

مطالعه تحلیلی و تجربی انتقال حرارت جوشش

هسته‌ای استخری بر روی سطوح مسی آب دوست

در این مقاله، تاثیر میزان آب دوستی سطح بر جوشش هسته‌ای استخری آب تحت فشار اتمسفر به صورت تحلیلی مدل گردیده و به صورت تجربی مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. مدل تحلیلی ارائه شده بر خلاف مدل های قبلی، تغییرات زاویه تماس سیال با سطح را در حین رشد حباب در نظر می‌گیرد. مقایسه منحنی جوشش استخری پیش‌بینی شده توسط مدل بهبود یافته با نتایج آزمایشگاهی دیگران و مدل پیشین، تطابق بهتر نتایج را نشان داد. علاوه بر این، سطوح آب-دوست (با زوایای تماس ۳۴، ۲۲ و کمتر از ۱۰) توسط استغراق مس در محلول آبی هیدروکسید سدیم و پرسولفات پتاسیم در زمان‌های مختلف (۳۰، ۶۰، ۱۸۰ دقیقه) ساخته شده و نتایج آزمون جوشش با پیش‌بینی مدل مقایسه می‌گردد. بر اساس نتایج تجربی، عملیات سطحی به کار رفته در این پژوهش به عنوان روشی مؤثر در افزایش ترشوندگی سطح مسی می‌باشد و آب دوستی بیشتر این سطوح باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش استخری نسبت به سطح معمولی می‌گردد.

سیدسینا ارشدی^۱

کارشناسی ارشد

حمید صفاری^۲

دانشیار

امیر میرزا قیطاقی^۳

دانشجوی دکترا

واژه های راهنما: جوشش هسته ای استخری، سطح آبدوست، مدل انتقال حرارت، زاویه تماس دینامیکی

۱- مقدمه

فرآیند جوشش به عنوان روشی مؤثر در انتقال گرما از یک سطح با دمای زیاد به سیال با دمای کمتر در تماس با سطح به کار می‌رود. در این فرآیند پیچیده، انتقال جرم، ممنوم و انرژی (تکفاز و دوفاز) مربوط به دیواره جامد و مایع و بخار به یکدیگر وابسته هستند. با وجود مطالعات و پیشرفت‌های حاصله در نیمه دوم قرن بیستم، هنوز محققین قادر به پیش‌بینی دقیق منحنی جوشش نمی‌باشند. اهم مطالعات بر روی بررسی زیرفرآیندهایی هستند که به عنوان پایه برای توسعه مدل‌های مکانیکی به منظور تعیین شار حرارتی جوششی بر حسب تابعی از سوپرهیت دیواره یا دیگر متغیرهای مستقل به کار گرفته می‌شود. این زیرفرآیندها شامل دینامیک حباب، سوپرهیت مورد نیاز برای جوشش، چگالی هسته‌های جوشش، مکانیزم‌های انتقال حرارت جوششی، مساحت نسبی تماس جامد با مایع و زمان آن، ناپایداری سطح مشترک، انتقال جرم و حرارت در

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران sina_arshadi@mecheng.iust.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران saffari@iust.ac.ir

^۳ نویسنده مسئول، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

a_m_gheitaghy@mecheng.iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۱۸، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۷/۲۸

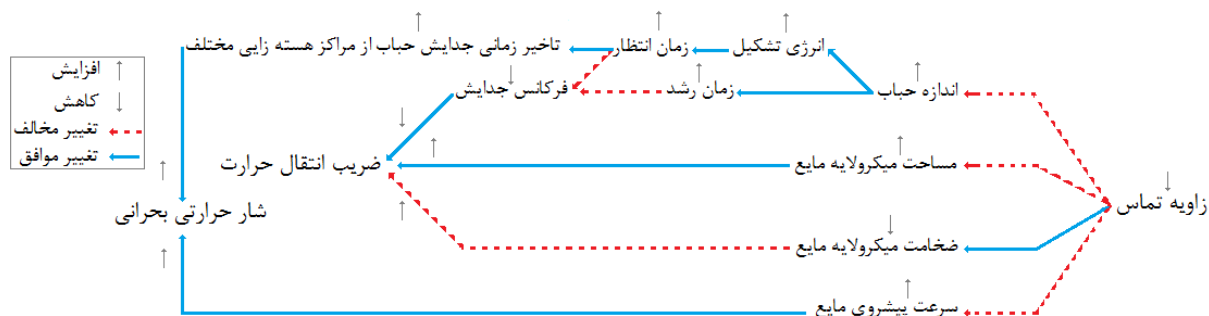
سطح مشترک و ... می‌باشد. هر چند که این مطالعات اساسی در پدیده‌های منفرد، به ندرت در نیل به هدف نهایی موفق می‌باشند. عوامل مؤثر برای ضریب انتقال حرارت شامل فشار اشباع، مشخصات ترمو فیزیکی مایع، مشخصات فیزیکی سطح گرمکن (خواص فیزیکی، اندازه، ضخامت، سطح عملیات، میکروساختار و ...) و اثرات متقابل بین سطح، مایع و بخار (زاویه تماس) است. اثر همزمان این پارامترها و کمبود داده‌های آزمایشگاهی، ایجاد مدلی برای تعیین ضریب انتقال حرارت را دشوار می‌کند. در میان عوامل مؤثر متعدد، سطح انتقال حرارت از چهار جنبه باعث تأثیر بر ضریب انتقال حرارت می‌شود [۱]:

(۱) خواص ماده تشکیل دهنده سطح مخصوصاً ضریب هدایت حرارتی نقش مهمی در انتقال حرارت گذرا در جوشش استخری ایفا می‌کند. با این حال این پارامتر اثر کمی بر روی انتقال حرارت پایا دارد.

(۲) اندازه سطح که معمولاً برای سطوح معمولی قابل صرف نظر کردن است مگر برای سطوح خیلی خاص.

(۳) مورفولوژی سطح که به طور عمده بر روی چگالی سایت های جوششی فعال اثر می‌گذارد و می‌تواند به عنوان تابعی از میانگین حسابی زبری ($Ra < 10 \mu m$) برای سطوح معمولی بدون ساختار مویرگی خاص بیان شود.

(۴) زاویه تماس، که به طور عمده بر روی فرکانس جدایش حباب و سطح تماس مایع جامد اثر می‌گذارد. به طور کلی در مطالعه‌ی اثر خواص سطح بر شار حرارتی بحرانی، تمایل به در نظر گرفتن اثر زبری و زاویه تماس به طور همزمان وجود دارد. اما افزایش زبری باعث دوری زاویه تماس از حالت میانی می‌شود و اثر آن ها بر ضریب انتقال حرارت برعکس یکدیگر است. مطالعات نظری و تجربی سیستماتیک بر روی اثر زاویه تماس هنوز ناقص است و بنابراین هنوز رابطه کلی برای پیش‌بینی اثر زاویه تماس بر ضریب انتقال حرارت وجود ندارد. در دیاگرام شکل (۱)، تاثیر زاویه تماس استاتیکی از طریق پارامترهای مختلف دینامیک حباب بر روی ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی به صورت پیکان های موافق و مخالف نشان داده شده است. به عنوان نمونه، زاویه تماس با پیکان خط چین قرمز رنگ به سرعت پیشروی مایع وصل شده است، بنابراین رفتار متضادی دارند و کاهش زاویه تماس باعث افزایش موینگی و سرعت پیشروی مایع می‌گردد که با توجه به پیکان آبی متصله به شار حرارتی بحرانی، باعث افزایش شار بحرانی می‌شود. بنابراین همانگونه که مشاهده می‌گردد کاهش زاویه تماس (آبدوست نمودن سطح)، منجر به کاهش ضخامت و افزایش مساحت میکرو لایه زیر حباب، افزایش اندازه و کاهش فرکانس جدایش حباب و افزایش پیشروی مایع می‌گردد. بنابراین با توجه به پیکان های موافق، افزایش سرعت پیشروی مایع و تاخیر زمانی جدایش حباب از مراکز هسته‌زایی مختلف باعث افزایش قطعی شار حرارتی بحرانی با کاهش زاویه تماس می‌گردد. اما افزایش مساحت و کاهش ضخامت میکرو لایه موافق افزایش ضریب انتقال حرارت ولی کاهش فرکانس جدایش حباب مخالف افزایش می‌باشد بنابراین نمی‌توان به صورت قطعی در مورد تاثیر کاهش زاویه تماس بر ضریب انتقال حرارت نظری داد. البته تحقیقات اخیر نشان داده که در بحث بررسی جوشش، علاوه بر زاویه تماس استاتیکی، زاویه تماس دینامیکی هم مهم می‌باشد که این مقاله سعی دارد تا حدی در روابط دینامیک حباب وارد شود. در تئوری پدیده‌های موین، زاویه تماس استاتیک و زاویه تماس دینامیک به ترتیب مرزهای ثابت و متحرک در تماس بین جامد، مایع و گاز هستند. زاویه تماس استاتیکی مربوط به حالت سکون قطره و زاویه تماس دینامیکی مربوط به حرکت قطره می‌باشد.



شکل ۱- دیاگرام تاثیر زاویه تماس بر روی پارامترهای جوشش هسته‌ای [۲]

مدل‌های مختلفی به منظور پیش‌بینی عملکرد جوشش استخری و تعیین منحنی شار حرارتی بر حسب سوپرهیت دیواره ارائه شده است. هان و گریفیت [۳] سطح گرمکن را به دو ناحیه متاثر و غیرمتاثر از جدایش حباب تقسیم کردند. بر این اساس، شار حرارتی منتقل شده از سطح گرمکن به مایع نیز به دو بخش هدایت حرارتی گذرا در ناحیه متاثر از حباب و جابجایی آزاد در نواحی غیرمتاثر از حباب، قسمت گردید. ناحیه تحت تأثیر حباب به صورت دایره‌ای بر روی سطح با قطر دو برابر قطر جدایش حباب در نظر گرفته می‌شود. هان و گریفیت در این ناحیه، تشکیل لایه مرزی گرمایی سوپرهیت را برای تشکیل حباب ضروری دانستند. متعاقب آن، میکیچ و روزنو [۴] با اصلاح مدل هان و گریفیت، مشخصات فیزیکی سطح گرمکن را به عنوان پارامتری مؤثر در شار حرارتی جوشش در نظر گرفتند. ایشان با فرض جزئی بودن سهم تبخیر در میزان کل شار حرارتی به رابطه‌ای برای شار حرارتی در ناحیه حباب مجزا دست یافتند که نیاز به تعدادی ثابت تجربی دارد. جاد و هوانگ [۵] روشی مانند میکیچ و روزنو را دنبال کردند اما تبخیر را در دو بخش ماکرولایه و میکرو لایه زیر حباب به صورت مجزا در نظر گرفتند. پائول و عبدالخلیک [۶] جوشش استخری را با استفاده از سیم پلاتینیومی در آب اشباع مطالعه کردند. ایشان با استفاده از تصویر برداری چگالی سایت‌های جوششی، قطر جدایش حباب و فرکانس جدایش حباب را تعیین کردند. آن‌ها توانستند سهم تغییر فاز (تبخیر) و جابجایی آزاد را از شار حرارتی کل تعیین کنند. مشخص شد که در شارهای حرارتی پایین، جابجایی آزاد عامل اصلی انتقال حرارت است ولی در شارهای حرارتی متوسط و زیاد، تغییر فاز سهم عمده را در انتقال حرارت دارد. بنجامین و بالاکریشن [۷] مدلی با مکانیزم زیر ارائه کردند: (۱) جذب گرما توسط میکرو لایه در حال تبخیر؛ (۲) گرمای مصرف شده برای تشکیل مجدد لایه مرزی گرمایی؛ (۳) حرارت منتقل شده با جابجایی آزاد توربولانسی.

همچنین یو و چنگ [۸] مدلی برای انتقال حرارت جوشش استخری بر اساس نحوه توزیع سایت‌های جوششی ارائه کردند و رابطه تحلیلی را بر اساس کسر سایت‌های جوشش به کل سطح جوشش ارائه کردند. سه مکانیزم عمده در انتقال حرارت جوششی این مدل اثر دارد: تولید و جدایش حباب از سایت‌های جوششی بر روی سطوح سوپرهیت، جابجایی آزاد بر روی سایت‌های جوششی غیر فعال سطح و تبخیر میکرو لایه زیر حباب. مدل ایشان فقط برای جوشش استخری مایع خالص در شارهای حرارتی پایین تا متوسط قابل استفاده است. لی و همکاران [۹] مدلی نیمه تحلیلی برای انتقال حرارت جوششی بر روی سطوح آبدوست با در نظر گرفتن زبری سطح و زاویه تماس استاتیک (ثابت) ارائه کردند.

هدف این مقاله، بررسی تئوری و تجربی جوشش هسته‌ای استخری بر روی سطوح آبدوست می باشد. در راستای تحلیل تئوری، مدلی برای جوشش بر روی سطوح آبدوست ارائه می‌گردد که تغییرات زاویه تماس را در حین رشد حباب در نظر بگیرد و بتواند مدل‌های موجود که جدیدترین آن‌ها زاویه تماس را ثابت در نظر گرفته است، به واقعیت پدیده جوشش نزدیکتر کند.

بخش عمده حجم حباب ناشی از تبخیر میکروولایه زیر حباب است و تغییرات زاویه تماس به عنوان پارامتری مؤثر در حجم میکروولایه تبخیر شده زیر حباب در نظر گرفته می‌شود. پس از آن در راستای تحلیل آزمایشگاهی، آبدوستی سطحی از جنس مس با روش شیمیایی پیشنهادی در سه مقدار مختلف، افزایش داده می‌شود و اثر زاویه تماس استاتیکی (ثابت) و دینامیکی (متغیر) بر روی جوشش استخری بررسی می‌گردد. نتایج تحلیلی مدل پیشنهادی با نتایج حاصل از مدل پیشین، نتایج تجربی دیگران و نتایج تست جوشش استخری بر روی سطوح مسی پردازش شده مقایسه گردیده و براساس میزان خطا، صحت‌سنجی می‌شود.

۲- مدل انتقال حرارت جوششی

مکانیزم‌های انتقال حرارت در تشکیل یک حباب، در شکل (۲) نشان داده شده است. حباب شامل میکروولایه و ناحیه خشک است. بعد از تشکیل حباب بر روی سایت جوششی فعال، با تبخیر میکروولایه، بخار مورد نیاز برای رشد حباب تأمین می‌شود. ناحیه خشک سطحی است که با عقب رفتن خط تماس سه‌گانه ایجاد می‌شود. قطر ناحیه خشک با رشد حباب تا لحظه جدایش افزایش می‌یابد. گرمایی که هنگام جوشش از سطح گرمکن به مساحت واحد خارج می‌شود، از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

(۱) q_{me} گرمای نهان مورد نیاز برای تبخیر میکروولایه زیر حباب در حال رشد.

(۲) q_r گرمای مورد نیاز برای تشکیل مجدد لایه مرزی گرمایی بعد از جدایش حباب.

(۳) q_{nc} انتقال حرارت جابجایی طبیعی توربولانس در بخشی از سطح گرمکن که تحت تأثیر جدایش حباب نیست.

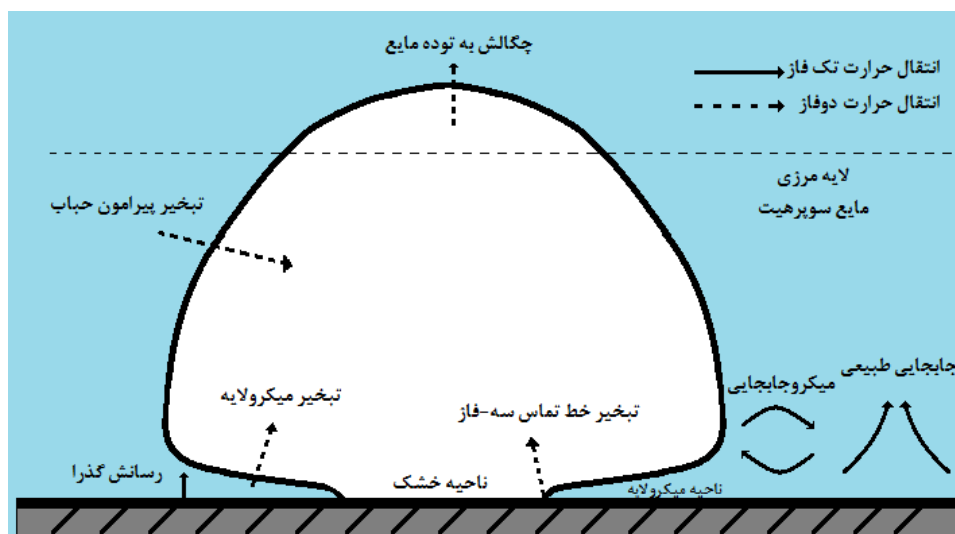
به جمع وزنی دو مورد اول، شار حرارتی متوسط طی یک چرخه رشد حباب گفته می‌شود:

$$q_{cycle} = \frac{q_{me}t_g + q_r t_w}{t_g + t_w} \quad (1)$$

که در آن t_g زمان رشد حباب و t_w زمان مکث برای تشکیل مجدد لایه مرزی گرمایی است. شار حرارتی جوششی کل به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$q_{tot} = q_{cycle} + q_{nc} \quad (2)$$

در ذیل توضیح داده می‌شود که هر یک از بخش‌های گرمایی فوق، چگونه به دست خواهد آمد.



شکل ۲- مکانیزم های انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای

۲-۱- انتقال حرارت جابجایی طبیعی توربولانس، q_{nc}

هان و گریفیت [۳] برای نواحی از سطح که تحت تأثیر جدایش حباب قرار ندارند، مکانیزم انتقال حرارت جابجایی طبیعی توربولانس تکفاز را پیشنهاد دادند:

$$q_{nc} = h_{nc} A_{nc} \Delta T_{sat} \quad (3)$$

$$h_{nc} = 0.14 \rho_l c_{pl} \left(\frac{\gamma g \Delta T_{sat} \alpha_l^2}{\nu_l} \right)^{1/3} \quad (4)$$

که در آن A_{nc} کسری از سطح گرمکن است که تحت تأثیر جدایش حباب قرار ندارد. در هر لحظه، t_{gf} درصد سایت‌های هسته‌زایی هستند که تحت هدایت گذرا قرار دارند و t_{wf} درصد سایت‌های هسته‌زایی هستند که در حالت رشد حباب قرار دارند. مساحتی از سطح بر واحد سطح گرمکن که تحت تأثیر حباب قرار ندارد، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A_{nc} = 1 - t_{gf} N_a \left(\frac{\pi D_b^2}{4} \right) - t_{wf} N_a K \left(\frac{\pi D_b^2}{4} \right) \quad (5)$$

۲-۲- گرمای مورد نیاز برای تشکیل مجدد لایه مرزی گرمایی بعد از جدایش حباب، q_r

به محض جدایش حباب، مایع اشباع اطراف فضای خالی را پر می‌کند و توسط هدایت گذرا گرم می‌شود. گرمای q_r صرف تشکیل مجدد لایه مرزی گرمایی می‌شود:

$$q_r = h_r A_{bub} \Delta T_{sat} \quad (6)$$

که در آن h_r ضریب انتقال حرارت گذرا و A_{bub} مساحت تحت تأثیر جدایش حباب بر واحد سطح است. [۱۰]

$$h_r = \frac{2(k_l \rho_l c_{pl})^{0.5}}{(\pi t_w)^{0.5}} \quad (7)$$

$$A_{bub} = N_a K \left(\frac{\pi D_b^2}{4} \right) \quad (۸)$$

K فاکتور اثر سطح بر روی جدایش حباب است که اکثر محققان عدد ۲ را برای آن پیشنهاد کرده‌اند. N_a چگالی سایت های جوششی فعال می باشد که در ذیل رابطه پیشنهادی برای آن ارائه می شود.

۲-۲-۱- چگالی سایت های جوششی فعال

بنجامین و بالا کریشن [۱۱] پدیده جوشش اشباع استخری را بر روی سطوح با جنس مختلف و پردازش های متفاوت بررسی کردند. آن ها رابطه ای تجربی برای چگالی سایت های جوششی بر اساس میکرو زبری سطح، تنش های سطحی مایع، خواص ترموفیزیکی سطح گرمکن و مایع و سوپرهیت دیواره ارائه دادند:

$$N_a = 218.8 \frac{1}{\gamma} Pr^{1.63} R_{nd}^{-0.4} \Delta T_{sat}^3 \frac{\varphi(\theta)}{\varphi(50)} \quad (۹)$$

که در آن $\varphi(\theta)$ ضریب اثر زاویه تماس و R_{nd} پارامتر زبری بدون بعد سطح است:

$$R_{nd} = 14.5 - 4.5 \left(\frac{R_a P}{\sigma} \right) + 0.4 \left(\frac{R_a P}{\sigma} \right)^2 \quad (۱۰)$$

از R_{nd} برای بیان اثرات زبری متوسط استفاده می شود. P فشار و واحد آن اتمسفر است. رابطه بیان شده برای N_a در محدوده $0.02 \mu m < R_a < 1.17 \mu m$ ؛ $13 \times 10^{-3} N/m < \sigma < 59 \times 10^{-3} N/m$ ؛ $4.7 < \gamma < 93$ ؛ $2.2 < R_{nd} < 14$ ؛ $1.7 < Pr < 5$ ؛ $5K < \Delta T_{sat} < 25K$ معتبر است.

۲-۳- گرمای نهان مورد نیاز برای تبخیر میکرو لایه زیر حباب در حال رشد، q_{me}

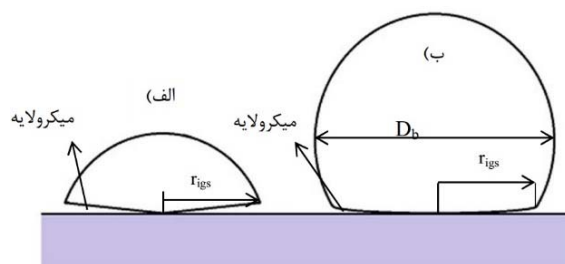
بر اساس مدل بنجامین، گرمای نهان مورد نیاز برای تبخیر میکرو لایه از طریق مکانیزم انتقال حرارت هدایتی منتقل می شود. برای محاسبه شار حرارتی تبخیر q_{me} از گرمای نهان جذب شده توسط حجم میکرو لایه در حال تبخیر بر واحد سطح در زمان رشد t_g استفاده می شود:

$$q_{me} = \frac{(\rho_l h_{lv} V_{me}) N_a}{t_g} \quad (۱۱)$$

که در آن V_{me} حجم میکرو لایه در حال تبخیر زیر حباب در حال رشد است. رشد حباب مطابق شکل (۳)، شامل دو مرحله است و هر کدام، قسمتی از زمان رشد حباب را به خود اختصاص می دهد:

(۱) مرحله رشد اولیه: حباب به شکل قارچ روی سطح گسترش می یابد.

(۲) مرحله رشد نهایی: حباب به شکل کره در می آید.



شکل ۳- مراحل رشد حباب: الف) مرحله رشد اولیه؛ ب) مرحله رشد نهایی

بنابراین حجم میکروولایه از رابطه ذیل حاصل می‌گردد:

$$V_{me} = V_{igs} + V_g = \frac{\int_0^{t_{igs}} A_{me}(t) \delta(t) dt}{t_g} + \frac{\int_{t_{igs}}^{t_g} A_{me}(t) \delta(t) dt}{t_g} \quad (12)$$

مساحت میکروولایه زیر حباب در هر لحظه بر اساس نتایج فن و همکاران [۱۲] به صورت زیر بدست می‌آید:

$$A_{me}(t) = \frac{\pi D_b(t)^2}{4} \cos^2 \theta(t) \quad (13)$$

و $\delta(t)$ ضخامت متوسط میکروولایه در هر لحظه به صورت ذیل بدست می‌آید:

$$\delta(t) = \frac{2\gamma}{3t} \sqrt{\frac{\alpha_l}{\pi}} (t_g^{3/2} - t^{3/2}) \quad (14)$$

در مدل سابق [۹]، زاویه تماس $\theta(t)$ در کل زمان رشد ثابت در نظر گرفته شده است. در این مقاله با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی از رشد حباب روی سطوح آب دوست، زاویه تماس در مرحله رشد اولیه ثابت و برابر زاویه تماس پسرو، و در مرحله رشد نهایی در بازه زاویه تماس پیشرو تا زاویه تماس پسرو به صورت خطی تغییر ذیل در نظر گرفته شده است:

$$\left. \begin{array}{l} t = 0 \rightarrow \theta \approx \theta_r \\ t = t_{igs} \rightarrow \theta = \theta_r \\ t = t_g \rightarrow \theta = \theta_a \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} \theta(t) = \theta_r & , 0 \leq \theta \leq t_{igs} \\ \theta(t) = \frac{\theta_a - \theta_r}{t_g - t_{igs}} (t - t_{igs}) + \theta_r & , t_{igs} < \theta \leq t_g \end{array} \right. \quad (15)$$

بنابراین حجم میکروولایه در مرحله رشد اولیه به صورت ذیل حاصل می‌گردد:

$$V_{igs} = \frac{\int_0^{t_{igs}} \frac{\pi D_b(t)^2}{4} \cos^2 \theta_r \frac{2\gamma}{3t} \sqrt{\frac{\alpha_l}{\pi}} (t_g^{3/2} - t^{3/2}) dt}{t_g} \quad (16)$$

$$= \frac{\cos^2 \theta_r}{10} \sqrt{\pi} B^2 \gamma Ar^{0.27} (\alpha_l t_{igs})^{1.5} Ja$$

و حجم میکروولایه در مرحله رشد نهایی به انتگرال ذیل ساده می‌شود:

$$V_g = \frac{\int_{t_{igs}}^{t_g} \frac{\pi D_b^2(t)}{4} \cos^2 \left(\frac{\theta_r - \theta_a}{t_g} t + \theta_a \right) \cdot \frac{2\gamma}{3t} \sqrt{\frac{\alpha_l}{\pi}} \left(t_g^{3/2} - t^{3/2} \right) dt}{t_g} \quad (17)$$

$$= \frac{\sqrt{\pi}}{6} B^2 Ar^{0.27} \gamma Ja \alpha_l^{3/2} \int_{t_{igs}}^{t_g} \frac{\left(t_g^{3/2} - t^{3/2} \right) \cos^2 \left(\frac{\theta_r - \theta_a}{t_g} t + \theta_a \right)}{t_g} dt$$

انتگرال فوق با استفاده از نرم افزار متلب به صورت عددی حل می‌شود. پارامترهای زمان رشد اولیه، زمان رشد نهایی و ... در روابط فوق مجهول می باشند که در ذیل به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱- زمان رشد اولیه حباب

ژائو و همکاران [۳۱] رابطه زیر را برای زمان رشد مرحله اول ارائه کردند:

$$t_{igs} = \left[\frac{\sqrt{c} \alpha \rho_v h_{fg} r_{igs}}{2k_l \Delta T_{sat}} \right]^2 \quad (18)$$

که در آن $c = 0.64Pr$ است و r_{igs} بزرگترین شعاع حباب در مرحله رشد اولیه است. برای بدست آوردن r_{igs} از تعادل نیروها برای حباب روی سطح استفاده می‌کنیم. بزرگترین شعاع حباب در مرحله رشد اولیه برابر با شعاع ماکزیمم ناحیه ای است که روی سطح اشغال می‌کند. نیروهایی که به حباب بر روی سطح وارد می‌شود شامل F_g نیروی بویانسی، $F_{\sigma,v}$ مؤلفه عمودی نیروی کشش سطحی و F_{cp} نیروی فشار تماسی می باشد.

$$F_g - F_{\sigma,v} + F_{cp} = 0 \quad (19)$$

$$F_{cp} = \pi r_{igs}^2 [P_v - P_l]_{cl} = \pi r_{igs} \sigma \quad (20)$$

$$F_{\sigma,v} = -2\pi r_{igs} \sigma \quad (21)$$

$$F_g = gV_b^* (\rho_v - \rho_l) \quad (22)$$

با استفاده از روابط فوق داریم:

$$r_{igs} = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{-1/2} \tan \theta^{-1/2} L_c} \quad (23)$$

۲-۳-۲- زمان رشد نهایی حباب

زمان رشد حباب بر اساس قطر جدایش حباب به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$t_g = \frac{D_b^2}{B^2 Ar^{0.27} Ja \alpha_l} \quad (24)$$

فن [۱۵] توانست با استفاده از تعریف زاویه تماس ماکرو و میکرو و همچنین بررسی تعادل نیرویی، رابطه زیر را برای قطر جدایش حباب بر روی سطوح آبدوست ارائه کند:

$$D_b = \left(6 \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{-1/2} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right)^{1/3} \tan \theta^{-1/6} L_c \quad (25)$$

و برای محاسبه زمان مکث از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$f = \frac{1}{t_g + t_w} \quad (26)$$

فرکانس جدایش حباب وابسته به قطر جدایش حباب است بنابراین هم نرخ رشد و هم اندازه حباب، تعیین‌کننده فرکانس جدایش هستند. زوبر [۱۶] رابطه ذیل را بر حسب نتایج آزمایشگاهی ارائه کرد:

$$f_b = \frac{0.59}{D_b} \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4} \quad (27)$$

۳- صحت سنجی مدل پیشنهادی

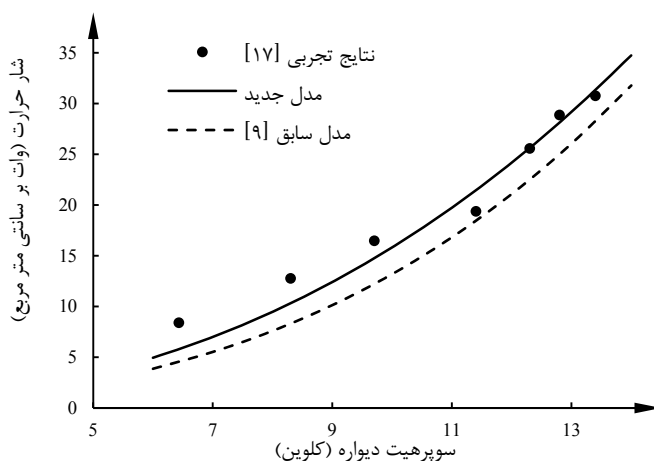
۳-۱- مقایسه مدل پیشنهادی با مدل قبلی

نتایج آزمایشگاهی هسو و چن [۱۷] با مدل سابق [۹] برای جوشش بر روی سه سطح با مدل حاضر مقایسه گردیده است. در مدل سابق زاویه تماس حین رشد حباب ثابت و برابر با زاویه تماس استاتیک در نظر گرفته می‌شود. هسو و چن با استفاده از محلول نانوذرات سیلیکا در آب مقطر با غلظت‌های مختلف و لایه نشانی آن‌ها بر روی سطوح مسی توانستند سطوح آبدوستی با زاویه تماس‌های 16° ، 25° و 75° به دست آورند. آزمایش جوشش هسته‌ای بر روی سطوح تولیدشده در فشار اتمسفر انجام گرفت و نتایج حاصله به صورت منحنی جوشش تا شار حرارتی بحرانی ارائه گردید.

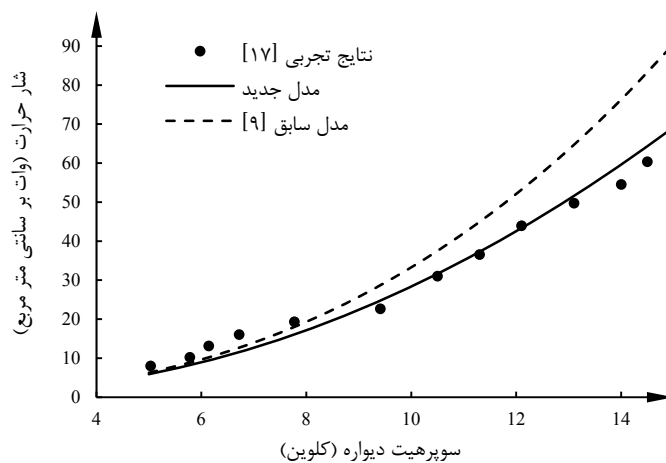
خواص سطوح در جدول (۱) ارائه شده است (خواص سطح A با سطح مس معمولی مشابه می‌باشد). نتایج منحنی‌های جوشش هسته‌ای استخری بر روی این سطوح در شکل‌های (۴) الی (۶) ارائه شده است. برای سطح A، خطای مدل سابق در ابتدا حدود ۴۰٪ است و با افزایش شار حرارتی، خطا کاهش می‌یابد و به نتایج تجربی نزدیک می‌شود ولی خطای مدل جدید برای نقطه اول تجربی در شار حرارتی کم حدود ۳۰٪ است و در ادامه کاهش می‌یابد. برای سطح B تا قبل از سوپرهِیت دیواره 9°C مدل قدیمی به نتایج تجربی نزدیکتر است ولی پس از آن مدل جدید، نتایج با خطای کمتر ارائه می‌دهد (کمتر از ۱۰٪). برای سطح C، خطای مدل سابق در ابتدا حدود ۳۰٪ است ولی خطای مدل جدید برای نقطه تجربی اول حدود ۲۰٪ است.

جدول ۱- خواص سطوح پردازش شده [۱۷]

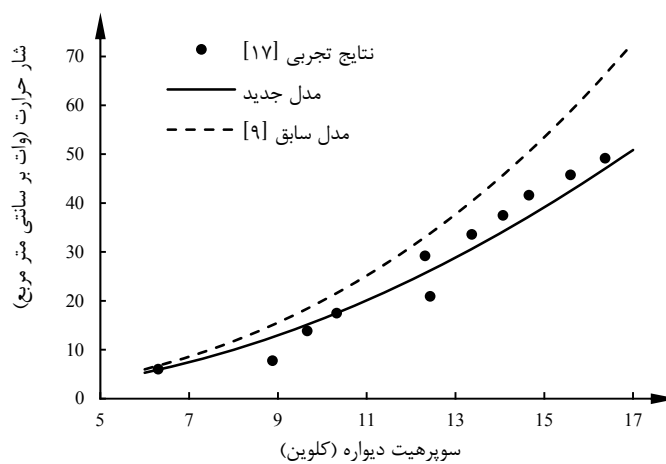
عنوان سطح	θ	θ_a	θ_r	$R_a(\mu\text{m})$
A	۷۵	۸۰/۵	۵۵/۲	۰/۱۵
B	۲۵	۲۸/۳	۱۱/۷	۰/۲۱
C	۱۶	۱۷/۴	<۱۰	۰/۳۰



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل جدید و مدل سابق با نتایج تجربی برای سطح A



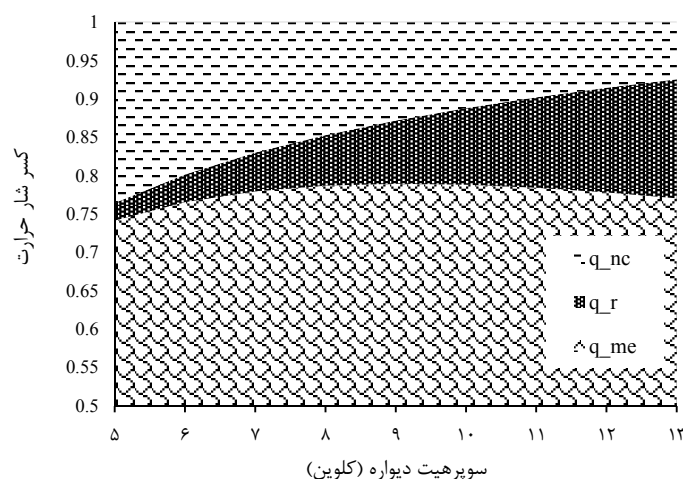
شکل ۵- مقایسه نتایج مدل جدید و مدل سابق با نتایج تجربی برای سطح B



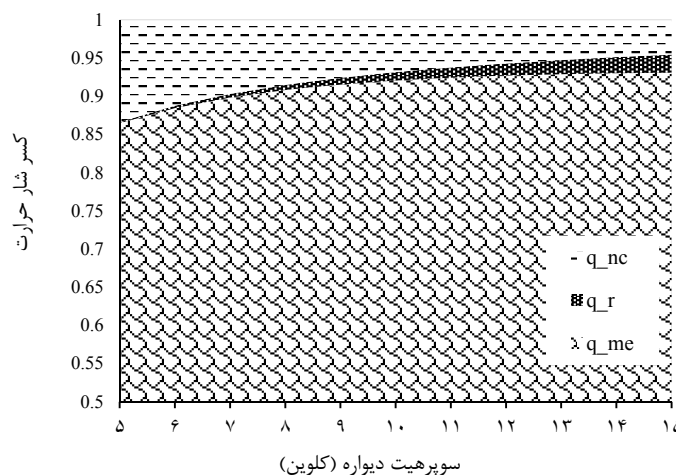
شکل ۶- مقایسه نتایج مدل جدید و مدل سابق با نتایج تجربی برای سطح C

در ادامه برای هر سطح نسبت ترم‌های شار حرارتی نهان، شار حرارتی هدایت گذرا و شار حرارتی جابجایی طبیعی به شار حرارتی کل به ترتیب به صورت $q_{me}\% = q_{me}/q_{tot}$ ، $q_r\% = q_r/q_{tot}$ و $q_{nc}\% = q_{nc}/q_{tot}$ محاسبه شده است. همانطور که در شکل‌های (۷) تا (۹) مشاهده می‌شود با افزایش دما، سهم ترم‌های شار حرارتی نهان و شار حرارتی هدایت گذرا افزایش می‌یابد.

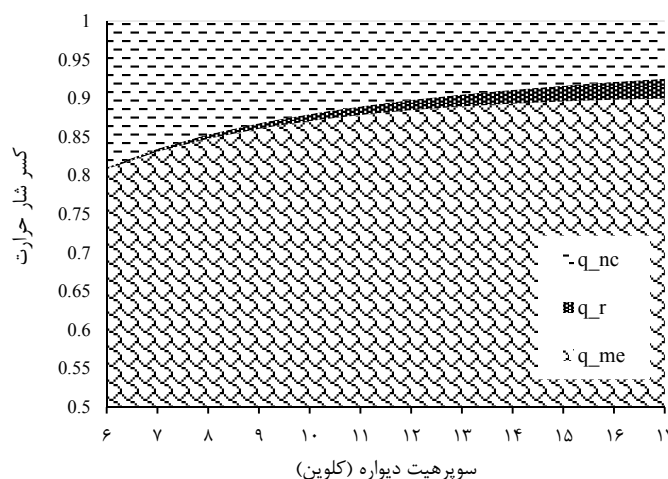
شار حرارتی جابجایی طبیعی که در سوپرهیت پایین سهم عمده را در انتقال حرارت دارد با افزایش دما به دلیل کاهش سطح اثر، به شدت کاهش می‌یابد. سهم شار حرارتی نهان در سطوح B و C حدود ۹۰٪ و برای سطح A حدود ۷۵٪ کل انتقال حرارت حین جوشش است که دلیل آن وجود تبخیر میکرو لایه زیر حباب در این ترم و ضریب انتقال حرارت بسیار بیشتر آن نسبت به سایر ترم‌های شامل انتقال حرارت جابجایی است. دلیل اختلاف بین سطوح B و C با سطح A می‌تواند به دلیل تفاوت کشش سطحی می‌باشد زیرا به جز پارامترهای ارائه شده در جدول (۱) تنها تفاوت این دو گروه، کشش سطحی آن‌ها می‌باشد. در واقع برای سطوحی که با استفاده از روش‌های مختلف مانند تکنولوژی نانو، فرآیند شیمیایی و ... لایه‌ای نازک از جنس دیگری متفاوت با جنس فلز پایه بر روی سطح تشکیل می‌شود، از خواص فلز پایه به عنوان خواص سطح در روابط استفاده می‌شود و فقط کشش سطحی با توجه به جنس جدید و مایع جوشش تغییر داده می‌شود.



شکل ۷- نسبت شارهای حرارتی تبخیر میکرو لایه، تشکیل مجدد لایه مرزی گرمایی و جابجایی طبیعی به شار حرارتی کل برای سطح A



شکل ۸- نسبت شارهای حرارتی تبخیر میکرو لایه، تشکیل مجدد لایه مرزی گرمایی و جابجایی طبیعی به شار حرارتی کل برای سطح B



شکل ۹- نسبت شارهای حرارتی تبخیر میکرو لایه، تشکیل مجدد لایه مرزی گرمایی و جابجایی طبیعی به شار حرارتی کل برای سطح C

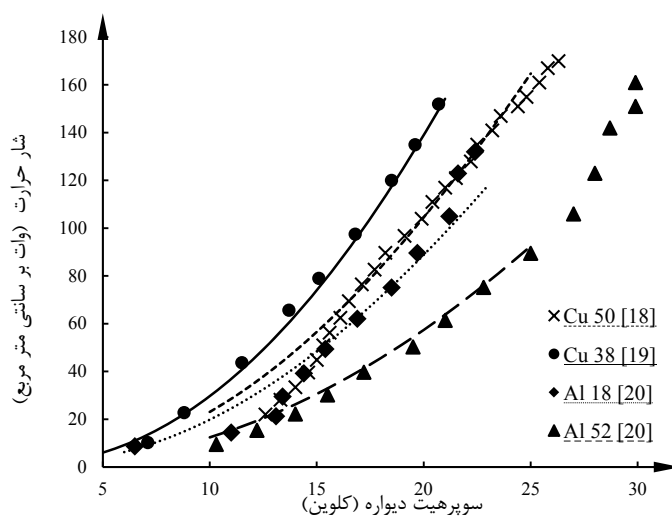
۳-۲- مقایسه مدل با دیگر داده‌های آزمایشگاهی

در ادامه کار، مدل حاضر با چند داده آزمایشگاهی دیگر برای جوشش بر روی سطوح پردازش شده مسی و آلومینیومی در شکل (۱۰) مقایسه شده است. در این شکل، نقاط مربوط به داده‌های آزمایشگاهی و خطوط مربوط به نتایج مدل سازی می‌باشد. این سطوح با روش‌های مختلف پردازش شده‌اند و دارای خواص سطح و پارامترهای متفاوت می‌باشند. کوارک و همکاران [۱۸] جوشش استخری روی سطوح لایه نشانی شده توسط نانوذرات را بررسی کردند. آن‌ها برای ایجاد لایه نانو بر روی سطح، محلول نانوذرات آلومینیم اکسید در آب را بر روی سطح مسی جوشاندند و حاصل آن سطحی با زاویه تماس 50° بر روی سطح شد. پس از ایجاد سطح، جوشش استخری را بر روی آن آزمایش نموده و نتایج به صورت منحنی جوشش تا شار حرارتی بحرانی در شکل (۱۰) به صورت ضربدر نشان داده شده است. نتایج حاصل از مدل در سوپرهیت دیواره کم، تفاوت زیادی با نتایج آزمایشگاهی دارد اما با افزایش سوپرهیت دیواره این میزان خطا کاهش پیدا کرده به طوری

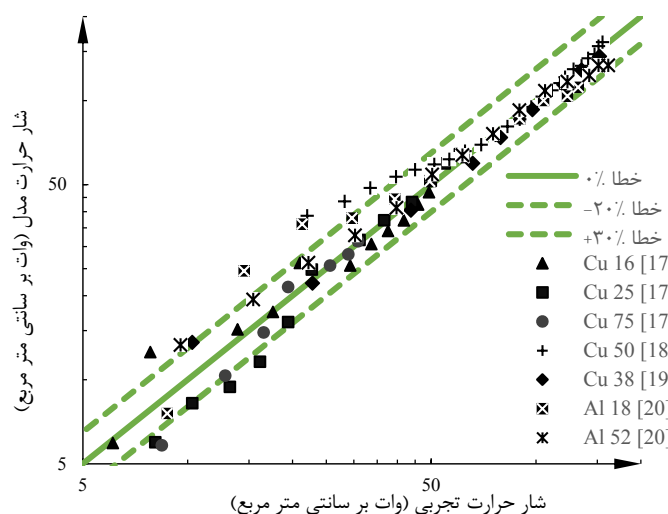
که خطای مدل در سوپرهیت دیواره 10°C به حدود 30% می‌رسد و پس از آن برای سوپرهیت بالاتر از 15°C خطا کمتر 4% می‌شود. لی و همکاران [۱۹] نانومیله‌هایی را بر روی سطح مسی ایجاد کردند. برای این کار نانوذرات مس را بر روی سطح قرارداده و پرتو الکترونی را بر روی سطح تاباندند. نانومیله‌ها به صورت مایل نسبت به سطح و هم‌جهت ایجاد شده و باعث کاهش زاویه تماس سطح به 38° می‌شود. خطای مدل حاضر برای این داده‌های آزمایشگاهی که به صورت دایره نشان داده شده است، (به جز یکی از نقاط منحنی در سوپرهیت دیواره 7°C با خطای 31%) کمتر از 10% می‌باشد. عالم‌رجبی و سعیدی [۲۰] جوشش استخری روی سطوح آلومینیمی دارای نانوساختار را بررسی و با سطح آلومینیوم معمولی مقایسه کردند. برای این منظور ساختار نانو را بر روی سطح آلومینیمی با استفاده از محلول اسید کرومیک و اسید سولفوریک به عنوان الکترولیت پردازش کردند. برای ایجاد سطوح با خواص مختلف، زمان انجام عملیات پردازش سطح برای مراحل مختلف را تغییر دادند. نتایج جوشش بر روی دو سطح با زاویه تماس 18° و 52° استخراج گردید (در شکل (۱۰) به صورت لوزی و مثلث نمایش داده شده است) و با مدل حاضر مقایسه شد. برای هر دو سطح در سوپرهیت دیواره کم، میزان خطا زیاد است ولی با افزایش سوپرهیت، نتایج حاصل از مدل به سمت داده‌های آزمایشگاهی میل می‌کند.

حدود 90% از نتایج مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در بازه $20\% +$ و $30\% -$ قرار دارد که با توجه به پیچیده بودن فرآیند جوشش و تعدد پارامترهای تأثیرگذار در این فرآیند و همچنین تأثیر این پارامترها بر یکدیگر، تقریب خیلی خوبی است. این خطا می‌تواند به دلیل تقریب‌های موجود در هر جزء از عبارت کلی باشد. به عنوان مثال هرکدام پارامترهای استفاده شده مانند قطر جدایش حباب و یا چگالی سایت‌های جوششی و یا فرکانس جدایش دارای خطا می‌باشند که در نتیجه بر روی رابطه نهایی نیز اثر می‌گذارند. شکل (۱۱) منحنی خطا بین مدل ارائه شده و داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. برای محاسبه خطا، از میان‌بایی مقادیر شار حرارتی مدل حاضر در نقاط متناظر با سوپرهیت دیواره داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. برای محاسبه خطا از رابطه (۲۸) استفاده شده است:

$$\text{error} = \frac{q_{\text{experimental}} - q_{\text{model}}}{q_{\text{experimental}}} \times 100 \quad (28)$$



شکل ۱۰- مقایسه منحنی شار بر حسب دما برای نتایج تجربی و مدل ارائه شده



شکل ۱۱- منحنی تغییرات شار حرارتی بر حسب زاویه تماس

۴- تولید سطوح آبدوست و نتایج آزمون جوشش

به منظور مطالعه تجربی مدل، سطوح آبدوست مختلف با فرآیند شیمیایی ساخته شدند و نتایج آزمایشی حاصل از انجام جوشش استخری بر روی آنها با پیش‌بینی مدل مقایسه گردید.

۴-۱- تولید سطوح آب دوست مسی

روش‌های مختلفی مانند سل-ژل، پلاسما، الکتروشیمیایی، هیدروترمال و ... به منظور ایجاد آب دوستی بر روی سطح فلز استفاده گردیده است. یکی از ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها به منظور آبدوستی سطح فلز مس، رشد نانومیله‌های اکسید مس بر روی سطح به روش شیمیایی می‌باشد [۲۱]. ماهیت شیمیایی مس غیرفعال است و در هوای خشک و یا آب خالص در دمای اتاق هیچ واکنش شیمیایی نمی‌دهد. با غوطه‌ور کردن قطعه مسی در محلول پتاسیم پرسولفات ($K_2S_2O_8$) و سدیم هیدروکسید (NaOH)، اکسید مس (CuO) بر روی سطح رشد می‌نماید. اکسید مس ذاتا آبدوستی بیشتری نسبت به فلز مس دارد و ایجاد زبری توسط نانومیله‌ها باعث ابرآبدوستی سطح می‌گردد. از پارامترهای تاثیرگذار در این فرآیند می‌توان به غلظت ترکیبات محلول، دمای فرآیند و زمان اشاره نمود که در این تحقیق با افزایش زمان فرآیند، سه نوع سطح با آبدوستی متفاوت ایجاد می‌گردد. مراحل تولید سطح به شرح زیر بیان می‌گردد:

(۱) قطعه مسی را سنباده زده تا اکسید مس از سطح جدا شود و سپس با آب مقطر به مدت یک دقیقه شسته تا آلودگی‌های روی سطح پاک شود.

(۲) قطعه مسی را از آب خارج کرده و در هوای آزاد قرار داده تا خشک شود.

(۳) محلول با غلظت ۱ g/L پتاسیم پرسولفات و ۵ g/L سدیم هیدروکسید در دمای محیط تهیه کرده و سپس قطعه مسی را در آن به مدت مشخص شده در جدول (۱)، در محلول غوطه‌ور کرده تا نانوساختارهای اکسید مس بر روی سطح ایجاد شوند.

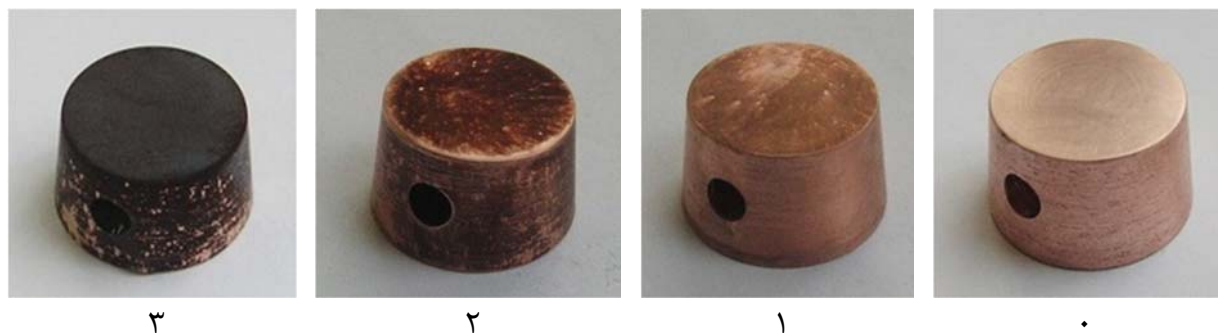
- (۴) قطعه مسی را از محلول خارج کرده و سپس به مدت یک دقیقه در آب مقطر قرار داده می شود.
- (۵) سطح را از آب مقطر خارج کرده و در معرض هوا قرار داده تا خشک شود.
- زبری سطح، زاویه تماس، زاویه تماس پسر و زاویه تماس پیشرو در سه نقطه مختلف سطح و استفاده از مقدار میانگین، اندازه‌گیری شده و در جدول (۲) ارائه شده است.

۲-۴- نتایج آزمایش جوشش استخری و مقایسه با مدل

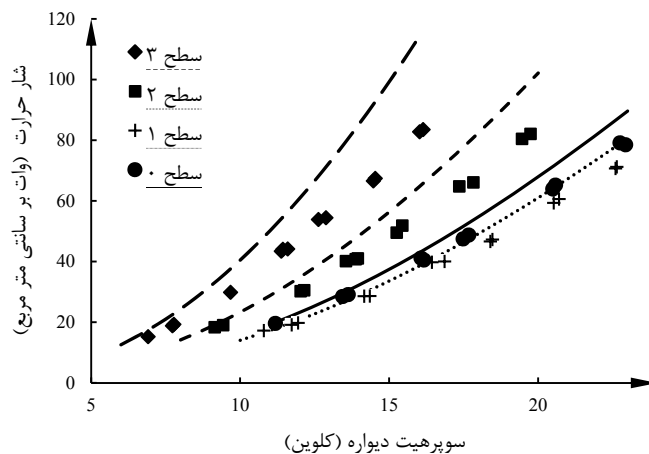
سطح مس معمولی و سطوح پردازش شده با استفاده از دستگاه جوشش تحت آزمایش قرار گرفتند و نتایج حاصل با مدل ارائه شده مقایسه گردید. همانگونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌گردد، با افزایش آب دوستی سطح، ضریب انتقال حرارت جوششی افزایش یافته و سوپرهیت موردنیاز برای جوشش کاهش می‌یابد. برای سطوح شماره صفر، ۱ و ۲ نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند و خطا در بازه ۱۲٪ قرار دارد. برای سطح شماره ۳ میزان خطا حدود ۲۵٪ است که با توجه به مشخص نبودن اندازه دقیق زوایای تماس و در نظر گرفتن مقادیر تقریبی برای این پارامترها، میزان خطای بدست آمده زیاد می‌باشد. برای این سطح زاویه تماس استاتیک برابر ۸ درجه، پیشرو ۹ درجه و پسر ۵ درجه در نظر گرفته شد. شکل (۱۲) قطعات مسی مورد استفاده در دستگاه آزمون جوشش را نشان می‌دهد که سطح آن‌ها با فرآیند شیمیایی آبدوست شده است.

جدول ۲- خواص سطوح پردازش شده

شماره سطح	زمان فرآیند	θ	θ_a	θ_r	Ra(μm)
۰	مس ساده	۷۵	۸۳	۶۴	۰/۱۵
۱	۳۰ دقیقه	۳۴	۴۴	۳۰	۰/۱۸
۲	۱ ساعت	۲۲	۳۰	۱۸	۰/۲۳
۳	۳ ساعت	<۱۰	<۱۰	<۱۰	۰/۳۵



شکل ۱۲- سطوح مسی آب دوست شده توسط فرآیند شیمیایی در زمان های مختلف



شکل ۱۳- منحنی جوشش برای سطوح پردازش شده

۵ - نتیجه گیری

بحث بهبود انتقال حرارت جوششی با استفاده از تغییر ترشوندگی سطح گرمکن، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌های تئوری بر اساس مکانیزم انتقال حرارت و دینامیک حباب در حال توسعه می‌باشد و سطوح با روش‌های مختلف تغییر ترشوندگی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار می‌گیرد.

در این مقاله بر اساس دینامیک رشد حباب، مدلی برای جوشش هسته‌ای بر روی سطوح آبدوست ارائه شد که در آن زاویه تماس حباب را در حین رشد حباب متغیر در نظر می‌گیرد. بر اساس این مدل هنگام تشکیل حباب بر روی سطح، در مرحله اولیه رشد حباب اندازه زاویه تماس برابر با زاویه تماس پسر و باقی می‌ماند. پس از آن در مرحله رشد نهایی حباب اندازه زاویه تماس از زاویه تماس پسر و تا زاویه تماس پیشرو به صورت خطی افزایش می‌یابد. پیش‌بینی این مدل و داده‌های آزمایشگاهی موجود همگرایی خوبی داشتند و نسبت به مدل سابق خطای کمتری وجود دارد. نشان داده شد تبخیر میکروولایه سهم عمده (بیش از ۷۵٪ در سوپرهیت‌های زیاد) در مکانیزم انتقال حرارت جوششی دارد.

همچنین سطوح مسی با درجات آبدوستی مختلف، به روش ساده و ارزان شیمیایی ساخته شد. مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیلی انتقال حرارت جوشش استخری بر روی این سطوح نشان داد کاهش زاویه تماس، باعث افزایش شار حرارت در سوپرهیت دیواره ثابت می‌شود.

مراجع

- [1] Jones, B. J., McHale, J. P., and Garimella, S. V., "The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 131, No. 12, pp. 121-129, (2009).
- [2] Phan, H. T., Caney, N., Marty, P., Colasson, S., and Gavillet, J., "How Does Surface Wettability Influence Nucleate Boiling?", *C. R. Mecanique* 337, pp. 251-259, (2009).

- [3] Han, C., and Griffith, P., "The Mechanism of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 8, No. 6, pp. 887-914, (1965).
- [4] Mikic, B., and Rohsenow, W., "A New Correlation of Pool-boiling Data Including the Effect of Heating Surface Characteristics", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 91, No. 2, pp. 245-250, (1969).
- [5] Judd, R., and Hwang, K., "A Comprehensive Model for Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Including Microlayer Evaporation", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 98, No. 4, pp. 623-629, (1976).
- [6] Paul, D., and Abdel-Khalik, S., "A Statistical Analysis of Saturated Nucleate Boiling Along a Heated Wire", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, No. 4, pp. 509-519, (1983).
- [7] Benjamin, R., and Balakrishnan, A., "Nucleate Pool Boiling Heat Transfer of Pure Liquids at Low to Moderate Heat Fluxes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 12, pp. 2495-2504, (1996).
- [8] Yu, B., and Cheng, P., "A Fractal Model for Nucleate Pool Boiling Heat Transfer", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 124, No. 6, pp. 1117-1124, (2002).
- [9] Li, Y. Y., Liu, Z.H., and Wang, G.S., "A Predictive Model of Nucleate Pool Boiling on Heated Hydrophilic Surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 789-797, (2013).
- [10] Del Valle, V. H., and Kenning, D., "Subcooled Flow Boiling at High Heat Flux", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 10, pp. 1907-1920, (1985).
- [11] Benjamin, R., and Balakrishnan, A., "Nucleation Site Density in Pool Boiling of Saturated Pure Liquids: Effect of Surface Microroughness and Surface and Liquid Physical Properties", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 15, No. 1, pp. 32-42, (1997).
- [12] Phan, H. T., Caney, N., Marty, P., Colasson, S., and Gavillet, J., "Surface Wettability Control by Nanocoating: the Effects on Pool Boiling Heat Transfer and Nucleation Mechanism", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 23, pp. 5459-5471, (2009).
- [13] Zhao, Y.H., Masuoka, T., and Tsuruta, T., "Unified Theoretical Prediction of Fully Developed Nucleate Boiling and Critical Heat Flux Based on a Dynamic Microlayer Model", *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 45, No. 15, pp. 3189-3197, (2002).
- [14] Sernas, V., and Hooper, F., "The Initial Vapor Bubble Growth on a Heated Wall During Nucleate Boiling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, No. 12, pp. 1627-1639, (1969).

- [15] Phan, H. T., " Effects of Nano-and Micro-Surface Treatments on Boiling Heat Transfer", PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, (2010).
- [16] Zuber, N., "The Region of Isolated Bubbles and the Similarity with Natural Convection", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 6, No. 1, pp. 53-78, (1963).
- [17] Hsu, C. C., and Chen, P.H., "Surface Wettability Effects on Critical Heat Flux of Boiling Heat Transfer using Nanoparticle Coatings", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, No. 13-14, pp. 3713-3719, (2012).
- [18] Kwark, S. M., Moreno, G., Kumar, R., Moon, H., and You, S. M., "Nanocoating Characterization in Pool Boiling Heat Transfer of Pure Water", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No. 21, pp. 4579-4587, (2010).
- [19] Li, C., Wang, Z., Wang, P. I., Peles, Y., Koratkar, N., and Peterson, G., "Nanostructured Copper Interfaces for Enhanced Boiling", Small, Vol. 4, No. 8, pp. 1084-1088, (2008).
- [20] Saeidi, D., and Alemrajabi, A., "Experimental Investigation of Pool Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux of Nanostructured Surfaces", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 60, pp. 440-449, (2013).
- [21] Min, J., Wu, X., Shen, L., and Ga, F., "Hydrophilic Treatment and Performance Evaluation of Copper Finned Tube Evaporators", Applied Thermal Engineering, Vol. 31, pp. 2936-2942, (2011).

فهرست نمادهای انگلیسی

A	مساحت سطح (m^2)
Ar	عدد ارشمیدس
B	ثابت ویژه مایع
Cp	ظرفیت گرمایی ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
D	قطر (m)
f	فرکانس جدایش حباب (s^{-1})
F	نیرو (N)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($Wm^{-2}K^{-1}$)
Ja	عدد جاکوب
k	ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
Lc	طول موینگی (m)
Na	چگالی سایت‌های جوشش فعال ($site.m^{-2}$)
q	شار حرارتی (Wm^{-2})
Ra	زبری (μm)
T	دما (K)
t	زمان (s)

نمادهای یونانی

α	ضریب پخش حرارت (m^2s^{-1})
γ	پارامتر اثرات جنس سطح
δ	ضخامت میکرو لایه (m)
ϑ	زاویه تماس
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	کشش سطحی (Nm^{-1})

زیر نویس‌ها

bub	حباب
d	جدایش
g	رشد
me	میکرو لایه
nc	جابجایی طبیعی
r	تشکیل مجدد لایه مرزی
sat	اشباع
tot	کل

Abstract

In this paper, the effects of surface hydrophilicity on nucleate pool boiling of water under atmospheric pressure were theoretically modeled and experimentally examined. The proposed analytical model consider change of contact angle in bubble growing period. Comparisons of the pool boiling curve based on the modified model with existing experimental data and previous model show the better agreement. Moreover, hydrophilic surfaces (with contact angles of 34, 22, <10) are made by immersing the copper in an aqueous solution of sodium hydroxide and potassium persulphate for different length of times (30, 60, 180 min, respectively) and the boiling experiment on these surfaces is compared with prediction of model. According to experimental results, the surface treating method applied in this research is an effective means to promote the surface wettability of a copper, and the more hydrophilicity of treated surfaces tend to yield a greater pool boiling heat transfer coefficient than the untreated surface.