, 32(6):1259-1270, 2009.
- [20] Boudouh, M., Gualous, H.L., Labachelerie, M. "Local convective boiling heattransfer and pressure drop of nanofluid in narrow rectangular channels." *Appl. Therm. Eng.*, 30(17-18):2619-2631, 2010.
- [21] Soltani, S., S.G. Etemad, J. Thibault. "Pool boiling heat transfer of non-Newtonian nanofluids." *Int Commun Heat Mass Transf*, 2010, 37(1):29-33.



- [22] Liu, Z.H., X.F. Yang, J. G. Xiong. "Boiling characteristics of carbon nanotubesuspensions under sub-atmospheric pressures." *Int J ThermSci*,49(7):1156-1164, 2010.
- [23] Suriyawong, A., S. Wongwiset. "Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids at very low concentrations." *ExpTherm Fluid Sci*, 34(8):992-999, 2010.
- [24] Kwark, S.M., Ratan Kumara, Gilberto Morenoa, Jaisuk Yoob, Seung M. You. "Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids." *Int J Heat Mass Transf*, vol. 53, pp. 972-981, 2010.
- [25] Park, Ki-Jung, Dong gyu Kang, Dongsoo Jung. "Nucleate boiling heat transfer in nanofluids with carbon nanotubes up to critical heat fluxes." *JMechSci and Tech* 25 (10) 2647-2655, 2011.
- [26] Gerardi, C., J. Buongiorno, L.W. Hu, T. McKrell. "Infrared thermometry study ofnanofluid pool boiling phenomena." *Nanoscale Res. Lett.* 6, 232–248, 2011.
- [27] Kole, M., T.K. Dey. "Investigations on the pool boiling heat transfer and criticalheat flux of ZnO–ethylene glycol nanofluids." *Appl. Therm. Eng.* 37, 2012, pp. 112-119.
- [28] Vazquez, D.M., R. Kumar. "Surface effects of ribbon heaters on critical heat flux in nanofluid pool boiling." *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 41, 2013, pp. 1–9.
- [29] Shahmoradi, Z., N. Etesami, M.N. Esfahany. "Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis." *Int. Commun. HeatMass Transfer* 47, 2013, pp. 113–120.
- [30] Amiri, A., M. Shanbedi, H. Amiri, S.Z. Heris, S.N. Kazi, B.T. Chew, H. Eshghi. "Pool Boiling Heat Transfer of CNT/Water Nanofluids." *Applied Thermal Engineering*, 2014.
- [31] Mohamadifard, K., S. Z. Heris, M. Honarmand. "Experimental Investigation of Pool Boiling Performance of Alumina/Ethylene-Glycol/Water (60/40) Nanofluids." *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 28, No. 4, 2014, pp. 724-734.
- [32] Wen, D.S., B.X. Wang. "Effects of surface wettability on nucleate pool boiling heat transfer for surfactant solutions." *Int J Heat Mass Transf*, vol. 45, 2002, pp. 1739-1747.
- [33] Barber, J., D. Brutin, L. Tadrist. "A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids." *Nanoscale Research Letters*, vol. 6, 2011, pp. 1-16.
- [34] O'Hanley, H., C. Coyle<sup>1</sup>, J. Buongiorno. "Separate effects of surface roughness, wettability, and porosity on the boiling critical heat flux." *Appl. Phys. Lett.* 103, 2013.
- [35] Kim, H.D., Kim, J., Kim, M.H. "Effect of nanoparticles on CHF in pool boiling of nano-fluids", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 49, 2006, pp. 5070–5074.
- [36] Ganapathy, H., V. Sajith. "Semi-analytical model for pool boiling of nanofluids." *Int J Heat Mass Transf*, vol. 57, 2013, pp. 32-47.
- [37] Jones, B. J., *et al.*, "The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer." *Journal of Heat Transfer*, vol. 131, 2009.
- [38] Narayan, G.P., K.B. Anoop, Sarit K. Das. "Mechanism of enhancement/deterioration of boiling heat transfer using stable nanoparticle suspensions over vertical tubes" *J App Phys*, vol. 102, pp. 7-7-17, 2007.



- [39] Park, Seong Dae, Sung Bo Moon, In Cheol Bang. "Effects of thickness of boiling-induced nanoparticle deposition on the saturation of critical heat flux enhancement." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 78, 2014, pp. 506–514.
- [40] Kim, Hyungdae, Eunho Kim, Moo Hwan Kim "Effect of nanoparticle deposit layer properties on pool boiling critical heat flux of water from a thin wire." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 69, 2014, pp. 164–172.
- [41] Harish, G., V. Emlin, V. Sajith. "Effect of surface particle interactions during pool boiling of nanofluids." *Int J TherSci*, vol. 50, pp. 2318-2327, 2011.
- [42] Taylor, R. A., P. E. Phelan. "Pool boiling of nanofluids: Comprehensive review of existing data and limited new data." *Int J Heat Mass Transf*, vol. 52, pp. 5339-5347, 2009.
- [43] Ahn, H.S., J.M. Kim, M. Kaviany, M.H. Kim. "Pool boiling experiments in reduced graphene oxide colloids, part I: boiling characteristics." *Int. J. Heat Mass Transf.* 74, 501-512, 2014.
- [44] Wang, C. H., V. K. Dhir. "Effect of Surface Wettability on Active Nucleation Site Density During Pool Boiling of Water on a Vertical Surface." *J Heat Transf*, vol. 115, pp. 659-669, 1993.
- [45] Cooper, M.G. "Heat flows rates in saturated pool boiling – a wide ranging examination using reduced properties." *Ad in Heat Transf*, p. 82, 1984.
- [46] Wen D. S., B. X. Wang. "Effects of surface wettability on nucleate pool boiling heat transfer for surfactant solutions." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 1739-1747, 2002.
- [47] Liaw, S. P., V. K. Dhir. "Void Fraction Measurements During Saturated Pool Boiling of Water on Partially Wetted Vertical Surfaces." *J Heat Transf*, vol. 111, pp. 731-738, 1989.
- [48] Takata, Y., S. Hidaka, J.M. Cao, T. Nakamura, H. Yamamoto, M. Masuda. "Effect of surface wettability on boiling and evaporation." *Energy*, vol. 30, pp. 209-220, 2005.
- [49] Griffith, P., D. Wallis. "The Role of Surface Conditions in Nucleate Boiling." Presented at the Third National Heat Transfer Conference A.S.M.E - A.I.Ch.E., Storrs, Connecticut, 1959.
- [50] Hummel, R. L. "Means for increasing the heat transfer coefficient between a wall and boiling liquid", U.S. Patent, 1965.
- [51] Phan, H. T., Nadia Caneya, Philippe Martya, Stéphane Colasson. "Surface wettability control by nanocoating: The effects on pool boiling heat transfer and nucleation mechanism." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 5459-5471, 2009.
- [52] Witharana, S. "Thermal Transport in Nanofluids: Boiling heat transfer." Ph.D Thesis, The University of Leeds, 2011.
- [53] Jingliang Bi, Kambiz Vafai, David M. Christopher, "Heat transfer characteristics and CHF prediction in nanofluid boiling." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 80, 256–265, 2015.

پی نوشت

3. Das et al.
4. Witharana
5. You et al.
6. Vassallo et al.
7. Wen and Ding
8. Bang and Chang
9. Ding et al.
10. Park and Jung
11. Kim et al.
12. Chopkar et al.
13. Liu and Liao
14. Trisaksri and Wongwises
15. Peng et al.

16. Boudouh et al.
17. Liu et al.
18. Suiyawong and Wongwises
19. Kwark et al.
20. Gerardi et al.
21. Kole and Dey
22. Vazquez and Kumar
23. AFM
24. SEM
25. Zetasizer
26. DLS
27. Electron microscopy
28. goniometry

**مرکز آموزش جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر**

**برگزاری کنه:**

**دوره های آموزشی نرم افزارهای طراحی . مهندسی . ساخت و تولید به کمک کامپیوتر**

**دوره های تخصصی مهندسی برق**  
 Protel , Matlab, LabView , Orcad

**دوره های تخصصی مهندسی مکانیک**  
 Catia 5f1, Ansys9 , Carrier, CNC , CadWorx , Auto Plant  
 Matlab, Simulink matlab , piping , Fluent

**دوره های تخصصی مهندسی صنایع**  
 مدیریت و کنترل پروژه , Primavera , MSP , SPSS

**SolidWorks , Pro/E , PowerMILL , powerShape**

- Pro/ENGINEER
- Solid Works
- Auto cad
- Fluent – Gambit
- Mechanical Desktop
- Matlab
- ANSYS
- Surf CAM
- Power MILL
- Edge CAM
- CATIA

**آماده برگزاری دوره های آموزش جهت مراکز ، نهجسات و کارخانجات**

آدرس : خیابان حافظ ، روبروی دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، کوچه آرژانتین ، پلاک ۲  
 فکس : ۸۸۸۰۷۰۰۸ تلفن : ۸۸۸۹۲۱۴۴ ، ۸۸۸۹۵۹۶۹

