



## بررسی آزمایشگاهی اثر غلظت و جنس نانوسیال بر جوشش استخری

تورج ملک‌پور<sup>1</sup>، علی کشاورز ولیان<sup>2\*</sup>، مسعود ضیاء بشرحق<sup>2</sup>، باقر سلیمانی<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 19395-1999، keshavarz@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 تیر 1394

پذیرش: 28 مرداد 1394

ارائه در سایت: 18 شهریور 1394

کلید واژگان:

جوشش استخری

نانوسیال

سطح برنجی

ضریب انتقال حرارت جوششی

غلظت

### چکیده

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در مورد استفاده از نانوسیال روی جوشش استخری انجام شده که نتایج متناقضی در این مورد ارائه شده است. در این مقاله انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال آب-آلومینا در دمای اشباع با غلظت‌های حجمی مختلف 0/0025 تا 1 درصد، و آب-تیتانیا با غلظت‌های 0/0025، 0/01 و 0/25 درصد حجمی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. به همین منظور یک دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شد. قطعه مورد آزمایش یک هیتر استوانه‌ای از جنس برنج با زبری 0/2 میکرومتر می‌باشد. این آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر غلظت و جنس نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت جوشش استخری سطح برنجی انجام شده‌اند. نتایج نشان دادند که با افزودن ذرات نانو به سیال پایه آب خالص، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در یک شار ثابت، با افزایش غلظت نانوسیال آلومینا از 0/0025 تا 0/01 درصد حجمی ضریب انتقال حرارت کاهش و با افزایش بیشتر غلظت آن از 0/01 تا 1 درصد حجمی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. نانوسیال تیتانیا رفتار بدتری نسبت به نانوسیال آلومینا از خود نشان داد و باعث کاهش بیشتر انتقال حرارت جوششی و افزایش بیشتر دمای سطح جوشش در یک شار ثابت شد.

## Experimental investigation of nanofluid concentration and material type effect on pool boiling

Touraj Malek Pour, Ali Keshavarz Valian\*, Masoud Zia Bashar Hagh, Bagher Soleimani

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, keshavarz@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 09 July 2015  
Accepted 19 August 2015  
Available Online 09 September 2015

#### Keywords:

Pool Boiling  
Nanofluid  
Brass Surface  
Boiling Heat Transfer Coefficient  
Concentration

### ABSTRACT

In recent years, many researches have investigated nanofluids pool boiling and reported some contradictory results. In this study, the pool boiling heat transfer of water-alumina and TiO<sub>2</sub>-water nanofluids at saturated temperature was investigated experimentally. The experiments were conducted to investigate the impact of concentration and type of nanofluid on the pool boiling heat transfer of brass surface. Water-alumina and TiO<sub>2</sub>-water nanofluids with volumetric concentration of 0.0025-1% and 0.0025, 0.01, 0.25 % were used, respectively. An experimental setup with a cylindrical heated test section made of brass and surface roughness of 0.2μm was designed and fabricated. The experimental results showed that, the heat transfer decreases as the nanoparticles are added into the pure water base fluid. At a constant heat flux, the heat transfer coefficient decreases as the alumina volumetric concentration increments from 0.0025 to 0.01% and then increases for further addition from 0.01 to 1%. The TiO<sub>2</sub>-water nanofluids performance with respect to the water-alumina nanofluids was not very promising. That means, the boiling heat transfer decreases while the boiling surface temperature increases at a constant heat flux.

### 1- مقدمه

در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله تهویه مطبوع، خنک کاری موتورهای احتراق داخلی و سیستم یخچال‌ها بکار گرفته می‌شود. مشکل اصلی برخی از این صنایع در استفاده از پدیده جوشش، وجود دماهای بالا و کنترل نشده در بویلرها و ابزار انتقال حرارت می‌باشد که محدودیت انتخاب ماده را در این ابزار به همراه دارد. همچنین وجود دماهای بالا موجب اتلاف حرارتی بیشتر و در نهایت کاهش استفاده از انرژی مصرفی می‌شود. یکی از تکنیک‌های جدید برای بهبود عملکرد جوششی استفاده از نانوسیالات است. موضوع یافتن مشخصات جوشش نانوسیالات اولین بار توسط داس و

امروزه در صنعت سرمایش و گرمایش، با توجه به مسأله بحران انرژی و مسائل زیست محیطی، تمام تلاش محققین بر این است که روش‌هایی اقتصادی‌تر و سازگار با محیط‌زیست در پیش گرفته شود. استفاده از پدیده جوشش موضوعی است که برای افزایش نرخ انتقال حرارت مورد توجه محققان این زمینه بوده است که دلیل این امر افزایش انتقال حرارت بدون افزایش سطح انتقال حرارت می‌باشد. به دلیل بالا بودن گرمای نهان سیال در طی فرایند جوشش، انرژی زیادی از سطح جامد دفع می‌شود این ویژگی مهم جوشش،

Please cite this article using:

T. Malek Pour, A. Keshavarz Valian, M. Zia Bashar Hagh, B. Soleimani, Experimental investigation of nanofluid concentration and material type effect on pool boiling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 165-172, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

T. Malek Pour, A. Keshavarz Valian, M. Zia Bashar Hagh, B. Soleimani, Experimental investigation of nanofluid concentration and material type effect on pool boiling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 165-172, 2015 (In Persian)

غلظت، شاهد کاهش ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه شدند که با افزایش غلظت بیشتر کاهش می‌یافت.

سیس‌لینسکی و همکارانش [9] به بررسی جوشش استخری نانوسیال آب-آلومینا و آب-مس در غلظت‌های 0/01، 0/1 و 1/00 درصد جرمی پرداختند. سطح جوشش آن‌ها از جنس مس و فولاد زد زنگ بود. آنها برای هیتر مسی گزارش دادند که استفاده از نانوسیال آب-آلومینا در همه غلظت‌ها باعث بدتر شدن ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه می‌شود و در نانوسیال آب - مس در غلظت 0/01 درصد جرمی، شاهد افزایش نسبت به سیال پایه بودند که با افزایش غلظت این ضریب کاهش می‌یافت.

احمد و حامد [10] جوشش استخری نانوسیال را در فشار محیط بررسی نمودند. آن‌ها در این آزمایش از نانوسیال آب-آلومینا با غلظت‌های حجمی مختلف و یک صفحه تخت افقی از جنس مس به عنوان گرم‌کن استفاده کردند. نتایج آزمایش نشان می‌داد که نرخ انتقال حرارت برای نانوسیال با غلظت 0/01 درصد حجمی، نسبت به آب خالص، بهبود می‌یابد. برای نانوسیال با غلظت 0/1 درصد حجمی، نرخ انتقال حرارت مشابه با آب خالص بوده و برای نانوسیال با غلظت 0/5 درصد حجمی، نرخ انتقال حرارت تنزل می‌یابد.

روشی و همکارانش [11] انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال حاوی نانوذرات آلومینا و مخلوط دوتایی آب-اتیلن‌گلیکول را با غلظت‌های حجمی یکسان به عنوان سیال پایه بررسی کردند. این آزمایش برای نسبت میانگین قطر ذرات به میانگین زبری سطح کوچک‌تر از واحد انجام گرفته بود. نتایج آزمایش نشان داد که افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود. همچنین دریافته‌اند که یک غلظت حجمی بهینه از نانوذرات وجود دارد که ضریب انتقال حرارت در آن بیش‌ترین مقدار خود را دارا است. آن‌ها غلظت حجمی بهینه نانوذرات و بیش‌ترین افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به سیال پایه را به ترتیب %0/75 و %64 بدست آوردند.

رانگایاه و همکارانش [12] به مطالعه انتقال حرارت در جوشش استخری نانوسیالات حاوی آب-سیلیکا و آب-تنگستن با غلظت‌های مختلف (0/01 تا 1/0 گرم بر لیتر) در فشار اتمسفر بر روی نمونه برنجی پرداختند. آنها مشاهده کردند که افزودن نانوذرات به سیال پایه، مستقل از جنس نانوذرات، بر ضریب انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد.

یومش و همکارانش [13] جوشش استخری پنتان و نانوسیال پنتان-اکسیدمس را روی گرمکنی تخت از جنس برنج در دو حالت سطح صاف و بهبود یافته به قطر 20 میلی‌متر در فشار اتمسفر بررسی کردند. غلظت نانوذرات 0/005 و 0/01 درصد حجمی بود. آنها مشاهده کردند که در غلظت 0/005 درصد حجمی ضریب انتقال حرارت 5 الی 25 درصد افزایش می‌یابد ولی با افزایش غلظت نانوذرات انتقال حرارت بدتر می‌شود.

ولی نتایج متناقضی در این مورد ارائه شده است. تعدادی از محققین گزارش داده‌اند که افزودن نانوذره باعث بهبود ضریب انتقال حرارت و تعدادی دیگر گزارش داده‌اند که موجب کاهش آن می‌شود.

با توجه به مطالعات انجام شده توسط افراد مختلف، می‌بینیم پژوهش‌های مربوط به جوشش استخری نانوسیال‌ها، نتایج متفاوتی راجع به کاهش و یا افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی گزارش داده‌اند و نتایج آنها در روند کاهش ضریب انتقال حرارت با تغییر غلظت، با هم در تناقض است. از طرفی این بررسی‌ها در بازه غلظت نانوسیالات محدود انجام شده است و اطلاعات کمی برای سطح برنجی که بهترین انتقال حرارت جوششی نسبت به

همکارانش [1] مورد توجه قرار گرفت. آنها جوشش استخری نانوسیال آب-آلومینا را تحت فشار اتمسفری و با استفاده از یک گرمکن استوانه‌ای افقی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی کاهش ضریب انتقال حرارت جوششی را در غلظت‌ها و زبری‌های مختلف، با افزودن ذرات نانو، نشان می‌دادند.

لی و همکارانش [2] جوشش استخری نانوسیال آب-اکسید مس را در غلظت‌های 0/005 و 0/2 درصد جرمی بر روی گرمکن تخت از جنس مس بررسی کردند. آنها دریافته‌اند که انتقال حرارت نانوسیالات در مقایسه با سیال پایه کاهش می‌یابد و دلیل آنرا ته نشینی نانوذرات و پرشدن حفره‌های فعال اعلام کردند.

بنگ و چنگ [3] آزمایشی طراحی کردند که جوشش استخری نانوسیال آب-آلومینا را روی گرمکن صفحه‌ای از جنس مس در فشار اتمسفر بررسی کنند. غلظت نانوذرات آنها 0/5%، 1%، 2% و 4% حجمی بود. آنها دریافته‌اند که افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث بدتر شدن انتقال حرارت می‌شود. در حالیکه این بدتر شدن با افزایش غلظت افزایش می‌یابد.

ون و دینگ [4] جوشش استخری نانوسیال آب-آلومینا را با استفاده از یک گرمکن مدور از جنس فولاد ضد زنگ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش حاکی از آن بود که ضریب انتقال حرارت جوششی با استفاده از نانوسیال بهبود می‌یابد و این بهبود با افزایش غلظت نانوسیال بیشتر می‌شود. آن‌ها یکی از دلایل این افزایش را همگن و پایدار بودن نانوسیال خود عنوان کردند، به طوری که پس از آزمایش هیچ‌گونه رسوبی بر سطح جوشش مشاهده نکرده بودند.

شی و همکارانش [5] آزمایشی انجام دادند که در آن انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال آب-آهن و آب-آلومینا در روی گرمکن صفحه‌ای دایروی از جنس مس به قطر 60 میلی‌متر با غلظت حجمی 0/1%، 1% و 2% را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که افزودن نانوذرات آهن به آب باعث بهتر شدن و افزودن نانوذرات آلومینا به آب باعث بدتر شدن انتقال حرارت می‌شود.

چوپکار و همکارانش [6] جوشش استخری نانوسیال آب-دی‌اکسید زیرکونیوم را در غلظت‌های مختلف بررسی کردند. سطح جوشش آنها صفحه‌ای از جنس مس بود. آنها گزارش دادند که با افزایش غلظت نانوذرات، ضریب انتقال حرارت بهبود می‌یابد و با افزایش بیش از حد غلظت، ضریب انتقال حرارت روند کاهشی پیدا کرده و حتی کمتر از سیال پایه می‌شود.

نارایان و همکارانش [7] تأثیر زاویه سطح گرمکن در جوشش استخری شامل نانوسیال آب-آلومینا بررسی را کردند. سطح مورد آزمایش آنها استوانه‌ای به قطر 33 میلی‌متر بود. غلظت نانوذرات آنها 0/5، 1 و 2 درصد جرمی و زاویه‌های مورد آزمایش آنها 0، 45 و 90 درجه نسبت به افق بود. آنها دریافته‌اند که انتقال حرارت در حالت افقی بیشترین مقدار را دارد و با افزایش غلظت نانوذرات انتقال حرارت بدتر می‌شود. سوربووانگ و همکارانش [8]

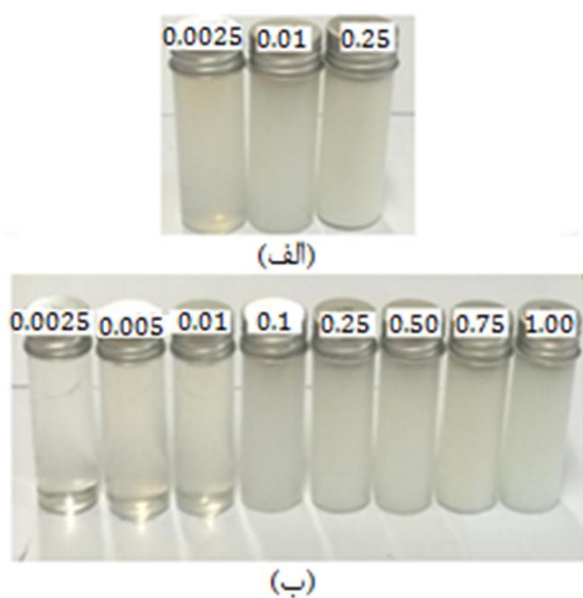
انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال آب-تیتانیا را روی صفحه‌ای افقی از جنس مس و آلومینیوم در زبری‌های 0/2 و 4/0 میکرومتر مطالعه کردند. غلظت نانوسیال آنها 0/00005%، 0/0001%، 0/0005%، 0/001% و 0/005% حجمی بود. آنها مشاهده کردند که برای سطح جوشش از جنس آلومینیوم، در همه غلظت‌ها، افزودن نانوسیال باعث کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود و برای سطح جوشش مسی در غلظت‌های پایین‌تر از 0/0001 درصد حجمی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد و بیشتر از این

جلوگیری از کاهش حجم سیال مورد بررسی و عدم تغییر غلظت نانوسیال، در حین آزمایش از یک کندانسور استفاده شده است.

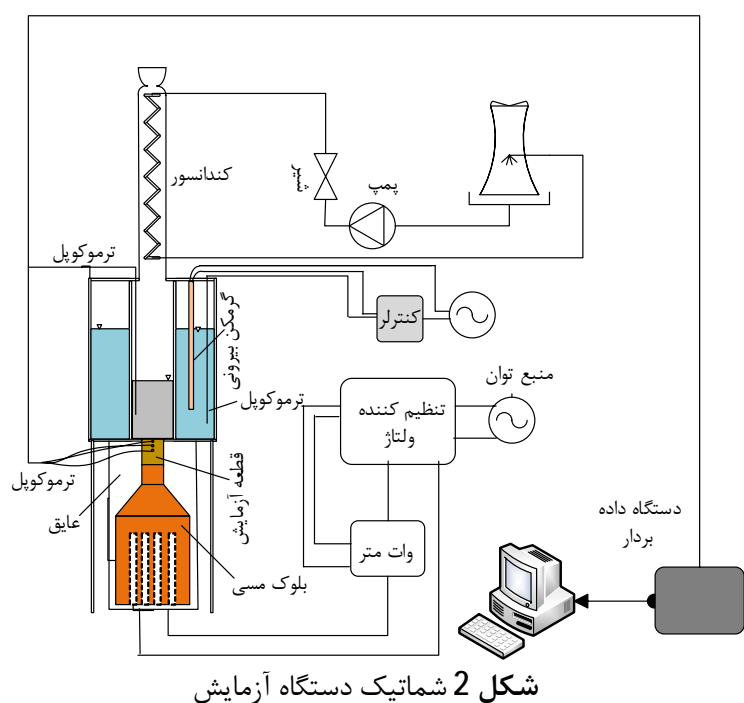
قطعه مورد آزمایش که شماتیک آن در شکل 4 نشان داده شده است، یک استوانه برنجی به قطر 40 میلی‌متر بوده که در کف محفظه جوشش تعبیه شده و اطراف آن را تفلون نسوز فرا گرفته است. این قطعه از طریق بلوک مسی که درون آن 9 هیتر 500 واتی تعبیه شده و به رئوستا متصل است، گرم می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای سطح جوشش و شار حرارتی سه عدد ترموکوپل نوع K با دقت 0/1 درجه سانتی‌گراد در فاصله‌های مشخصی از سطح قطعه برنجی جاسازی شده است.

برای ایجاد زبری مورد نظر در سطح قطعه مورد آزمایش، از سمباده‌هایی به شماره 600 - 15 گریت<sup>3</sup> استفاده شده و توسط زبری سنج<sup>4</sup> اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری و ثبت دما نیز از دستگاه داده بردار ساخت شرکت ادوینتک<sup>5</sup>، استفاده شده است.

بعد از هر آزمایش، به منظور ایجاد شرایط آزمایشی یکسان، تمام اجزای دستگاه از هم جدا شده و نانوذرات باقی مانده در قسمت‌های مختلف، توسط آب شست‌وشو می‌شوند و در نهایت پس از ایجاد میزان زبری مناسب سطح جوشش توسط سمباده، دستگاه دوباره بسته شده و آماده آزمایش بعدی می‌گردد.



شکل 1 تصویر نمونه‌های برداشته شده از نانوسیال بعد از 3 روز (الف) آب-تیتانیا، (ب) آب آلومینا



شکل 2 شماتیک دستگاه آزمایش

3- ساخت شرکت Time مدل Emery Tousa

4- مدل TR200

5- ساخت شرکت Advantech مدل ADAM 500/TCP

مس و آلومینیوم را دارد، [14] در دسترس است و نیازمند مطالعات عمیق‌تری در این خصوص می‌باشد. در این مقاله سعی شده، غلظت نانوسیالات طوری تعیین شود که بتوان رفتار انتقال حرارت جوششی نانوسیالات را در غلظت‌های کمتر از یک - که پرکاربردترین بازه استفاده از نانوسیالات است - را بر روی گرمکن برنجی بررسی کرد. برای بررسی تأثیر جنس نانوذرات، از دو نانوذره آلومینا و تیتانیا استفاده شده است.

## 2- تهیه نانوسیال

دو روش برای تولید نانوسیالات بکار گرفته می‌شود، روش تک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای، روش دومرحله‌ای به طور گسترده‌تر در تولید نانوسیالات استفاده می‌شود، چرا که کارخانه‌هایی به تولید انبوه و تجاری برخی نانوپودرها می‌پردازند. روش دو مرحله‌ای برای اکسید نانوذرات بهتر عمل کرده در حالی که برای نانوذرات فلزی نامناسب‌تر می‌باشد [15]. در روش دو مرحله‌ای نانوذرات ابتدا تولید و سپس در سیال پایه پخش می‌شوند عموماً برای کاهش انباشتگی نانوذرات و برای توزیع بهتر و منظم تر آن‌ها در سیال پایه از تجهیزات فراصوتی استفاده می‌شود. برای جلوگیری از تغییر خواص حرارتی نانوسیال، هیچگونه ماده اضافی یا پایدارکننده به سیال اضافه نشده است.

نانو ذرات استفاده شده در این کار اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم می‌باشند که مشخصات آنها در جدول 1 آورده شده است. سیال پایه در این کار آب می‌باشد. جرم نانوذرات با استفاده از یک ترازوی بسیار دقیق (با دقت 0/0001 گرم) وزن می‌شود. برای تهیه غلظت‌های مختلف از نانوسیالات (0/0025% تا 1% حجمی)، ابتدا جرم مورد نیاز را در میزان مناسبی از آب مقطر ریخته و به مدت 0/5 الی 1 ساعت با همزن مغناطیسی مخلوط می‌شود، بعد از آن به مدت 4 ساعت روی حمام اولتراسونیک و در آخر به مدت 4 ساعت در همزن مغناطیسی قرار داده می‌شود. برای بررسی پایداری، نانوسیال تولید شده را به مدت 3 روز در حالت سکون قرار داده، مشاهده شد که از پایداری خوبی برخوردارند (شکل 1).

## 3- دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایش از دستگاه آزمایشی که شماتیک آن در شکل 2 و تصویری از آن در شکل 3 نشان داده شده، استفاده شده است. تجهیزات آزمایش شامل محفظه اصلی آزمایش، سیستم خنک‌کننده، سیستم اندازه‌گیری دما، سیستم انتقال توان، سیستم عایق‌کننده و سایر اجزای مربوطه می‌باشند. این تجهیزات جهت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جوششی استفاده شده‌اند.

محفظه آزمایش شامل دو لوله هم محور از جنس شیشه پیرکس به قطرهای 100 و 200 میلی‌متر می‌باشد. سیال مورد بررسی در آزمایش، در لوله داخلی ریخته می‌شود و به منظور حفظ دمای سیال داخل آن در دمای اشباع، از آبی که توسط گرم‌کن‌های موجود در فضای بین لوله‌های داخلی و خارجی، در حالت اشباع نگه داشته می‌شود، استفاده شده است. برای

جدول 1 مشخصات نانوذرات مصرفی در این آزمایش.

ماده	شرکت سازنده	رنگ	خلوص	اندازه ذرات (نانومتر)	چگالی ( $\frac{gr}{cm^3}$ )
$Al_2O_3 - \alpha$	دگوسا <sup>1</sup>	سفید	+99%	20-30	3/6
$TiO_2$	یواس <sup>2</sup>	سفید	+99%	30	4/23

1- ساخت شرکت Degussa

2- ساخت شرکت US



تأثیرگذار بوده و می‌بایست میزان تأثیر هر یک از پارامترهای اندازه‌گیری شده را بر نتایج آزمایش به دست آورد. مطابق تئوری پخش خطاها به روش سری تیلور [16] برای محاسبه عدم قطعیت نتایج حاصل از اندازه‌گیری چند متغیره با درصد اطمینان 95% می‌توان رابطه (5) را نوشت:

$$U_{95} = \left[ \sum_{i=1}^J \left( \frac{\partial r}{\partial X_i} \right)^2 U_i^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

که با جایگذاری معادله (2) در معادله (5) رابطه (6) به دست می‌آید:

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left( \frac{U_{T_2-T_0}}{T_2 - T_0} \right)^2 + \left( \frac{U_{\Delta x}}{\Delta x} \right)^2} \quad (6)$$

بر مبنای دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری در جدول 2 و روش فوق حداکثر خطا در محاسبه شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت به ترتیب برابر با 7/83% و 11/43% است. فاصله کم ترموکوپل‌ها از هم و اختلاف کم دماها باعث زیاد شدن عدم قطعیت می‌شود. با افزایش شارحرارتی، اختلاف دماها افزایش می‌یابد و در نتیجه درصد عدم قطعیت کاهش می‌یابد. که این مقدار در شارهای بالای 50 وات بر سانتی‌مترمربع به کمتر از 1/40% برای محاسبه شارحرارتی و 2/81% برای محاسبه ضریب انتقال حرارت می‌رسد. شکل 5 عدم قطعیت‌های رخ داده در این آزمایش را به صورت تابعی از شار حرارتی دیواره، نشان می‌دهد.

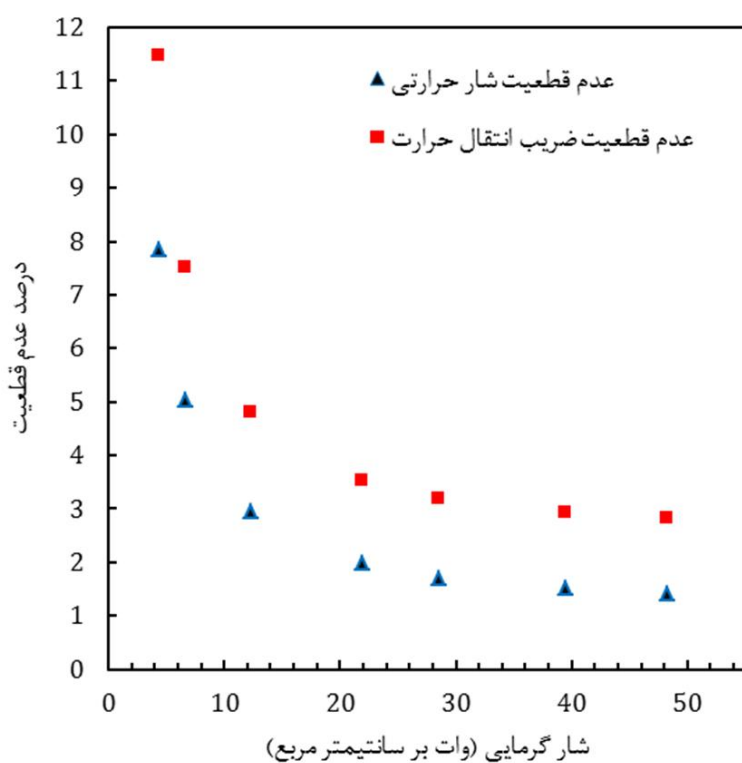
### 6- مدل‌های تجربی ارائه شده برای جوشش استخری

قبل از آزمایش بر روی نانوسیالات، آزمایشاتی با استفاده از آب مقطر به عنوان سیال عامل روی سطح جوشش با زبری میانگین حسابی 0/2 میکرومتر برای بررسی صحت عملکرد دستگاه انجام شد. سپس، نتایج حاصل از آزمایش با مدل‌های تجربی ارائه شده توسط ریباتسکی [14] و گرنفلو [17] مطابق با روابط (7) و (9)، مقایسه شدند (شکل‌های 5 و 6).

$$\frac{h}{q''m} = f_w \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^{0.45} \left[ -\log_{10} \left( \frac{P}{P_{cr}} \right) \right]^{-0.8} Ra^{0.2} M^{-0.5} \quad (7)$$

جدول 2 دقت وسایل اندازه‌گیری در این آزمایش.

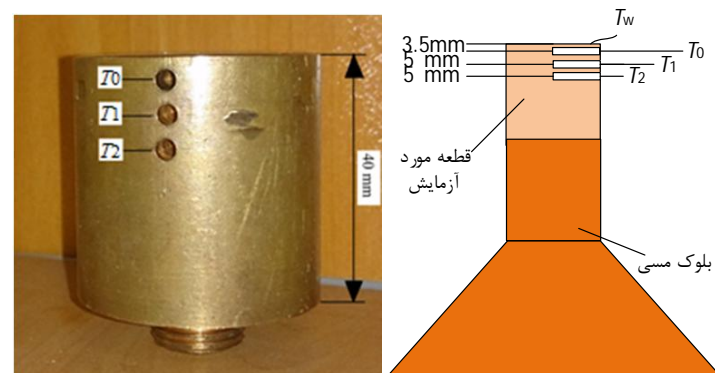
وسایل اندازه‌گیری	دقت
سنسور دما	±0/1 درجه سلسیوس
دستگاه تراش	±0/1 میلی‌متر



شکل 5 عدم قطعیت‌های رخ داده در آزمایش با استفاده از سیال عامل آب مقطر.



شکل 3 تصویری از دستگاه آزمایش



شکل 4 شماتیک قطعه مورد آزمایش

### 4- محاسبات

ضریب انتقال حرارت جوششی با استفاده از رابطه (1) محاسبه می‌شود:

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $T_w$  و  $T_{sat}$  به ترتیب نشان‌دهنده دمای دیواره‌ی سطح جوشش و دمای اشباع سیال می‌باشند.  $q''$  شار حرارتی می‌باشد که با فرض انتقال حرارت یک بعدی و پایا در قطعه مورد آزمایش از قانون یک بعدی فوریه بدست می‌آید:

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

که در رابطه (2)،  $k = 137 \text{ W/(mK)}$  رسانندگی گرمایی برنج است. گرادیان دما با استفاده از رابطه (3) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_0 - T_2}{2\Delta x} \quad (3)$$

دمای  $T_w$  در رابطه (1) از رابطه (4) محاسبه می‌شود:

$$T_w = T_0 - q'' \left( \frac{d}{k} \right) \quad (4)$$

که  $d$  فاصله محل کاشت ترموکوپل نمایانگر  $T_0$  (شکل 4) تا سطح جوشش است.

### 5- عدم قطعیت

از آنجا که در تحقیق حاضر پارامترهای زیادی توسط ابزارهای آزمایشگاهی با دقت‌های متفاوت اندازه‌گیری شده‌اند، بنابراین خطاهای اندازه‌گیری در نتایج

7- نتایج

فرایند انتقال حرارت جوششی شامل مجموعه‌ای از فرایندهای انتقال حرارتی، شامل هدایت حرارتی در لایه مایع مجاور سطح جوشش، رشد و جابه‌جایی حباب‌ها و سیال می‌باشد، لذا ضریب انتقال حرارت جوششی به عوامل مختلفی چون خواص ترموفیزیکی نانوسیال، خواص سطح جوشش و واکنش بین سطح و سیال بستگی دارد.

از آنجا که ضریب هدایت گرمایی سیال در تبخیر میکرو لایه زیر حباب و تشکیل لایه مرزی دمایی اطراف محل تشکیل حباب نقش بسیار مهمی را در انتقال حرارت جوششی ایفا می‌کند، می‌تواند موجب بهبود انتقال حرارت جوششی شود، از طرفی وجود نانوذرات انتقال حرارت جابه‌جایی را در سیال کنار دیواره از طریق افزایش جابه‌جایی حباب‌ها، جابه‌جایی خود این ذرات و توربولانس سیال، افزایش می‌دهد. ولی این ذرات حین جوشش روی سطح می‌نشینند، این ذرات به دام افتاده، خصوصیات سطح را تغییر داده و نقاط فعال هسته‌زایی را کاهش می‌دهند. بنابراین هدایت حرارتی توسط نانوذرات را تحت الشعاع قرار می‌دهند. پس می‌توان گفت که جوشش نانوسیالات رقابتی بین دو پدیده‌ی افزایش انتقال حرارت ناشی از افزایش هدایت گرمایی، لزجت، جابه‌جایی و توربولانس سیال، و کاهش انتقال حرارت ناشی از پر شدن منافذ سطح به وسیله نانو ذرات و کم شدن تعداد نقاط فعال هسته‌زایی هست، نتایج نشان داده است که در برخی از آزمایش‌ها، عامل افزایشی بر عامل کاهش غلبه کرده و در بعضی برعکس این موضوع اتفاق افتاده است.

شکل 8، نمودار شار گرمایی برحسب دمای فوق گرم سطح جوشش در غلظت‌های مختلف نانوسیال آلومینا را نشان می‌دهد مشاهده می‌شود با افزودن نانوسیال، منحنی جوشش، تحت شار حرارتی ثابت، به سمت راست جابه‌جا شده و در یک شار ثابت، با افزودن نانوسیال، شاهد افزایش دمای مافوق گرم سطح جوشش هستیم که این به دلیل ته‌نشینی ذرات نانو در حین جوشش بر سطح گرمکن و کاهش محل‌های فعال هسته‌زایی و در نتیجه کاهش میزان انتقال حرارت از سطح جوشش و افزایش دمای سطح جوشش است.

شکل 9، ضریب انتقال حرارت جوششی برحسب شار حرارتی در غلظت‌های مختلف نانوسیال آب-آلومینا را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزودن نانوسیال با غلظت‌های حجمی مختلف در شار ثابت، ضریب انتقال حرارت جوششی، نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد. از طرفی جدای از وابستگی به غلظت اجزاء، کاهش ضریب انتقال حرارت به شار حرارتی وابسته است که با افزایش شار حرارتی، منجر به مقادیر کمتری از ضریب انتقال حرارت می‌شود. نتایج بدست آمده در دو نمودار شکل‌های 8 و 9 حاکی از غلبه عامل ته‌نشینی بر عامل بهبود خواص حرارتی است.

شکل 10، نمودار ضریب انتقال حرارت در مقابل غلظت حجمی نانوسیال آلومینا در دو شار ثابت  $39 \text{ Wcm}^{-2}$  و  $48 \text{ Wcm}^{-2}$  می‌باشد. با افزودن نانوذرات به سیال پایه از غلظت  $0/0025$  تا  $0/01$  درصد حجمی سیر نزولی نمودار مشاهده شده که این می‌تواند به دلیل ته‌نشینی ذرات روی سطح هیتر و پر شدن نقاط فعال هسته‌زایی باشد، با افزایش غلظت از  $0/01$  تا  $1/00$  درصد سیر صعودی نمودار مشاهده شد که این به دلیل بهبود خواص حرارتی با افزایش غلظت می‌باشد. تقعر این نمودار رو به بالا است که نشان دهنده یک غلظت بهینه در کم کردن انتقال حرارت جوششی توسط نانوسیال است.

برای بررسی تأثیر جنس نانوذرات، از نانوذره‌ی تیتانیا استفاده شده است. شکل‌های 11 تا 13، نمودار ضریب انتقال حرارت بر حسب شار حرارتی برای

$$m = 0.9 - 0.3 \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^{0.2} \quad (8)$$

در رابطه (7)،  $f_w$  پارامتر جنس سطح جوشش است که برای جنس برنج به عنوان سطح جوشش،  $f_w = 110$  در نظر گرفته می‌شود.  $P$  و  $Ra$  به ترتیب زبری میانگین حسابی و فشار می‌باشد.

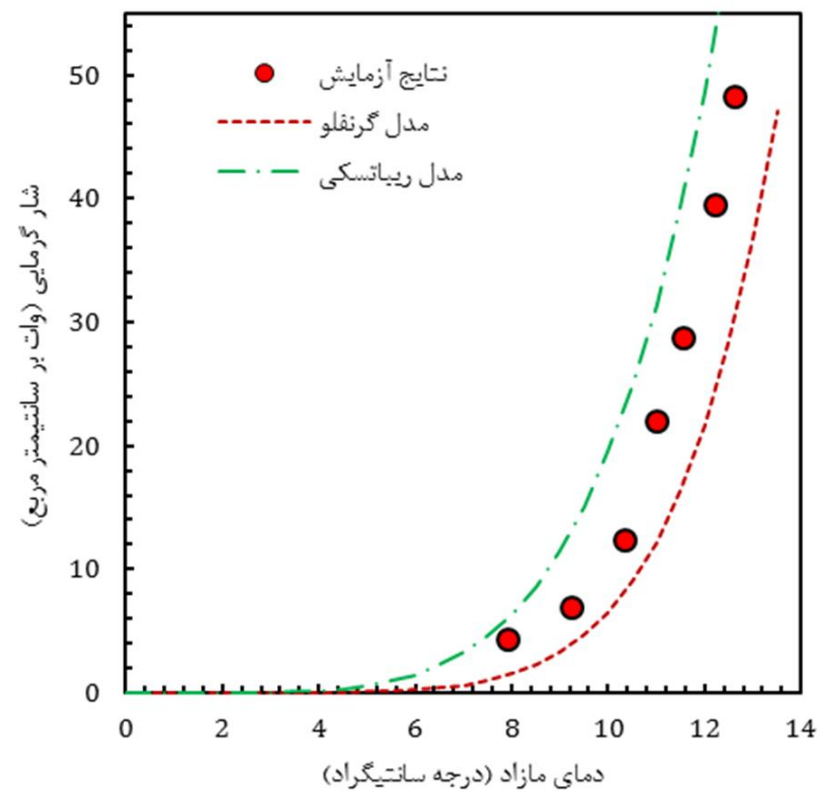
$$\frac{h}{h_0} = F_{PR} (q''/20000)^n Ra^{0.133} \quad (9)$$

در رابطه (9)،  $h_0$  برای سیال عامل آب  $5/600$  بوده و ضریب تصحیح فشار  $F_{PR}$  و پارامتر  $n$  از روابط (10) و (11) محاسبه می‌شوند:

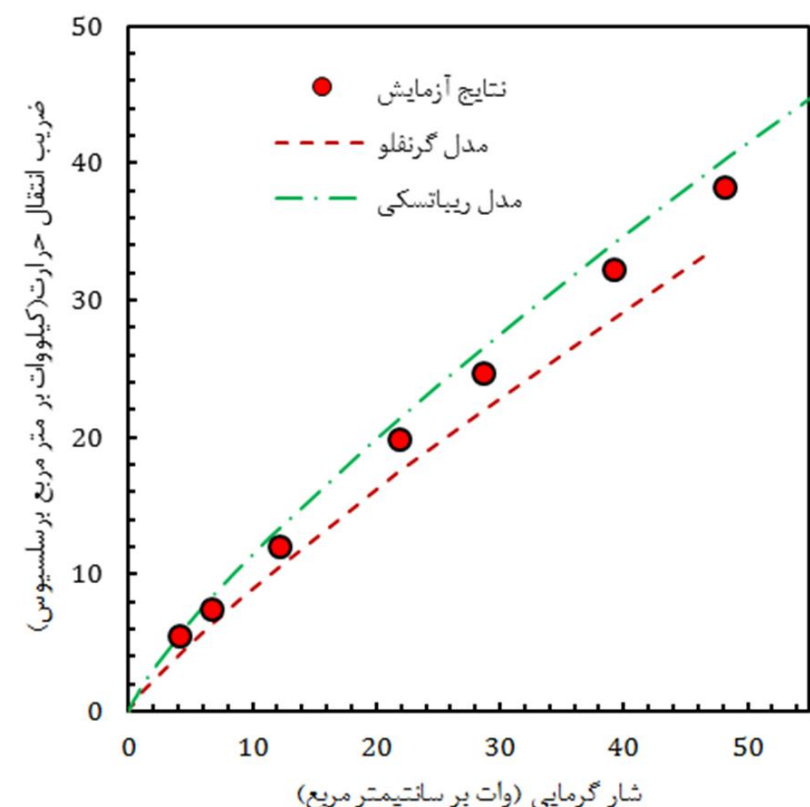
$$F_{PR} = 1.73 \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^{0.27} + \left( 6.1 + \frac{0.68}{1 - (P/P_{cr})} \right) \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \quad (10)$$

$$n = 0.9 - 0.3 \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^{0.3} \quad (11)$$

همان‌گونه که از شکل‌های 6 و 7 قابل مشاهده است، نتایج حاصل از جوشش استخری آب مقطر، مطابقت نسبتاً خوبی با مدل‌های ارائه شده دارد.

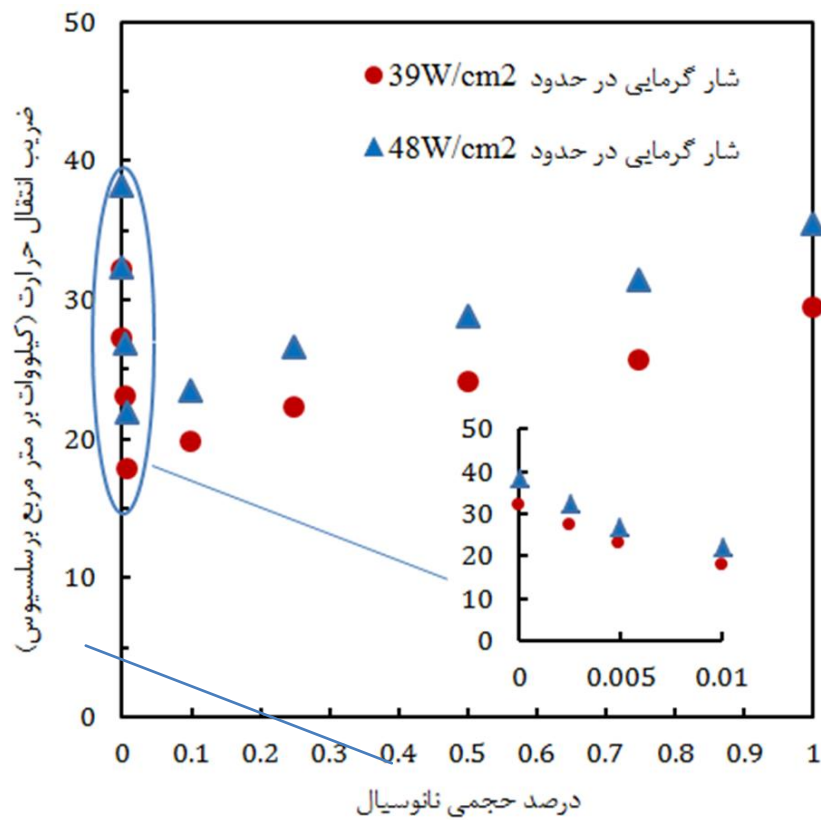


شکل 6 مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با مدل‌های گرنفلو و ریباتسکی برای آب مقطر در زبری  $0/2$  میکرومتر.



شکل 7 مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با مدل‌های گرنفلو و ریباتسکی ارائه شده برای آب مقطر در زبری  $0/2$  میکرومتر.





شکل 10 نتایج تجربی جوشش استخری نانوسیال آب-آلومینا در شارهای ثابت و غلظت‌های مختلف.

ویسکوزیته به علت حضور ذرات است. از آنجا که هدایت حرارتی سیال در تشکیل مجدد لایه‌ی مرزی حرارتی در محل هسته‌زایی و هم برای مکانیزم لغزش حباب، نقش مهمی در انتقال حرارت حین جوشش استخری دارد، با چنین افزایش چشمگیری در هدایت حرارتی، انتظار می‌رود نانوسیال خواص انتقال حرارت حین جوشش استخری را بهبود بخشد. که این امر در تضاد با چیزی است که در سری آزمایشات مشاهده شد.

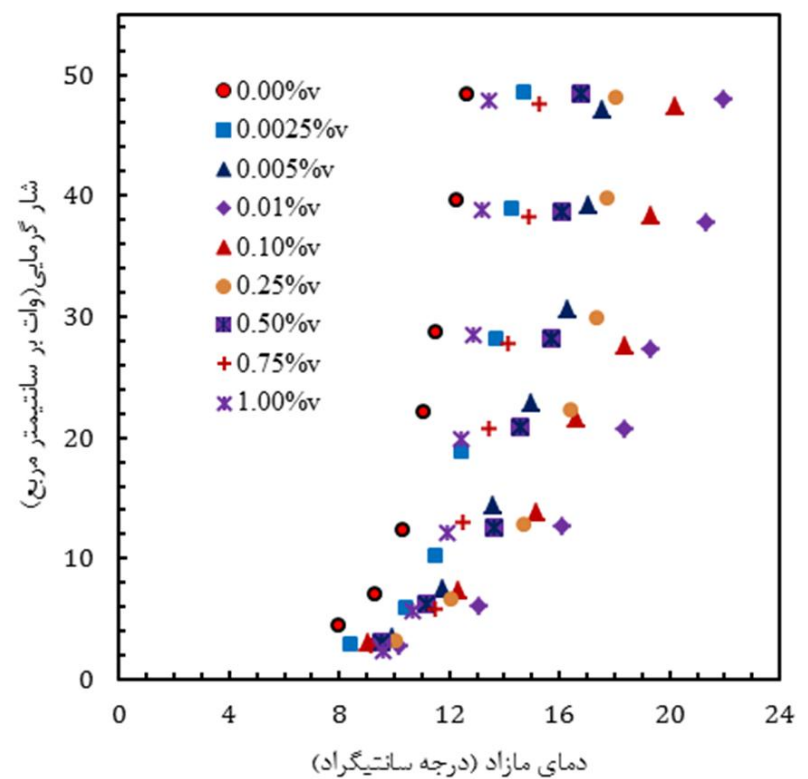
در جوشش نانوسیالات، نانوذرات در حین جوشش روی سطح جوشش به دام افتاده، خصوصیات سطح را تغییر می‌دهند و آن را صیقلی‌تر می‌کنند و این امر منجر به تنزل خصوصیات جوشش می‌شود. در غلظت‌های بیشتر ذرات، یک لایه‌ی فرضی روی سطح گرم‌کن تشکیل می‌دهند که مانع انتقال حرارت می‌شود. بنابراین ضریب انتقال حرارت جوششی بیشتر تحت تأثیر رسانندگی حرارتی لایه تشکیل شده از جنس نانوذرات قرار می‌گیرد. از آنجایی که رسانندگی حرارتی نانوذرات آلومینا بیشتر از نانوذرات تیتانیا است (جدول 3)، انتظار می‌رود در یک شار ثابت حرارتی ضریب انتقال حرارت جوششی نانوسیال آلومینا بیشتر از نانوسیال تیتانیا باشد که شکل‌های 11 تا 13 صحت این امر را نشان می‌دهند.

### 8- نتیجه‌گیری

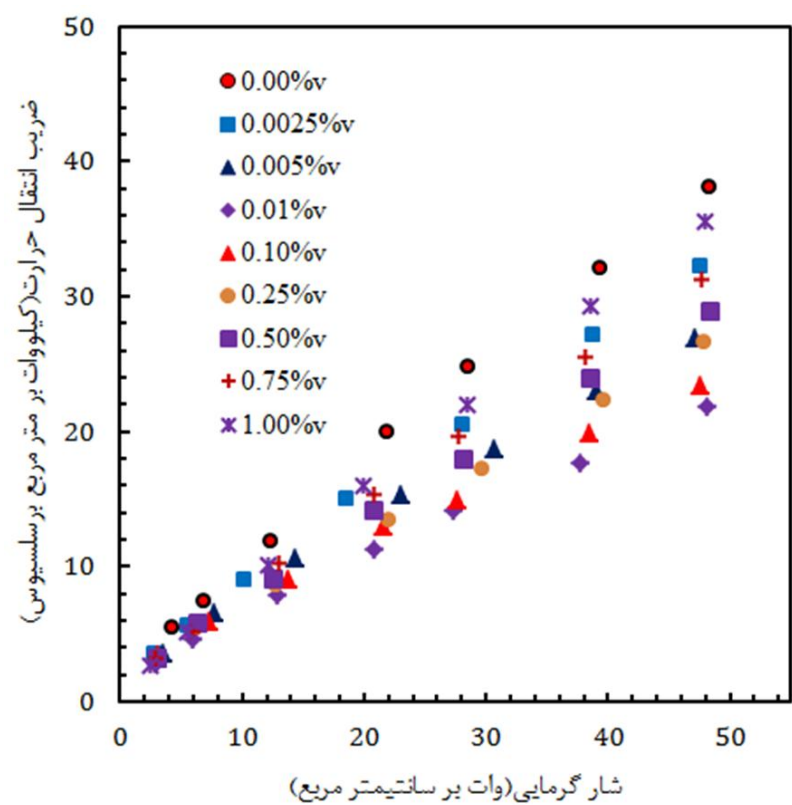
هدف از این تحقیق آزمایشگاهی، بررسی تأثیر غلظت و جنس نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت جوششی در روی سطح جوشش برنجی است. به همین منظور یک دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شد. زبری مورد آزمایش در این تحقیق 0/2 میکرومتر و نانوسیالات به کار گرفته شده تیتانیا با غلظت حجمی 0/0025، 0/01 و 0/25 درصد و آلومینا با غلظت‌های 0/0025 تا 1/00 درصد حجمی بود. نتایج بدست آمده به صورت زیر است:

جدول 3 مشخصات نانوذرات. [18]

نوع نانوذره	ظرفیت گرمایی ( $\frac{J}{kgK}$ )	رسانندگی حرارتی ( $\frac{W}{mK}$ )
$Al_2O_3 - \alpha$	765	36
$TiO_2$	710	8/4



شکل 8 نتایج تجربی جوشش استخری آب مقطر و نانوسیال آب-آلومینا در غلظت‌های 0/0025 تا 1/0 درصد حجمی.



شکل 9 نتایج تجربی جوشش استخری آب مقطر و نانوسیال آب-آلومینا در غلظت‌های 0/0025 تا 1/0 درصد حجمی.

آب مقطر و نانوسیال با غلظت‌های حجمی به ترتیب 0/0025، 0/01 و 0/25 درصد را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که نانوسیال تیتانیا نیز مانند نانوسیال آلومینا در همه غلظت‌های حجمی در یک شار ثابت، دارای ضریب انتقال حرارت پایین‌تری نسبت به سیال پایه است و با افزایش غلظت نانوسیال تیتانیا تا غلظت 0/25 درصد حجمی در شار ثابت، ضریب انتقال حرارت روند کاهشی دارد که رفتار آن مشابه نانوسیال آلومینا هست. پس می‌توان گفت در این نانوسیال نیز عامل ته‌نشینی بر عامل بهبود خواص حرارتی غلبه کرده و موجب کاهش ضریب انتقال حرارت جوششی شده است. با توجه به نمودارهای شکل‌های 11 تا 13 در یک شار ثابت ملاحظه می‌کنید که نانوسیال آلومینا نسبت به تیتانیا ضریب انتقال حرارت بالاتری دارد.

افزودن نانوذرات افزایش چشمگیری در هدایت حرارتی سیالات ایجاد می‌کنند از طرفی با افزودن نانوذرات، کشش سطحی و گرمای نهان با کمی کاهش تقریباً ثابت می‌مانند و تنها تغییر نامطلوب در خواص سیال، افزایش

با افزودن ذرات نانو بر سیال پایه آب مقطر، اگرچه خواص حرارتی سیال بهبود می‌یابد ولی به دلیل ته‌نشینی ذرات نانو و کاهش مکان‌های فعال هسته‌زایی ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

در نانوسیال آلومینا با افزایش غلظت حجمی از 0/0025 تا 0/01 درصد در یک شار ثابت گرمایی ضریب انتقال حرارت روند کاهشی داشته و با افزایش بیشتر غلظت از 0/01 تا 1/00 درصد روند افزایشی پیدا کرده ولی باز عملکرد انتقال حرارت بدتری نسبت به آب داشت.

با تغییر جنس نانو ذره از آلومینا به تیتانیا، نه تنها باعث بهبود ضریب انتقال حرارت نسبت به آب مقطر نشد، بلکه در یک شار ثابت و در یک غلظت مشخص، نسبت به آلومینا، ضریب انتقال حرارت کمتری را از خود نشان داد.

9- فهرست علائم

$f_w$	ثابت معادله ریباتسکی
$h$	ضریب انتقال حرارت جوششی ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
$k$	ضریب رسانندگی گرمایی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
$M$	جرم مولکولی
$P$	فشار (Pa)
$q''$	شار حرارتی ( $Wm^{-2}$ )
$Ra$	زبری میانگین حسابی ( $\mu m$ )
$T$	دما (K)
$x$	موقعیت ترموکوپل‌ها در قطعه مورد آزمایش (mm)

علائم یونانی

$v$	غلظت حجمی
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )

زیرنویس‌ها

cr	بحرانی
sat	اشباع
w	سطح جوشش

10- مراجع

[1] Das, Sarit K., Nandy Putra, and Wilfried Roetzel. Pool boiling characteristics of nano-fluids, *International journal of heat and mass transfer* 46.5, pp. 851-862, 2003.

[2] Li, C. H., B. X. Wang, and X. F. Peng. "Experimental investigations on boiling of nano-particle suspensions, *2003 Boiling heat transfer conference, Jamaica, USA*, 2003.

[3] Bang, In Cheol, and Soon Heung Chang. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nano-fluids from a plain surface in a pool, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48.12, pp. 2407-2419, 2005.

[4] D. Wen, Y. Ding. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based  $\gamma$ -alumina nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 265-274, 2005.

[5] M. H. Shi, et al. Experimental study of pool boiling heat transfer for nano-particle suspensions on a plate surface, *International Heat Transfer Conference 13*. Begel House Inc, 2006.

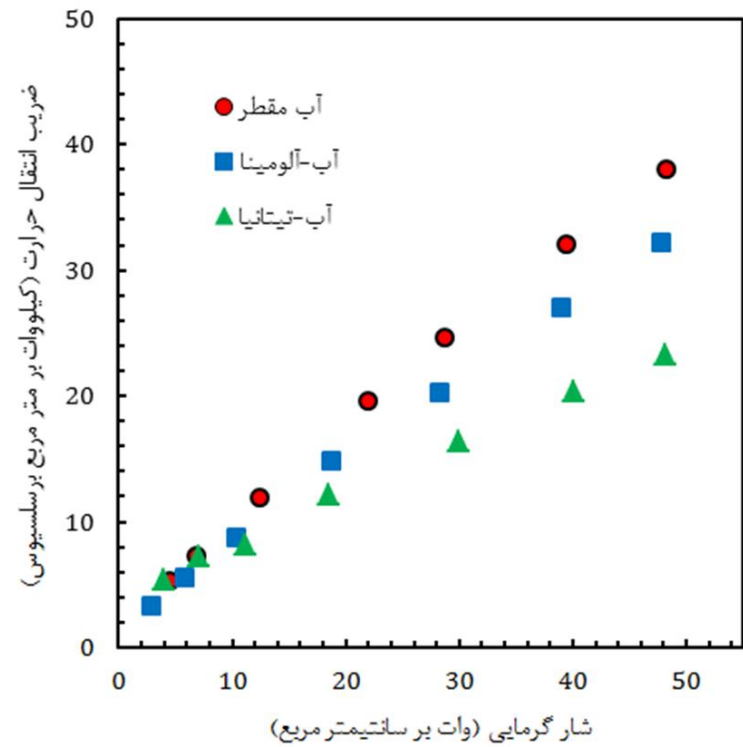
[6] M. Chopkar, A. K. Das, I. Manna, P. K. Das. Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO<sub>2</sub>-water nanofluids from a flat surface in a pool, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 8, pp.999-1004, 2006.

[7] G. Prakash Narayan, et al. Effect of surface orientation on pool boiling heat transfer of nanoparticle suspensions, *International Journal of Multiphase Flow* 34.2, pp.145-160, 2008.

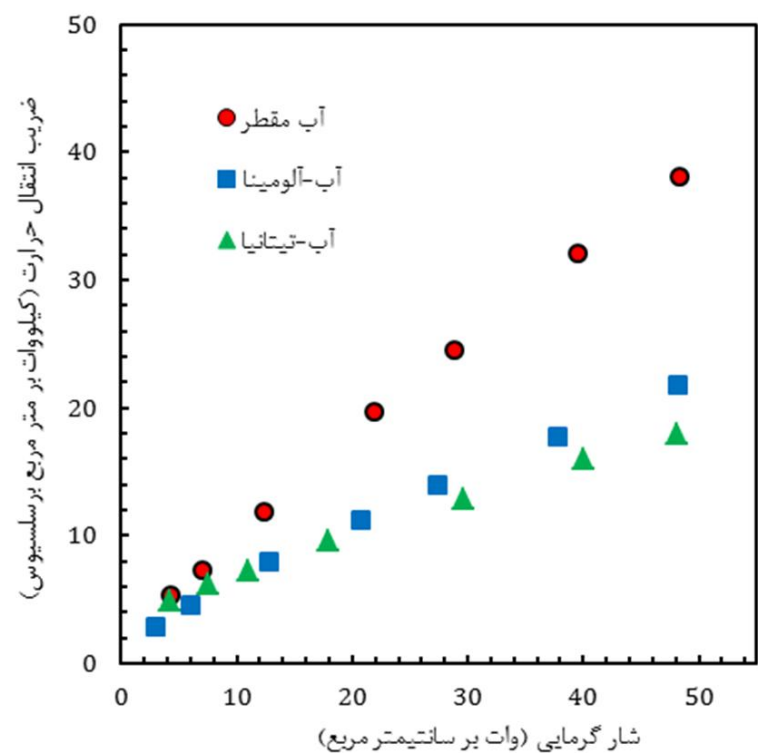
[8] Suriyawong, Adirek, and Somchai Wongwises. "Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids at very low concentrations, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34.8, pp. 992-999, 2010.

[9] Cieslinski, Janusz T., and Tomasz Z. Kaczmarczyk. "Pool boiling of water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and water-Cu nanofluids on horizontal smooth tubes." *Nanoscale research letters* 6.1, pp. 1-9, 2011.

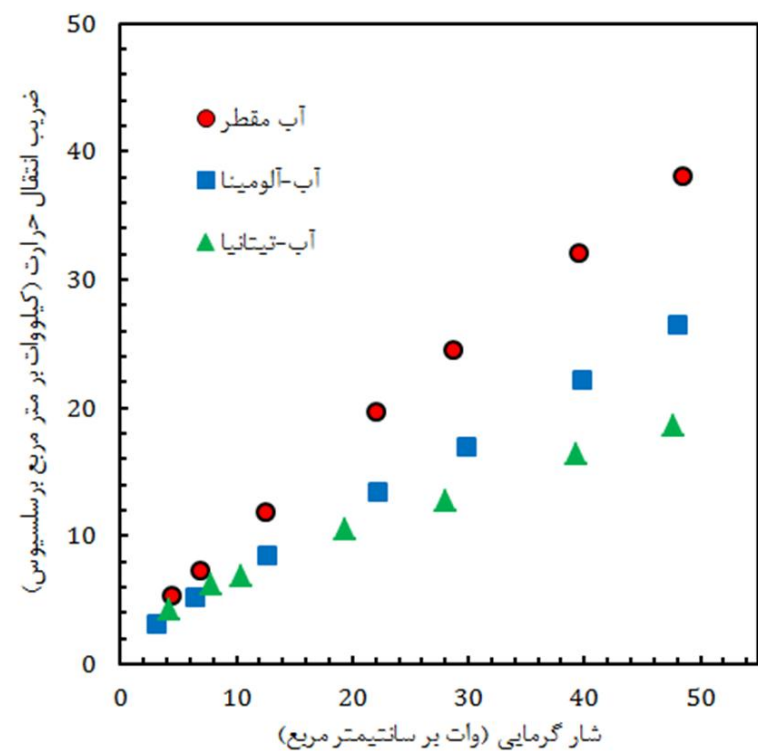
[10] O. Ahmed, MS. Hamed. "The effect of experimental techniques on the



شکل 11 نتایج تجربی جوشش استخري نانوسیال آب-آلومینا و آب-تیتانیا با غلظت حجمی 0/0025 درصد.



شکل 12 نتایج تجربی جوشش استخري نانوسیال آب-آلومینا و آب-تیتانیا با غلظت 0/01 درصد.



شکل 13 نتایج تجربی جوشش استخري نانوسیال آب-آلومینا و آب-تیتانیا با غلظت 0/25 درصد.

- nucleate boiling of halocarbon refrigerants on cylindrical surfaces, *International journal of heat and mass transfer* 46.23, pp. 4439-4451, 2003.
- [15] Wang, X.Q. and A.S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, pp. 1-19, 2007.
- [16] Hugh W. Coleman, and W. Glenn Steele. *Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers*, John Wiley & Sons, pp. 61-84, 2009.
- [17] Francisco Táboas, et al. Pool boiling of ammonia/water and its pure components: comparison of experimental data in the literature with the predictions of standard correlations, *International journal of refrigeration* 30.5, pp. 778-788, 2007.
- [18] Dogan Ciloglu, Abdurrahim Bolukbasi, and Kemal Comakli. "Effect of Nanofluids on the Saturated Pool Film Boiling." *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. No. 67. World Academy of Science, Engineering and Technology, pp. 53-55, 2012.
- pool boiling of nanofluids." 7th International Conference On Multiphase Flow, ICMF 2010, Tampa, FI USA 2010.
- [11] M. R. Ravehi, A. Keshavarz, M. S. Mojarrad, S. Amiri. Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina-water-ethylene glycol nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 805-8014, 2013.
- [12] M. P. Rangaiah, and B. Gowd. "Investigation of Heat Transfer In Pool Boiling on Vertical Cylindrical Brass Surface With Silica and Tungsten Oxide Nanofluids, *International Journal of Applied Engineering Research* 10.6, pp. 15049-15057, 2015.
- [13] V. Umesh, and B. Raja. A study on nucleate boiling heat transfer characteristics of pentane and CuO-pentane nanofluid on smooth and milled surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science* 64, pp. 23-29, 2015.
- [14] Gherhardt Ribatski, and José M. Saiz Jabardo. Experimental study of