

# بهبود فرآیند جوشش استخری با استفاده از اثر سطوح متخلخل

حمید صفاری<sup>۱</sup>، حسام مقدسی<sup>۲\*</sup> و سید مصطفی حسینعلی پور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* مسئول مکاتبات: hesam\_moghadasi@mecheng.iust.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

جوشش استخری  
ضریب انتقال حرارت  
منحنی جوشش  
مورفولوژی  
تخلخل

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

فرآیند جوشش به عنوان روشی کارآمد و مؤثر در انتقال گرما بین یک سطح با دمای بالاتر به سیال با دمای کمتر در تماس با سطح به کار گرفته می شود. این فرآیند به دلیل دارا بودن ضریب انتقال حرارت بالا نسبت به سایر مکانیزم های انتقال حرارت، از اقبال بسیار خوبی در صنعت برخوردار است. روش های ترکیبی به کار برده شده در سال های اخیر و توسعه سریع فناوری های مهندسی، کمک قابل توجهی به بهبود انتقال حرارت جوششی کرده است. در میان انواع جوشش، جوشش استخری به دلیل قابلیت برداشتن شارهای حرارتی بالا در دمای اضافی پایین و عدم استفاده از نیروی خارجی از جایگاه ویژه ای برخوردار است. از جمله عوامل مؤثر در فرآیند جوشش استخری می توان به خواص سطح نظیر ترشوندگی، موئینگی و ایجاد تخلخل روی سطوح اشاره کرد. در این مقاله به تشریح جوشش استخری و تحلیل منحنی جوشش پرداخته و پارامترهای موثر بر این فرآیند را مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهد، و در نهایت با بهبود مورفولوژی سطح از نقطه نظر عملکرد گرمایی، با تمرکز بر اثر ایجاد تخلخل روی سطح در جوشش استخری به انتها می رسد.

## ۱ مقدمه

## ۲ جوشش استخری

پدیده جوشش در طراحی تجهیزات مختلفی مانند بویلرها، لوله های تقطیر، راکتورهای هسته ای، تجهیزات تهویه مطبوع و تبرید، پمپ های حرارتی، تجهیزات اصلی نیروگاه های تولید توان و غیره کاربرد فراوانی دارد و می توان شار حرارتی زیادی را در سوپر هیت دیواره کم از این طریق با سطح جابجا کرد.

محدودیت منابع انرژی، همچنین بازده اقتصادی موجب گردیده است افزایش بازدهی فرآیند انتقال حرارت، بهبود توان نیروگاه ها، افزایش بازدهی بویلرها و مبادله گرهای حرارتی و نیز افزایش بازدهی انتقال حرارت در جوشش در اولویت اول محققان قرار گرفته بگیرد.

همانطور که بیان گردید انتقال حرارت در جریان های چندفازی در مقایسه با انتقال حرارت تک-فاز آهنگ انتقال گرمای بالاتری دارد اما باید دانست تغییر فاز در شارهای حرارتی کم با راندمان های پایین ترمودینامیکی و در شارهای حرارتی زیاد با ناپایداری های شدید همراه است. پارامترهای مختلفی همانند گرمای نهان، دینامیک حباب، نیروهای شناوری سیال، خواص سیال و سطح بر افزایش بازدهی انتقال حرارت در جوشش تأثیرگذار هستند [۱].

با تغییر و یا کنترل هر یک از این پارامترها، می توان انتقال حرارت جوشش را بهبود داد. با بهبود فرآیند جوشش، ضریب انتقال حرارت جابجایی و شار حرارت بحرانی<sup>۱</sup> که نشان دهنده راندمان انتقال حرارت هستند، افزایش می یابند.

مکانیزم های انتقال حرارت جوششی به خصوص جوشش استخری، پس از گذشت دهه های متمادی همچنان موضوع تحقیقات بسیاری از محققین است. درک دقیق این مکانیزم ها و عوامل تأثیرگذار بر آن ها از جمله موضوعات مورد مطالعه پژوهشگران این حوزه است. در پدیده جوشش حضور حباب ها، مایع در حال جوشش و نیز سطح جامد حرارت دهنده به عنوان سه فاز گاز، مایع و جامد موجب پیچیدگی های فوق العاده این مکانیزم در مقایسه با سایر مکانیزم های انتقال حرارت هدایتی و جابجایی می شود. همزمانی مکانیزم های مختلف در فرآیند جوشش باعث افزایش قابل ملاحظه ای در ضریب انتقال حرارت جوشش در قیاس با دیگر مکانیزم های شناخته شده انتقال حرارت می گردد. برای نخستین بار نوکیاما<sup>۲</sup> به صورت تجربی رژیم های مختلف جوشش استخری را تشخیص داد [۲].

نوکیاما سیم های نیکرومی، نیکلی، آهنی و پلاتینیومی مستغرق افقی را در آب اشباع و در فشار استاندارد اتمسفری، به تدریج حرارت داد تا مقدار بیشینه انتقال حرارت را برای آب در جوشش استخری به صورت تجربی بدست آورد. نتایج آزمایش برای مقدار بیشینه انتقال حرارت، بالاتر از نتایجی بود که قبلاً انتظار می رفت. محور عمودی این منحنی شار گرمایی و محور افقی آن دمای اضافی است و دارای چهار رژیم انتقال حرارت است که عبارتند از جابجایی طبیعی، جوشش هسته ای، جوشش گذرا و جوشش لایه ای. فرآیند جوشش استخری با تولید بخار بر روی سطح گرمکن در داخل سیال ساکن

<sup>1</sup>Critical Heat Flux (CHF) <sup>2</sup>Nukiyama

می‌یابد. در این رژیم، قسمت اعظم تبادل حرارت از سطح گرما دیده نه از طریق حباب‌های بالا آمده از سطح بلکه به مایع متحرک نزدیک سطح صورت می‌گیرد. با افزایش  $q$  و  $\Delta T$  سایت‌های بیشتری فعال می‌شوند. در ناحیه  $B - C$  که تعداد سایت‌های فعال خیلی زیاد شده است، حباب‌ها به یکدیگر می‌پیوندند و نوع کاملاً متفاوتی از فرار بخار به صورت جت و ستون اتفاق می‌افتد این حباب‌های بخار تا فصل مشترک مایع - بخار بالا می‌آیند و در آنجا از بین می‌روند. تداخل بین اجتماع فشرده حباب‌ها از حرکت سیال نزدیک سطح جلوگیری می‌کند. در نقطه‌ای بین  $B$  و  $C$ ، ضریب انتقال گرما ماکزیمم می‌گردد. پس از این نقطه، ضریب انتقال گرما با افزایش دمای سوپرهیت، شروع به کاهش می‌کند اما شار گرمایی که حاصلضرب این دو پارامتر است، به افزایش خود ادامه می‌دهد تا جایی که افزایش دما با کاهش ضریب انتقال گرما موازنه شود. در اینجا ماکزیمم شار که شار گرمای بحرانی نامیده می‌شود، حاصل می‌گردد. در این نقطه ماکزیمم، بخار زیادی تشکیل می‌شود و برای خیس شدن سطح توسط مایع ایجاد مشکل می‌نماید. از این نقطه به بعد، فرآیند جوشش برای پایدار نگه داشتن دمای سطح، نمی‌تواند گرما را با نرخ کافی منتقل کند. تفاوت بین گرمایی که می‌بایست منتقل گردد با گرمایی که منتقل می‌گردد منجر به افزایش سریع دمای سطح می‌شود. ناحیه سوم بعد از رسیدن به شار بحرانی، در ناحیه  $C - D$  افزایش دما با کاهش شار حرارتی همراه است. در هر نقطه روی سطح، شرایط بین جوشش فیلمی و جوشش هسته ای نوسان می‌کند، اما کسری از سطح کل که با لایه بخار پوشیده می‌شود با افزایش دمای مازاد، افزایش می‌یابد. اثر فرار حباب، بد و بدتر می‌شود تا جایی که سطح توسط بخار پوشانده شود و شار حرارتی به کمترین مقدار خود می‌رسد. چون رسانندگی گرمایی بخار خیلی کمتر از رسانندگی گرمایی مایع است، با افزایش دما در این ناحیه مقدار ضریب جابجایی و انتقال گرما کاهش می‌یابد. جوشش انتقالی در عمل کمتر اتفاق می‌افتد زیرا آن را فقط با کنترل دمای سطح می‌توان به دست آورد اگرچه نظریه مناسبی برای این جوشش داده نشده است ولی می‌توان گفت بین سطح مایع و سطح گرم یک تماس متناوب و ناپایدار برقرار است. ناحیه چهارم، در نقطه  $D$  منحنی جوشش، به نام نقطه لیدن فراست، شار گرما مینیمم است و سطح کاملاً با لایه بخار پوشیده می‌شود. با افزایش دمای سطح، تشعشع در لایه بخار علاوه بر رسانش، حائز اهمیت می‌شود و شار گرما افزایش می‌یابد. مکانیزم انتقال حرارت در جوشش فیلمی و جدا شدن حباب از سطح، تطابق خوبی با تقطیر فیلمی دارد اما ضریب انتقال حرارت بسیار پایین‌تر است زیرا گرما باید از طریق لایه بخار به لایه آب هدایت شود.

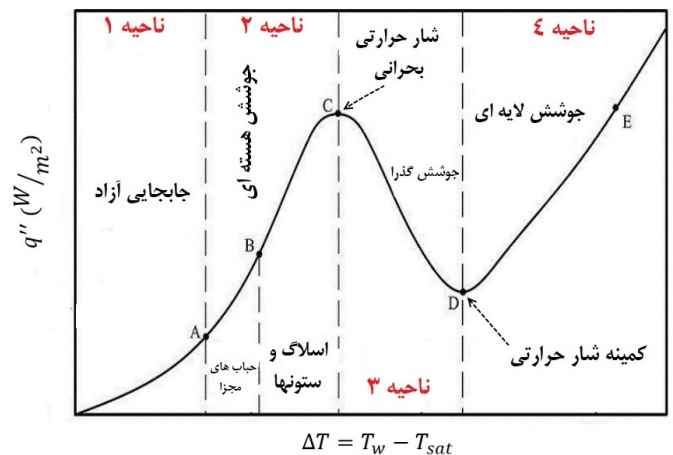
### ۳ عوامل مؤثر بر بهبود انتقال حرارت جوششی

عوامل متعددی بر بهبود انتقال حرارت جوششی تأثیرگذار هستند. از جمله این عوامل می‌توان به مکان‌های هسته-زایی، تشکیل حباب، رشد، اندازه و جدا شدن، نیروهای شناوری سیال، تشکیل بخار، دینامیک تعاملات مایع-حباب، تغییرات چگالی بین فازها، جهت سطح، زبری سطح، خواص ترموفیزیکی چون رسانش گرمایی و تنش سطحی و در برخی شرایط نیروهای جاذبه اشاره کرد. در میان عوامل مؤثر متعدد، سطح انتقال حرارت از چهار

روی می‌دهد. هرچند که سیال داخل استخر می‌تواند با جابجایی طبیعی و حرکت حباب‌ها، حرکت نماید. در حالی که این استخر سیال به صورت لایه نازک سیال بر روی سطح گرم شده باشد، تبخیر به صورت مستقیم از طریق سطح لایه نازک سیال رخ می‌دهد. اگرچه در شارهای حرارتی بالا، جوشش هسته‌ای بر روی سطح گرمکن با تولید حباب رخ می‌دهد. همچنین جوشش را می‌توان به دو صورت فرسود و اشباع دسته‌بندی کرد: در جوشش فرسود دمای مایع کم‌تر از دمای اشباع است و حباب‌های تشکیل شده در سطح، ممکن است چگالیده شوند. ولی در جوشش اشباع، دمای مایع برابر با دمای اشباع است. لذا حباب‌های تشکیل شده در سطح توسط نیروهای شناوری پیشرانده و سرانجام از سطح آزاد فرار می‌کنند. در این رساله تمرکز بر روی تبخیر در شارهای حرارتی پایین و جوشش اشباع در شارهای حرارتی بالا است.

### ۱.۲ منحنی جوشش استخری

همانطور که گفته شد منحنی جوشش نشان‌دهنده شار حرارتی بر اساس اختلاف دمای بین سطح و سیال است. شکل ۱ منحنی جوشش آب در فشار اتمسفر را همراه با چهار رژیم مختلف آن نشان می‌دهد.



شکل ۱: منحنی جوشش استخری و رژیم‌های مختلف جوشش برای سطح گرمکن نامشخص [۲]

برای شروع جوشش استخری لازم است دمای سطح کمی بیشتر از دمای اشباع مایع گردد. تا زمان شروع هسته زایی حباب، انتقال حرارت به صورت جابجایی آزاد صورت می‌گیرد و دمای سطح به طور پیوسته افزایش می‌یابد. در این حالت، مایع نزدیک سطح داغ از سطح حرارت گرفته و گرم می‌شود و به دلیل وجود گرادیان دما، به صورت طبیعی جابجا می‌شود. در ناحیه دوم رژیم جوشش هسته‌ای بین نقطه شروع تشکیل حباب و اولین نقطه انتقالی نوکیاما قرار دارد. در این گستره، دو جریان مختلف وجود دارد: ابتدا، پس از آنکه دمای کل مایع به دمای اشباع رسید، هسته‌زایی بخار در سطح حرارت دیده شده آغاز می‌گردد، در ناحیه  $A - B$ ، حباب‌های مجزا در مواضع هسته‌زایی به وجود می‌آیند و از سطح جدا می‌شوند اما از آنجایی که مایع هنوز در دمای اشباع نیست، حباب‌ها در بین راه تقطیر شده و به سطح آزاد نمی‌رسند. این جدایی باعث آمیختگی شدید سیال نزدیک سطح شده و انتقال حرارت افزایش

اختلاف دماهای کمتر مهم بوده و این مهم با ساخت سطوح آب‌گریز قابل دستیابی است. در شارهای حرارتی خیلی زیاد که شروعی برای جوشش فیلمی است، افزایش شار حرارتی بحرانی برای دوری از این حالت، مهم است که توسط سطوح آب‌دوست قابل دستیابی است. در دماهای سوپرهیت بالاتر از نقطه شار بحرانی که پدیده لیدن-فراست روی می‌دهد، سطوح آب‌گریز باعث ایجاد لایه بخار پایدار می‌گردد. در این حالت بایستی به جهت انتقال گرما توجه نمود. گاهی هدف سرمایش آهسته جسم داغ است که تشکیل لایه بخار پایدار است اما اگر هدف افزایش انتقال حرارت باشد، ناپایداری لایه بخار و تبدیل آن به جوشش هسته‌ای مطلوب است.

روش‌های زیادی برای بهبود فرآیند جوشش پیشنهاد شده است. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان آن‌ها را به سه دسته روش‌های فعال، غیرفعال و ترکیبی تقسیم‌بندی کرد. جدول ۱ تقسیم‌بندی هر کدام از این روش‌ها را نشان می‌دهد [۵].

جدول ۱: روش‌های بهبود جوشش [۵]

| روش‌های غیرفعال   | روش‌های فعال         | روش‌های ترکیبی |
|-------------------|----------------------|----------------|
| عملیات سطحی       | ارتعاش سطح           | هر ترکیبی      |
| ایجاد زبری سطح    | ارتعاش سیال          | از دو یا چند   |
| افزودنی‌های سیال  | تزریق و مکش          | روش فعال       |
| سطوح گسترش یافته  | جابجا نمودن سیال     | و غیرفعال      |
| ایجاد جریان چرخشی | میدان الکترواستاتیکی |                |
| لوله‌های انحنادار | جت برخوردی           |                |

از روش‌های جدید بهبود جوشش با ورود فناوری نانو می‌توان به استفاده از نانوذرات برای بهبود خواص سیال (نانوسیال) و ایجاد نانو ساختارها روی سطوح جوشش برای تغییر خواص ترشوندگی و ایجاد هسته‌های فعال جوشش نام برد. بر اساس مطالعات اخیر، مهمترین مشخصه‌های ساختار سطح به سه دسته ترشوندگی، زبری و تخلخل تقسیم‌بندی می‌شوند که تأثیر هر یک به صورت مجزا بر بهبود جوشش بررسی شده است [۶]. نتایج آزمایشی نشان می‌دهد زبری سطح تأثیر کمی بر منحنی جوشش داشته و ساختار متخلخل آب‌دوست تأثیر مطلوبی در رژیم‌های مختلف انتقال حرارت دارد و منحنی جوشش را بهبود می‌دهد. هرچند نحوه ایجاد ساختار متخلخل، زبری و ترشوندگی می‌تواند در نتایج تأثیر داشته باشد. ساختارهای متخلخل با توجه به خواصی مانند افزایش سطح انتقال حرارت، افزایش هسته‌های جوشش، ایجاد نیروی موینگی، ایجاد حالت جت در دینامیک حباب و غیره در بهبود فرآیند جوشش تأثیر بسزایی دارند.

## ۵ هسته‌زایی و رشد حباب

شروع تشکیل حباب بخار (هسته‌زایی) ممکن است در سطح مشترک مایع-بخار دور از سطح، در بالک مایع بدلیل نوسانات چگالی و یا در سطح جامد به دلیل وجود کاواک‌ها و خلل و فرج‌های سطح که بخار درون آن‌ها گیر افتاده است، تشکیل شود. حالت اول که به آن تبخیر می‌گویند زمانی رخ می‌دهد که دمای مایع اندکی بالاتر از دمای اشباع بخار در فشار بخار درون ناحیه گاز یا بخار باشد. در دو حالت دیگر، یک حباب بخار تشکیل می‌شود که از نظر

جنبه باعث تأثیر بر ضریب انتقال حرارت می‌شود:

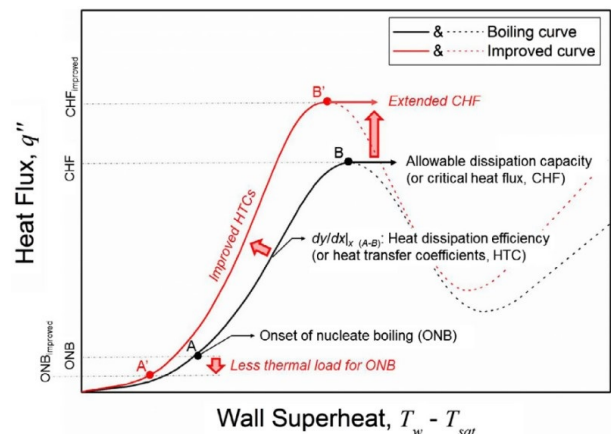
- خواص ماده تشکیل دهنده سطح مخصوصاً ضریب هدایت حرارتی نقش مهمی در انتقال حرارت گذرا در جوشش استخری ایفا می‌کند. با این حال این پارامتر اثر کمی بر روی انتقال حرارت پایا دارد.
- اندازه سطح که معمولاً برای سطوح معمولی قابل صرف نظر است مگر برای سطوح خیلی خاص.
- مورفولوژی<sup>۱</sup> سطح که به طور عمده بر روی چگالی سایت‌های جوششی فعال اثر می‌گذارد و می‌تواند به عنوان تابعی از میانگین حسابی زبری برای سطوح معمولی بدون ساختار مویرگی خاص بیان شود.
- زاویه تماس، که به طور عمده بر روی فرکانس جدایش حباب و سطح تماس مایع-جامد اثر می‌گذارد.

تغییر مورفولوژی سطح از متداول‌ترین روش‌های بهبود است. این تغییر را می‌توان به صورت تغییر در ویژگی‌هایی چون زبری، تخلخل، ترشوندگی و موینگی دانست. مورفولوژی سطح با تأثیر بر سایت‌های هسته‌زایی، دینامیک حباب و مکانیزم انتقال حرارت عملکرد گرمایی سطح را تغییر می‌دهد. در این مقاله از تغییر مورفولوژی سطح برای بهبود فرآیند جوشش استخری استفاده می‌شود [۳].

## ۴ روش‌های بهبود فرآیند انتقال حرارت جوشش

### استخری

بهبود منحنی جوشش را می‌توان در چند بخش شروع سریعتر فرآیند جوشش، افزایش ضریب جابجایی در جوشش هسته‌ای، افزایش شار حرارتی ماکزیمم و تخریب لایه بخار در دمای سوپرهیت بحرانی کمتر [۴] تقسیم‌بندی نمود. در شکل ۲ می‌توان منحنی کیفی بهبود یافته جوشش را مشاهده نمود. البته هر بخش این تقسیم‌بندی در جای خود مهم است. مثلاً در شارهای حرارتی کم یا جوشش مادون سرد، شروع فرآیند جوشش و ایجاد هسته‌های فعال، مسأله مهمی است.



شکل ۲: تغییر در منحنی جوشش استخری به واسطه بهبود فرآیند [۴]

در شارهای حرارتی متوسط یا جوشش هسته‌ای، انتقال گرمای بیشتر در

<sup>1</sup>Morphology

مانع از نفوذ بیشتر مایع حتی هنگامی که فشار بخار درون کاواک ناچیز است، می‌شوند. با گرمایش بیشتر کاواک، فشار بخار درون آن به شدت افزایش یافته و سطح مشترک را تا دهانه کاواک بالا به سرعت می‌برد. در این حالت سطح حباب مقعر شکل می‌شود. برای ادامه رشد حباب، دمای مایع باید همچنان نسبت به دمای اشباع افزایش یابد تا بیشتر از درجه دمای اضافی تعادل مربوط به شعاع انحناء سطح مشترک شود. بنابراین اندازه دهانه حفره تعیین کننده دمای اضافی لازم برای فعال شدن کاواک برای هسته‌زایی بخار است. کندلیکار و همکاران کمترین و بیشترین شعاع کاواک برای فعال بودن به منظور هسته‌زایی را به صورت معادله (۳) بیان کردند [۷]:

$$R_{c, \min / \max} = \frac{\delta_t \sin \theta}{\gamma (1 + \cos \theta_r)} \times \left( \frac{\Delta T_{sat}}{\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}} \right) \times \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{12 \gamma \sigma \Delta T_{sat} (\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub})}{\rho_v h_{lg} \delta_t \Delta T_{sat} \gamma}} \right) \quad (3)$$

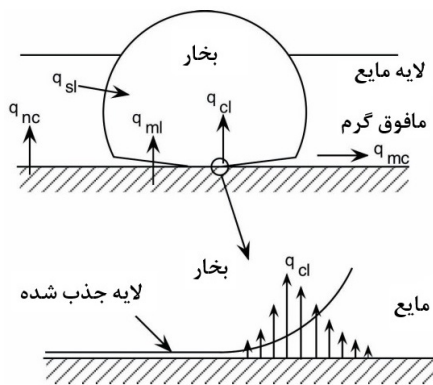
اگر کاواک‌ها در بازه داده شده بالا قرار گیرند، می‌توانند به عنوان مکان‌های هسته‌زایی فعال باشند. خواص سطح نقش مهمی در تعیین شروع هسته‌زایی دارند. اگر سطح صیقلی باشد، نیاز به دمای اضافی بیشتری به دلیل نبود کاواک‌ها برای صدق کردن در معادله بالا دارد. برای هر دمای اضافی داده شده، مقدار شعاع بحرانی از معادله (۴) به دست می‌آید:

$$R_{c, \text{critical}} = \frac{\delta_t \sin \theta}{\gamma (1 + \cos \theta_r)} \times \left( \frac{\Delta T_{sat}}{\Delta T_{sat} + \Delta T_{sub}} \right) \quad (4)$$

معادله (۴) شعاع کاواکی را می‌دهد که نخستین حباب در یک دمای اضافی داده شده از آن هسته‌زایی می‌کند [۸].

## ۶ مکانیزم‌های انتقال حرارت مربوط به حباب در حال رشد

مکانیزم‌های انتقال حرارت در دسترس به هنگام ترک حباب در شکل ۵ نشان داده شده‌اند:

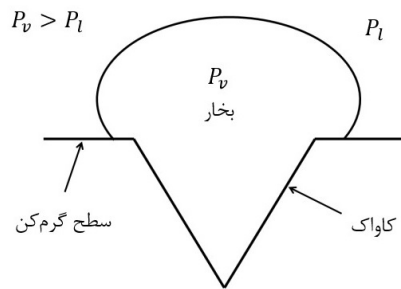


شکل ۵: مکانیزم‌های انتقال حرارت در حین رشد حباب [۹]

(۱) هدایت گذرا: این مکانیزم توسط هان و گریفیت<sup>۱</sup> تشخیص داده شد و میکیک و روسنو<sup>۲</sup> آن را تحلیل کردند. هنگامی که یک حباب یک سطح

<sup>1</sup>Han & Graffith <sup>2</sup>Mikic & Rohsenow

مکانیکی و گرمایی پایدار است. شکل ۳ یک حباب ساده را نشان می‌دهد. دو نیروی وارده بر حباب استاتیک، نیروهای فشار و کشش سطحی هستند. بنابر معادله (۱) از تعادل مکانیکی داریم:



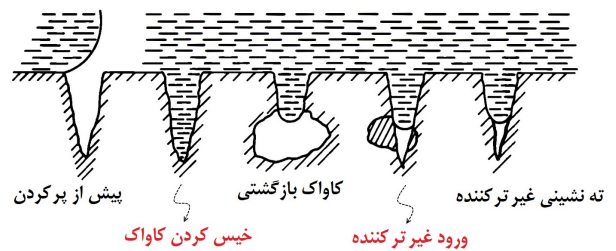
شکل ۳: هسته‌زایی حباب [۷]

$$P_v = P_l + \frac{2\sigma}{R} \quad (1)$$

که در آن  $P$  فشار،  $\sigma$  کشش سطحی و  $R$  شعاع حباب است. از رابطه بالا می‌توان دریافت فشار بخار درون حباب با شعاع حباب رابطه عکس دارد، بدین معنا که دمای سطح باید بیشتر از دمای سیال باشد تا هسته‌زایی صورت بگیرد. از آنجایی که حباب باید در تعادل گرمایی نیز باشد، پس دمای بخار و مایع باید با یکدیگر برابر باشد و این بدین معناست که دمای مایع باید بیشتر از دمای اشباع باشد. دمای اضافی که در آن حباب شروع به شکل‌گیری می‌کند را می‌توان به کمک رابطه کلایزیوس کلاپیرون به صورت معادله (۲) نوشت:

$$\Delta T_{sat} = \frac{RT_{sat}T_g}{JifgM} \ln \left[ 1 + \frac{2\sigma}{P_f r^*} \left( 1 + \frac{v_f}{v_g} \right) \right] \quad (2)$$

تنها کسر کوچکی از کاواک‌های موجود بر روی سطح گرم‌کن می‌توانند به عنوان مکان‌های هسته‌زایی مؤثر در نظر گرفته شوند. شکل ۴ مکانیزم شکل‌گیری یک سایت فعال را نشان می‌دهد. هنگامی که یک سطح ابتدا با مایع خیس می‌شود، مایع پیشرو ترکیبی از هوا و بخار را درون این کاواک‌ها و شکاف‌ها به دام می‌اندازد. هوا فوراً حل می‌شود و اگر مایع دیواره‌های کاواک را خیس کند، آنگاه فشار بخار باقی‌مانده برای جلوگیری از نفوذ مایع بدلیل نیروهای کشش سطحی ناکافی خواهد بود و مایع تا انتهای شکاف به صورت کامل نفوذ خواهد کرد. کاواکی که تماماً با مایع پر شده باشد نمی‌تواند به صورت یک مکان هسته‌زایی عمل کند.



شکل ۴: شکل‌گیری یک سایت فعال [۸]

حال اگر دیواره‌های کاواک به خوبی خیس نشده باشند، انحناء سطحی مشترک ممکن است برگردد به گونه‌ای که هم‌اکنون نیروهای کشش سطحی

می‌تواند همچنان از طریق کلاه حباب به حباب داده شود بخصوص اگر توده مایع مادون سرد نباشد. انتقال حرارت در خط تماس سه فاز ( $q_{cl}$ ) رخ می‌دهد، اما انتظار می‌رود این انتقال حرارت کوچک‌تر از انتقال حرارت در حین رشد حباب باشد. زیرا زاویه تماس پیشرو بیشتر از زاویه تماس پسرو است و این امر منجر به ضخیم‌تر بودن لایه مایع بر روی سطح می‌شود. با خیس شدن مجدد وصله خشک در حین ترک حباب، هدایت گذرا ( $q_{tc}$ ) به درون مایع پیشرونده رخ می‌دهد. حباب در حال ترک می‌تواند مایع مجاور حباب را آشفته کند که در نتیجه آن انرژی توسط میکروکونوکسیون ( $q_{mc}$ ) انتقال می‌یابد. گردابه‌های درون ناحیه ویک<sup>۴</sup> ایجاد شده ناشی از ترک حباب می‌تواند باعث میکروکونوکسیون اضافی و کاهش ضخامت لایه مایع فوق گرم شوند [۹].

## ۸ دینامیک حباب

فرآیند تکامل یک حباب از لحظه تشکیل شدن تا جدایش را دینامیک حباب می‌گویند که توسط پارامترهایی مانند حباب، شعاع جدایش حباب و فرکانس آزاد شدن حباب توصیف می‌شود. دینامیک حباب مهمترین زیر پدیده جوش هسته‌ای است که اساساً ضریب انتقال حرارت جوش استخری را تحت تأثیر می‌گذارد. طبق رابطه ارائه شده توسط میمیک و روسنو، ضریب انتقال حرارت تابعی از دینامیک حباب به صورت معادله (۵) است:

$$HTC = \sqrt[2]{(\pi k_l \rho_l c_{pl})^{1/2} n'_a d_{df}^{1/2}} \quad (5)$$

که در آن  $k_l$ ،  $\rho_l$  و  $c_{pl}$  به ترتیب ضریب هدایت گرمایی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه مایع است. ضریب انتقال حرارت به صورت حاصلضرب خواص مایع در چگالی سایت‌های هسته‌زایی، مربع قطر جدایش و مجذور فرکانس جدایش حباب است. هر یک از این پارامترها در زیر توصیف شده‌اند:

**چگالی سایت‌های هسته‌زایی:** با افزایش دمای اضافی، سایت‌های بیشتری بر روی سطح جهت هسته‌زایی فعال می‌شوند. چگالی سایت‌های هسته‌زایی تابعی از شرایط سطح است. امروزه پذیرفته شده است که این مقدار را می‌توان به صورت تابعی از شعاع کاواک‌ها به شکل معادله (۶) بیان کرد:

$$N = C(r_{min})^m \quad (6)$$

که در آن  $N$  چگالی سایت‌های هسته‌زایی و  $r_{min}$  کمترین شعاع کاواک در یک شرایط مشخص است.  $C$  و  $m$  مقادیر ثابتی دارند که توصیف‌کننده شرایط سطح هستند. کمترین شعاع کاواک را می‌توان به صورت معادله (۷) تعریف نمود:

$$r_{min} = \sqrt[2]{\sigma T_{sat} v_{fg} / (h_{fg} \Delta T)} \quad (7)$$

**فرکانس جدایش حباب:** سایت‌های هسته‌زایی با یک فرکانس متوسط مشخص حباب ساعت می‌کنند که این مقدار از یک سایت به سایت دیگر تفاوت می‌کند. فرکانس جدایش حباب برابر با معکوس جمع زمان رشد حباب و زمان

حرارت دیده را ترک می‌کند توسط توده مایع جایگزین می‌شود. حرارت توسط هدایت گذرا به مایع منتقل می‌شود و مقدار آن با افزایش فرکانس حباب افزایش و با کاهش قطر حباب کاهش می‌یابد. به صورت کلی این سهم با افزایش دمای سطح حرارت دیده در شارهای حرارتی بالا به مقدار اندکی افزایش می‌یابد.

**۲) جابجایی گذرا:** حرکت سریع سطح مشترک حباب باعث حرکت مایع می‌شود. بدین معنا که حباب در حال رشد می‌تواند مایع مجاور حباب را آشفته و لایه مرزی پس زمینه جابجایی طبیعی ( $q_{nc}$ ) را مختل کند که در نتیجه آن انرژی توسط جابجایی گذرا ( $q_{mc}$ ) منتقل می‌شود. سهم انتقال حرارت حاصله از جابجایی گذرا یا میکروکونوکسیون با افزایش سرعت سطح مشترک، افزایش می‌یابد. این مکانیزم مهمترین سهم را در انتقال حرارت دارد و با افزایش شار حرارتی افزایش می‌یابد.

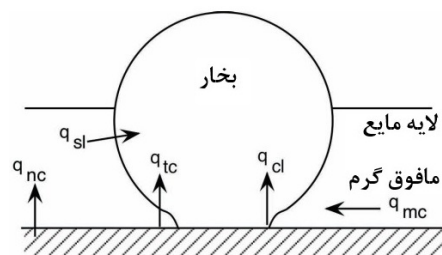
**۳) تبخیر میکرو لایه:** یک حباب در حال رشد نیم‌کروی شکل می‌تواند یک لایه نازکی از مایع (میکرو لایه) را بین حباب در حال رشد و دیواره فوق گرم به دام ببنداند و تبخیر این مایع ( $q_{mi}$ ) در رشد حباب سهم دارد. انرژی لازم برای تبخیر این مایع از انرژی ذخیره شده در دیواره فوق گرم تأمین می‌شود. نقش این مکانیزم در انتقال حرارت نسبتاً کوچک است. همچنین با افزایش شار حرارتی کلی، نسبتاً ثابت می‌ماند.

**۴) انتقال حرارت خط تماس<sup>۱</sup>:** مکانیزم دیگری برای رشد حباب بواسطه تبخیر در خط تماس سه فاز ( $q_{cl}$ ) وجود دارد و هنگامی رخ می‌دهد که یک وصله خشک<sup>۲</sup> به دلیل خشک شدن پاره‌ای میکرو لایه بر روی سطح تشکیل می‌شود.

حباب همچنین می‌تواند از طریق تبخیر لایه مایع فوق گرم اطراف کلاه حباب<sup>۳</sup> ( $q_{sl}$ ) رشد کند.

## ۷ مکانیزم‌های انتقال حرارت مربوط به حباب در حال جدایش

نیروی شناوری در اثر رشد حباب افزایش می‌یابد و می‌تواند فرآیند ترک حباب را شروع کند. مکانیزم‌های انتقال حرارت در دسترس به هنگام ترک حباب در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶: مکانیزم‌های انتقال حرارت در حین ترک حباب [۹]

انتقال حرارت از طریق میکرو لایه ( $q_{mi}$ ) می‌تواند در صورتیکه کاملاً خشک نشده باشد، همچنان رخ دهد. انرژی از لایه مایع فوق گرم ( $q_{sl}$ )

<sup>1</sup>Contact Line Heat Transfer <sup>2</sup>Dry Patch <sup>3</sup>Bubble Cap <sup>4</sup>Wake region

انتظار حباب است و به صورت معادله (۸) بیان می‌شود:

$$f = \frac{1}{t_g + t_w} \quad (8)$$

که در آن زمان انتظار حباب برابر با زمان بین ترک حباب و شروع رشد حباب بعدی است.

**قطر جدایش حباب:** همان قطر حباب در لحظه‌ای است که حباب سطح حرارت دیده را ترک می‌کند. هنگامی که یک حباب بر روی سطح رشد می‌کند، نیروی شناوری به عنوان نیروی اصلی رو به بالا و نیروی کشش سطحی به عنوان نیروی اصلی رو به پایین بر حباب وارد می‌شوند. یکی از معتبرترین همبستگی‌های موجود برای پیش‌بینی قطر جدایش حباب همبستگی فریتز<sup>۱</sup> است که تعادل بین این دو نیرو را بیان می‌کند و به صورت معادله (۹) است:

$$D_b = 0.0208 \theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (9)$$

همانطور که در معادله (۹) مشاهده می‌شود، با افزایش نیروی کشش سطحی، شعاع جدایش حباب افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه بالا می‌توان دریافت حباب بر روی سطوح با انرژی سطحی بیشتر قطر جدایش کوچک‌تری دارد [۱۰].

## ۹ تأثیر مورفولوژی سطح

مورفولوژی سطح می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود یا بدتر کردن عملکرد گرمایی سطح داشته باشد. از میان روش‌های غیرفعال بکار برده شده، اکثر تلاش‌ها بر استفاده از فین‌ها، افزایش چگالی سایت‌های هسته‌زایی، کاواک‌های بازگشتی<sup>۲</sup>، ترکیبی از حفره‌ها و تونل‌ها و نانوساختارهای آبرگریز و آبدوست برای بهبود انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی متمرکز است. در این مقاله برای بهبود انتقال حرارت، از اثر تغییر پارامتر تخلخل بهره برده شده است.

## ۱۰ تخلخل<sup>۳</sup>

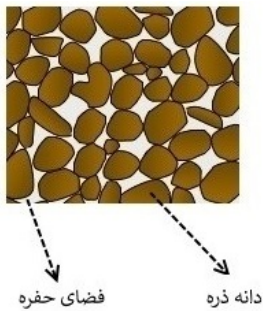
پژوهشگران دریافته‌اند که ساختار سطح تأثیر زیادی بر روی فرآیند جوشش و تبخیر لایه نازک سیال دارد و از میان تمامی ساختارها، سطح متخلخل کاربرد فراوان و تأثیر بیشتری در بهبود تبخیر و جوشش دارد. افزایش انتقال حرارت توسط ساختار متخلخل به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت، افزایش تعداد نقاط هسته‌زایی حباب، ایجاد نیروی موینگی کمک‌کننده به سیال برای رسیدن به سطح گرم‌کن، فرار بخار از لایه متخلخل، افزایش سطح میکرو لایه‌های نازک تبخیری و غیره است. این تأثیرات بستگی به خواص ترموفیزیکی سیال و جامد و پارامترهای سطح متخلخل مانند میزان تخلخل، اندازه حفره‌ها و نحوه توزیع آن‌ها، ضخامت لایه متخلخل و غیره دارد. ارتباط دقیق بین این تأثیرات به دلیل پدیده‌های پیچیده هنوز شناخته شده نیست [۱۱].

بنابر یک تعریف عمومی به نسبت حجم خالی محیط متخلخل به کل

حجم محیط، تخلخل گویند. که توسط معادله (۱۰) بیان می‌شود.

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_T} \quad (10)$$

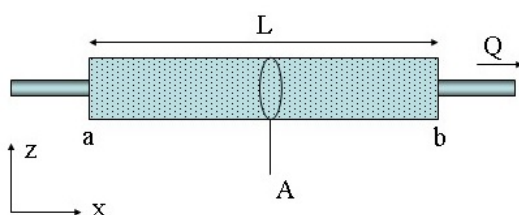
مقدار تخلخل همواره بین ۱ - ۰ و یا به صورت درصدی بین ۱۰۰ - ٪۰ است. معمولاً نسبت‌های تخلخل محیط‌های معمولی در حدود ۰/۶ است. اما از معمولاً از محیط‌های مصنوعی با نسبت بالاتر استفاده می‌کنند. شکل ۷ یک سطح متخلخل به همراه شماتیک ساختار آن را نشان می‌دهد.



شکل ۷: یک سطح متخلخل و شماتیک ساختار آن [۱۲]

همچنین مفهومی به نام تراوایی معرفی می‌گردد که به معنی توانایی محیط متخلخل برای انتقال سیال از طریق حفره‌های به هم پیوسته است. تراوایی دارای بعد مساحت است و در کاربردهای زمین شناسی با واحد میلی داری می‌گزارش می‌شود. روابط تجربی زیادی برای رابطه بین تخلخل و تراوایی محیط ارائه شده است که بیشتر آن‌ها برای شبیه‌سازی مخازن نفت و گاز مناسب هستند. نمونه‌ای از این روابط تجربی در شکل نشان داده شده است. یک داری، واحد نفوذپذیری محیط‌های متخلخل است که به نام هنری داری، قرار داده شده است. این واحد، جزو واحدهای SI نیست ولی به‌طور گسترده در زمین‌شناسی و زمین‌های نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک داری با استفاده از قانون داری به صورت زیر تعریف می‌گردد. یک داری ترکیبی از واحدهاست به طوری که ۱ داری، اجازه عبور یک سانتی‌متر مکعب بر ثانیه جریانی از سیالی با ویسکوزیته دینامیکی ۱ سانتی-پویز را تحت فشار ایجاد شده یک اتمسفر بر سانتی‌متر که بر  $1 \text{ cm}^2$  اثر می‌کند را نشان می‌دهد. استفاده از واحدهای میلی و میکرو داری نیز رایج است. شکل ۸ نشان دهنده تعریف قانون داری برای نفوذپذیری است همچنین قانون داری در معادله (۱۱) نیز بیان گردیده است.

$$Q = \frac{A \kappa \Delta P}{\mu \Delta x} \quad (11)$$



شکل ۸: نشان دهنده تعریف قانون داری برای نفوذپذیری

<sup>1</sup>Fritz <sup>2</sup>Re-entrant Cavity <sup>3</sup>Porosity

### ۱.۱° ویژگی محیط‌های متخلخل

این محیط مورد بررسی شامل یک ماده دارای خلل و فرج است که در کاربردهای خنک‌کاری در لوله‌های حرارتی به آن فتیله گویند. دلیل کارایی بالای محیط متخلخل در فرآیند جوشش این است که حفره‌ها فضای لازم برای دور شدن بخار از سطح گرم را فراهم می‌کنند. از طرف دیگر عمل مویینگی محیط متخلخل، فشار لازم برای رساندن مایع به سطح گرم کن را فراهم می‌کند. در ادامه مهم‌ترین ویژگی‌های این محیط مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

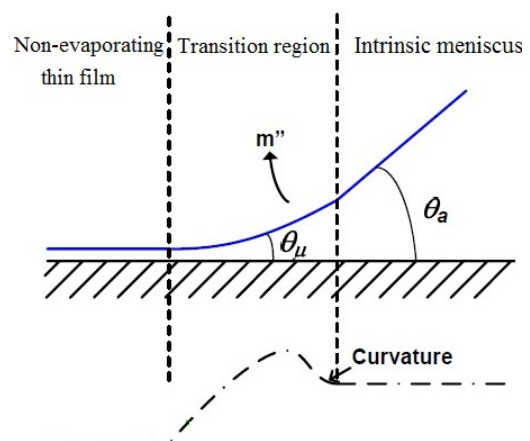
محققین متعددی بر روی اثر تخلخل به مطالعه و تحقیق پرداخته‌اند در جوشش استخری بر روی پوشش‌های متخلخل یکنواخت نازک به صورت تجربی بررسی‌های زیادی صورت پذیرفته است. به عنوان نمونه این پوشش‌ها از ذرات مس با قطرهای و ویژگی‌های مختلف و با ضخامت‌های گوناگون ساخته شده‌اند و دیده شد که شار حرارتی بحرانی آن‌ها ۱/۸ برابر سطح معمولی بود.

همچنین ویژگی‌های جوشش پوشش‌های فلزی متخلخل را که به سطح لحیم شده و دارای تخلخل ۶۰٪ - ۵۰٪ بودند، به صورت تجربی بررسی شده و دریافتند که ضریب انتقال حرارت آن‌ها تا ۲۵٪ برای آب و ۸۰٪ برای R-113 افزایش یافته است [۱۳، ۱۴].

### ۲.۱° مدل‌سازی جوشش در محیط متخلخل

وقتی شار حرارتی به یک محیط متخلخل اشباع از فاز مایع اعمال می‌گردد. به علت کمتر بودن کسر جرمی بخار در محیط اطراف، نسبت به سطح مایع، مایع شروع به تبخیر شدن در محیط می‌کند. این تبخیر، در سطح مشترک هلالی شکل بین فاز جامد، مایع و گاز اتفاق می‌افتد. این ناحیه هلالی شکل شامل سه قسمت است:

۱. ناحیه بالک
  ۲. ناحیه جوشش فیلم نازک
  ۳. ناحیه غیرجوششی فیلم نازک (ناحیه کشش سطحی)
- مرز مشترک هلالی به انضمام قسمت‌های جدا کننده آن در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: فصل مشترک هلالی شکل و نواحی سازنده آن

### ۳.۱° ناحیه بالک

در این قسمت، شرایطی شبیه به جوشش استخری وجود دارد. به طوری که تبخیر در این ناحیه تحت تاثیر کسر جرمی بخار در سطح مایع در محیط اطراف است. مایع به وسیله گرمای هدایت شده از سطح گرمکن به توده سیال گرم شده و این گرما به وسیله جابجایی طبیعی به سرتاسر استخر سیال منتقل می‌شود. با افزایش انتقال حرارت گرادیان کسر جرمی افزایش یافته و در نتیجه جوشش شدیدتر می‌شود.

### ۴.۱° ناحیه جوشش فیلم نازک

در ناحیه فیلم نازک جوششی، به دلیل نیروهای تنش سطحی، سطح مایع به سطح گرمکن نزدیک است و هرچه این ناحیه نازک‌تر شود، مقاومت به هدایت گرما از سطح گرمکن به لایه سیال بسیار کم می‌شود. در نتیجه نرخ جوشش در این ناحیه بسیار بالاست. با نازک شدن لایه سیال نیروهای جاذبه بین مولکول‌های سیال و دیواره قابل توجه شده و فشار مایع را افزایش می‌دهند. این تغییر فشار به فشار انفصالی مشهور است و وقتی به اندازه کافی بزرگ شود، مانع از تبخیر مایع می‌شود. علت کارآمد بودن محیط‌های متخلخل این است که این محیط‌ها تعداد این هلال‌ها و در نتیجه سطح تماس مایع و گرمکن را افزایش می‌دهند. چون جوشش در ناحیه فیلم نازک، شدیدتر است، برای بهبود عملکرد باید تعداد حفره‌هایی که در آن‌ها جوشش فیلمی رخ می‌دهد افزایش یابد. ناحیه بالک در اندازه ذرات کوچک‌تر مشارکت چندانی در انتقال حرارت به وسیله تبخیر ندارد. ضریب انتقال حرارت ناحیه فیلم نازک بسیار بالاتر از ناحیه بالک است اما در سوپرهیت‌های کمتر و ذرات بزرگ‌تر، انتقال حرارت کمی از این ناحیه صورت می‌گیرد.

### ۵.۱° محیط‌های متخلخل دو حفره‌ای

فتیله‌های دو حفره‌ای، نوع خاصی از محیط متخلخل هستند که در آن‌ها دو توزیع اندازه حفره متمایز وجود دارد. به عبارت دیگر تک حفره‌ای یک اندازه حفره غالب است حال آنکه در محیط دو حفره‌ای دو اندازه حفره غالب، یکی بزرگ و دیگری کوچک وجود دارد. از کنار هم قرار گرفتن تعدادی حفره کوچک یک خوشه تشکیل می‌شود و فضای بین خوشه‌ها حفره‌های بزرگ را تشکیل می‌دهند.

حفره‌های کوچک، فشار مویینگی قابل توجهی برای رساندن مایع به سطح فتیله فراهم می‌کنند و حفره‌های بزرگ تراوایی بخار را افزایش می‌دهند. به همین دلیل فتیله‌های دو حفره‌ای عملکرد بهتری نسبت به فتیله‌های تک حفره‌ای دارند. حفره‌های بزرگ علاوه بر افزایش تراوایی بخار، به حرکت مایع نیز کمک می‌کند. به نظر می‌رسد ناحیه گلویی بین خوشه‌ها یک سطح مشترک هلالی ثانویه به وجود می‌آورد که برای فاز مایع نیز تراوایی بالایی فراهم می‌کنند. فتیله‌های دو حفره‌ای برای ایجاد یک توزیع اندازه حفره از اکسیداسیون مواد تف جوشی شده استفاده گردید.

محققین امیدوار بودند که محیط دو حفره‌ای بتواند برخی محدودیت‌های فتیله‌های تک حفره‌ای از جمله محدودیت تداخل و محدودیت مویینگی را

دمای گرم کن به شدت افزایش خواهد یافت.

### ۷.۱.۰ مشخصه‌های ساختار متخلخل برای بهبود جوش

ساختارهای متخلخل مؤثر در فرآیند جوش استخری دارای ویژگی‌های خاصی هستند که عبارتند از:

- ساختار متخلخل باز
- حفره‌های مرتبط ساختار
- عدم واکنش شیمیایی و فیزیکی ساختار با سیال عامل
- پایداری و عدم تغییر خواص ساختار در دماهای بالا
- رسانش حرارتی بالای ساختار
- ایجاد ضخامت بهینه ساختار
- اتصال مناسب ساختار با سطح

**ساختار متخلخل باز:** سطوح متخلخل دارای تنوع ساختاری زیادی بوده و همگی آن‌ها باعث بهبود فرآیندهای انتقال حرارت نمی‌گردد. به عنوان مثال سطح متخلخل بسته که سیال قابلیت نفوذ در حفره‌های آن را ندارد به عنوان عایق‌های حرارتی قوی استفاده می‌گردد. بنابراین سطح متخلخل باز با حفره‌های سطحی و همچنین حفره‌های مرتبط داخلی برای بهبود جوش مناسب است.

**حفره‌های مرتبط ساختار:** به منظور انتقال و نفوذ سیال و ایجاد نیروی موینگی نیاز است حفره‌ها به یکدیگر متصل باشند. فضای بین میکروساختارهای همسایه بایستی حداقل باشد تا این نیروی موینگی افزایش یابد. البته از طرف دیگر، بایستی فضای کافی برای فرار بخار از حفره‌های ساختار متخلخل وجود داشته باشد. برای رفع این مشکل، محققین اخیراً ساختارهای دوتخلخلی را پیشنهاد داده‌اند که از کلوخه‌های میکروذرات برای رساندن سیال به سطح و از فضای بین کلوخه‌ها برای فرار بسته‌های بخار از سطح استفاده می‌گردد. ایجاد ساختارهای متخلخل چند مقیاسی جای کار برای آینده را دارند.

**عدم واکنش شیمیایی و فیزیکی ساختار با سیال عامل:** مواد ساختار متخلخل بایستی در سیال عامل، غیرقابل حل باشند و واکنش شیمیایی و فیزیکی با آن ندهند. این امر باعث خوردگی، از بین رفتن ساختار متخلخل، آزاد شدن اکسیژن در محفظه‌های بسته، تغییر خواص سیال و غیره می‌گردد.

**پایداری و عدم تغییر خواص ساختار در دماهای بالا:** ساختار متخلخل نبایستی در دماهای بالا تغییر خاصیت دهد. فرآیند جوش با توجه به نوع سیال و فشار، در دماهای تقریباً بالایی رخ می‌دهد که ساختار متخلخل باید در این دماها به مدت طولانی، تغییر خواصی مانند به هم پیوستن حفره‌ها، ترشوندگی سطح، حل شدن در سیال و غیره را ندهد.

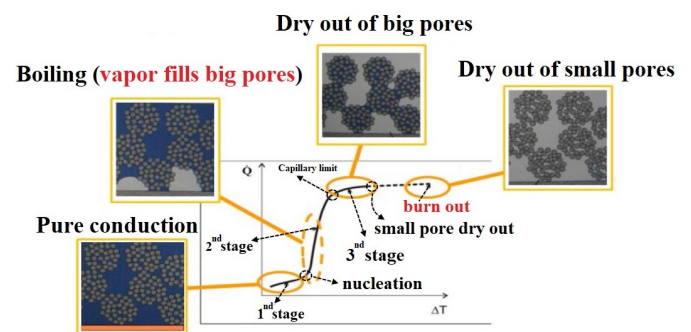
**رسانش حرارتی بالای ساختار:** ساختار متخلخل بایستی دارای رسانش حرارتی بالا باشد تا بتواند از طریق شبکه متخلخل به هم پیوسته، گرما را انتقال دهد. این انتقال گرما خصوصاً در شارهای پایین که هنوز جوش رخ نداده و گرما بایستی از طریق این ساختار به سیال منتقل شود، دارای اهمیت است. هرچند در شارهای بالا نیز، مقاومت رسانشی کمتر می‌تواند به فرآیند

از میان بردارد. همچنین عملکرد یک لوله حرارتی با فتیله دو حفره‌ای، فتیله تک حفره‌ای و یک تکه مسی بدون تخلخل توسط محققین این حوزه مقایسه گردید. آن‌ها مبنای محاسبه مقاوت حرارتی را به مقاومت هدایت حرارت در ناحیه فیلم نازک قرا دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در شارهای حرارتی بالا، از بین این سه محیط، فتیله دو حفره‌ای کمترین مقاوت حرارتی و در نتیجه بهترین عملکرد را دارد.

انواع دیگری از محیط‌های متخلخل برای ساختن محیط متخلخل یک شبکه شامل حفره‌های کوچک استفاده شد و برای حفره‌های بزرگ بین حفره‌های کوچک ستون‌هایی روی کف شبکه تراشیده گردید. با این شبکه متناوب، می‌توان به تراوایی نسبتاً بالایی دست یافت و همچنین می‌توان اندازه حفره‌ها را به دقت کنترل کرد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهد که هرچه شروع جوش زودتر اتفاق بیافتد، ضریب انتقال حرارت افزایش خواهد یافت.

### ۶.۱.۰ منحنی جوش در محیط‌های متخلخل دو حفره‌ای

عملکرد فتیله دو حفره‌ای به گونه‌ای است که می‌توان آن‌ها را به سه ناحیه مایع اشباع، دو فازی و بخار تقسیم کرد. در ناحیه مایع اشباع، انرژی تنها از طریق هدایت از میان ماده متخلخل فلزی انتقال می‌یابد، زیرا ضریب هدایت حرارتی فتیله بسیار بزرگ‌تر از ضریب هدایت حرارتی مایع است. مایع به سمت سطح بالایی فتیله حرکت می‌کند. اما عدد رینولدز بسیار کوچک تر از واحد است. با افزایش اختلاف دمای بین مایع و سطح گرم کن، حباب‌های بخار روی سطح پایینی فتیله شروع به تشکیل می‌کنند. هنگامی که هسته زایی جوش شروع می‌شود، انرژی علاوه بر هدایت گرمایی از طریق تبخیر نیز منتقل می‌شود. از آنجا که انتقال حرارت دو فازی مکانیزم به مراتب قوی‌تری برای انتقال حرارت است این نقطه نشان دهنده یک افت قابل ملاحظه در مقاوت حرارتی کلی فتیله خواهد بود. با افزایش شار حرارتی، تبخیر شدیدتر شده و ناحیه تبخیر توسعه خواهد یافت. شکل ۱۰ رژیم‌های جوش در محیط متخلخل دو حفره‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: رژیم‌های جوش در محیط متخلخل دو حفره‌ای [۱۵]

در یک نقطه مشخص افت فشار مانع از رسیدن مایع به سطح گرمکن خواهد شد. در این نقطه شار حرارتی به عنوان شار حرارتی بیشینه تعریف می‌شود. بعد از این نقطه حفره‌های بزرگ از مایع خالی شده و عملکرد لوله حرارتی به شدت افت می‌کند. با خشک شدن حفره‌های کوچک از بخار پوشیده شده و خشکی اتفاق می‌افتد. در این حالت بخار سوپریت شده و



## ۹.۱۰ روش‌های ساخت سطوح متخلخل نانو ساختار

فن‌آوری نانو توانایی ساخت، کنترل و استفاده ماده در ابعاد نانومتری است. اندازه ذرات در فن‌آوری نانو بسیار مهم است، چرا که در مقیاس نانویی، ابعاد ماده در خصوصیات آن بسیار تأثیرگذار است و خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تک تک اتم‌ها و مولکول‌ها با خواص توده ماده متفاوت است. این اندازه در مواد مختلف متفاوت است، اما به طور معمول مواد نانو به موادی که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر باشد گفته می‌شود. نانو ساختارها به ساختارهای دارای ابعاد نانو گفته می‌شوند. هنگامی که این ساختارها بر روی سطوح معمولی ساخته شوند، خواص ویژه‌ای به سطح می‌بخشند که آن‌ها را به پتانسیل خوبی برای استفاده در فرآیند جوشش تبدیل می‌کند. از جمله این نانو ساختارها می‌توان به نانوسیم‌ها<sup>۲</sup>، نانولوله‌ها<sup>۴</sup>، نانومیله<sup>۵</sup>، نانوفین‌ها<sup>۶</sup>، نانو-کانال‌ها<sup>۷</sup>، شبکه‌های بهم پیوسته نانوحفره<sup>۸</sup> و پوشش‌های نانوپوروس<sup>۹</sup> اشاره کرد. در سال‌های اخیر طراحی و ساخت نانو ساختارهای تک بعدی مانند نانوسیم‌ها، نانومیله‌ها، نانولوله‌ها و غیره توجه وسیعی را به خود جلب کرده‌است. این ساختارها به دلیل مساحت سطح بیشتر و تمرکز نقص‌های سطح<sup>۱۰</sup> مؤثرتر دارای خواص الکتروشیمیایی جدیدی هستند که آن‌ها را به پتانسیل خوبی برای استفاده در زمینه الکترونیک، انتقال حرارت، سنسورهای گاز و کاتالیست‌ها تبدیل کرده‌است. در زمینه انتقال حرارت جوششی، میکرو و نانو ساختارها با تغییر خواص سطح مانند ترشوندگی، زبری، موینگی و ابعاد سطح می‌توانند جوشش استخری را بهبود بخشند و از این رو پتانسیل خوبی برای بهبود عملکرد جوشش استخری بشمار می‌روند [۱۷].

روش‌های زیادی برای ساخت سطوح متخلخل برای بهبود انتقال حرارت جوششی پیشنهاد گردیده است. متداول‌ترین این روش‌ها به ترتیب تف‌جوشی<sup>۱۱</sup>، انباشت الکتروشیمیایی<sup>۱۲</sup>، آندایز<sup>۱۳</sup>، لیئوگرافی<sup>۱۴</sup> و روش‌های ابداعی دیگر است. در ادامه دو روش متداول توضیح داده می‌شوند.

**تف‌جوشی:** تف‌جوشی یک از رایج‌ترین و معمول‌ترین روش‌ها برای تولید سطح میکرومتخلخل فلزی است. محلولی از ذرات فلزی و نگهدارنده‌هایی (مانند استون) به روش‌های مختلف بر روی سطح می‌نشینند. این مخلوط در دماهای مختلف برای زمان‌های مورد نظر و در محیط‌های کنترل شده گرمادهی می‌گردد. عیب این فرآیند، نیاز به فشار بالا برای فشرده‌سازی و کوره دما بالا یا خلا یا اتمسفر ورودی برای جلوگیری از اکسیداسیون است. به علاوه پودرهای متشکل از میکرو/نانوذرات، واکنش‌پذیری بالایی را نشان می‌دهند و کار کردن با آن‌ها نیازمند تجهیزات ویژه‌ای است. طی فرآیند ساخت محیط متخلخل، قرارگیری در معرض هوا حتی در زمان کوتاه، اجتناب ناپذیر است. برای مثال در خصوص مس، پس از خروج ساختار متخلخل مسی از کوره سیتترینگ، اکسید مس آب‌گریز بر روی سطح مس با گذشت زمان تشکیل می‌شود که با افزایش دما نیز، تسریع می‌گردد. اگر دمای ماده متخلخل بالا باشد یا زمان قرارگیری طولانی شود، ترشوندگی و در نتیجه نیروی موینگی کاهش می‌یابد و عملکرد سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

جوشش کمک نماید. بدین صورت که هسته‌های حباب عموماً در لایه پایین تخلخل که نزدیکتر به سطح داغ هستند، ایجاد می‌شود. اگر مقاومت رسانشی ساختار متخلخل کم باشد، دمای لایه‌های بالاتر تخلخل افزایش یافته و مستعد تولید حباب می‌گردند.

**ایجاد ضخامت بهینه ساختار:** همچنین ضخامت سطح متخلخل در مقاومت رسانشی ذکر شده تأثیرگذار است. با وجود اینکه ساختار متخلخل در افزایش انتقال حرارت بین سطح و سیال تأثیرگذار است اما افزایش بیش از حد آن هم باعث افزایش مقاومت رسانشی بین سطح گرمکن و سیال می‌گردد. تام<sup>۱</sup> پیشنهاد داده است که حداکثر ضخامت پوشش نبایستی بیش از  $3 - 1/5$  میلی‌متر باشد تا در شارهای حرارتی کم مناسب باشد. آزمایشات نشان داده است نسبت بهینه ضخامت سطح متخلخل به قطر ذرات در ساختارهای متخلخل ذره‌ای حدود ۴ است [۱۶].

**اتصال مناسب ساختار با سطح:** به منظور ارتباط رسانشی و ایجاد نیروی موینگی کافی، نیاز است اتصال ساختار متخلخل با سطح به خوبی ایجاد گردد. جنس سطح گرمکن و پودر متخلخل در میزان استحکام این اتصال دخیل است و در برخی مواد، این اتصال برقرار نمی‌گردد. در صورتی که گرادیان دمایی زیادی در طول جوشش بر روی سطح متخلخل ایجاد گردد، لایه‌های چسبیده عموماً از دیواره پایه پس از مدت زمان محدودی جدا می‌شوند. این نقیصه یکی از دلایلی است که تغییر مستقیم سطح پایه برای بهبود ساختار ترجیح داده می‌شود. هر چند پیچیدگی و هزینه بالای بهبود مستقیم هم قابل توجه است.

## ۸.۱۰ استحکام مکانیکی ساختار متخلخل

در اغلب کاربردها و محیط‌های صنعتی، نیروهای مکانیکی مانند ارتعاشات، ضربه، صوت و غیره وجود دارد. همچنین سیکل‌های جدایش حباب نیز نیروهایی بر دیواره‌های متخلخل وارد می‌آورد. بنابراین اتصال ذرات در ساختار متخلخل بایستی به قدری محکم باشد که بتواند در برابر این شرایط محیطی، به هم پیوستگی خود را حفظ نمایند.

**کاهش مقاومت رسانشی اتصال دهنده ساختار با سطح پایه:** مقاومت رسانشی برای اتصال دهنده ساختار متخلخل به سطح موردنظر بایستی حداقل باشد. در برخی روش‌های ساخت سطح متخلخل، از ترکیب ذرات با مواد چسبنده یا رنگ و اعمال آن‌ها بر روی سطح برای ایجاد تماس استفاده می‌نمایند که مقاومت رسانشی این ترکیبات بر روی سطح تأثیرگذار است.

**هیستریزیس<sup>۲</sup> جوششی کم ساختار در کارکرد تناوبی و طولانی:** همچنین برای کاربردهای صنعتی بایستی پایداری کافی برای زمان‌های کارکرد طولانی و کم بودن هیستریزیس جوشش برای کارکردهای تناوبی داشته باشد. علاوه بر موارد ذکر شده، کاهش هزینه تولید ساختار متخلخل، سادگی ساخت، قابلیت تکرارپذیری، قابلیت تولید انبوه، استفاده از ابزارهای موجود و در دسترس برای ساخت و غیره از مواردی است که بایستی در انتخاب نحوه ساخت ساختار متخلخل مطلوب در نظر گرفت [۱۱].

<sup>1</sup>Tom <sup>2</sup>Hysteresis <sup>3</sup>Nanowire <sup>4</sup>Nanotube <sup>5</sup>Nanorod <sup>6</sup>Nanofin <sup>7</sup>Nanochannel <sup>8</sup>Interconnected network of Nanopores <sup>9</sup>Nanoporous coating <sup>10</sup>Surface Defect Concentration <sup>11</sup>Sintering <sup>12</sup>Electrochemical Deposition <sup>13</sup>Anodize <sup>14</sup>Lithography

کشش سطحی باعث سهولت جدا شدن حباب از سطح می‌شود و افزایش فشار باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد.

سطوح متخلخل در افزایش انتقال حرارت دوفازی و کاهش مافوق گرم دیواره موثرند. سطوح متخلخل دارای تنوع ساختاری زیادی بوده و تمامی آن‌ها باعث بهبود فرآیندهای انتقال حرارت نمی‌گردد. ساختار متخلخل سطحی مطلوب، برای بهبود انتقال حرارت جوششی دارای خواص حفره‌های باز و مرتبط، تامین نیروی موئینگی با حفره‌های کوچک، ایجاد نفوذپذیری کافی سیال با حفره‌های بزرگ، عدم واکنش شیمیایی و فیزیکی ساختار با سیال عامل، استحکام مکانیکی کافی، پایداری و عدم تغییر خواص در دماهای بالا، هیستریزیس جوششی کم ساختار در کارکردهای متناوب و طولانی، رسانش حرارتی بالای ماده ساختار با ضخامت بهینه، اتصال مناسب ساختار متخلخل با سطح زیرلایه با کمترین مقاومت حرارتی است. همچنین کاهش هزینه و زمان تولید، سادگی فرآیند، قابلیت تکرارپذیری و کنترل پذیری، قابلیت تولید انبوه، استفاده از ابزارهای موجود و در دسترس ساخت از مواردی است که بایستی در انتخاب نحوه ساخت ساختار متخلخل مطلوب در نظر گرفت. قابل ذکر است که اگر پوششی از نانوذره را روی سطح گرم‌کن در مقیاس نانو ایجاد کنیم، این امر نیز موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد.

## مراجع

- [1] El-Genk, Mohamed S. Nucleate boiling enhancements on porous graphite and microporous and macro-finned copper surfaces. *Heat Transfer Engineering*, 33(3):175-204, 2012.
- [2] Nukiyama, Shiro. The maximum and minimum values of the heat  $q$  transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 9(12):1419-1433, 1966.
- [3] Jones, Benjamin J, McHale, John P, and Garimella, Suresh V. The influence of surface roughness on nucleate pool boiling heat transfer. *Journal of Heat Transfer*, 131(12):121009, 2009.
- [4] Kim, Beom Seok, Shin, Sangwoo, Lee, Donghwi, Choi, Geehong, Lee, Hwanseong, Kim, Kyung Min, and Cho, Hyung Hee. Stable and uniform heat dissipation by nucleate-catalytic nanowires for boiling heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70:23-32, 2014.
- [5] Phan, Hai Trieu. *Effects of nano-and micro-surface treatments on boiling heat transfer*. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [6] O'Hanley, Harry, Coyle, Carolyn, Buongiorno, Jacopo, McKrell, Tom, Hu, Lin-Wen, Rubner, Michael, and Cohen, Robert. Separate effects of surface roughness, wettability, and porosity on the boiling critical heat flux. *Applied Physics Letters*, 103(2):024102, 2013.
- [7] Kandlikar, Satish G. *Handbook of phase change: boiling and condensation*. Routledge, 2018.
- [8] Collier, John G and Thome, John R. *Convective boiling and condensation*. Clarendon Press, 1994.

آزمایش‌ها نشان داده است با ۳ ساعت قرارگیری در معرض هوا، شار حرارتی بحرانی حدود نصف می‌شود. اگرچه مقاومت تبخیری حداقل، تغییر چندانی نمی‌یابد. البته سیالات با ترشوندگی بالا مانند استون یا متانول، خیلی کمتر تحت تأثیر این پدیده قرار می‌گیرند. اتمسفر فرآیند سینترینگ تأثیر زیادی در شکل‌گیری ساختار دارد. شکل‌گیری ساختار اکسید فلزی بر روی سطح ماده با افزایش دما در معرض هوا باعث عدم اتصال بین پودرها و بین پودر و ماده سطح می‌گردد. این اتمسفر به جنس پودر مورد استفاده بستگی دارد. برای پودر مس، اتمسفر کاهشی برای جلوگیری از تشکیل اکسید مس بر روی سطح، با استفاده از گازهای هیدروژن یا مونوکسیدکربن فراهم می‌گردد. این اتمسفر باعث برداشتن لایه اکسیدی در مس پیش از شروع فرآیند نیز می‌گردد. جریانی از این اتمسفر با دبی  $300 \text{ ccm}$  می‌تواند شرایط مطلوبی برای فرآیند سینترینگ با در نظرگیری ایمنی فرآیند فراهم آورد [۱۸].

**الکترونشست:** انباشت الکتروشیمیایی روشی ساده برای تولید میکرو/نانوساختارهای متخلخل است که شامل فرآیند الکتروشیمیایی کاهش یون در کاتد توسط عبور جریان مستقیم از طریق محلول (گالوانوستاتیک<sup>۱</sup>) یا نگهداری زیرلایه (کاتد) در پتانسیلی که کاهش اتفاق می‌افتد (پتانسیوستاتیک<sup>۲</sup>)، است. در این فرآیند، سطح مسی مورد نظر به عنوان کاتد و فلزی دیگر با قابلیت اکسیدشوندگی به عنوان آنود، به طور کامل در محلول الکترولیت شامل نمک فلزی (سولفات مس) حل شونده در آب و اسید سولفوریک، به فاصله چند سانتیمتر مستغرق می‌شوند. فرآیند می‌تواند با گذر جریان ثابت از محلول یا با نگهداری ماده الکترود آنود در پتانسیل ثابت انجام شود. در حالت گالوانوستاتیک، کاتد و آنود به منبع جریان مستقیم کنترل شونده با کامپیوتر وصل می‌شوند تا چگالی جریان قابل تنظیم باشد و زمان فرآیند مشاهده شود. زمانی که جریان الکتریکی در سلول الکتروشیمیایی برقرار شود، یون‌های  $H^+$  و  $Cu^{2+}$  در محلول الکترولیت تحت دو واکنش کاهشی همزمان در کاتد به صورت زیر قرار می‌گیرند. اتم‌های مس در سطح کاتد به سرعت تشکیل شده و به صورت دندانه‌های ریز و فشرده در حفره‌های دایروی رشد می‌نمایند. مولکول‌های هیدروژن در کاتد به صورت حباب‌های ریز تشکیل شده و پس از اتصال به یکدیگر، جریانی از حباب‌های بزرگ ایجاد می‌گردد. بدین ترتیب لایه‌ای متخلخل بر روی سطح مورد نظر می‌نشیند [۱۹].

## ۱۱ نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی فرآیند جوشش استخری به‌عنوان روشی مؤثر در انتقال گرما با رویکرد ایجاد تخلخل روی سطح جهت افزایش ضریب انتقال حرارت پرداخته شد. هدف بهبود شار حرارتی بحرانی و یا ضریب انتقال حرارت است. از جمله عوامل مؤثر در فرآیند جوشش استخری، خواص سطح نظیر ترشوندگی، موئینگی و ایجاد تخلخل هستند. روش‌های ترکیبی به کار برده شده در این مقاله با بهبود مورفولوژی سطح از نقطه نظر عملکرد گرمایی، جوشش استخری را بهبود می‌بخشند. می‌توان نتیجه گرفت افزایش اثر افزایش زبری سطح باعث افزایش شار گرمایی می‌شود. همچنین کاهش

<sup>1</sup>Galvanostatic    <sup>2</sup>Potentiostatic

- [9] Kim, Jungho. Nucleate pool boiling: the dominant bubble heat transfer mechanisms. in *ASME 2009 7th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, pp. 1267–1278. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [10] Mikic, BB and Rohsenow, WM. A new correlation of pool-boiling data including the effect of heating surface characteristics. *Journal of Heat Transfer*, 91(2):245–250, 1969.
- [11] Ji, Xianbing, Xu, Jinliang, Zhao, Ziwei, and Yang, Wolong. Pool boiling heat transfer on uniform and non-uniform porous coating surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 48:198–212, 2013.
- [12] Patil, Chinmay. Enhancement of pool boiling heat transfer using a combination of open microchannels and microporous surfaces. 2014.
- [13] Min, DH, Hwang, GS, Usta, Y, Cora, ON, Koc, M, and Kaviani, M. 2-d and 3-d modulated porous coatings for enhanced pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(11-12):2607–2613, 2009.
- [14] Bergles, AE and Chyu, MC. Characteristics of nucleate pool boiling from porous metallic coatings. *Journal of Heat Transfer*, 104(2):279–285, 1982.
- [15] Reilly, Sean W and Catton, Ivan. Utilization of pore-size distributions to predict thermophysical properties and performance of biporous wick evaporators. *Journal of Heat Transfer*, 136(6):061501, 2014.
- [16] Chang, JY and You, SM. Enhanced boiling heat transfer from microporous surfaces: effects of a coating composition and method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(18):4449–4460, 1997.
- [17] Celia, Elena, Darmanin, Thierry, de Givenchy, Elisabeth Taffin, Amigoni, Sonia, and Guittard, Frédéric. Recent advances in designing superhydrophobic surfaces. *Journal of colloid and interface science*, 402:1–18, 2013.
- [18] Xiao, Zhu. *Heat transfer, fluid transport and mechanical properties of porous copper manufactured by lost carbonate sintering*. Ph.D. thesis, University of Liverpool, 2013.
- [19] Patil, Chinmay M and Kandlikar, Satish G. Pool boiling enhancement through microporous coatings selectively electrodeposited on fin tops of open microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79:816–828, 2014.