



## مطالعه‌ی تجربی شار حرارت بحرانی نانو سیال‌ها در جوشش استخری

اعظم اخوان، حسین کاظمی‌نژاد\*، حسین خلیفی، ابراهیم عطایی

پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

**چکیده:** استفاده از نانو سیال‌ها برای افزایش حاشیه‌ی ایمنی سیستم‌های حرارتی با شار حرارتی بالا مانند نیروگاه‌های هسته‌ای، از طریق بالا بردن شار حرارت بحرانی (CHF) اخیراً مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش، آزمایش جوشش استخری نانو سیال‌های  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در غلظت‌های مختلف با استفاده از سیم نیکل-کرم به قطر ۰٫۲ mm در فشار اتمسفری انجام گرفت. مقایسه‌ی شار حرارت بحرانی نانو سیال‌ها نشان داد که در نانو سیال  $\text{SiO}_2$  با افزایش غلظت به میزان ۰٫۰۵٪ وزنی، شار حرارت بحرانی نسبت به آب خالص به میزان قابل توجهی (۵۶٪) افزایش می‌یابد. تصاویر میکروسکوپی بعد از آزمایش نشان داد که در فرایند جوشش استخری، پوششی از نانوذرات  $\text{SiO}_2$  بر روی سیم ایجاد می‌شود. هم‌چنین نتایج آزمایش آب خالص و سیم‌های پوشش داده شده با نانوذرات در غلظت‌های مختلف از  $\text{SiO}_2$  نشان داد که علت اصلی افزایش شار حرارت بحرانی نانو سیال می‌تواند تغییرات میکروساختاری باشد که به وسیله‌ی پوشش نانوذرات  $\text{SiO}_2$  بر روی سطح سیم تشکیل می‌شوند.

**کلیدواژه‌ها:** نانو سیال، شار حرارت بحرانی، جوشش استخری

## Experimental Studies on CHF Characteristics of Nanofluids at Pool Boiling

A. Akhavan, H. Kazeminejad\*, H. Khalafi, E. Ataeivarjovi

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran-Iran

**Abstract:** The use of nanofluids to increase the safety margin of high heat flux thermal systems in nuclear power plants through the enhancement of the critical heat flux (CHF) has been considered recently by researchers. To investigate the CHF characteristics of nanofluids, pool boiling experiments of nanofluids with various concentrations of  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  nanoparticles were carried out using a 0.2 mm diameter cylindrical Ni-Cr wire under the atmospheric pressure. The results showed that the CHF of  $\text{SiO}_2$  nanofluid is significantly enhanced by 56% compared with that of pure water by increasing the nanoparticle concentration to 0.05 wt%. Microscopic images, subsequent to the CHF experiment of  $\text{SiO}_2$  nanofluid, revealed that nanoparticles are deposited on the wire surface during the pool boiling of the nanofluid. The CHF of pure water was measured on a nanoparticle-coated wire which was produced during the pool boiling experiments of  $\text{SiO}_2$  nanofluids. The results of these experiments showed clearly that the main reason for the CHF enhancement of the nanofluid is the modification of the heating surface by the  $\text{SiO}_2$  nanoparticle deposition during the pool boiling.

**Keywords:** Nanofluids, Critical Heat Flux, Pool Boiling

\*email: hkazeminejad@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۰/۲۲



## ۱. مقدمه

با توجه به اهمیت سیستم‌های خنک‌کننده در ایمنی راکتورهای هسته‌ای، تاکنون تلاش‌های زیادی برای بهبود عملکرد حرارتی و در نتیجه افزایش توان بازدهی آن‌ها صورت گرفته است. یکی از فرایندهایی که موجب بهبود ایمنی راکتورهای هسته‌ای می‌شود، افزایش شار حرارت بحرانی (CHF) است. شار حرارت بحرانی در جوشش، پدیده‌ی ناخواسته‌ای است که موجب افزایش دمای سطح جوشش می‌شود. زمانی که دمای سطح غلاف سوخت افزایش می‌یابد، در دمای بالاتر از دمای شار بحرانی، تجمع حباب‌ها موجب تشکیل لایه‌ی بخار بر روی سطح غلاف، و به دنبال آن آفت شدید انتقال حرارت سیال خنک‌کننده، و در نهایت آسیب جدی به سوخت می‌شود. با توجه به این که در راکتورهای هسته‌ای از آب سبک به جای خنک‌کننده استفاده می‌شود، بنابراین شار حرارت محدودی دارند. از این‌رو امروزه پژوهش‌های گسترده‌ای در حوزه‌ی محاسباتی، شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، به منظور بهبود انتقال حرارت و افزایش شار حرارت بحرانی در راکتورهای هسته‌ای در حال انجام است.

اخیراً پژوهش‌ها نشان داده‌اند که با استفاده از نانو سیال‌ها (سیال پایدار حاوی نانوذرات فلزی یا غیرفلزی) به جای آب خالص و یا بهره‌گیری از سطوح پوشیده شده از نانوذرات در راکتورهای هسته‌ای، افزایش کارایی ترموهیدرولیکی میسر می‌شود و ضمن بالا بردن حاشیه‌ی ایمنی راکتور، آهنگ توان نیز ارتقا می‌یابد [۱-۴]. یو و همکارانش [۵] برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ برای بهبود شار حرارت بحرانی از نانو سیال‌ها استفاده کردند. آن‌ها آزمایش‌های جوشش استخری را با یک سطح مسی  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  در نانو سیال آب-آلومینا با غلظت‌های  $0$  تا  $0.05 \text{ g/L}$  از نانوذرات انجام دادند. نتایج نشان داد که در این شرایط، شار حرارت بحرانی نانو سیال تا سه برابر آب خالص افزایش می‌یابد. اگرچه در این پژوهش، افزایش غیرعادی شار حرارت بحرانی با هیچ یک از مدل‌های موجود شار حرارت بحرانی قابل توجیه نبود. در سال ۲۰۰۴ واسالو و همکارانش [۶]، شار حرارت بحرانی را در محلول  $0.5\%$  سیلیکا با قطر  $15$  تا  $3000 \text{ nm}$  با گرم‌کننده‌ی سیمی شکل از جنس نیکل-کرم با قطر  $0.4 \text{ mm}$  در فشار اتمسفری مطالعه کردند. نتایج، افزایش قابل توجهی را در شار حرارت بحرانی محلول نسبت به آب نشان داد. در این

آزمایش، لایه‌ی نازک تشکیل شده از سیلیکا بر روی سطح سیم، نشان‌دهنده‌ی احتمال برهم‌کنش بین نانو سیال و سطح سیم در شارهای حرارتی بالا بود. بنگ و چنگ [۷] آزمایش‌های جوشش استخری را بر روی نانو سیال‌های با غلظت حجمی  $0$  تا  $0.4$  از نانوذرات آلومینا با استفاده از گرم‌کننده‌ی تخت افقی در فشار اتمسفری انجام دادند و دریافتند که شار حرارت بحرانی نانو سیال‌ها در هر دو شرایط گرمایی افقی و عمودی افزایش پیدا می‌کنند. آن‌ها از روی تغییراتی که در سطح گرم‌کننده قبل و بعد از آزمایش ایجاد شده بود نتیجه گرفتند که افزایش شار حرارت بحرانی احتمالاً به پوشش نانوذرات تشکیل شده بر روی سطح گرم‌کننده مربوط می‌شود. میلیووا و کوما [۸] انتقال حرارت جوشش استخری را در نانو سیال سیلیکا با گرم‌کننده سیمی نیکل-کرم با قطر  $0.32 \text{ nm}$  در فشار اتمسفر مطالعه، و اثر نمک‌ها و اندازه ذرات سیلیکا را بر روی شار حرارت بحرانی بررسی کردند. آن‌ها با کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به دست آمده از روی سطح گرم‌کننده ادعا کردند که تخلخل سطح موجب افزایش شار حرارت بحرانی شده است. اخیراً کیم و همکارانش [۹، ۱۰] آزمایشی را انجام دادند که تأثیر سطح پوشش داده شده با نانوذرات را روی شار حرارت بحرانی نشان می‌دهد. آن‌ها آزمایش را در نانو سیال  $\text{TiO}_2$  بر روی گرم‌کننده‌ی سیمی شکل افقی انجام دادند. افزایش شار حرارت بحرانی در گرم‌کننده‌ی پوشش داده شده با نانوذرات در آب خالص نشان داد که علت اصلی افزایش شار حرارت بحرانی، تغییر خواص سطح گرم‌کننده به علت نشست نانوذرات بر روی سطح آن است، اگرچه این گروه نتوانستند سازوکار افزایش شار حرارت بحرانی را بدون ویژگی‌های کمی گرم‌کننده توجیه کنند. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی برای ارتباط دادن تئوری شار حرارت بحرانی و نتایج تجربی حاصل در نانو سیال‌ها انجام شده است، اما با توجه به پیچیدگی‌هایی که این پدیده دارد و فاکتورهای گوناگونی که روی آن اثر می‌گذارد، تاکنون یک تئوری مطمئن که به کمک آن بتوان رفتار نانوذرات تشکیل شده بر روی سطح سیم را در افزایش شار حرارت بحرانی توضیح داد هنوز درج نشده است [۱۱].

از آن‌جا که در خصوص بررسی اثر نانو سیال‌ها در شار حرارت بحرانی با هدف استفاده در راکتورهای هسته‌ای در داخل



شکل ۱. دستگاه اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی.

گسیخته می‌شود، ولتاژ و جریان ثبت، و شار حرارت بحرانی از طریق داده‌های به دست آمده درست قبل از افزایش شدید مقاومت گرم‌کننده از طریق معادله‌ی (۱) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$Q_{CHF} = V_{max} I_{max} / \pi D L \quad (1)$$

در این رابطه  $Q_{CHF}$  شار حرارتی بحرانی برحسب وات،  $I_{max}$  به ترتیب جریان و ولتاژ بیشینه برحسب آمپر و ولت،  $L$  و  $D$  به ترتیب طول و قطر سیم نیکل-کرم برحسب متر است.

### ۳.۲ تهیه‌ی نانو سیال‌ها

با افزودن مقادیر مشخص از هر یک از نانوپودرهای  $SiO_2$ ،  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  به آب دیونیزه، نانو سیال‌ها با درصد‌های وزنی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۰/۰۵، در آب دیونیزه تهیه شدند. به منظور توزیع یکنواخت ذرات در محلول، هر یک از نمونه‌ها با همگن‌ساز به مدت ۳۰ min و با سرعت ۱۵۰۰۰ rpm هم زده شد.

### ۴.۲ اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی آب در فشار اتمسفری و

#### دمای اشباع

برای اندازه‌گیری شار حرارتی بحرانی آب خالص در فشار اتمسفری و دمای اشباع، مقدار ۱L آب دیونیزه در بشر ریخته شد. پس از جوشیدن آب (دمای  $96^\circ C$ )، ولتاژ به صورت آهسته

کشور مطالعات تجربی انجام نشده است، در این پژوهش، ابتدا یک سیستم آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی در جوشش استخری سیال طراحی و ساخته شد. سپس شار حرارت بحرانی آب خالص و نانوسیال‌های  $SiO_2$ ،  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  اندازه‌گیری، و اثر لایه نشانی نانوذرات  $SiO_2$  بر روی سطح سیم به منظور افزایش آن بحث و بررسی شده است.

## ۲. بخش تجربی

### ۱.۲ مواد و تجهیزات

در این پژوهش، نانوذرات  $SiO_2$  و  $TiO_2$  به ترتیب با میانگین اندازه‌ی ذرات ۲۰ و ۲۱nm ساخت شرکت Degussa آلمان، نانوذرات  $Al_2O_3$  با میانگین ذرات ۲۵ nm تهیه شده در داخل کشور، میکروسکوپ نوری مدل Nikon، منبع تغذیه (با حداکثر جریان ۲۰A و حداکثر ولتاژ ۴۰V)، دو الکتروود مسی به فاصله‌ی ۸cm، مخزن شیشه‌ای، گرم‌کننده (سیم نیکل-کرم) با قطر ۰/۲mm، ترموکوپل، همزن مکانیکی با دور بالا و مبرد شیشه‌ای استفاده شدند.

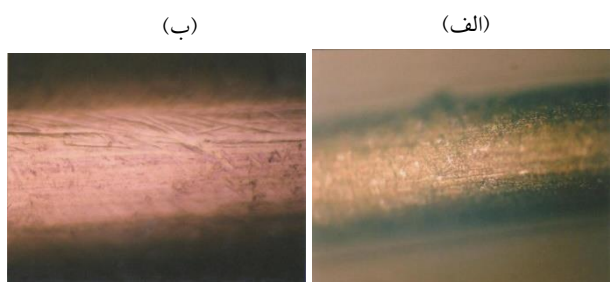
### ۲.۲ طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری شار حرارتی بحرانی

دستگاه ساخته شده برای اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی در شکل ۱ نمایش داده شده است. دستگاه شامل یک مخزن شیشه‌ای به حجم ۲L با درپوش تفلونی است. سیال با استفاده از یک گرم‌کننده‌ی برقی گرم می‌شود. مبرد رفلاکس در قسمتی از درپوش قرار داده می‌شود تا از خروج بخار آب جلوگیری کند و مانع تغییر غلظت محلول در طول جوشش شود. با توجه به این که سر مبرد باز است، فشار مخزن، فشار اتمسفری خواهد بود. یک سیم نیکل کرمی با قطر ۰/۲mm که به طور افقی در مخزن قرار می‌گیرد برای سطح جوشش استفاده می‌شود. دو انتهای سیم به الکتروودهای مسی که به فاصله ۸cm از هم قرار گرفته‌اند وصل، و الکتروودها به منبع تغذیه متصل می‌شوند. پس از رسیدن دمای سیال به دمای اشباع، آزمایش انجام می‌شود. نحوه‌ی انجام آزمایش به این صورت است که ولتاژ از طریق پیچ روی منبع تغذیه به گرم‌کننده‌ی سیمی منتقل می‌شود. با افزایش ولتاژ، هنگام رسیدن به شار حرارتی بحرانی، مقاومت گرم‌کننده افزایش شدیدی پیدا می‌کند و لحظه‌ای که گرم‌کننده سیمی



با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده برای شار حرارت نانو سیال‌ها، می‌توان دریافت که در بین سه نوع نانو سیال  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در غلظت‌های مختلف، نانو سیال  $\text{SiO}_2$  بیش‌ترین افزایش را در غلظت ۰/۰۵٪ برای شار حرارت بحرانی نشان می‌دهد. از این نظر ادامه‌ی بررسی‌ها بر روی نانو سیال  $\text{SiO}_2$  صورت گرفت.

برای بررسی علت افزایش شار حرارت بحرانی نانو سیال  $\text{SiO}_2$ ، تصویر میکروسکوپی از سطح سیم در غلظت ۰/۰۵٪ از نانو سیال که بیش‌ترین تغییر را نشان داده بود گرفته شد. تصاویر سیم نیکل-کرم پس از گسیخته شدن در آب دیونیزه در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در فرایند جوشش استخری، لایه‌ی نازکی از نانوذرات بر روی سطح سیم تشکیل شده است. سازوکار تشکیل این لایه را می‌توان به تبخیر میکرو لایه‌ی حباب‌های بخار در اثر جوشش نسبت داد. به این ترتیب که با رشد تدریجی حباب‌های بخار بر روی سطح گرم‌کننده، نانوذرات حاصل از مایع تبخیر شده، بر روی سطح بر جای می‌مانند و در نهایت در پایه‌ی حباب‌ها تغلیظ می‌شوند و میکرو لایه را تشکیل می‌دهند. زمانی که میکرو لایه تبخیر می‌شود، نانوذرات بر جای می‌مانند و به سطح گرم‌کننده می‌چسبند. در نتیجه پوششی از نانوذرات با گذشت زمان بر روی سطح تشکیل می‌شود. علت افزایش شار حرارت بحرانی در نانو سیال  $\text{SiO}_2$  را می‌توان به تغییر در میکروساختار، توپوگرافی سطح در اثر نشست نانوذرات بر روی سطح سیم، و در نهایت تغییر در سازوکار عملکرد جوشش سطح نسبت داد. با توجه به سازوکارهای پیشنهاد شده، تشکیل این لایه با افزایش زبری یا تخلخل و یا ترشوندگی سطح، موجب افزایش شار حرارت بحرانی می‌شود [۱۳].

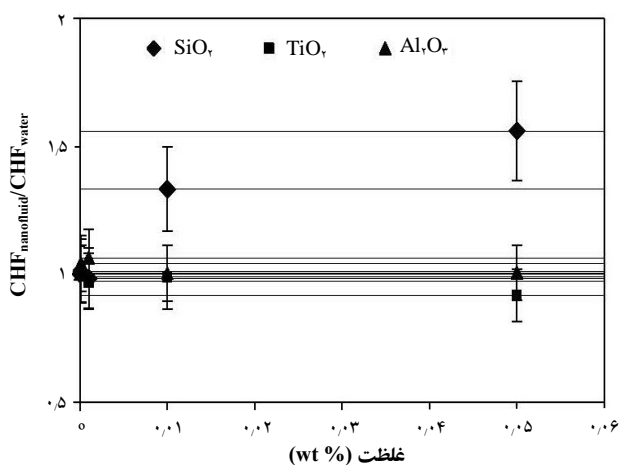


شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نوری سطح سیم نیکل-کرم پس از گسیخته شدن در (الف) آب دیونیزه (ب) محلول  $\text{SiO}_2$  با غلظت ۰/۰۵٪.

و با سرعت تقریباً ثابت روی سیم نیکل-کرم تا وقتی که سیم سرخ و گسیخته شود برقرار شد. به محض گسیخته شدن سیم، شدت جریان و ولتاژ ثبت، و با استفاده از معادله‌ی (۱)، شار حرارتی بحرانی محاسبه شد.

## ۵.۲ اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی نانو سیال‌ها

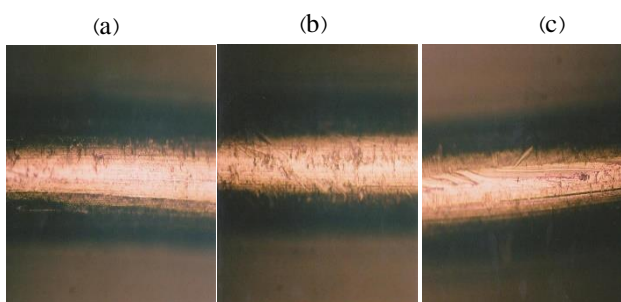
برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، قبل از اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی هر یک از نانو سیال‌ها، ابتدا شار حرارت بحرانی آب خالص به عنوان شاهد، اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن، هر سری از آزمایش‌ها حداقل سه بار انجام شد. شکل ۲، نتایج شار حرارت بحرانی نانو سیال‌های  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  را نسبت به آب در غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش شار حرارت بحرانی برای نانو سیال‌های حاصل از  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در غلظت‌های مختلف کم‌تر از ۱۰٪ است. در حالی که برای نانو سیال  $\text{SiO}_2$ ، با افزایش غلظت، شار حرارت بحرانی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد به طوری که در غلظت ۰/۰۵٪، مقدار افزایش شار حرارت بحرانی به ۵۶٪ می‌رسد. این نتایج با یافته‌های به دست آمده‌ی موجود در خصوص اثر غلظت نانو سیال بر روی شار حرارت بحرانی کاملاً هم‌خوانی دارد [۱۲]. لازم به ذکر است که آزمایش در غلظت ۰/۱٪ وزنی نیز انجام شد، اما مشاهده‌ی دقیق نحوه‌ی گسیخته شدن سیم به دلیل کدر بودن محلول میسر نبود. از این‌رو از ارائه‌ی نتایج آن صرف نظر شد.



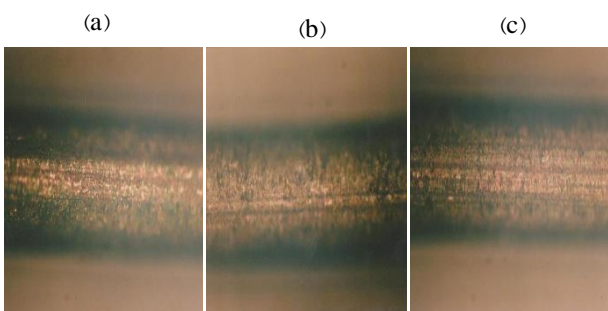
شکل ۲. شار حرارت بحرانی نانو سیال‌های  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در غلظت‌های مختلف نسبت به آب.

**جدول ۱.** شار حرارت بحرانی سیم نیکل- کرم لایه نشانی شده به روش

حرارتی در نانو سیال $\text{SiO}_2$		
سیال	سیم	درصد افزایش CHF
آب	سیم نیکل- کرم لایه نشانی شده در نانو سیال ۰.۰۱٪	۱.۴
آب	سیم نیکل- کرم لایه نشانی شده در نانو سیال ۰.۰۱٪	۴.۶
آب	سیم نیکل- کرم لایه نشانی شده در نانو سیال ۰.۰۵٪	۶.۱



**شکل ۴. الف.** تصاویر سیم پس از لایه نشانی به روش حرارت دادن در محلول  $\text{SiO}_2$  با غلظت‌های (a) ۰.۰۱٪ (b) ۰.۰۱٪ (c) ۰.۰۵٪.



**شکل ۴. ب.** تصاویر سیم لایه نشانی شده به روش حرارت دادن در محلول  $\text{SiO}_2$  با غلظت‌های (a) ۰.۰۱٪ (b) ۰.۰۱٪ (c) ۰.۰۵٪ پس از گسیخته شدن در آب خالص.

از نتایج به دست آمده می‌توان چنین دریافت که لایه‌ی ناپایدار تشکیل شده بر روی سطح سیم موجب شده است که شار حرارت بحرانی کم‌تر تحت تأثیر قرار گیرد. این پدیده، ارتباط نحوه‌ی نشست نانوذرات بر روی سطح سیم و مقدار شار حرارت بحرانی را به خوبی نشان می‌دهد.

**۷.۲ لایه نشانی نانوذرات  $\text{SiO}_2$  بر روی سطح سیم با حرارت دادن نانو سیال و برقراری جریان**

در این روش ابتدا نانو سیال‌های  $\text{SiO}_2$  با غلظت‌های ۰.۰۱، ۰.۰۱ و ۰.۰۵ درصد وزنی تهیه شدند. در داخل هر یک از محلول‌ها سیم نیکل- کرم قرار گرفت و برای مدت ۱۰ min با برقراری جریان و ولتاژ تا نقطه‌ی نزدیک شار حرارت بحرانی، لایه نشانی

برای بررسی بیش‌تر، تأثیر لایه‌ی نانوذرات تشکیل شده بر روی سطح سیم در مقدار شار حرارت بحرانی، سیم‌های نیکل- کرم به دو روش قرار دادن سیم در محلول نانو سیال و حرارت دادن آن تا نزدیک دمای جوشش آب و قرار دادن سیم در محلول نانو سیال و حرارت دادن نانو سیال همراه با به کارگیری جریان الکتریکی (جوشش استخری) لایه نشانی شد. سپس شار حرارت بحرانی سیم‌های لایه نشانی شده در غلظت‌های مختلف از محلول نانو سیال در شرایط یکسان در سیال آب خالص اندازه‌گیری و مقایسه شدند.

**۶.۲ لایه نشانی نانوذرات  $\text{SiO}_2$  بر روی سطح سیم با حرارت دادن نانو سیال**

در این روش، ابتدا نانو سیال‌های  $\text{SiO}_2$  با غلظت‌های ۰.۰۱، ۰.۰۱ و ۰.۰۵٪ وزنی تهیه شد. سیم نیکل- کرم در داخل هر یک از محلول‌ها قرار گرفت، و برای مدت ۱۰ min تا دمای جوش آب حرارت داده شد. سپس سیم‌های لایه نشانی شده در آب دیونیزه قرار داده شد. بعد از به جوش آمدن محلول، در اثر برقراری ولتاژ، سیم گسیخته شد و ولتاژ مربوط به آن ثبت شد (جدول ۱). تصاویر میکروسکوپی سطح سیم پس از لایه نشانی و بعد از گسیخته شدن در آب در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند.

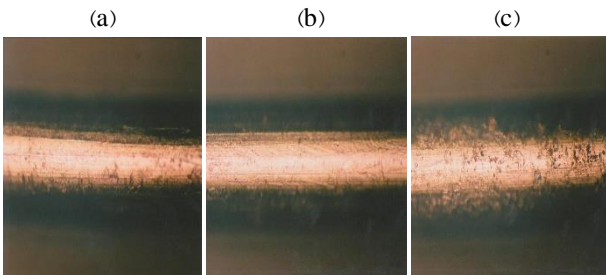
با توجه به جدول ۱، شار حرارت بحرانی آب خالص در سیم نیکل- کرم که در نانو سیال با بیش‌ترین غلظت (۰.۰۵٪) لایه نشانی شده است، افزایش بیش‌تری را نشان می‌دهد، اگرچه برای هر سه غلظت، افزایش شار حرارت بحرانی چندان قابل توجه نیست. علت این پدیده را می‌توان با توجه به تصاویر به دست آمده از سطح سیم‌ها قبل و بعد از گسیخته شدن در آب تفسیر کرد (شکل ۴). تصاویر شکل ۴. الف نشان می‌دهند که در همه‌ی غلظت‌ها، لایه‌ای از نانوذرات در اثر حرارت بر روی سیم تشکیل شده است. اما پس از این که سیم در داخل آب خالص گسیخته می‌شود، نانوذرات تشکیل شده از روی سیم شسته می‌شوند (شکل ۴. ب). به عبارت دیگر می‌توان گفت که در این روش، لایه‌ی ناپایداری از نانوذرات در اثر برهم کنش نانوذرات و سطح سیم بر روی آن تشکیل می‌شود. به همین دلیل پس از قرار دادن سیم‌ها در آب خالص، شار حرارتی حداکثر تا ۶.۱٪ افزایش می‌یابد که این افزایش چندان قابل توجه نیست.



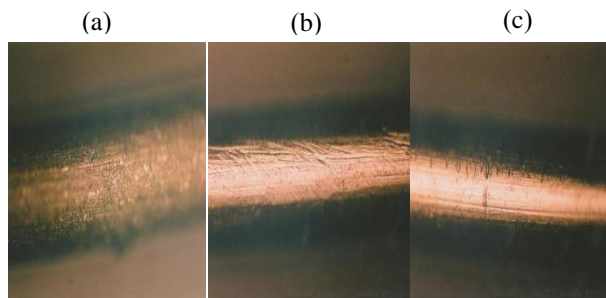
ترشوندگی سطح نسبت داده شده است که با افزایش ضخامت بیش‌تر می‌شود، ولی پس از نقطه‌ی بهینه، در اثر افزایش ضخامت، دیگر تغییر چندانی نمی‌کند. از این‌رو ترشوندگی سطح، عامل محدودکننده‌ی افزایش شار به شمار می‌آید [۱۴]، هم‌چنین می‌توان احتمال داد که در غلظت‌های بیش‌تر، نانوذرات وارد ساختار موئینه‌ی لایه‌های زیرین موجود در سطح می‌شود و توپوگرافی سطح، و در نتیجه درصد افزایش شار حرارت بحرانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

**جدول ۲.** شار حرارت بحرانی سیم نیکل-کرم لایه نشانی شده به روش حرارتی و برقراری جریان در سیال آب

سیال	سیم	درصد افزایش CHF
آب	سیم نیکل-کرم لایه نشانی شده در نانو سیال $SiO_2$ از ۰٫۰۰۱٪	۱٫۱
آب	سیم نیکل-کرم لایه نشانی شده در نانو سیال $SiO_2$ از ۰٫۰۱٪	۲۶٫۴
آب	سیم نیکل-کرم لایه نشانی شده در نانو سیال $SiO_2$ از ۰٫۰۵٪	۱٫۸



**شکل ۵. الف.** تصاویر سیم پس از لایه نشانی به روش حرارت دادن و برقراری جریان در محلول  $SiO_2$  با غلظت‌های (a) ۰٫۰۰۱٪ (b) ۰٫۰۱٪ (c) ۰٫۰۵٪.

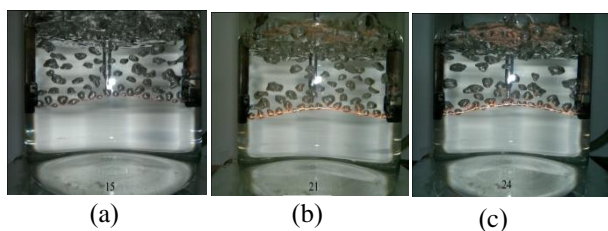


**شکل ۵. ب.** تصاویر سیم لایه نشانی شده به روش حرارت دادن و برقراری جریان در محلول  $SiO_2$  با غلظت‌های (a) ۰٫۰۰۱٪ (b) ۰٫۰۱٪ (c) ۰٫۰۵٪ پس از گسیخته شدن در آب خالص.

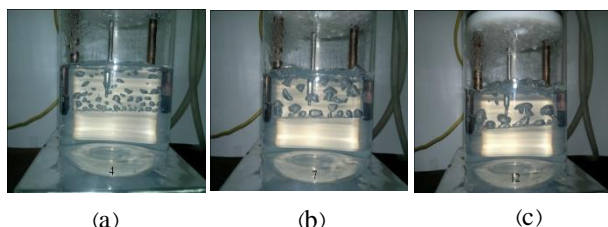
انجام شد. سپس سیم‌های لایه نشانی شده، در آب دیونیزه قرار داده شد و بعد از به جوش آمدن محلول، در اثر برقراری ولتاژ، سیم گسیخته شد و جریان و ولتاژ مربوط به آن ثبت شد (جدول ۲). تصاویر میکروسکوپی سطح، پس از لایه نشانی و بعد از گسیخته شدن در آب در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۲، شار حرارت بحرانی مربوط به سیم لایه نشانی شده در نانو سیال  $SiO_2$  با غلظت ۰٫۰۰۱٪ کم‌ترین مقدار (۱/۱٪)، و شار حرارت بحرانی سیم لایه نشانی شده در نانو سیال  $SiO_2$  با غلظت ۰٫۰۱٪، بیش‌ترین مقدار (۲۶/۴٪) است. سیمی که در غلظت ۰٫۰۰۵٪ لایه نشانی شده است، تأثیر قابل توجهی (۱/۸٪) را بر مقدار شار حرارت بحرانی نشان نمی‌دهد. علت این پدیده‌ها را می‌توان با توجه به تصاویر به دست آمده از سطح سیم، بعد از لایه نشانی سطح و پس از گسیخته شدن در آب خالص تفسیر نمود (شکل ۵). تصاویر شکل ۵. الف نشان می‌دهند که در همه غلظت‌ها، در اثر حرارت، لایه‌ای از نانوذرات بر روی سیم تشکیل شده است. اما از تصاویر شکل (۵. الف-ا) و (۵. ب-ا) که مربوط به سیم‌های لایه نشانی شده، قبل و پس از گسیخته شدن در آب خالص است، می‌توان چنین دریافت که در غلظت کم نانو سیال، لایه‌ی بسیار نازکی از نانوذرات بر روی سطح سیم تشکیل می‌شود که تأثیر قابل توجهی بر روی مقدار شار حرارت بحرانی ندارد. در تصاویر شکل (۵. الف-ب) و (۵. ب-ب) نیز مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانو سیال، ضخامت لایه‌ی تشکیل شده بر روی سطح سیم تا ۰٫۰۱٪ افزایش می‌یابد. از آن‌جا که با افزایش ضخامت لایه‌ی نانوذرات، ساختار سطح از جمله زبری و تخلخل افزایش می‌یابد، در نتیجه شار حرارت بحرانی نیز افزایش می‌یابد [۱۳]. البته با توجه به این که نتایج نشان می‌دهد درصد افزایش شار حرارت بحرانی سیم لایه نشانی شده در غلظت ۰٫۰۰۵٪ در آب خالص چندان قابل توجه نیست، می‌توان دریافت که این افزایش، احتمالاً تا غلظت معینی که در آن تغییرات ساختاری سطح، سازوکار جوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مشاهده خواهد شد. به عبارت دیگر درصد افزایش شار حرارتی، با افزایش ضخامت لایه‌ی نشسته بر روی سطح بیش‌تر می‌شود تا آن‌که به یک مقدار بهینه برسد و بیش‌تر از آن، افزایش ضخامت، تأثیری در افزایش شار نخواهد داشت. این پدیده به افزایش





شکل ۶. الف. تصاویر جوشش در سیال آب خالص با گذشت زمان.



شکل ۶. ب. تصاویر جوشش در نانو سیال  $\text{SiO}_2$  با غلظت ۰٫۱٪ با گذشت زمان.

## مراجع

- [1] M.N. Golubovic, H.D.M. Hettiarachchi, W.M. Worek, W.J. Minkowycz, Nanofluids and critical heat flux, experimental and analytical study, *Appl. Therm. Eng.* **29** (2009) 1281-1288.
- [2] S.J. Kim, T. McKrell, J. Buongiorno, L.W. Hu, Alumina nanoparticles enhance the flow boiling critical heat flux of water at low pressure, *J. Heat Transfer* **130** (2008) 044501.
- [3] S.J. Kim, T. McKrell, J. Buongiorno, L.W. Hu, Experimental study of flow critical heat flux in alumina-water, zinc-oxide-water, and diamond-water nanofluids, *J. Heat Transfer*. **131** (2009) 043204, 1-5.
- [4] S. Kim, I. Bang, J. Buongiorno, L. Hu, Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, *Int. J. Heat Mass Transfer* **50** (2007) 4105-4116.
- [5] S.M. You, J.H. Kim, K.H. Kim, Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 3374-3376.
- [6] P. Vassallo, Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer* **47** (2004) 407-411.

۸.۲ مقایسه‌ی تصاویر جوشش در سیال آب و در نانو سیال  $\text{SiO}_2$  رژیم‌های جوشش آب خالص و نانو سیال  $\text{SiO}_2$  با غلظت ۰٫۱٪ در شکل ۶ مقایسه شده‌اند. در شار حرارتی کم (شکل ۶. الف-a و شکل ۶. ب-a) هر دو سیال در رژیم جوشش هسته‌ای قرار دارند. با توجه به تصاویر در شار حرارتی بالا در آب خالص، فیلمی از بخار بر روی سیم تشکیل می‌شود (۶. الف-c) که در نهایت جوشش فیلمی موجب قرمز شدن سیم و گسیخته شدن آن می‌شود. اما در همان زمان نانو سیال  $\text{SiO}_2$  در رژیم جوشش هسته‌ای قرار دارد. به عبارت دیگر، با لایه نشانی نانوذرات بر روی سطح و افزایش ترشوندگی، حباب‌ها به هم پیوسته، و با به تعویق انداختن جوشش فیلمی، موجب افزایش شار حرارت بحرانی می‌شوند [۱۶].

## ۳. نتیجه‌گیری

شار حرارت بحرانی سه نوع نانو سیال  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در غلظت‌های ۰٫۰۵ تا ۰٫۰۱٪ وزنی با انجام آزمایش جوشش استخری بررسی شد. با توجه به نتایج، شار حرارت بحرانی نانو سیال  $\text{SiO}_2$  با افزایش غلظت نانو سیال تا ۰٫۰۵٪ وزنی به مقدار ۵۶٪ افزایش داشته است. تصاویر میکروسکوپی سطح سیم پس از آزمایش جوشش استخری و اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی نشان داد که افزایش شار نانو سیال کاملاً به ساختار میکروسکوپی و ویژگی‌های سطح بستگی دارد. با توجه به این نکته، شار حرارت بحرانی جوشش استخری آب بر روی سیم لایه نشانی شده با نانوذرات اندازه‌گیری شد که مشاهده‌ی افزایش شار حرارت بحرانی در این آزمایش نیز اثر لایه نشانی سطح را در افزایش آن تأیید می‌کند. علاوه بر آن، نتایج شار حرارتی سطوح ایجاد شده در غلظت‌های متفاوت از نانو سیال در شرایط یکسان بر روی سیم‌ها، نشان داد که ضخامت لایه‌ی تشکیل شده بر روی سطح در افزایش شار مؤثر است. هم‌چنین با توجه به نتایج به دست آمده از شار حرارت بحرانی جوشش استخری آب بر روی سیم پوشش داده شده با نانوذرات  $\text{SiO}_2$  به دو روش حرارتی و حرارتی با برقراری جریان (در جوشش استخری)، می‌توان دریافت که علت اصلی افزایش شار حرارت بحرانی نانو سیال‌ها تغییراتی است که در ساختار میکروسکوپی و توپوگرافی سطح گرم‌کننده به علت نشست نانوذرات در فرایند جوشش استخری ایجاد می‌شود.



- [7] I. Bang, S. Heungchang, Boiling heat transfer performance and phenomena of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -water nano-fluids from a plain surface in a pool, *Int. J. Heat Mass Transfer* **48** (2005) 2407-2419.
- [8] D. Milanova, R. Kumar, Heat Transfer Behavior of Silica Nanoparticles in Pool Boiling Experiment, *J. Heat Transfer* **130** (2008) 042401, 1-6.
- [9] H. Kim, J. Kim, M.W. Kim, Experimental study on CHF characteristics of water- $\text{TiO}_2$  nano-fluids, *Nucl. Eng. Technol.* **38** (2006) 61-68.
- [10] H. Kim, M. Kim, Experimental study of the characteristics and mechanism of pool boiling CHF enhancement using nanofluids, *Heat Mass Transfer* **45** (2009) 991-998.
- [11] H. Kim, Enhancement of critical heat flux in nucleate boiling of nanofluids: a state-of-art review, *Nanoscale Res. Lett.* **6** (2011) 415, 1-18.
- [12] H. Kim, J. Kim, M. Kim, Experimental studies on CHF characteristics of nano-fluids at pool boiling. *Int. J. Multiphase Flow* **33** (2007) 691-706.
- [13] H. Kim, J. Kim, M.H. Kim, Effect of nanoparticles on CHF enhancement in pool boiling of nano-fluids. *Int. J. Heat Mass Transfer* **49** (2006) 5070-5074.
- [14] S.K. Kwark, G. Moreno, R. Kumar, H. Moon, S.M. You, Nanocoating characterization in pool boiling heat transfer of pure water, *Int. J. Heat and Mass Transfer* **53** (2010) 4579-4587.
- [15] S. Kim, I. Bang, J. Buongiorno, L. Hu, Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *Int. J. Heat Mass Transfer* **50** (2007) 4105-4116.
- [16] H.T. Phan, N. Caney, M. Philippe, S. Colasson, J. Gavillet, Surface wettability control by nanocoating: The effects on pool boiling heat transfer and nucleation mechanism, *Int. J. Heat Mass Transfer* **52** (2009) 5459-5471.