



مشاهده دینامیک حباب طی جریان جوشش تحت اشباع تحت شرایط مختلف تر شوندگی سطح در فشار اتمسفر

روح اله احمدی^{1*}، تومیو اوکاوا²

1- استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک و سیستم‌های هوشمند، دانشگاه الکترو کامیونیکیشن، توکیو، ژاپن

* تهران، کد پستی 1684613114، ahmadi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 اردیبهشت 1394

پذیرش: 11 خرداد 1394

ارائه در سایت: 19 خرداد 1394

کلید واژگان:

جریان جوشش تحت اشباع

آغاز تولید بخار خالص

دینامیک حباب

تحلیل تصاویر

چکیده

در این مطالعه، دینامیک حباب و مکانیزم تولید بخار خالص به صورت تجربی - مشاهده‌ای در یک کانال مستطیلی عمودی، طی جریان جوشش تحت اشباع در فشار اتمسفر بررسی شد و نتایج قابل توجهی در شرایط مختلف تر شوندگی سطح بدست آمد. طی مشاهدات، دو نوع رفتار کاملاً متفاوت در شروع جوشش هسته‌ای برای حباب بخار مشاهده گردید و همچنین در ناحیه‌ای که کسر حجمی بخار کم است مکانیزم جدیدی برای شروع تولید بخار خالص ارائه شد. هنگام شروع جوشش هسته‌ای بر روی یک سطح آبدوست، مشاهده شد که همه حباب‌های تشکیل شده در هسته‌های فعال، بلافاصله پس از رشد یافتن از سطح بلند شده و از آن فاصله می‌گیرند و به سرعت در آب مادون اشباع در اثر چگالش ناپدید می‌شوند. در مقابل، زمانی که سطح آبگریز بود، در شرایط شروع جوشش هسته‌ای حباب‌های شکل گرفته در محل تشکیل خود گیر افتاده‌اند. در ادامه، مکانیزم شروع تولید بخار خالص در سطوح آبدوست و آبگریز پیشنهاد شد. نتیجه مهم حاصل از مشاهدات این پژوهش این است که بر روی یک سطح آبگریز با زاویه تماس بالا (حدود 90°)، جدایش حباب از هسته‌های فعال روی سطح، در نزدیکی نقطه آغاز کسر قابل توجه بخار که شرط لازم برای شروع تولید بخار خالص است، رخ می‌دهد. مکانیزم اصلی حاکم بر تولید بخار خالص برای سطوح آبدوست و آبگریز، بازگشت مجدد حباب بلند شده از سطح، به سطح داغ مشاهده گردید، اما جدایش حباب از هسته‌های فعال شاخص خوبی برای تعیین شروع تولید بخار خالص برای سطوح آبگریز است.

Observation of Bubble Dynamics during Subcooled Flow Boiling on Different Surface Wettability in Atmospheric Pressure

Rouhollah Ahmadi^{1*}, Tomio Okawa²

1- School of New Technology, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, University of Electro-Communications, Tokyo, Japan

* P.O.B. 1684613114 Tehran, Iran, ahmadi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 April 2015
Accepted 01 June 2015
Available Online 09 June 2015

Keywords:
subcooled flow boiling
incipient point of net vapor generation (NVG)
bubble dynamics
visual investigation

ABSTRACT

In this study, bubble dynamic and the mechanisms to cause net vapor generation (NVG) were explored experimentally in a rectangular vertical upward subcooled flow boiling under atmospheric pressure, and new results were found on various conditions of surface wettability. In the course of observation, two different vapor bubble behaviors were observed and in low void fraction region new mechanism for incipience of net vapor generation was proposed. On a hydrophilic heated surface, at boiling incipience all the bubbles were lifted off the heated surface at atmospheric pressure and immediately collapsed in the subcooled liquid. In contrast, when the surface was hydrophobic, bubbles mostly stuck on the nucleation sites at ONB condition. Furthermore, in this study, experiments were performed using rather hydrophilic and hydrophobic heated surface to propose the new mechanisms of NVG. An important result revealed in this work was that on a hydrophobic heated surface with high contact angle around 90° , bubble departure from all the nucleation sites which is a necessary condition to cause NVG, occurs in proximity to onset of significant void (OSV). The direct cause of OSV for the hydrophilic and hydrophobic surfaces was reattachment of lift-off bubble to heated surface, but bubble departure from nucleation sites was a good indication of OSV at hydrophobic surface.

1- مقدمه

که در آن دمای سیال پایین‌تر از دمای اشباع متناسب با فشار سیستم است و

در یک مجرای داغ، جوشش تحت اشباع ناحیه‌ای از جوشش را شامل می‌شود در عوض دمای سطح داغ بالاتر از دمای اشباع می‌باشد. دو نقطه مهم در این

Please cite this article using:

R. Ahmadi, T. Okawa, Observation of Bubble Dynamics during Subcooled Flow Boiling on Different Surface Wettability in Atmospheric Pressure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 313-320, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

منطقه حائز اهمیت می‌باشند: 1- نقطه شروع جوشش هسته‌ای و 2- نقطه آغاز کسر قابل توجه بخار یا نقطه شروع تولید بخار خالص. در بسیاری از مدل‌های جریان جوشش تحت اشباع، نقطه شروع تولید بخار خالص به عنوان موقعیتی که در آن حباب بخار، هسته تشکیل اولیه خود و یا سطح داغ را ترک می‌کند شناخته می‌شود [1]. گریفیت و همکاران [2] اولین کسانی بودند که جوشش تحت اشباع را به دو منطقه‌ی جریان مادون سرد و جریان سرد ملایم تقسیم کردند. ناحیه گذار بین این دو منطقه را حباب‌هایی که به سطح چسبیده شده است تشکیل می‌دهد. نقطه شروع تولید بخار خالص به عنوان نقطه‌ای که نرخ تبخیر با چگالش برابر است معرفی شده است. چند سال بعد، باورینگ [3] نقطه شروع تولید بخار خالص را نقطه‌ای که حباب‌ها از سطح جدا می‌شوند معرفی کرد و رابطه تجربی (1) را برای سیال آب در محدوده فشار 10 تا 136 بار پیشنهاد کرد.

$$\Delta T_{\text{sub,NVG}} = \eta \frac{q_w}{G v_f} \quad (1)$$

در رابطه فوق، q_w شار حرارتی، G شار جرمی، v_f حجم ویژه مایع و η فاکتوری است که تنها به فشار سیستم P (برحسب بار) وابسته است و برابر است با:

$$\eta \times 10^6 = 14 + 0.1P \quad (2)$$

شروع تولید بخار خالص به صورت تجربی توسط افراد مختلفی مطالعه شده است و روابط نیمه تجربی متفاوتی گزارش شده است. دیکس [4] با مطالعه تجربی جریان جوشش تحت اشباع در دبی جریان پایین، رابطه‌ای کاملاً تجربی برای شروع تولید بخار خالص ارائه کرد. لوی [5] و استاب [6] رابطه‌ای بر پایه اعمال تعادل نیرویی در یک حباب بیرون آمده از لایه مرزی حرارتی مجاور سطح داغ، با توجه به پروفیل دما و سرعت در کانال، پیشنهاد کرده‌اند. فرض بر این است که جدا شدن حباب در نتیجه غلبه نیروی پسا بر نیروی کشش سطحی وارد بر یک حباب متصل به سطح داغ است. اونا [7] رویه‌ای متفاوت برای معرفی نقطه شروع تولید بخار خالص ارائه نمود. او با در نظر گرفتن این نقطه به عنوان نقطه گذر و یا انتقال جریان تک فاز مایع به جریان کاملاً توسعه یافته جوشش هسته‌ای، رابطه خود را توسعه داد. کلی و کازمی [8] در گزارش خود آغاز کسر قابل توجه بخار را مقارن با جدایش حباب بخار از سطح داغ در نظر گرفته‌اند. در مدل معروف و پذیرفته شده که توسط ساها و زوبر بیان شد [9]، بسته به شرایط دینامیکی و گرمایی جریان در کانال یکی از دو مکانیزم هیدرودینامیک یا انتقال حرارت ممکن است به عنوان شرایط ایجاد شروع تولید بخار خالص اعمال شوند.

به طور کلی، مطالعات نشان می‌دهند که در مدل‌های ارائه شده جهت تشخیص موقعیت تولید بخار خالص در جریان جوشش تحت اشباع، اساس فرآیند مدل‌سازی، دینامیک حباب است. از این رو، بسیاری از مطالعات تجربی صورت گرفته تا کنون، به مشاهده رفتار حباب در هندسه‌ها و شرایط تجربی مختلف پرداخته است. در فشار نزدیک به اتمسفر، برای جریان جوشش تحت اشباع آب گزارش شد [10-12] که حباب پس از شکل‌گیری، به طور معمول محل تشکیل را ترک و با لغزیدن بر روی سطح داغ برای یک فاصله کوتاه، تمایل به بلند شدن از سطح را دارد و پس از آن در مایع تحت اشباع فرو می‌پاشد¹. در حالی که، در آزمایشی با استفاده از FC-87 به عنوان سیال، حباب محل تشکیل هسته خود را ترک و با لغزیدن بر روی سطح یک فاصله طولانی را طی می‌کند [13]. در مطالعه‌ای، طی بررسی سرعت و تغییر شکل حباب هوا در مایع ساکن در شیب‌های مختلف، با استفاده از روش شبیه

سازی عددی حجم سیال، نتیجه گرفته شد که بیشینه سرعت حباب در زاویه 45 درجه می‌باشد [14]. باسو و همکاران [15] نشان دادند که دو شرط برای تشکیل هسته حباب لازم است: اول این که، حفره مربوطه بر روی سطح در دسترس باشد و دوم، حفره مملو از مایع نباشد. آن‌ها نشان دادند که غوطه‌ور شدن حفره بستگی به شکل حفره و تر شوندگی سطح دارد. به عنوان مثال، با نزدیک شدن زاویه تماس سطح به صفر یعنی اگر سطح آبدوست باشد، تمام حفره‌ها دچار آب گرفتگی می‌شود و در نتیجه با کاهش زاویه تماس تعداد محل‌های فعال تشکیل هسته حباب کاهش می‌یابد. در مطالعات مشاهده‌ای-تجربی که توسط ماروس و همکاران [16] و همچنین ژانگ و همکاران [17] صورت گرفت فاکتورهای ابعادی و رفتاری حباب از قبیل اندازه حباب، عمر حباب، فرکانس تشکیل حباب و چگالی هسته‌های جوانه‌زنی² حباب در جوشش اجباری و استخری اندازه‌گیری و گزارش شده است. اوکاوا و همکارانش در مطالعه‌ای [18] میزان درصد حجمی بخار را بررسی و در جایی دیگر [19] گزارش دادند که در جوشش استخری وقتی که میزان تر شوندگی سطح کم است حباب به دیواره داغ تا حدی می‌چسبد. از طرفی، نتایج مشاهدات رفتار حباب مورد توجه افراد زیادی که در زمینه دینامیک محاسباتی سیالات فعال هستند واقع شده است تا رفتار حباب را بتوانند شبیه سازی نمایند. رفتار حباب در سیال تحت اشباع، به علت همزمانی تبخیر و چگالش در سطح آن بسیار پیچیده است. شبیه‌سازی نحوه چگالش یک حباب در جریان جوشش تحت اشباع توسط تان و پِن جهت توصیف پدیده انتقال حرارت و جرم بین فاز، انجام شده است [20]. با ارائه مدلی توسط کلجناک [21]، حباب‌ها در جریان جوشش تحت اشباع دنبال شدند تا با توجه به پدیده‌های انتقال حرارت و جرم در حباب، روند افزایش کسر حجمی بخار در طول کانال جوشش بدست آید. جدای از مباحث مطرح شده، در پژوهشی [22] با افزایش ناگهانی شار حرارتی، پدیده انحراف از جوشش هسته‌ای منجر به پدیده خشک شدگی و به دنبال آن افزایش ناگهانی دما می‌شود که به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، جریان همراه با جوشش هسته‌ای و انحراف از آن در یک مینی کانال توسط ربیعی و عطف مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت میدان جریان به صورت مایع تحت اشباع است ولی به علت تجاوز شار حرارت اعمالی از شار بحرانی، لایه‌ای از بخار در مجاورت دیواره شکل می‌گیرد. در مطالعه حاضر، شار حرارتی اعمالی فاصله قابل ملاحظه‌ای از شار بحرانی دارد.

2- توصیف آزمایش تجربی

مدار آزمون به همراه مقطع آزمون، که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت در شکل 1 بصورت شماتیک نشان داده شده است. قبل از آزمایش، آب فیلتر و دیونیزه شده، حداقل به مدت یک ساعت در یک مخزن ذخیره مجهز

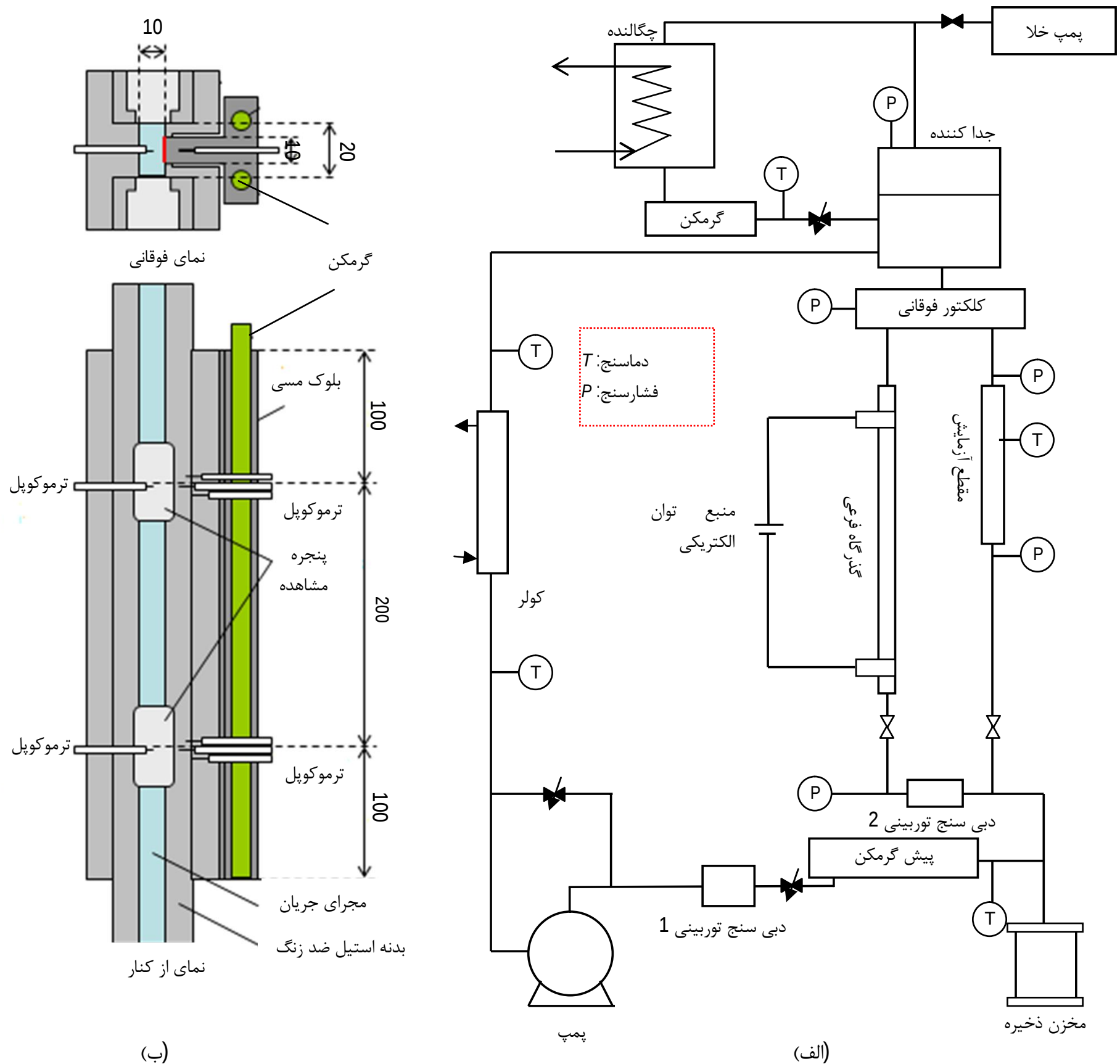
1- collapsing

2- Nucleation site density

موقعیت‌های بخش اندازه‌گیری به ترتیب در 100 و 300 میلی متر بالاتر از نقطه شروع بخش فعال حرارتی کانال قرار دارند. قابل توجه است که در این مطالعه، مشاهدات تنها در بخش اندازه‌گیری بالا (300 میلی متر) با استفاده از یک دوربین سرعت بالا صورت گرفت و پارامترهای جریان حرارتی سیال از قبیل دبی جریان، درجه حرارت سطح و سیال و فشار مایع با استفاده از سنسورهای نصب شده متصل به یک سیستم اکتساب داده ثبت شد. دبی کلی جریان سیال توسط دبی سنج توربینی شماره 1 ثبت می‌شود. مدل دوربین سرعت بالا، کداک فوترون K 120 می‌باشد. جهت ثبت تصاویر رفتار حباب، نور پس زمینه توسط یک لامپ هالیدی و یک کاغذ شفاف نورگذران واسطه به منظور پخش نور، تامین و تنظیمات دوربین سرعت بالا با توجه به شرایط تجربی تعیین گردید که در متن آمده است. حداکثر نرخ فریم و حداکثر سرعت شاتر دوربین سرعت بالای انتخاب شده، 120000 فریم در ثانیه و 1/250000 ثانیه است.

در این مطالعه، به منظور شناسایی اثر تر شونده گی سطح، زاویه تماس

به هیتر به منظور گاز زدایی در حال جوش نگه داشته شد. سپس مدار آزمون توسط پمپ خلا عاری از هوا شد و سپس با استفاده از اختلاف فشار ایجاد شده بین مخزن آب و مدار آزمون، آب گاز زدایی شده به مدار آزمون هدایت شد. آب توسط پمپ در مدار به گردش در می‌آید و میزان دمای آب ورودی به مقطع آزمایش با استفاده از دو غلاف پیش گرمکن 5 کیلو واتی تنظیم می‌شود. لازم به ذکر است که، مقدار کمی از آب از طریق یک خط گذرگاه فرعی (سمت چپ مقطع آزمون) برای کنترل فشار سیستم جهت تولید جریان بخار-آب، عبور داده می‌شود. میزان دبی عبوری از این گذرگاه فرعی توسط دبی سنج توربینی شماره 2 اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که در شکل 1 (ب) نشان داده شده است، مقطع آزمون، کانال مستطیل شکل با ابعاد 10 × 20 میلی متر است و بخشی از یک طرف کانال توسط جریان الکتریکی گذرنده از گرمکن‌های جاسازی شده در یک بلوک مسی حرارت داده می‌شود. در مقطع آزمون، دو بخش اندازه‌گیری قابل رویت برای بدست آوردن اطلاعات جریان و همچنین ثبت تصاویر رفتار حباب طی جوشش، طراحی شده است.



از سوی دیگر، مشاهده شد که رفتار حباب بر روی سطح آبگریز در فشار تست شده کاملاً متفاوت است. رفتار حباب در آزمایش سری 1 در مرحله اجرای 101، با استفاده از یک سطح آبگریز با زاویه تماس متوسط 89° در شکل 3 ب نشان داده شده است. در سطح داغ آبگریز، حباب ها به طور معمول در شرایط نزدیک به شروع جوشش هسته ای به محل تشکیل هسته خود چسبیده اند، و تنها به صورت متناوب بزرگ و کوچک می شوند.

در ادامه، مشاهده جزئیات رفتار حباب نزدیک به شرایط شروع جوشش هسته ای و در فشار اتمسفر مورد بحث قرار می گیرد. در این مطالعه، میانگین زاویه تماس φ_m در هر سری از آزمایش توسط رابطه (3) تعریف شد:

$$\varphi_m = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad (3)$$

اندازه φ_m در آزمایشات انجام شده در فشار اتمسفر، برابر با 89° در سری 1، 82° در سری 2، $56/5^\circ$ در سری 3 و 18° در سری 4 می باشد. در واقع

جدول 1 خلاصه شرایط چهار سری آزمون در فشار اتمسفر

کسر حجمی بخار $\langle \alpha \rangle$	کیفیت تعادلی بخار X_{eq}	دمای تحت اشباع $\Delta T_{sub} (K)$	شار حرارتی q_w (kW/m ²)	مرحله اجرا	سری آزمون/ زاویه تماس
0/00015	-0/02267	10/8	222	101	سری 1
0/00019	-0/02195	10/3	220	102(OSV)	$(\varphi_1=97^\circ,$
0/00467	-0/01570	7/5	216	103	$\varphi_2=81^\circ,$
0/01259	-0/01041	4/8	220	104	$\varphi_m=89^\circ)$
0	-0/03456	16/8	203	201	
0	-0/02747	13/3	207	202(ONB)	
0/00052	-0/02401	11/6	200	203	سری 2
0/00188	-0/01885	9/0	205	204(OSV)	$(\varphi_1=94^\circ,$
0/00217	-0/01720	8/2	205	205	$\varphi_2=70^\circ,$
0/00377	-0/01595	7/6	207	206	$\varphi_m=82^\circ)$
0/00880	-0/01433	6/6	205	207	
0/00975	-0/01042	4/8	204	208	
0/01557	-0/00810	3/7	207	209	
0	-0/02183	10/4	211	301	سری 3
0/00020	-0/02035	9/7	213	302(OSV)	$(\varphi_1=57^\circ,$
0/00208	-0/01540	7/2	208	303	$\varphi_2=56^\circ,$
0/01170	-0/00896	4/0	206	304	$\varphi_m=56/5^\circ)$
0	-0/0345	16/3	217	401	
0	-0/0319	15/2	219	402	
0	-0/0299	14/4	213	403	سری 4
0/00001	-0/0275	13/3	213	404(ONB)	$(\varphi_1=18^\circ,$
0/00001	-0/0255	12/2	210	405	$\varphi_2=18^\circ,$
0/00020	-0/0231	11/2	212	406	$\varphi_m=18^\circ)$
0/00020	-0/0210	9/6	215	407(OSV)	
0/00377	-0/0159	7/6	224	408	
0/00443	-0/0127	6/6	227	409	
0/01170	-0/0078	4/9	229	410	

سطح حرارتی مسی تغییر یافت، چهار سری آزمایش، در فشار اتمسفر (1 بار) تحت شرایط مختلف تر شونده گی صورت گرفت. لازم به ذکر است که در تمام آزمون ها شار گرمی، G ، حدود $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ثابت نگه داشته شده است. در هر سری آزمایش، تنها میزان دمای تحت اشباع آب در ورودی، ΔT_{sub} ، گام به گام کاهش یافته است و سایر پارامترها از قبیل فشار، شار گرمی و شار حرارتی نسبتاً ثابت نگه داشته شد. طیف وسیعی از ΔT_{sub} برای پوشش شرایط شروع جوشش هسته ای تا نزدیک به جوشش اشباع تست شده است. شرایط اصلی آزمون، کیفیت بخار X_{eq} و متوسط کسر حجمی بخار $\langle \alpha \rangle$ در هر مرحله اجرای آزمون در جدول 1 لیست شده است. روش محاسبه متوسط کسر حجمی بخار $\langle \alpha \rangle$ در بخش 2-3 توضیح داده شده است. با توجه به مشخصات تجهیزات اندازه گیری، دقت فشارسنج ها $\pm 0/25 \% \text{ F.S}$ ، ترموکوپل 1°C و دبی سنج ها $\pm 0/25 \%$ برآورد می شود.

به منظور اندازه گیری میزان تر شونده گی سطح زاویه تماس استاتیکی قطرات آب با سطح اندازه گیری شد. با استفاده از دستگاه مدل فیبرو X-PG، قطرات کوچک آب (0/5 میکرولیتر) در چند نقطه بر روی سطح مس توسط سُرنگ قرار داده شد و سپس تصاویر دیجیتالی قطره ها در کامپیوتر مورد بررسی قرار گرفت و زاویه تماس استاتیکی اندازه گیری شد. نمونه ای از سطوح با زاویه های تماس متفاوت در شکل 2 نمایش داده شده است. زاویه تماس متفاوت را می توان با روش هایی از جمله پرداخت سطح، اکسیداسیون، و یا تغییر پوشش حاصل کرد [24]. در این جا، با توجه به گزارش های مختلف از جمله مطالعه هانگ و همکاران [25] مبنی بر تاثیر اکسیداسیون سطح و همچنین زبری سطح بر کاهش زاویه تماس سطح، زاویه تماس با تغییر میزان اکسیداسیون سطح مس کنترل شد. به این منظور در مرحله اول از این مطالعه، سطح گرمی که در دراز مدت در کانال قرار داشت استفاده شد. این سطح به سبب جوشش آب در کانال و تخلیه و پر شدن مداوم مدار آزمون به طور طبیعی اکسیده شده بود، و از این رو زاویه تماس اندازه گیری شده نسبتاً پایین و برابر 18 درجه بود. جهت افزایش زاویه تماس، سطح توسط خمیر پرداخت فلز که سطح را خراش و آسیب نمی زند جلا داده شد و پس از آن با استون تمیز شد. در این مرحله، زاویه تماس سطح تمیز حدود 90 درجه بود. برای تغییر زاویه تماس، بلوک مس در هوا با ملایمت حرارت داده شد. نتیجه حائز اهمیت طی آزمایشات مختلف، این بود که زاویه تماس نه تنها در حرارت محیط بلکه در حین آزمایش به سبب حرارت اعمالی کاهش یافته است؛ این نتیجه را به ویژه هنگامی که سطح تمیز (زاویه تماس 90 درجه) در مقطع آزمون به کار گرفته شد می توان ملاحظه کرد. از این رو، در جدول 1، دو مقدار زاویه تماس متوسط که قبل و بعد از یک سری آزمایش، اندازه گیری می شوند با φ_1 و φ_2 گزارش شده است. به عنوان مثال، در آزمون سری 1 زاویه تماس از 97 درجه به 81 درجه کاهش یافته است در حالی که در آزمون سری 4 زاویه تماس قبل و بعد آزمون 18 درجه باقی مانده است.

3- نتایج تجربی

3-1- دینامیک حباب

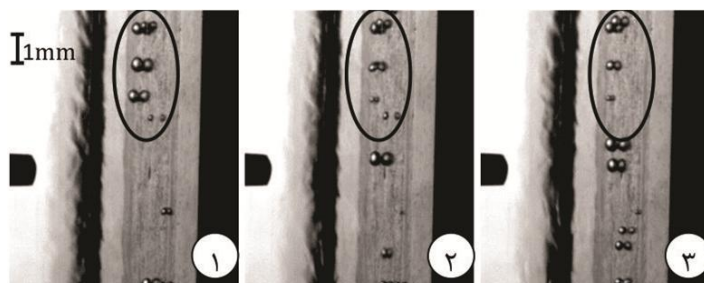
مشاهدات این پژوهش نشان داد که رفتار حباب با توجه به میزان تر شونده گی سطح متفاوت است. در سطح آبدوست، یعنی هنگامی که سطح به طور کامل اکسیده شد و زاویه تماس حدود 18° است، تحت شرایط نزدیک به شروع جوشش هسته ای دیده شد که حباب پس از تشکیل، در هسته فعال روی سطح داغ رشد کرده و از سطح جدا می شود و پس از فاصله گرفتن از سطح به سرعت در مایع تحت اشباع (شکل 3 الف) به سبب چگالش ناپدید می شود.

3-2- مکانیزم شروع تولید بخار خالص

در این مطالعه، میزان کسر حجمی بخار α در کانال جریان بصورت مشاهده‌ای با استفاده از تصاویر یک دوربین سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفت. در تنظیمات دوربین سرعت بالا، اندازه تصاویر و نرخ ثبت تصاویر، عکس یکدیگر عمل می‌کنند؛ یعنی با افزایش نرخ ثبت تصاویر، اندازه تصویر کوچکتر می‌شود. لذا، با توجه به فرکانس جوانه‌زنی حباب، اندازه حباب و همچنین تلاش برای مشاهده سطح بیشتری از مقطع آزمایش، سرعت ثبت تصاویر برابر با 6000 فریم بر ثانیه انتخاب و تنظیم شد. از طریق تجزیه و

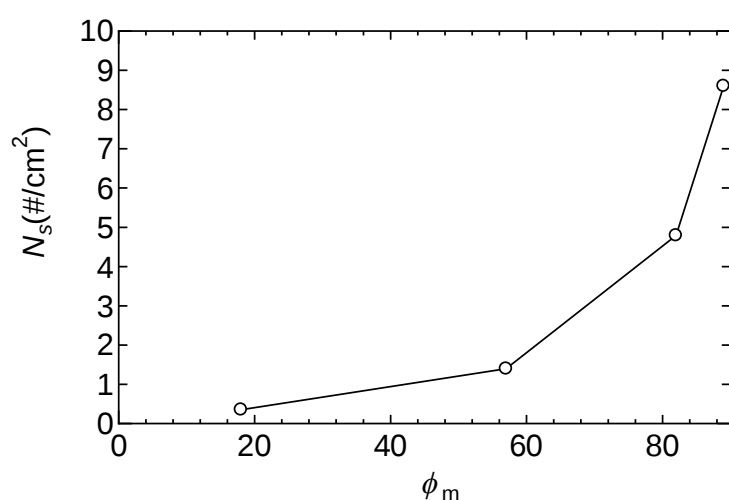


الف فاصله زمانی تصاویر 0/67 میلی ثانیه

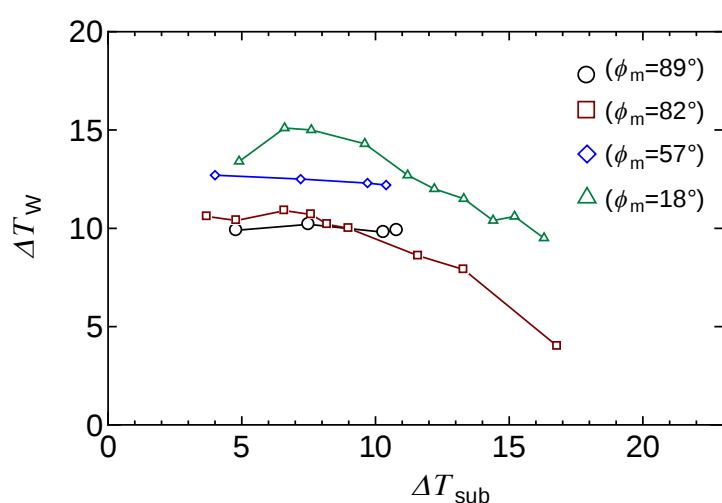


ب فاصله زمانی تصاویر 2/49 میلی ثانیه

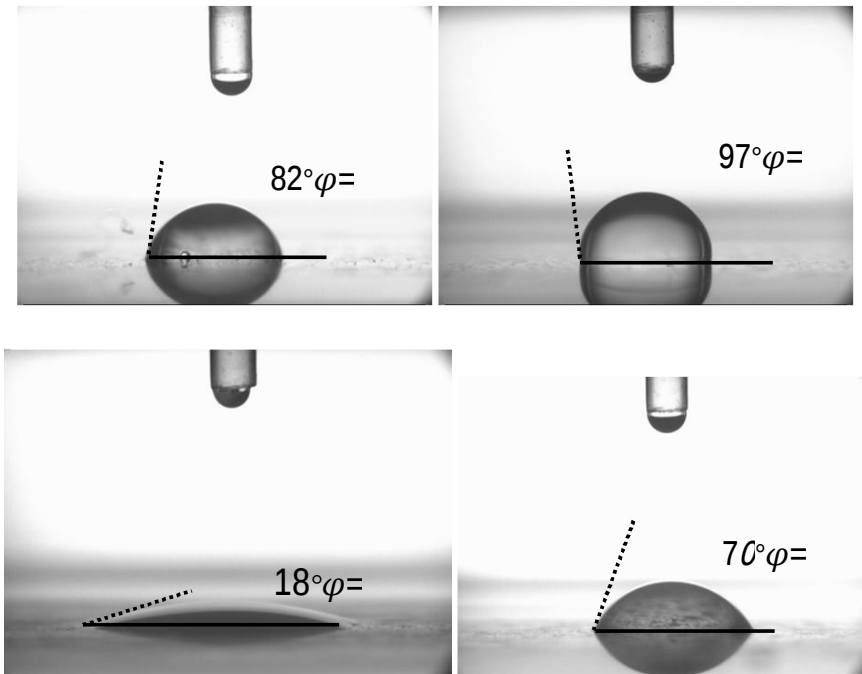
شکل 3 نمونه رفتار حباب در شروع جوشش هسته‌ای الف- حباب بلند شونده از سطح در مرحله اجرای 404 سطح آبدوست، ب- حباب چسبیده به سطح در مرحله اجرای 101 سطح آبگریز



شکل 4 چگالی هسته‌های فعال حباب در سطوح با تر شوندگی مختلف



شکل 5 دمای مازاد سطح طی جوشش تحت اشباع در سطوح با تر شوندگی مختلف

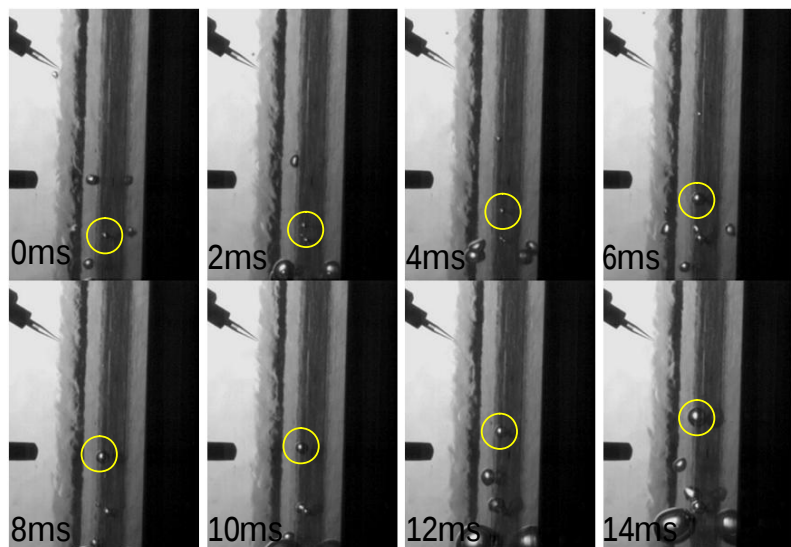


شکل 2 نمونه ای از زوایای تماس اندازه‌گیری شده

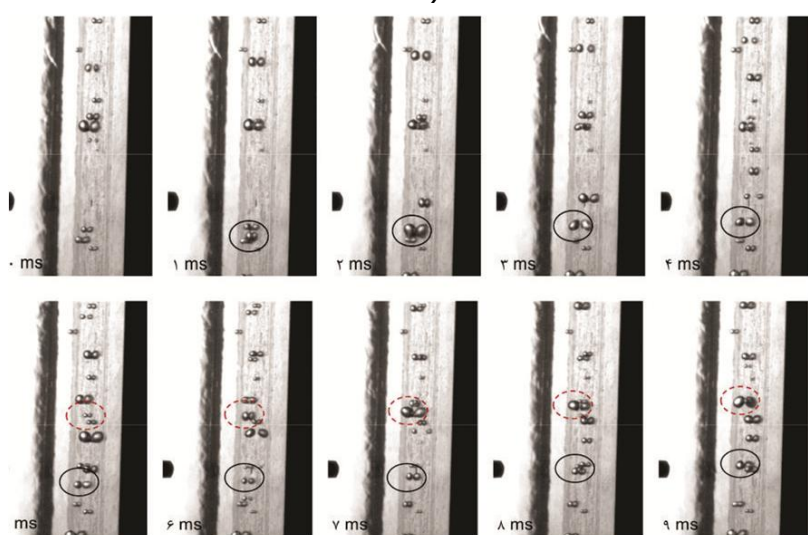
تفاوت اصلی این آزمایشات درجه تر شوندگی سطح می‌باشد. از این پس در این مقاله، سطح آبگریز به سطح با زاویه تماس نزدیک به 90° (سری 1)، و سطح آبدوست به سطح با زاویه تماس حدود 18° (سری 2) اشاره دارد. آمار حباب‌های گیرافتاده در حفره‌ها، بسته به میزان تر شوندگی سطح متفاوت است. در شرایط نزدیک به شروع جوشش هسته‌ای، مشاهده شد که در سری 1 با سطح ترشوندگی کم تقریباً همه حباب‌های تشکیل شده در محل هسته خود گیر افتاده‌اند، در سری 2 برخی از حباب‌ها گیر کرده و بقیه حباب‌ها از سطح بلند می‌شوند، در سری 3 بیشتر حباب‌ها از سطح بلند می‌شوند و بالاخره در سری 4 با سطح تر شوندگی بالا تمامی حباب‌ها از سطح بلند می‌شوند. به عنوان مثال، در سری 1، در میان 22 هسته فعال، حباب‌ها در 15 سایت گیر افتاده، در حالیکه در سری 2، تنها در پنج محل از 13 سایت فعال، حباب در محل هسته تشکیل گیر افتاده است. بنابراین می‌توان گفت که رفتار حباب در شروع جوشش هسته‌ای از رفتار چسبندگی به سطح، به رفتار جدا شدن از سطح، با بهبود تر شوندگی سطح تغییر می‌کند.

با استفاده از تصاویر دیجیتال، چگالی هسته‌های فعال حباب N_s ، نزدیک به شرایط شروع جوشش هسته‌ای اندازه‌گیری شد و برحسب میانگین زاویه تماس ϕ_m در شکل 4 رسم شد. چگالی هسته‌های فعال حباب N_s ، نقاط فعال جوانه‌زای حباب بازای واحد سطح گرمایی می‌باشد. در زاویه تماس کم، شعاع دهانه حفره تشکیل هسته حباب کوچک هستند، و حتی اگر بسیاری از حفره‌ها موجود باشند، برخی از آنها ممکن است به علت جاری شدن آب در آنها به عنوان سایت فعال کار نکنند [15]. بنابراین، در شکل 4، دیده می‌شود که با کاهش زاویه تماس سطح، چگالی هسته‌های فعال حباب کاهش می‌یابد. به طور جداگانه، دمای مازاد سطح داغ اندازه‌گیری شد و در شکل 5 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دمای مازاد دیواره در زاویه تماس متوسط 18° بالاترین مقدار را دارد. مقایسه بین چگالی هسته‌های فعال حباب و نتایج دمای مازاد دیواره نشان می‌دهد که زمانی که زاویه تماس کم است، چگالی هسته‌های فعال سطح کم است، اما درجه حرارت مازاد دیواره بالا می‌باشد. استنباط می‌شود که از آن‌جا که در سطح با زاویه تماس کم، چگالی هسته‌های فعال بخاطر جاری شدن آب در حفره‌ها کم است، درجه حرارت مازاد بالاتری جهت تشکیل حباب در دیواره داغ نیاز است. از این رو، زاویه متوسط تماس سطح با افزایش چگالی هسته‌های فعال افزایش می‌یابد و درجه حرارت مازاد دیواره کاهش می‌یابد.

می شود و افزایش حجم می دهند. این پدیده در شکل 7 الف قابل مشاهده است. دیده شد که بازگشت مجدد حباب در مقادیر پایین تر ΔT_{sub} با فرکانس بیشتری رخ می دهد. احتمال بازگشت مجدد حباب، P_r ، که به صورت نسبت تعداد حباب های برگشته به سطح، بر تعداد کل حباب های تولید شده، تعریف شده است، برای آزمایش سری 4 اندازه گیری شد و در شکل 8 نمایش داده شده است. مطابق با این شکل، احتمال بازگشت مجدد حباب در مقادیر کم x_{eq} نزدیک به شرایط شروع جوشش هسته ای، صفر و در شرایطی نزدیک به آغاز تولید بخار خالص این مقدار به شدت افزایش می یابد. بنابراین، نتیجه مهم این مشاهدات این است که در نقطه آغاز تولید بخار خالص، تغییر رفتار

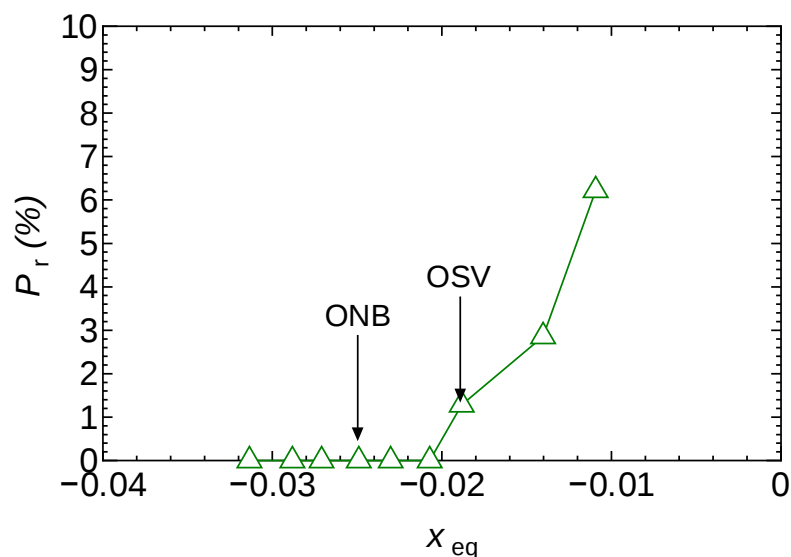


(الف)

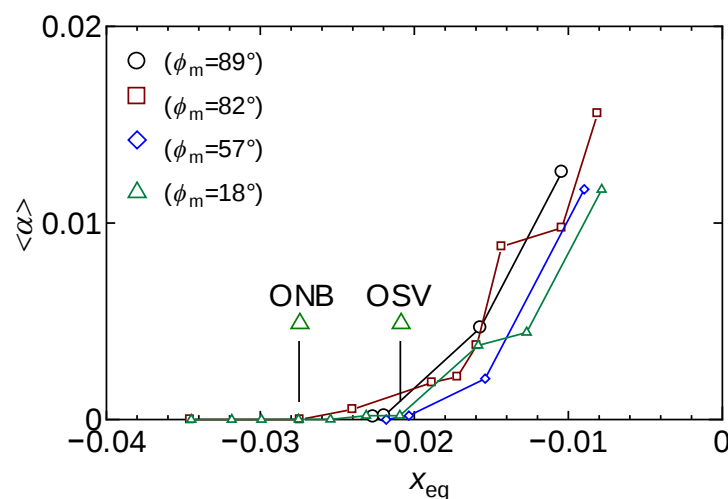


(ب)

شکل 7 نمونه بازگشت مجدد حباب پس از شرایط آغاز کسر قابل توجه بخار، الف - سطح آبدوست در آزمایش سری 4، ب - سطح آبگریز در آزمایش سری 1



شکل 8 درصد احتمال بازگشت پذیری مجدد حباب پس از جدا شدن از سطح در آزمایش سری 4



شکل 6 روند تغییرات متوسط کسر حجمی بخار $\langle \alpha \rangle$ در سطوح با تر شونده گی مختلف

تحلیل تصاویر، به طور متوسط کسر حجمی بخار در بخش داده برداری مقطع آزمون را می توان با رابطه (4) برآورد کرد:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{V_0 N_{im}} \sum_{i=1}^{N_{im}} \sum_{j=1}^{N_{b,i}} V_{b,ij} \quad (4)$$

که در آن V_0 حجم تصویر، N_{im} تعداد تصاویر مورد استفاده در تجزیه و تحلیل تصاویر، $N_{b,i}$ تعداد حباب های موجود در تصویر i ام، و $V_{b,ij}$ حجم حباب j ام در تصویر i ام است. تعداد تصاویر مورد استفاده در اندازه گیری کسر حجمی بخار بین 40 تا 50 تصویر است که به طور تصادفی از میان تصاویر برداشت شد. با این تصاویر مقدار کسر حجمی بخار $\langle \alpha \rangle$ با دقت 0/00001 مشخص شد. نتایج اندازه گیری $\langle \alpha \rangle$ بر حسب x_{eq} در شکل 6 رسم شده است. میزان x_{eq} از رابطه (5) بدست آمده است:

$$x_{eq} = \frac{h_l - h_f}{h_{fg}} \quad (5)$$

در این رابطه h_l ، h_f و h_{fg} به ترتیب آنتالپی آب در بخش اندازه گیری مقطع آزمون، آنتالپی آب اشباع و آنتالپی نهان آب در فشار تست شده می باشند.

در شکل 6، شرایط شروع جوشش هسته ای و آغاز کسر قابل توجه بخار برای آزمایش سری 4 نشان داده شده است. در آزمایش های حاضر همانطور که در بخش قبلی بحث شد، در شروع جوشش هسته ای رفتارهای حباب بسته به میزان تر شونده گی سطح، متفاوت مشاهده شد. با این حال، شکل 6 نشان می دهد که روند توسعه $\langle \alpha \rangle$ بازای افزایش x_{eq} به طور کلی در تمام سری های آزمایش تقریباً مشابه هستند. به وضوح دیده می شود که مقدار کسر حجمی بخار بین شروع جوشش هسته ای و آغاز کسر قابل توجه بخار کم است و زمانی که شرایط به شروع تولید بخار خالص می رسد به طور قابل توجهی افزایش می یابد. با این وجود، با در نظر گرفتن جزئیات مقادیر x_{eq} در آغاز کسر قابل توجه بخار در شکل 6 و در جدول 1، می توان نشان داد که با افزایش زاویه تماس، آغاز کسر قابل توجه بخار، در x_{eq} کمتر رخ می دهد. در ادامه مکانیزم شروع تولید بخار خالص برای دو سطح آبدوست و آبگریز شرح داده شده است.

بر روی سطح آبدوست، در شرایط شروع جوشش هسته ای (شکل 3 الف) حباب معمولاً پس از تشکیل و بزرگ شدن، از سطح بلند می شود و به سرعت در مایع تحت اشباع ناپدید می شود، و افزایش قابل توجه کسر حجمی بخار تا زمانی که x_{eq} به اندازه کافی افزایش یابد به تعویق می افتد. در این شرایط مشاهده می شود که برخی از حباب های بلند شده از سطح، دوباره به سطح باز می گردند و با لغزیدن روی سطح طول عمر حباب به طور قابل توجهی دراز

حباب، زمانی اتفاق افتاد که دمای تحت اشباع آب به اندازه کافی کاهش یافت. همزمان با جدا شدن حباب مشاهده شد که برخی حباب‌ها در فشار اتمسفر پس از بلند شدن از سطح داغ دوباره به سطح بازگشت داشت که این پدیده از چگالش کامل این حباب‌ها جلوگیری کرد. برای سطح آبدوست نیز بازگشت حباب بلند شده مقارن با افزایش ناگهانی کسر حجمی بخار مشاهده گردید. بنابراین، پدیده بازگشت حباب به عنوان عامل اصلی ایجاد شرایط تولید بخار خالص در جریان جوشش تحت اشباع در فشار اتمسفر برای سطوح آبدوست و آبگریز شناسایی شدند.

5- فهرست علائم

A	سطح مقطع کانال (m^2)
c_{pl}	ظرفیت حرارتی مایع ($kJ/kg K$)
$F.S$ (Full Scale)	مقیاس کامل
G	دبی جرمی (kg/m^2s)
ms	میلی ثانیه
N_b	تعداد حباب‌ها
N_{im}	تعداد تصاویر
N_s	تعداد هسته‌های فعال حباب ($\#/cm^2$)
P	فشار (pa)
P_r	احتمال بازگشت مجدد حباب
q_w	شار حرارتی (kw/m^2)
T	دما (K) یا ($^{\circ}C$)
V_{im}	حجم پنجره مشاهده در تصاویر (m^3)
V_b	حجم حباب (m^3)
x_{eq}	کیفیت بخار

علائم یونانی

α	کسر حجمی بخار
ΔT_{sub}	دمای تحت اشباع (K)
ΔT_w	دمای سطح (K)
φ_1	زاویه تماس قبل از آزمایش ($^{\circ}$)
φ_2	زاویه تماس بعد از آزمایش ($^{\circ}$)
φ_m	زاویه تماس متوسط ($^{\circ}$)

زیر نویس‌ها

b	حباب
eq	شرایط تعادل
im	تصویر
m	متوسط
r	برگشت مجدد حباب
s	هسته‌های فعال حباب
sub	تحت اشباع
w	دیواره، سطح

6- مراجع

- [1] G.R. Warrier, V.K. Dhir, Heat transfer and wall heat flux partitioning during subcooled flow nucleate boiling—a review, *Journal of Heat Transfer* 128 (12), pp. 1243-1256 (2006).
- [2] P.J. Griffith, A. Clark, and W.M. Rohsenow, Void Volumes in Subcooled Boiling Systems. *ASME paper* 58-HT-19 (1958).
- [3] R.W. Bowring, *Physical model based on bubble detachment and calculation of steam voidage in the subcooled region of a heated channel*,

حباب از فروپاشی سریع در مایع تحت اشباع با جدا شدن از سطح، به رفتار لغزیدن روی سطح به سبب بازگشت حباب، تاثیر بسزایی در افزایش کسر حجمی بخار ایفا می‌کند.

اما برای سطح آبگریز در فشار اتمسفر، از سوی دیگر، از آنجا که تقریباً تمام حباب‌ها در هسته‌های تشکیل اولیه خود در شرایط شروع جوشش هسته‌ای گیر افتاده‌اند، تولید حباب‌های جدید در سایت‌های فعال متوقف است. خروج حباب از این رو می‌تواند به عنوان یک شرط لازم برای افزایش تولید بخار در شرایط آغاز کسر قابل توجه بخار و برای سطح آبگریز در نظر گرفته شود [5]. تمایل حباب به سطح در سطح آبگریز می‌تواند به علت نیروی کشش سطحی بالا باشد. به همین سبب مشاهده شد که برخی حباب‌های جدا شده از سطح، همزمان با شرایط آغاز کسر قابل توجه بخار، تمایل به برگشت به سطح را داشته و با لغزیدن روی سطح افزایش حجم می‌دهند و موجب افزایش کسر حجمی بخار در این شرایط شوند. شکل 7 ب نمونه‌ای از برگشت مجدد حباب درست پس از بلند شدن از سطح در شرایط مشاهده شده در نزدیک آغاز کسر قابل توجه بخار برای سری آزمایش 1 را نشان می‌دهد. در نتیجه، بر روی یک سطح آبگریز زمانی که حباب موفق به ترک محل تشکیل هسته شد، شرایط برای شکل‌گیری پی‌درپی حباب جدید ایجاد می‌شود. به علاوه، پس از جدا شدن حباب، به دلیل برگشت مجدد حباب به سطح از چگالش سریع آن در مایع تحت اشباع خودداری می‌شود. از این رو، اگر چه رفتار حباب در دو سطح آبدوست و آبگریز قبل از شرایط آغاز کسر قابل توجه بخار متفاوت بود، اما پس از آن رفتار مشابهی برای سطوح آبدوست و آبگریز مشاهده شد. بنابراین، برای سطح آبگریز در فشار اتمسفر، می‌توان نتیجه گرفت که خروج حباب از هسته‌های فعال، توانم با برگشت مجدد آن به سطح یک پدیده کلیدی در افزایش شدید کسر حجمی بخار در شرایط آغاز تولید بخار خالص می‌باشد.

4- نتیجه گیری

در کار تجربی حاضر، اثر تر شونده گی سطح در دینامیک حباب و روند تکامل کسر حجمی بخار طی جریان جوشش تحت اشباع از طریق مشاهده رفتار حباب مورد بررسی قرار گرفت. طی مشاهدات، دو نوع رفتار کاملاً متفاوت در شروع جوشش هسته‌ای برای حباب بخار مشاهده گردید و همچنین در ناحیه‌ای که کسر حجمی بخار کم است مکانیزم جدیدی برای شروع تولید بخار خالص ارائه شد. نزدیک به شرایط شروع جوشش هسته‌ای، مشاهده شد که تولید حباب و رفتار حباب، به علت تفاوت در نیروی کشش سطحی، وابستگی شدیدی به میزان تر شونده گی سطح دارد؛ در سطح آبگریز حباب‌ها در محل تولید هسته خود گیر افتاده‌اند، در حالی که در سطح آبدوست آن‌ها محل تشکیل خود را بلافاصله ترک می‌کنند و از سطح بلند شده و در مایع تحت اشباع ناپدید می‌شوند. نکته قابل ذکر این‌که در بسیاری از مدل‌های ارائه شده برای تولید بخار خالص، جدا شدن حباب از سطح و یا هسته تشکیل، به عنوان شرط لازم و کافی مطرح است. نتیجه مهمی که در مطالعه حاضر حاصل شد این است که شرط جدا شدن حباب از هسته تشکیل به عنوان شرط لازم است نه کافی. لازم از این جهت که تا وقتی که حباب به محل سایت تشکیل چسبیده باشد تولید حباب جدید متوقف می‌شود، و کافی نیست، چرا که در سطوح آبدوست قبل از نقطه آغاز کسر قابل توجه بخار حباب‌ها از سطح و محل تشکیل کنده می‌شوند ولی کسر حجمی بخار تا رسیدن به نقطه شروع تولید بخار خالص قابل توجه نیست.

برای سطوح آبگریز، شرط لازم برای تولید بخار خالص یا همان جدا شدن

- slopes using VOF-PLIC method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 11, pp. 29-36, 2015. (In Persian)
- [15] N. Basu, G.R. Warriar, V.K. Dhir, Onset of nucleate boiling and active nucleation site density during subcooled flow boiling, *Journal of Heat Transfer* 124, pp. 717–728 (2002).
- [16] R. Maurus et al., Automated high-speed video analysis of the bubble dynamics in subcooled flow boiling, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 25 pp. 149–158, (2004)
- [17] Q. Zheng et al., Bubble growth during subcooled forced convective flow boiling, *ICONE21-16200*, pp. V004T09A078; 6 pages, (2013)
- [18] T. Okawa et al., Simultaneous measurement of void fraction and fundamental bubble parameters in subcooled flow boiling, *Nuclear Engineering and Design* 237 1016–1024, (2007)
- [19] T. Okawa, T. Harada, Y. Kotsusa, Photographic study on bubble motion in subcooled pool boiling, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 132, art. no. 102922 (2010).
- [20] Z. Tan and L. Pan, Vapor bubble condensation characteristics of subcooled flow boiling in vertical rectangular channel, *ICONE20-POWER2012-54299*, pp. 181-190; 10 pages, (2013)
- [21] I. Kljenak, Modeling of two-phase flow structure evolution in subcooled nucleate convective boiling with coupling of bubble-tracking and two-fluid model, *Proceedings of ASME Summer Heat Transfer Conference*, pp. 10-14, (2008)
- [22] A. Rabiee, A. Atf, Prediction of departure from nucleate boiling in a mini channel using CFD, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 303-312, 2015. (In Persian)
- [23] R. Ahmadi, T. Ueno, T. Okawa, Bubble dynamics at boiling incipience in subcooled upward flow boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 1-3, pp. 488-497 (2012).
- [24] S.G. Kandlikar, M. Shoji, V.K. Dhir, *Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation*, Taylor & Francis, London (1999).
- [25] K.T. Hong et al., Effects of oxidation and surface roughness on contact angle, *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol. 8, Issue 4, pp. 279–285 (1994).
- OECD Halden Reactor Project Report HPR-10, (1962).
- [4] G.E. Dix, *Vapor void fraction for forced convection with subcooled boiling at low flow rates*, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, CA (1971).
- [5] S. Levy, Forced convection subcooled boiling prediction of vapor volumetric fraction, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 10, pp. 951–965 (1967).
- [6] F. W. Staub, The void fraction in subcooled boiling-prediction of the initial point of net vapor generation, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 90, pp. 151-157 (1968).
- [7] H.C. Unal, Determination of the initial point of net vapor generation in flow boiling systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18, pp. 1085-1099 (1975).
- [8] J. E. Kelly, and M. S. Kazimi, *Interfacial exchange relations for two-fluid vapor-liquid flow: a simplified map approach*, private communication, March (1981).
- [9] P. Saha, N. Zuber, Point of net vapor generation and vapor void fraction in subcooled boiling, *Proceedings of the 5th International Heat Transfer Conference*, Tokyo, pp. 175-179 (1974).
- [10] F.C. Gunther, photographic study of surface-boiling heat transfer to water with force convection, *Journal of Heat Transfer* 73, pp. 115–123 (1951).
- [11] E.L. Bibeau, *Void Growth in Subcooled Flow Boiling For Circular and Finned Geometries for Low Values of Pressure and Velocity*, Ph.D. Thesis, Univ. of British Columbia. (1993).
- [12] O. Zeitoun, M. Shoukri, Bubble behavior and mean diameter in subcooled flow boiling, *Journal of Heat Transfer* 118, pp. 110–116 (1996).
- [13] G.E. Thorncroft, J.F. Klausner, R. Mei, An experimental investigation of bubble growth and detachment in vertical upflow and downflow boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41, pp. 3857–3871 (1998).
- [14] M.R. Ansari et al., Numerical simulation and investigation of bubble velocity and deformation in inclined channel with two consecutive