



تحلیل تجربی و شبیه سازی نانو پوشش دی اکسید تیتانیوم جهت افزایش شار حرارت بحرانی

عارف رحیمیان^۱، حسین کاظمی نژاد^۲، حسین خلفی^۲، سید محمد میروکیلی^۱، اعظم اخوان^۲، حسن اسماعیلی^۱، محمد امین امیرخانی دهکردی^۱

۱- پژوهشکده‌ی راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران
۲- پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

خلاصه

در این مطالعه پوشش دهی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر نوارهای استیل با استفاده از روش الکتروفوریتیک جهت افزایش شار حرارت بحرانی مورد استفاده قرار گرفته است. از روش RPI جهت شبیه سازی انتقال حرارت جوشش و شار حرارت بحرانی استفاده شده است. با تغییرات جزئی می توان از این روش جهت شبیه سازی جوشش استخری استفاده برد. از این رو در ابتدا جهت اعتبار سنجی این مدل، شبیه سازی جوشش استخری و مقایسه نتایج بدست آمده با داده های تجربی صورت می پذیرد و در ادامه مدل سازی شار حرارت بحرانی صفحات پوشش داده شده صورت می پذیرد. نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی شار حرارت بحرانی نانو پوشش ها به یکدیگر نزدیک بوده و می توان با شناخت بهتر پارامترهای جوشش در نانو پوشش ها و اضافه نمودن این پارامترها به شبیه سازی ها، هزینه های مربوط به آزمایشات را از بین برد.

کلمات کلیدی: نانو پوشش، روش الکتروفوریتیک، روش RPI

۱. مقدمه

سطوحی که در ناحیه انتقال حرارت جوشش هسته‌ای کار می کنند، محدود به شار حرارت بحرانی می باشند. زمانی که شار حرارت بحرانی اتفاق می افتد لایه‌ای از بخار، سطح حرارت دهنده را به صورت کامل می پوشاند و ضریب انتقال حرارت به شدت کاهش می یابد و این موضوع حائز اهمیت است که سیستمها و نیروگاهها جهت جلوگیری از افزایش ناگهانی دما و تخریب سطوح حرارتی، پایین تر از محدوده شار حرارت بحرانی باشند. بنابراین افزایش این محدوده سبب افزایش ایمنی، افزایش نرخ انتقال حرارت و یا کاهش اندازه سیستم حرارتی با ثابت نگه داشتن ظرفیت حرارتی آن می باشد. به طور مثال بونجورینو و همکاران [۱] نشان دادند که با افزایش ۳۲٪ شار حرارت بحرانی میزان ۲۰٪ توان کارکردی راکتورهای هسته‌ای قابل افزایش می باشد.

با پیشرفت در نانو تکنولوژی و مهندسی سطوح امروزه نانو ساختارهای متنوعی جهت بهبود انتقال حرارت جوشش و شار حرارت بحرانی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۲]. این بهبود سطوح بواسطه پوشش ذرات نانو متری مانند فلزات، اکسیدهای فلزی

و آلوتروپ‌های کربن می‌باشد. سطوحی که این ذرات نانومتری بر آنها می‌نشینند نسبت به سطوح بدون پوشش، پارامترهای انتقال حرارت جوشش (از قبیل دانسیته مکان هسته‌ها، فرکانس جدایش حباب و مکش‌های مویینگی) افزایش بیشتری را نشان می‌دهند. محققین در طی سال‌های اخیر با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی توانسته‌اند رفتار ترموهیدرولیکی نانو سیالات را پیش‌بینی نمایند [۳، ۴]. این مطالعات با دقت‌های قابل توجهی میزان ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی را برای نانو ذرات با درصد‌های حجمی متفاوت نانو ذرات بدست آورده‌اند. جهت شبیه‌سازی رفتار ترموهیدرولیک نانو سیالات به دو حالت کلی عمل شده است؛ یکی شبیه‌سازی به صورت تک فاز و دیگری شبیه‌سازی به صورت دو فاز [۳]. در روش اول مخلوط سیال پایه و نانو ذرات یا به عبارتی نانوسیال را به عنوان یک سیال فرضی در نظر گرفته می‌شود. در روش دوم نیز سیال پایه و نانو ذرات را به صورت دو فاز جداگانه در نظر گرفته و محاسبات را انجام می‌دهد که در این روش می‌توان از مدل‌های مختلف دو فاز استفاده نمود.

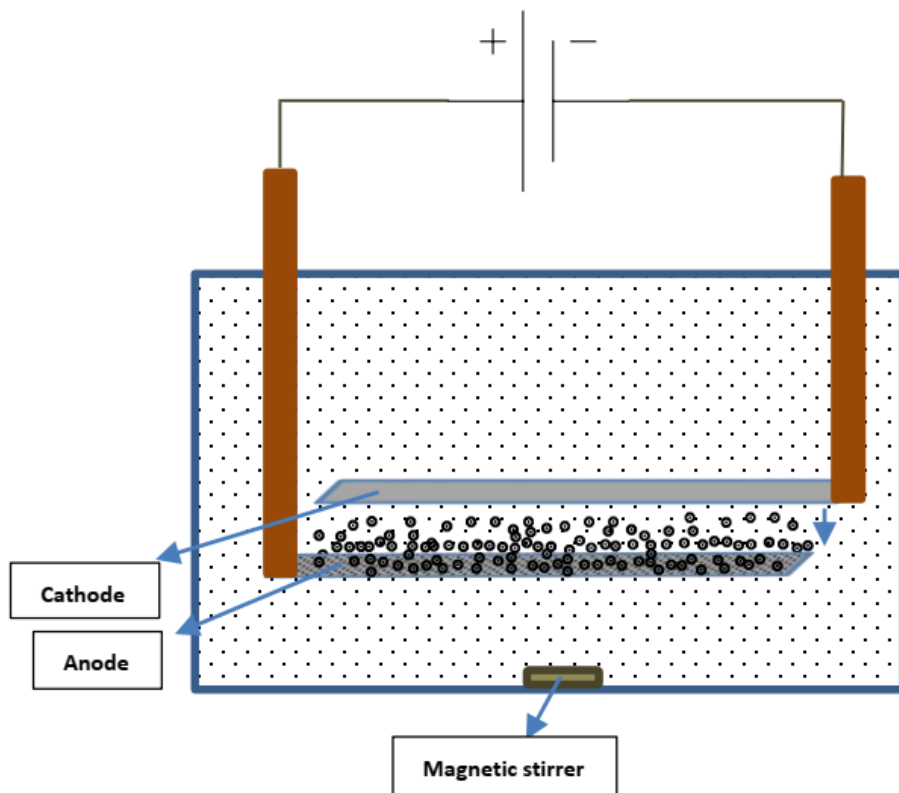
علازغم مطالعات فراوان جهت شبیه‌سازی عددی نانو سیالات، در راستای شبیه‌سازی نانو پوشش‌ها مطالعات چندانی صورت نپذیرفته است. یکی از دلایل آن می‌تواند به خاطر عدم شناخت کافی از پارامترهای سطح باشد. چنانچه در بخش‌های قبل اشاره شد با پوشش‌دهی سطوح و با تغییراتی که در پارامترهای سطح ایجاد می‌گردد ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی تغییرات چشمگیری می‌نمایند. یکی از مهمترین پارامترهای سطح که با پوشش‌دهی تغییر قابل ملاحظه‌ای می‌نماید و همچنین تاثیر فراوانی بر شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت دارد زاویه تماس قطره با سطح می‌باشد. در این مطالعه جهت شبیه‌سازی نانو پوشش‌ها از تغییر در پارامترهای سطح استفاده گردیده است. پارامترهای سطح در جوشش شامل دانسیته مکان هسته‌ها، فرکانس جدایش حباب و قطر جدایش حباب می‌باشد که به صورت تجربی مطالعات فراوانی بر روی آنها صورت پذیرفته است و هر کدام در شرایط متفاوت معادلات تجربی و نیمه تحلیلی خاص خود را دارند. این پارامترها بر یکدیگر اثر می‌گذارند و روابط بدست آمده نیز این موضوع را به اثبات رسانیده است.

۲. روش کار

۲-۱. روش پوشش‌دهی

در بسیاری از مطالعات نقطه ایزوالکتریک دی اکسید تیتانیوم را در PH نزدیک ۶ معرفی کرده‌اند. بنابراین سوسپانسیون‌هایی که PH بالاتر و یا کمتر از این مقدار را داشته باشند، جهت پوشش‌دهی الکتروفوریتیک مناسب می‌باشند. مطالعات بسیاری پوشش‌دهی الکتروفوریتیک کاتدی اکسید تیتانیوم را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین مطالعات بسیاری نیز محیط‌های سوسپانسیونی غیر آبی را جهت پوشش‌دهی الکتروفوریتیک در نظر گرفته‌اند، که معمولاً محیط‌های آلی مانند الکل‌ها و استون می‌باشند. هاناور و همکاران [۵] زتاپتانسیل را در محیط‌های قلیایی و بازی مختلف برای نانو ذرات TiO_2 مورد بررسی قرار دادند. این محیط‌ها توسط دو گروه، که هر کدام شامل یک اسید و یک باز است تنظیم می‌گردند. یکی از این دو گروه تنظیم PH با استفاده از ترکیب اسید نیتریک و هیدروکسید آمونیوم و گروه دوم ترکیب اسید هیدروکلریک و سدیم هیدروکسید می‌باشد. در مطالعه هاناور و همکاران نقطه ایزوالکتریک در PH برابر با ۲٫۸ گزارش شد و تغییرات زتاپتانسیل و اندازه کلوخه‌ها به تغییرات PH را گزارش دادند. در محیط‌های قلیایی میزان زتاپتانسیل به حدود ۶۰- میلی ولت رسیده است. همچنین اندازه کلوخه‌ها در PH های بالا و به عبارتی محیط‌های قلیایی بسیار کم بوده و به اندازه حدوداً ۳۰۰-۴۰۰ نانو متر رسیده است. با توجه به داده‌های

این نمودار و همچنین مطالعاتی که قبلا صورت پذیرفته می‌توان به این نتیجه رسید که محیط‌های قلیایی جهت پوشش‌دهی الکتروفوریتیک بسیار مناسب بوده و به عبارت دیگر الکتروفوریتیک آندی گزینه مناسبی جهت پوشش‌دهی ذرات TiO_2 می‌باشد. در این آزمایش از نوارهای نازک استیل به طول ۹۰ میلی‌متر و عرض ۴ میلی‌متر استفاده شده است. تجهیزاتی که جهت پوشش‌دهی به روش الکتروفوریتیک مورد استفاده قرار گرفته در شکل ۱ نشان داده شده است. از دو نوار مشابه به ابعاد ذکر شده که به دو سر الکترودها وصل شده، استفاده می‌گردد. فاصله بین این دو نوار ۵ میلی‌متر می‌باشد. الکترودها به یک منبع تغذیه DC با محدوده ولتاژ ۰-۵۰ ولت وصل شده است. با توجه به منفی بودن زتا-پتانسیل پوشش بر روی نواری که به آند متصل باشد، ایجاد می‌شود. پس از اتمام پوشش‌دهی، ۲۴ ساعت لازم است که پوشش کاملا خشک شود.



شکل ۱- شمایی از دستگاه پوشش‌دهی به روش الکتروفوریتیک

۲-۲. تجهیزات جوشش استخری

وسایل اندازه‌گیری انتقال حرارت جوشش و شار حرارت بحرانی در شکل ۲ نمایش داده شده است. تجهیزاتی که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است شامل یک ظرف آب، گرم کننده در زیر ظرف، ترمومتر جهت اندازه‌گیری دمای سیال و یک منبع تغذیه DC می‌باشد. دمای نوارها در زمان آزمایش با استفاده از روش ضریب دمایی مقاومت اندازه‌گیری می‌شود. ضریب دمایی مقاومت، نسبت تغییر در مقاومت به تغییر معادل یک درجه سانتیگراد در دما می‌باشد، و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\frac{R(T)}{R(T_0)} = 1 + \alpha \Delta T$$

(۱)

با اندازه‌گیری‌های دقیق، میزان این ضریب برای نوارهای استیل مورد استفاده برابر $0.0005 \pm 0.0006 \text{ K}^{-1}$ در محدوده دمایی ۲۵ تا ۱۶۰ درجه سانتیگراد تعیین شده است. به دلیل رسانایی بالای نوار و همچنین کوچک بودن ضخامت آن عدد بایوت کمتر از ۰٫۱ بوده و بنابراین از آنالیز لامپ می‌توان استفاده نمود. از این رو:

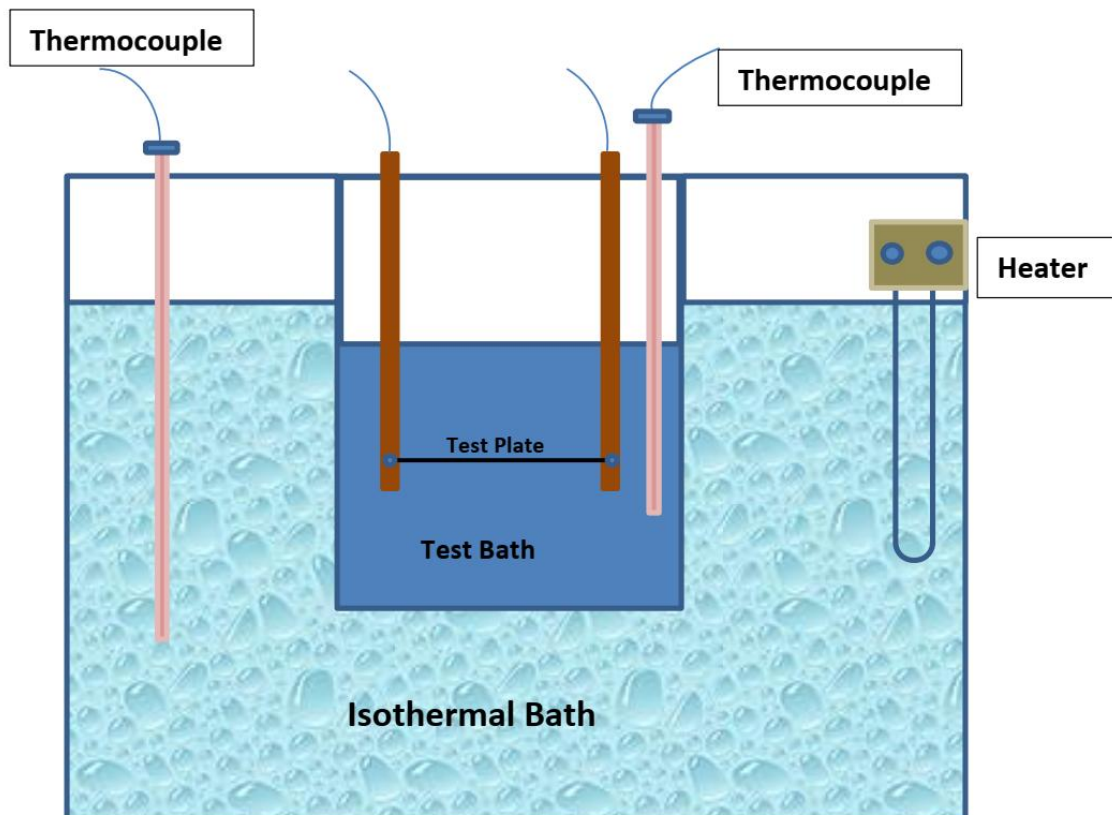
$$q'' = h_{eff} (T_w - T_{sat})$$

(۲)

شار حرارتی را نیز می‌توان با افزایش ولتاژ بالا برد، که مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q'' = IV/A$$

(۳)



شکل ۲- شمایی از سیستم اندازه‌گیری شار حرارتی جوشش استخری و شار حرارت بحرانی

۲-۳. شبیه سازی

یکی از روش‌های پرترفدار و دقیق در پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای بر اساس اصلی که به نام شار حرارتی جزء به جزء معروف می‌باشد و اصطلاحاً بدان روش RPI اطلاق می‌شود. این مدل براساس طرح بورینگ [۶] می‌باشد که در آن مکانیسم‌های مختلف جوشش به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل در ابتدا جهت بررسی جریان جوشش توسعه داده شد اما در این مطالعه جهت بررسی جوشش استخری مورد مطالعه قرار گرفت.

حرارتی که بواسطه جریان جوشش برداشت می‌شود در سه دسته زیر بیان می‌شود:

- حرارتی که صرف تبخیر و گرمای نهان می‌شود و حباب‌ها را ایجاد می‌نماید.
- حرارتی که صرف تشکیل لایه مرزی حرارتی مجدد می‌شود که اصطلاحاً بدان شار حرارتی کوئچ اطلاق می‌شود.
- حرارتی که در نواحی به دور از حباب بواسطه همرفت طبیعی آشفته به فاز مایع منتقل می‌شود.

شار حرارت کلی جوشش از مجموع این شار حرارتی بدست می‌آید و به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$q_{Total}'' = q_e'' + q_q'' + q_c'' \quad (۴)$$

در این مدل، کل شار حرارتی که از دیواره به مایع میرسد به سه قسمت تقسیم می‌شود که این سه قسمت عبارتند از شار حرارتی جابجایی، شار حرارتی کوئچ و شار حرارتی تبخیر.

$$\dot{q}_W = \dot{q}_C + \dot{q}_Q + \dot{q}_E \quad (۵)$$

$$\dot{q}_W = h_c(T_W - T_L)(1 - A_b) + \frac{2k_l}{\sqrt{\pi\lambda_l T}}(T_W - T_l) +$$

$$V_d N_w \rho_v h_{fv} f$$

سطح

دیواره

حرارتی به زیر سطح A_b که به واسطه حباب‌های هسته‌ای پوشانده شده و همچنین $(1 - A_b)$ که با مایع پوشانده شده تقسیم می‌شود. شار حرارتی جابجایی q_c با معادله زیر بیان می‌شود.

$$\dot{q}_C = h_c(T_W - T_L)(1 - A_b) \quad (۶)$$

که در این معادله h_c ضریب انتقال حرارت تک فاز و T_W و T_L به ترتیب دماهای دیواره و مایع می‌باشد.

شار حرارتی quenching (q_Q) انتقال انرژی گذرای متوسط سیکی است که بواسطه پر شدن مایع بعد جدایی حباب در نزدیکی دیواره می‌باشد که با معادله زیر بیان می‌شود.

$$\dot{q}_Q = \frac{2k_l}{\sqrt{\pi\lambda_l T}}(T_W - T_l) \quad (۷)$$

در این معادله k_l ضریب هدایتی گرمایی، T زمان پریودیک و λ ضریب نفوذ می باشد.

$$\lambda_l = \frac{k_l}{\rho_l c_{pl}} \quad (8)$$

شار حرارتی تبخیر نیز با معادله زیر بیان می شود.

$$\dot{q}_E = V_d N_w \rho_v h_{fv} f \quad (9)$$

که V_d حجم حباب بر اساس قطر حباب در لحظه جدایی می باشد، N_w دانسیته مکان هسته های فعال می باشد ρ_v دانسیته بخار، h_{fv} گرمای نهان تبخیر و f فرکانس جدایش حباب می باشد.

در این معادلات پارامترهای سطح نفوذ از رابطه کنینگ و دلواله [۷]، فرکانس جدایش حباب، دانسیته مکان هسته ها از رابطه ایشی [۸] و قطر جدایش حباب [۹] بدست می آیند.

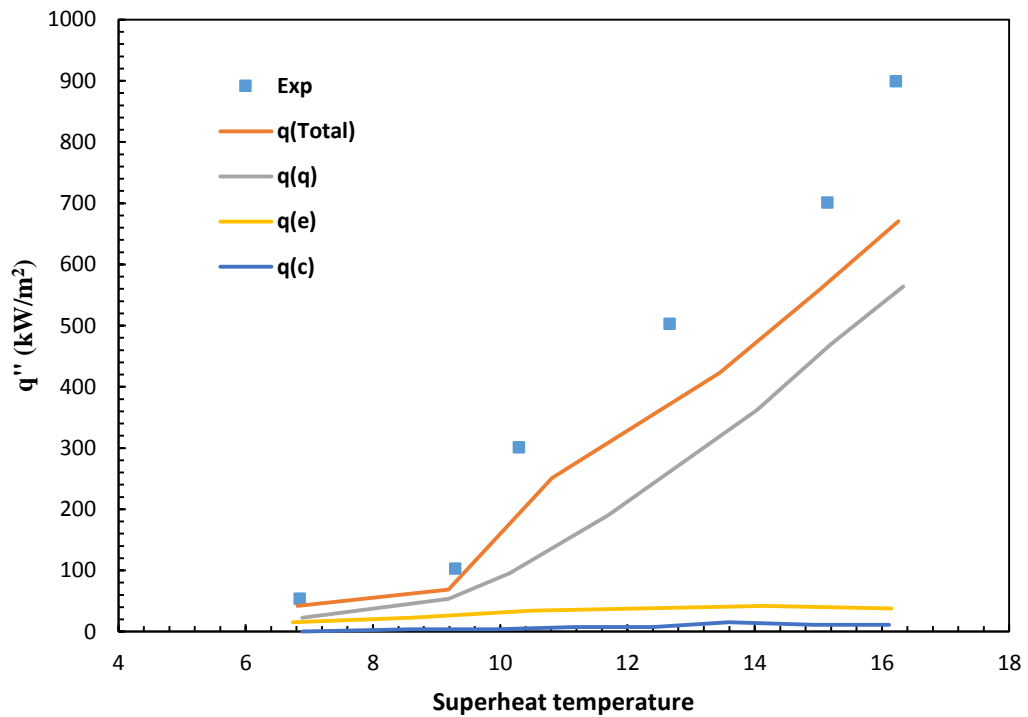
یکی از روابط موجود جهت پیش بینی دانسیته مکان هسته ها رابطه کوکامصطفی اوگلاری و ایشی [۸] می باشد که قطر جدایش حباب بستگی دارد. از طرف دیگر فرکانس جدایش حباب نیز از رابطه کول [۱۰] بدست می آید که به قطر جدایش حباب بستگی دارد. حال اگر رابطه ای را جهت محاسبه قطر جدایش حباب به کار برد که به زاویه تماس بستگی داشته باشد، می توان اثرات زاویه تماس را در تمامی پارامترهای جوشش ایجاد نمود.

در این مطالعه از رابطه فریتز [۹] جهت محاسبه قطر جدایش حباب که به زاویه تماس بستگی دارد استفاده شده است. این رابطه به صورت UDF به نرم افزار فلوئنت اضافه گردیده است و در رابطه دانسیته مکان هسته ها، قطر جدایش حباب با استفاده از این رابطه بدست آمده است.

۳. نتایج

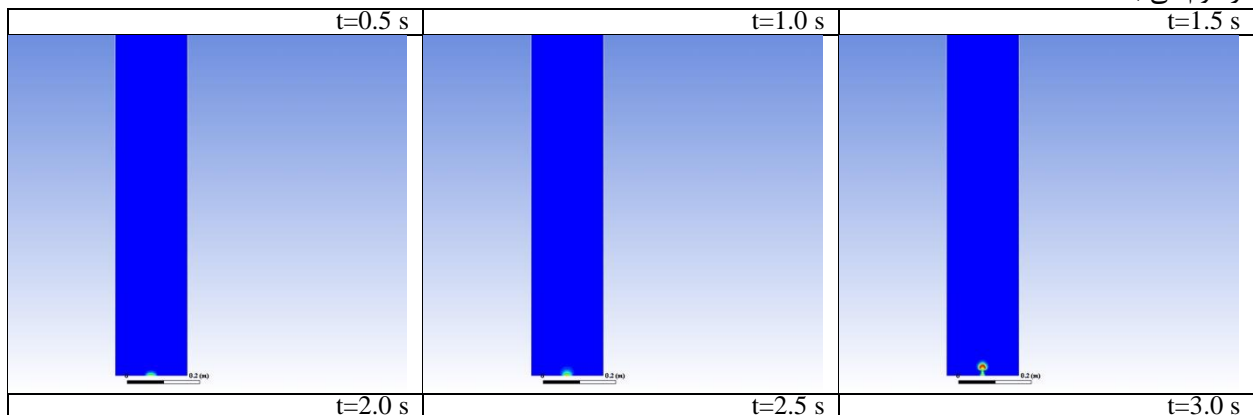
۳-۱. اعتبار سنجی عددی

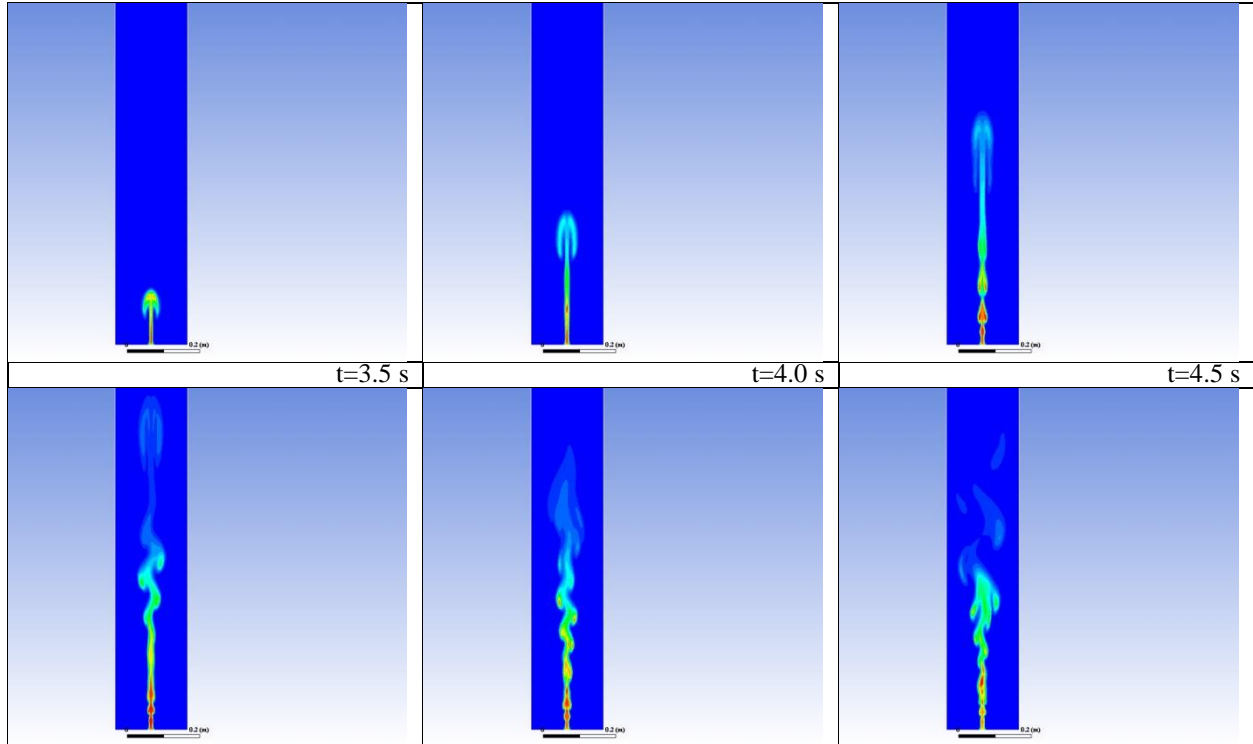
در قسمت دوم از مدل RPI جهت شبیه سازی جوشش استخری استفاده شده است و در این راستا به دلیل سادگی در شبیه سازی از نتایج تجربی جراردی و همکاران [۱۱] استفاده شده است. نتایج در مطالعه حاضر به این دلیل که از نوارها استفاده شده، جهت شبیه سازی مشکل بود، بنابراین از نتایج تجربی جراردی و همکاران استفاده شده است. در شکل ۳ مقایسه میان نتایج تجربی و شبیه سازی عددی جوشش استخری را نشان می دهد. نتایج شبیه سازی به نتایج تجربی نزدیک بوده و روند یکسانی داشته اند. از این رو میتوان از این مدل جهت شبیه سازی نانو پوششها استفاده نمود.



شکل ۳- شبیه سازی جوشش استخری و مقایسه نتایج آن با نتایج تجربی جراردی و همکاران [۱۱]

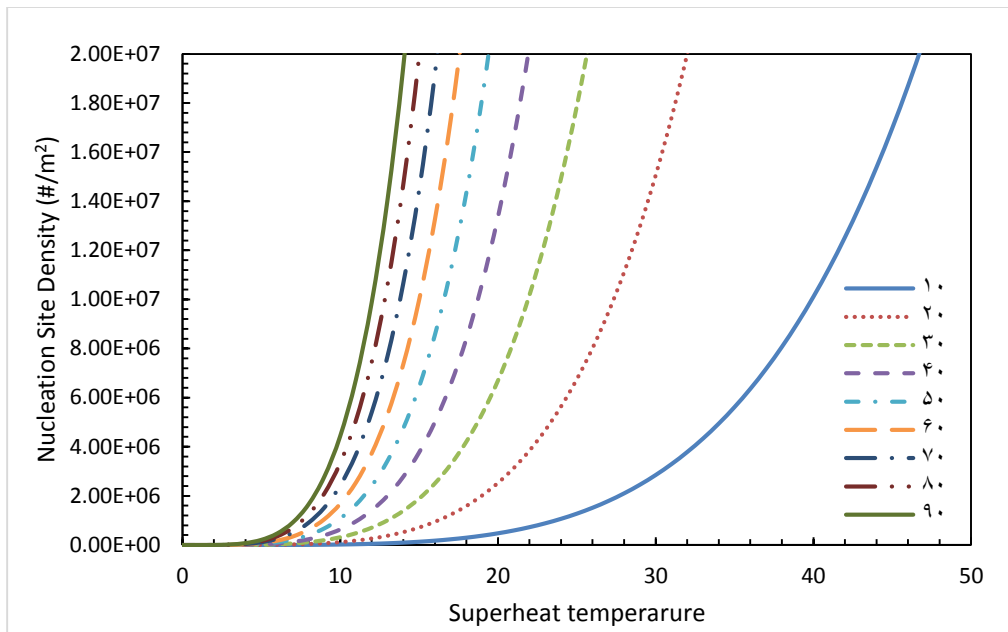
کانتور های فاز بخار در شکل ۴ نشان داده شده است، این کانتور ها در زمان های مختلف نشان دهنده روند رشد کسر حجمی فاز دوم می باشد.





شکل ۴ - کانتور فاز بخار در حل عددی انتقال حرارت جوشش استخری

در این مطالعه از رابطه فریتز [۹] جهت محاسبه قطر جدایش حباب که به زاویه تماس بستگی دارد استفاده شده است. این رابطه به صورت UDF به نرم افزار فلونت اضافه گردیده است و در رابطه دانسیته مکان هسته ها، قطر جدایش حباب با استفاده از این رابطه بدست آمده است. تغییرات دانسیته مکان هسته ها به تغییرات دمای فوق اشباع و در زوایای تماس متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است.

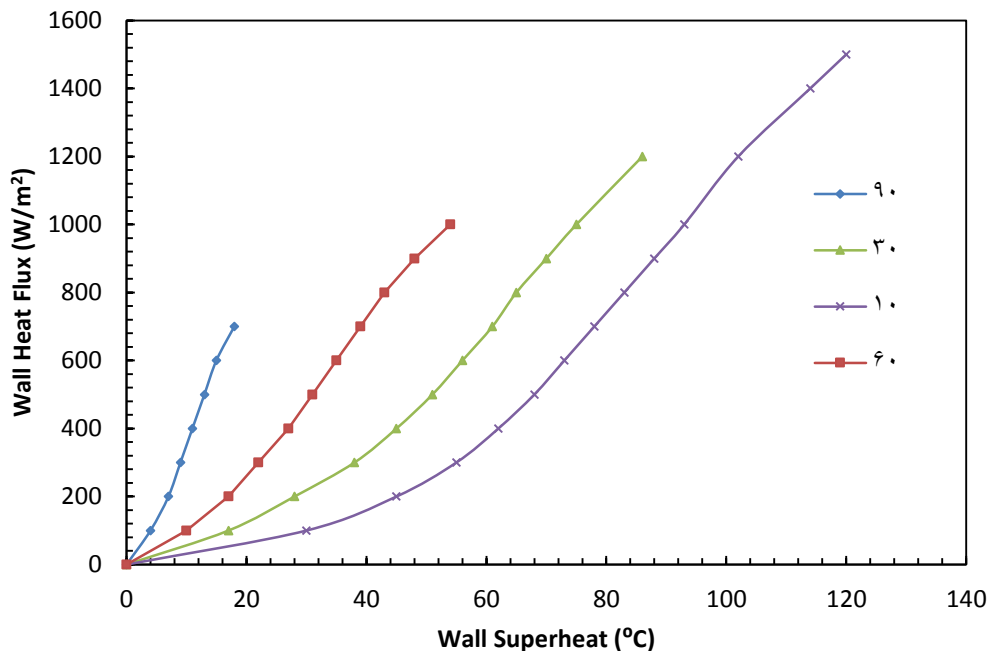


شکل ۵- تغییرات دانسیته مکان هسته ها به دمای فوق اشباع در زاویه های تماس متفاوت

در ادامه با استفاده از معادلات منتخب به حل انتقال حرارت جوشش در یک استخر آب پرداخته می شود. در شکل ۶ نیز منحنی جوشش با حل عددی نانو پوشش ها در زوایای تماس متفاوت را نشان می دهد که با توجه به اینکه روند کاهش ضریب انتقال حرارت و یا افزایش دمای فوق اشباع با کاهش زاویه تماس را نشان می دهد اما نسبت به منحنی های جوشش که از نتایج تجربی در بخش های قبل اندازه گیری شده اند، افزایش دمای فوق اشباع بیشتری را نشان می دهد و به عبارت دیگر ضریب انتقال حرارت کاهش بیشتری داشته است.

این کاهش در ضریب انتقال حرارت می تواند به دو دلیل که یکی عدم دقت کافی در روابط استفاده شده باشد و یکی دیگر نیز وجود اثرات دیگری در انتقال حرارت جوشش نانو پوشش ها باشد که از جمله این اثرات می توان به اثرات موئین و تخلخل و ... اشاره نمود.

به هر حال پدیده جوشش، خود پیچیدگی های فراوانی دارد و ایجاد یک حل عددی مناسب از آن بسیار مشکل می باشد، حال اگر هدف، حل انتقال حرارت جوشش با در نظر گرفتن اثرات نانو پوشش ها باشد این پیچیدگی ها بیشتر می گردد. با این وجود مدل نمودن نانو پوشش ها و محاسبه روند منحنی های جوشش حتی با وجود دقت پایین آن می تواند بسیار مفید باشد.



شکل 6- منحنی جوشش با استفاده از حل عددی نانو پوشش ها در زوایای تماس متفاوت

در مطالعات عددی صورت پذیرفته شار حرارت بحرانی نیز محاسبه گردیده است که در شکل ۷ نشان داده شده است. با کاهش زاویه تماس شار حرارت بحرانی در حل عددی نیز مشابه نتایج تجربی افزایش یافته است. بر خلاف دقت کم ضریب انتقال حرارت روش حل عددی، نتایج بدست آمده از حل عددی شار حرارت بحرانی نشان دهنده دقت قابل قبول این حل را دارد. جهت بررسی بیشتر، مقایسه ای بین نتایج شار حرارتی اندازه گیری شده و نتایج تحلیلی انجام گرفته است. اکثر این روابط تنها تابعی از خواص فیزیکی سیال و مستقل از پارامترهای سطح می باشند. یکی از روابطی که مورد توجه قرار گرفته است، رابطه زوبر [۱۲] می باشد. این رابطه بر اساس تئوری ناپایداری هیدرودینامیکی بیان می شود و در فصل دوم بدان اشاره شده است.

$$q_{CHF}'' = K \rho_g h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \quad (10)$$

در این رابطه K به هندسه جسم بستگی دارد.

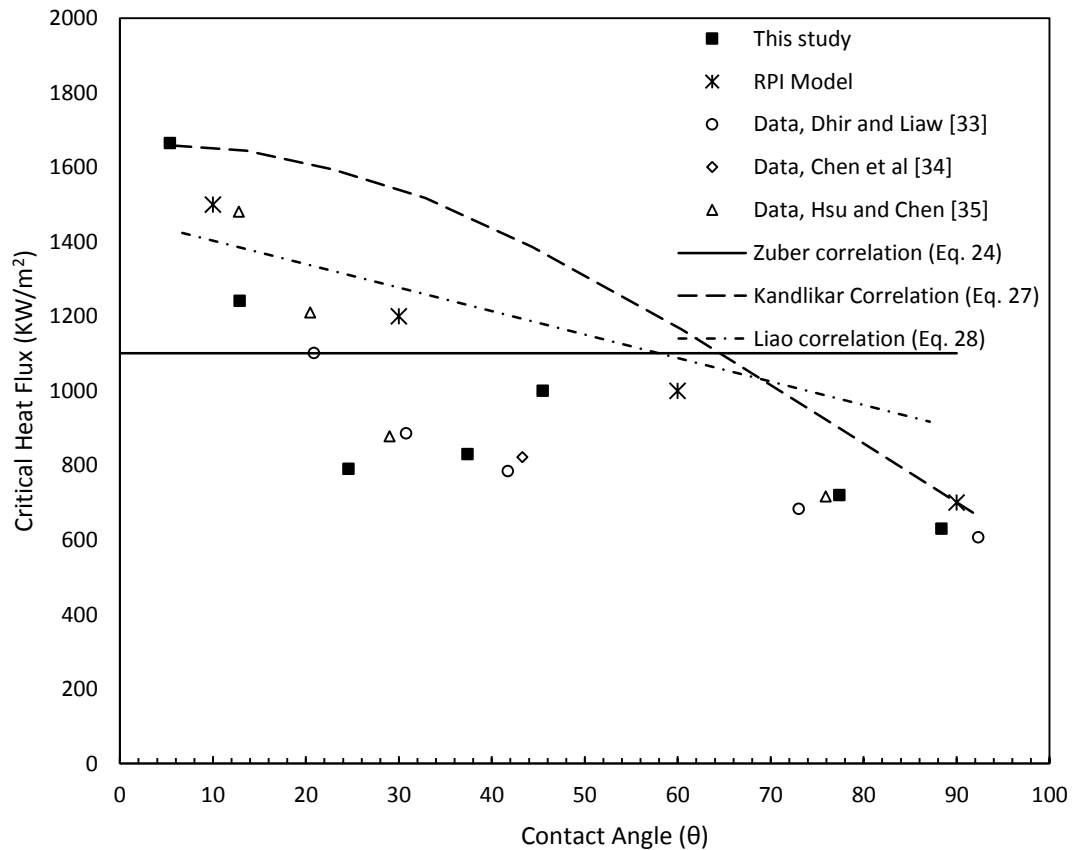
یکی از روابطی که در طی سال های اخیر ارائه شده و شار حرارت بحرانی را به پارامترهای سطح مرتبط می کند، رابطه کندلیکار [۱۳] می باشد. این رابطه به صورت زیر بیان می شود:

$$q_{CHF}'' = \rho_g^{1/2} h_{fg} \left(\frac{1 + \cos \beta}{16} \right) \times \left[\frac{2}{\pi} + \frac{\pi}{4} (1 + \cos \beta) \cos \phi \right]^{1/2} \left[\sigma g (\rho_f - \rho_g) \right]^{1/4} \quad (11)$$

رابطه دیگری در این راستا رابطه لیاوو [۱۴] می باشد، که به صورت زیر بیان می شود:

$$q_{CHF}'' = \left[1 + \frac{55 - \theta}{100} (0.56) \right] \rho_g h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \quad (12)$$

در شکل ۷ نتایج شار حرارت بحرانی بدست آمده از نوار استیل با پوشش دی اکسید تیتانیوم و همچنین روش RPI با نتایج حاصل از روابط اشاره شده و دو داده تجربی دیگر مقایسه شده است. رابطه زوبر مقدار ثابتی را نشان می دهد و مستقل از زاویه تماس می باشد، اما روابط کندلیکار و لیاوو ضمن اینکه روند افزایش شار حرارت بحرانی را تا حدود زیادی به خوبی نشان می دهند، اما پیش بینی آن کمی بیشتر از داده های تجربی است. نتایج بدست آمده در این آزمایش با نتایج تجربی سو و چن [۱۵] (که نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در غلظت های متفاوت را بر صفحات مسی نشانده بودند و زوایای تماس متفاوتی بدست آورده بودند) نزدیکتر می باشد.



شکل ۷- تغییرات شار حرارت بحرانی با زاویه تماس جهت مقایسه نتایج تجربی و عددی در این مطالعه

۴. نتیجه گیری

نتایج بدست آمده در این مطالعه در زیر آورده شده است:

- با پوشش دهی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم میزان آبدوستی سطوح افزایش یافته و شار حرارت بحرانی افزایش یافته است. اما این پوشش دهی سبب کاهش ضریب انتقال حرارت می گردند.
- با تغییرات پارامترهای جوشش در مدل RPI می توان شار حرارت بحرانی نانو پوشش ها مورد بررسی قرار داد و نتایج بدست آمده از این روش بسیار به نتایج تجربی نزدیک می باشد.
- این تغییرات در پارامترهای سطح با در نظر گرفتن تغییرات زاویه تماس در ضخامت های مختلف نانو ذرات بر سطوح و همچنین اثرات این تغییرات بر دیگر پارامترها قابل انجام است.
- نتایج بدست آمده از روابط کندلیکار و لیاو مقادیری بیشتر از نتایج تجربی و شبیه سازی را برای شار حرارت بحرانی نشان می دهند.

مراجع

۱. Buongiorno, J., et al., *Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors: an evaluation of the potential features, issues, and research gaps*. 2008. **162**(1): p. 80-91
۲. Lu, Y.-W. and S.G.J.H.T.E. Kandlikar, *Nanoscale surface modification techniques for pool boiling enhancement—a critical review and future directions*. 2011. **32**(10): p. 827-842
۳. Hadad, K., A. Rahimian, and M.J.a.o.n.e. Nematollahi, *Numerical study of single and two-convection flow in VVER-1000 phase models of water/Al₂O₃ nanofluid turbulent forced nuclear reactor*. 2013. **60**: p. 287-294
۴. Hadad, K., A. Rahimian, and A.J.A.o.N.E. Rabiee, *Nanofluid application in post SB-LOCA transient in VVER-1000 NPP*. 2015. **79**: p. 101-110
۵. D. Hanaor, M. Michelazzi, P. Veronesi, C. Leonelli, M. Romagnoli, and C. Sorrell, "Anodic aqueous electrophoretic deposition of titanium dioxide using carboxylic acids as dispersing agents," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 31, no. 6, pp. 1041-1047, 2011.
۶. Bowring, R., *Physical model, based on bubble detachment, and calculation of steam voidage in the sub-cooled region of a heated channel*. 1962, Institutt for Atomenergi (Norway). OECD Halden Reaktor Prosjekt
۷. Abe, N., et al., *Two-phase flow natural circulation characteristics inside BWR vessels*. 1994. **146**(1-3): p. 253-265
۸. Kocamustafaogullari, G., M.J.I.J.o.H. Ishii, and M. Transfer, *Foundation of the interfacial area transport equation and its closure relations*. 1995. **38**(3): p. 481-493
۹. Fritz, W.J.P.Z., *Berechnung des maximalvolumes von dampfblasen*. 1935. **36**: p. 379-384
۱۰. Cole, R.J.A.J., *A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux*. 1960. **6**(4): p. 533-538



- Gerardi, C., et al., *Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video*. 2010. **53**(19-20): p. 4185-4192. .۱۱
- Zuber, N., *Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer (thesis)*. 1959, Ramo-Wooldridge Corp., Los Angeles, CA (United States); Univ. of California, Los Angeles, CA (United States). .۱۲
- Kandlikar, S.G., *A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation*. *Journal of Heat Transfer*, 2001. **123**(6): p. 1071-1079. .۱۳
- Liao, L., et al., *Compositive effects of orientation and contact angle on critical heat flux in pool boiling of water*. 2008. **44**(12): p. 1447-1453. .۱۴
- Hsu, C.-C., P.-H.J.I.J.o.H. Chen, and M. Transfer, *Surface wettability effects on critical heat flux of boiling heat transfer using nanoparticle coatings*. 2012. **55**(13-14): p. 3713-3719. .۱۵