

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

روح الله احمدی^{۱*}، تومیو اوکاوا^۲

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

۲- استاد، مهندسی مکانیک و سیستم‌های هوشمند، دانشگاه الکترو کامپیونیکیشن، توکیو، ژاپن

* تهران، کد پستی ۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴ ahmadi@iust.ac.ir

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 قبل 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، بالافاصله پس از رشد یافتن از سطح بلند شده و از آن فاصله می‌گیرند و به سرعت در محل تشکیل خود گیر افتاده‌اند. در می‌شوند. در مقابل، زمانی که سطح آبگریز بود، در شرایط شروع جوشش هسته‌ای حباب‌های شکل گرفته در نزدیکی نقطه آغاز کسر قابل توجه بخار 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 ۹۰°)، 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.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۱ اردیبهشت ۱۳۹۴

پذیرش: ۱۱ خرداد ۱۳۹۴

ارائه در سایت: ۱۹ خرداد ۱۳۹۴

کلید واژگان:

جریان جوشش تحت اشباع

آغاز تولید بخار خالص

دینامیک حباب

تحلیل تصاویر

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

Rouhollah Ahmadi^{۱*}, Tomio Okawa^۲

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

۲- 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.

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

در عوض دمای سطح داغ بالاتر از دمای اشباع می‌باشد. دو نقطه مهم در این

۱- مقدمه

در یک مجرای داغ، جوشش تحت اشباع ناحیه‌ای از جوشش را شامل می‌شود

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:

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.9.7] [Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-03]

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 استخراج 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 استخراج 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 پنجه توصیف پدیده انتقال حرارت و جرم بین فازی، انجام شده است [20]. با ارائه مدلی توسط کلجنک [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 کanal 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 کanal 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.

در جریان جوشش تحت اشباع بر روی یک سطح آبدوست، رفتار حباب در شروع جوشش هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفت [23]. در دو فشار مختلف، دو رفتار متفاوت حباب مشاهده گردید: ۱- در فشار اتمسفر، حباب پس از تشکیل و رشد از سطح جدا شد و سپس بلافصله در مایع مادون اشباع ناپدید شد و ۲- در فشار بالای اتمسفر، حباب پس از تشکیل و رشد روی سطح لغزید و به رشد خود ادامه داد. هدف مطالعه حاضر، درک اثر تر شوندگی سطح در دینامیک حباب و همچنین بررسی مکانیزم‌های احتمالی شروع تولید بخار خالص طی جریان جوشش تحت اشباع، با معرفی فاکتور زاویه تماس استاتیکی به عنوان یک پارامتر مهم تجربی، می‌باشد.

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

2- Nucleation site density

منطقه حائز اهمیت می‌باشد: ۱- نقطه شروع جوشش هسته‌ای و ۲- 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 مایل 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 ۱۰ تا ۱۳۶ بار پیشنهاد کرد.

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

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 کanal، 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. اونال [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 سها و زوبر بیان شد [9]، بسته به شرایط دینامیکی و گرمایی جریان در کanal یکی از دو مکانیزم هیدرودینامیک یا انتقال حرارت ممکن است به عنوان شرایط ایجاد شروع تولید بخار خالص اعمال شوند.

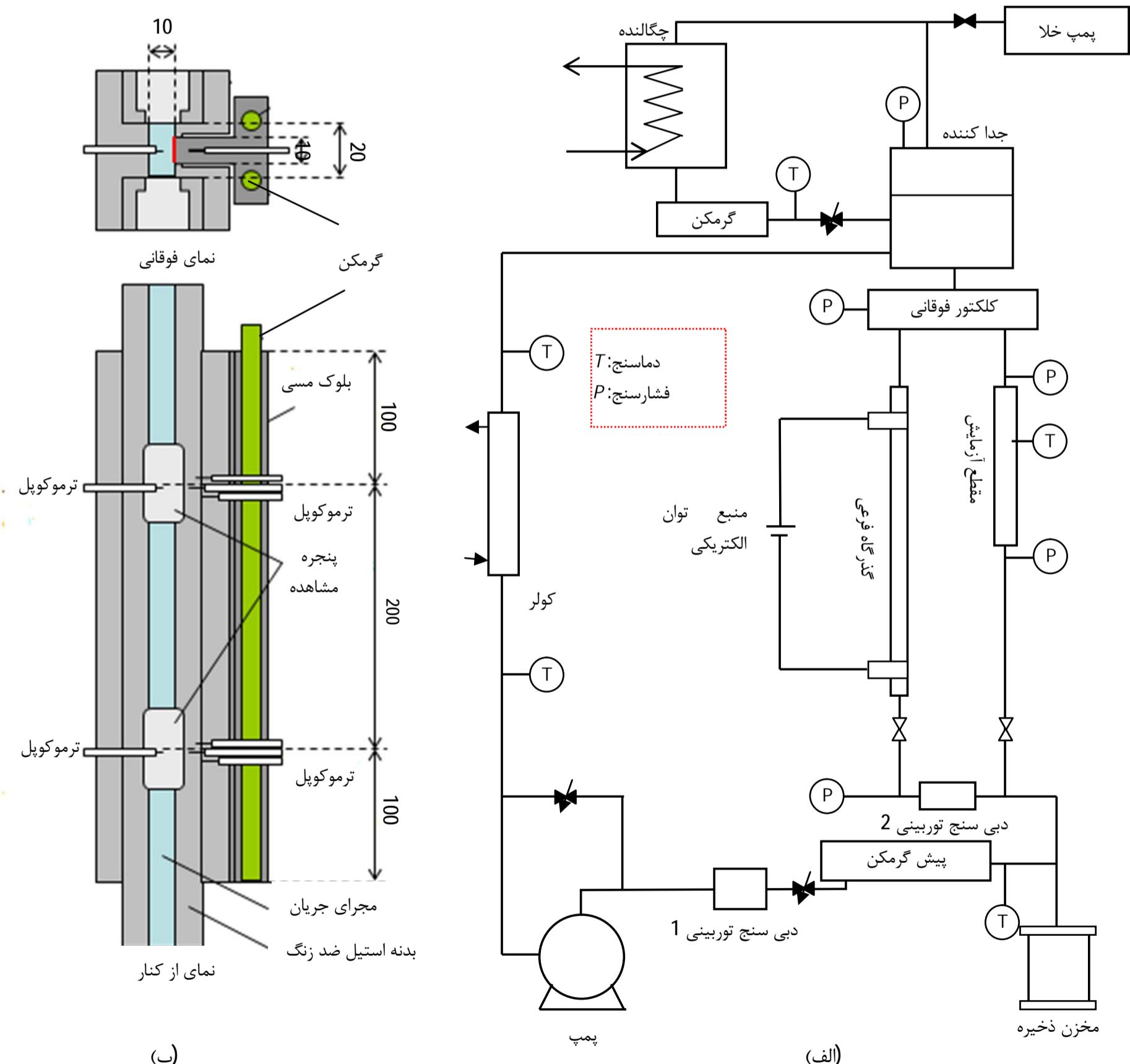
به طور کلی، مطالعات نشان می‌دهند که در مدل‌های ارائه شده جهت تشخیص موقعیت تولید بخار خالص در جریان جوشش تحت اشباع، اساس فرآیند مدل‌سازی، دینامیک حباب است. از این‌رو، بسیاری از مطالعات تجربی صورت گرفته تا کنون، به مشاهده رفتار حباب در هندسه‌ها و شرایط تجربی مختلف پرداخته است. در فشار نزدیک به اتمسفر، 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 می‌پاشد.¹ 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 شبکه‌های مختلف، با استفاده از روش شبیه

1- collapsing

موقعیت‌های بخش اندازه گیری به ترتیب در 100 و 300 میلی متر بالاتر از نقطه شروع بخش فعال حرارتی کanal قرار دارند. قابل توجه است که در این مطالعه، مشاهدات تنها در بخش اندازه گیری 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 شوندگی 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 اندازه گیری می‌شود. همان‌طور که در شکل 1 (ب) نشان داده شده است، مقطع آزمون، کanal مستطیل شکل با ابعاد 10 × 20 میلی‌متر است و بخشی از یک طرف کanal توسط جریان الکتریکی گذرنده از گرمکن‌های جاسازی شده در یک بلوک مسی حرارت داده می‌شود. در مقطع آزمون، دو بخش اندازه گیری قابل رویت برای بدست آوردن اطلاعات جریان و همچنین ثبت تصاویر رفتار حباب طی جوشش، طراحی شده است.



شکل 1 (الف)- شماتیک مدار آزمون، ب- مقطع آزمون (بعاد بر حسب میلی‌متر 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 هسته‌ای به محل تشکیل هسته خود چسبیده اند، و تنها به صورت متناسب بزرگ و کوچک می‌شوند.

در ادامه، مشاهده جزئیات رفتار حباب نزدیک به شرایط شروع جوشش هسته‌ای و در فشار اتمسفر مورد بحث قرار می‌گیرد. در این مطالعه، میانگین زاویه تماس φ_m در هر سری از آزمایش توسط رابطه (3) تعريف 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 می‌باشد. در واقع

جدول 1 خلاصه شرایط چهار سری آزمون در فشار اتمسفر

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

سطح حرارتی مسی تغییر یافت. چهار سری آزمایش، در فشار اتمسفر (1بار) تحت شرایط مختلف تر شوندگی صورت گرفت. لازم به ذکر است که در تمام آزمون‌ها شار جرمی، 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 جرمی و شار حرارتی نسبتاً ثابت نگه داشته شد. طیف وسیعی از ΔT_{sub} برای پوشش شرایط شروع جوشش هسته‌ای 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 3-2 توضیح داده شده است. با توجه به مشخصات تجهیزات اندازه گیری، دقت فشارسنج ها $\pm 0.25\%$ F.S، ترموموپل ۱۰°C و دبی سنج ها $\pm 0.25\%$ برآورد می‌شود.

به منظور اندازه گیری میزان تر شوندگی سطح زاویه تماس استاتیکی قطرات آب با سطح اندازه گیری شد. با استفاده از دستگاه مدل فیررو X-PG، قطرات کوچک آب (0/5 میکرومتر) در چند نقطه بر روی سطح مس توسط سرنگ قرار داده شد و سپس تصاویر دیجیتال قطره‌ها در کامپیوتر مورد بررسی قرار گرفت و زاویه تماس استاتیکی اندازه گیری شد. نمونه‌ای از سطوح با زاویه‌های تماس متفاوت در شکل 2 نمایش داده شده است. زاویه تماس متفاوت را می‌توان با روش‌هایی از جمله پرداخت سطح، اکسیداسیون، و یا تغییر پوشش حاصل کرد [24]. در اینجا، با توجه به گزارش‌های 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 کanal قرار داشت استفاده شد. این سطح به سبب جوشش آب در کanal 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 نمی‌زند 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 ملایمیت 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 می‌توان ملاحظه کرد. از این رو، در جدول 1، دو مقدار زاویه تماس متوسط که قبل و بعد از یک سری آزمایش، اندازه گیری می‌شوند 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.

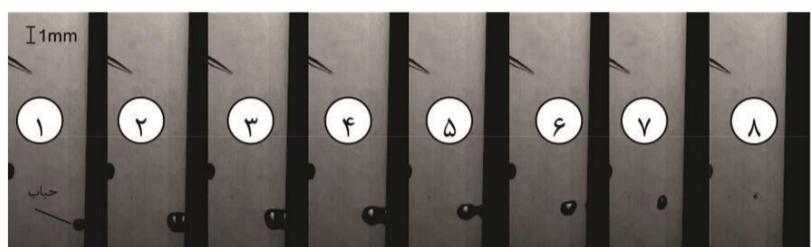
3- نتایج تجربی

3-1- دینامیک حباب

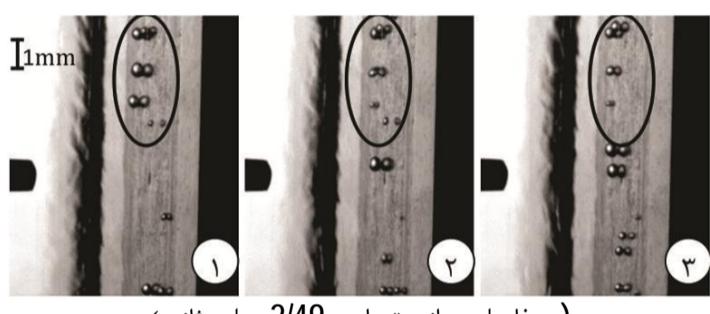
مشاهدهای این پژوهش نشان داد که رفتار حباب با توجه به میزان تر شوندگی سطح متفاوت است. در سطح آبدوست، یعنی هنگامی که سطح به طور کامل اکسیده شد و زاویه تماس حدود 18° است، تحت شرایط نزدیک به شروع جوشش هسته‌ای دیده شد که حباب پس از تشکیل، در هسته فعال روی سطح داغ رشد کرده و از سطح جدا می‌شود و پس از فاصله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

3-2- مکانیزم شروع تولید بخار خالص

در این مطالعه، میزان کسر حجمی بخار α در کanal 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

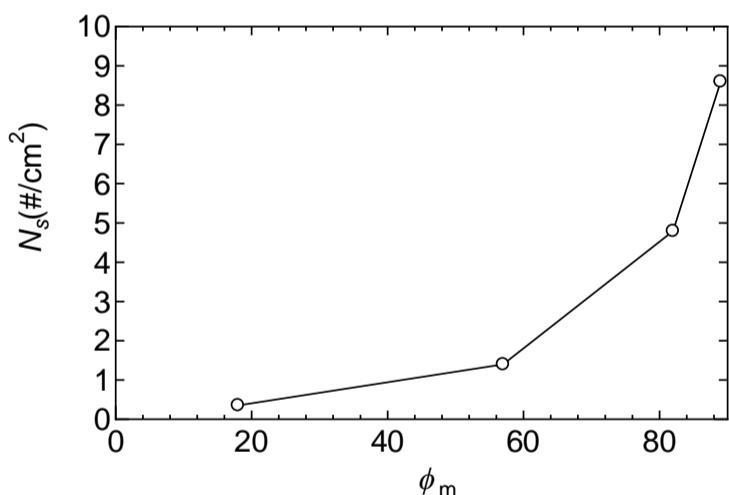


(الف) فاصله زمانی تصاویر 0/67 میلی ثانیه

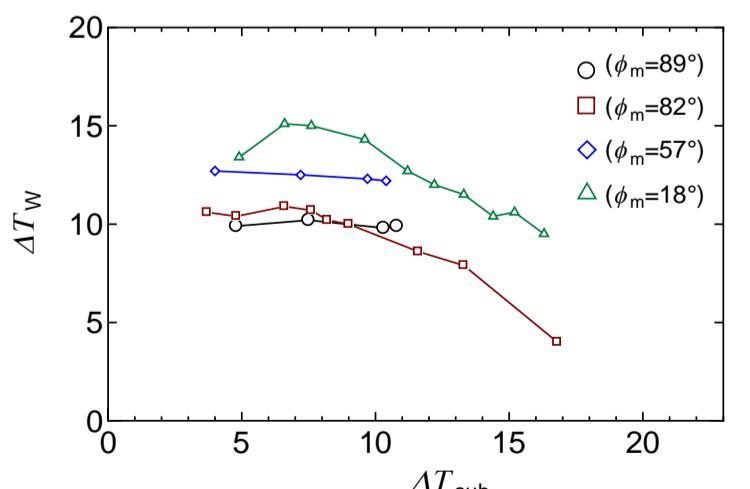


(ب) فاصله زمانی تصاویر 2/49 میلی ثانیه

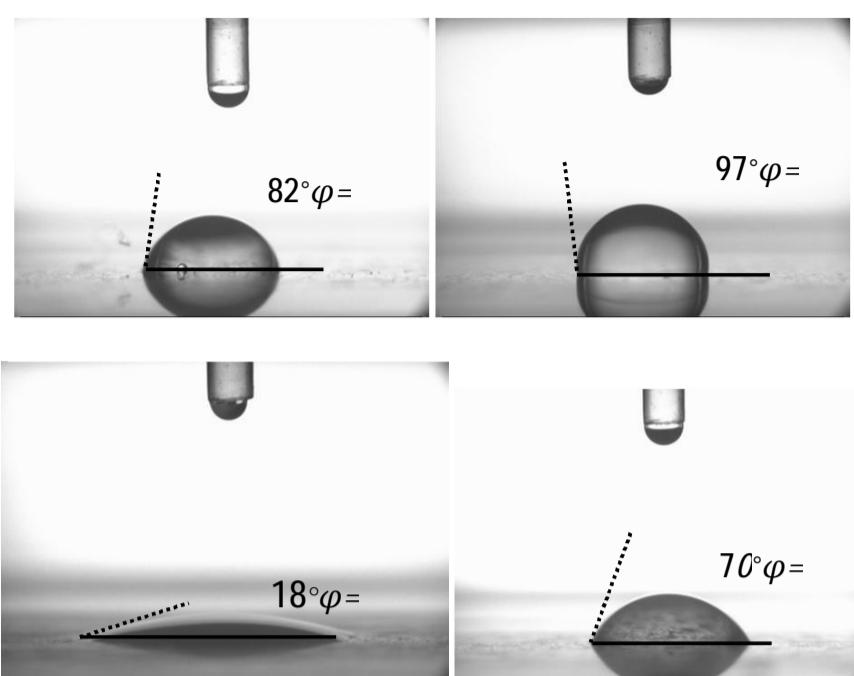
شکل 3 نمونه رفتار حباب در شروع جوشش هسته‌ای الف- حباب بلند شونده از سطح در مرحله اجرای 404 سطح آبدوست، ب- حباب چشیده به سطح در مرحله اجرای 101 سطح آبرگریز



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

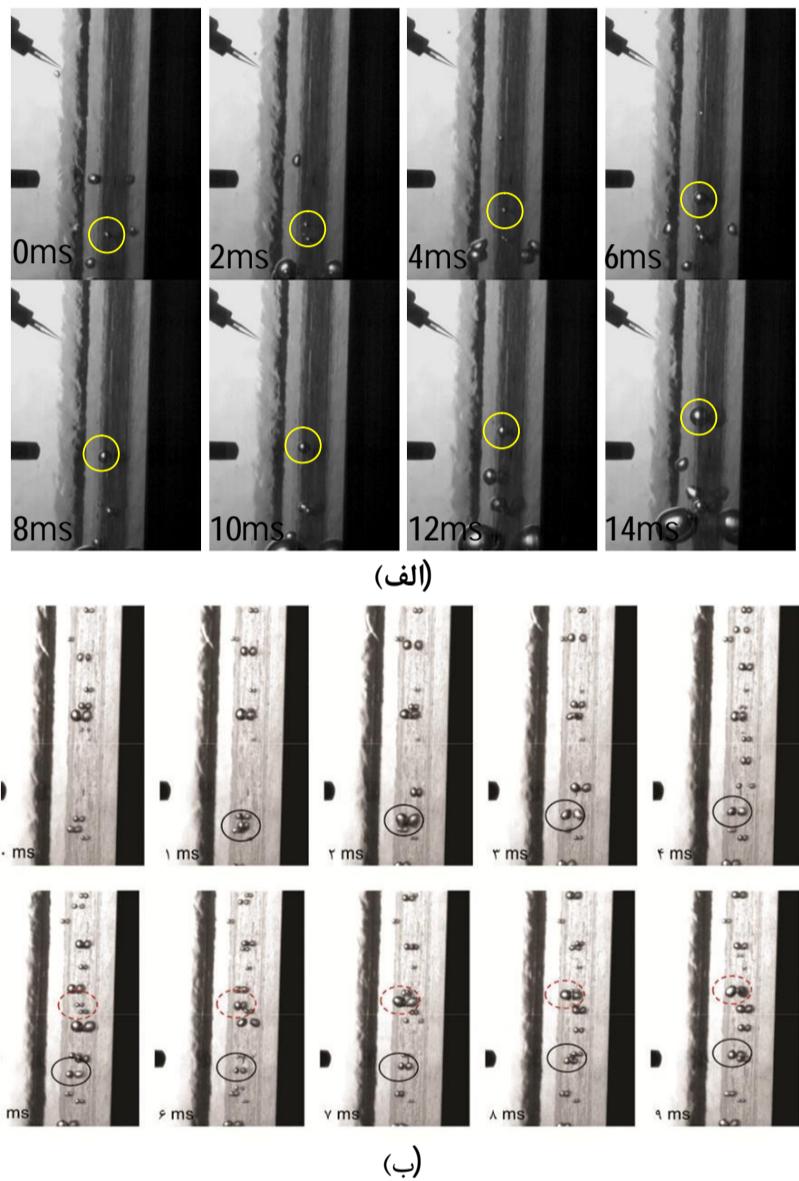


شکل 2 نمونه‌ای از زوایای تماس اندازه‌گیری شده

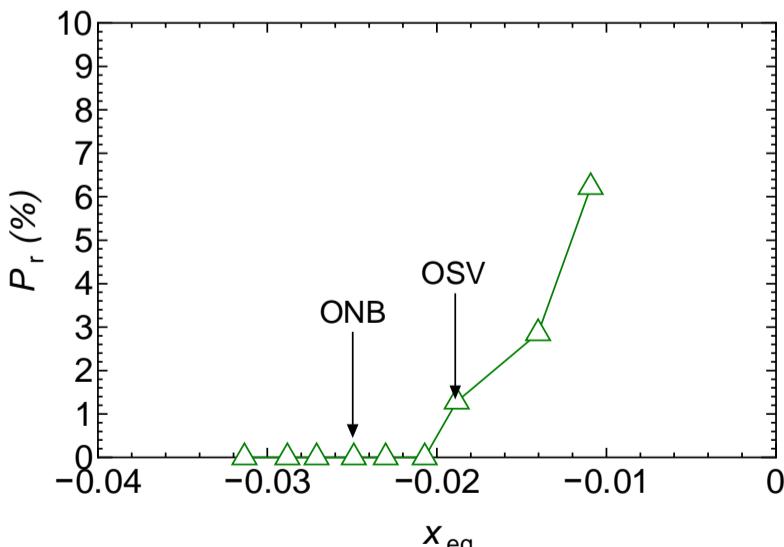
تفاوت اصلی این آزمایشات درجه تر شوندگی سطح می‌باشد. از این پس در این مقاله، سطح آبرگریز به سطح با زاویه تماس نزدیک به 90° (سری 1)، و سطح آبدوست به سطح با زاویه تماس حدود 18° (سری 2) اشاره دارد. آمار حباب‌های گیرافتاده در حفره‌ها، بسته به میزان تر شوندگی سطح متفاوت است. در شرایط نزدیک به شروع جوشش هسته‌ای، مشاهده شد که در سری 1 با سطح ترشوندگی کم تقریباً همه حباب‌های تشکیل شده در محل هسته خود گیرافتاده‌اند، 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 گیرافتاده، در حالیکه در سری 2، تنها در پنج محل از 13 سایت فعال، حباب در محل هسته تشکیل گیرافتاده 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 جوانه‌زنی حباب بازی 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 آن جا 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.

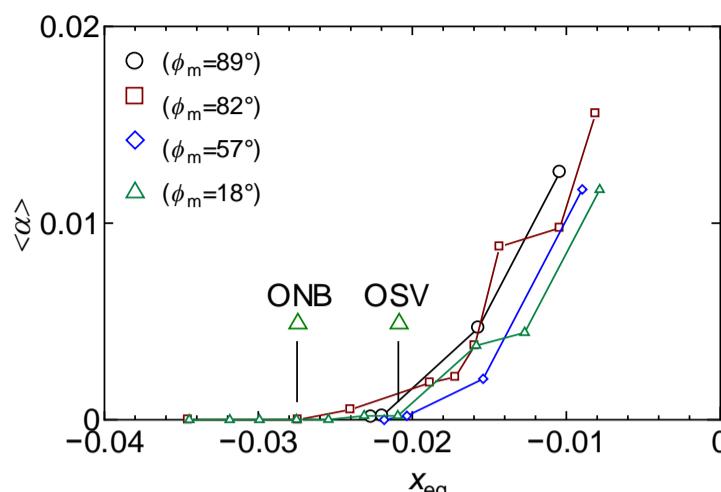
می‌شود و افزایش حجم می‌دهند. این پدیده در شکل 7 الف قابل مشاهده است. دیده شد که بازگشت مجدد حباب در مقادیر پایین تر $4T_{\text{sub}}$ با فرکانس بیشتری رخ می‌دهد. احتمال بازگشت مجدد حباب، P_r ، که به صورت نسبت تعداد حباب‌های برگشته به سطح، بر تعداد کل حباب‌های تولید شده، تعریف شده است، برای آزمایش سری 4 اندازه‌گیری شد و در شکل 8 نمایش داده شده است. مطابق با این شکل، احتمال بازگشت مجدد حباب در مقادیر کم نزدیک به شرایط شروع جوشش هسته‌ای، صفر و در شرایطی نزدیک به آغاز تولید بخار خالص این مقدار به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین، نتیجه مهم این مشاهدات این است که در نقطه آغاز تولید بخار خالص، تغییر رفتار



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 شوندگی مختلف

تحلیل تصاویر، به طور متوسط کسر حجمی بخار در بخش داده برداری مقطع آزمون را می‌توان 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 حباب‌های موجود در تصویر i ام، و $V_{b,ij}$ حجم حباب j ام در تصویر i ام است. تعداد تصاویر مورد استفاده در اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری $\langle \alpha \rangle$ 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 اندازه‌گیری مقطع آزمون، آنتالپی آب اشباع و آنتالپی نهان آب در فشار تست شده می‌باشند.

در شکل 6، شرایط شروع جوشش هسته‌ای و آغاز کسر قابل توجه بخار برای آزمایش سری 4 نشان داده شده است. در آزمایش‌های حاضر همانطور که در بخش قبلی بحث شد، در شروع جوشش هسته‌ای رفتارهای حباب بسته به میزان تر شوندگی سطح، متفاوت مشاهده شد. با این حال، شکل 6 نشان می‌دهد که روند توسعه $\langle \alpha \rangle$ بازی افزایش x_{eq} به طور کلی در تمام سری‌های آزمایش تقریباً مشابه هستند. به وضوح دیده می‌شود که مقدار کسر حجمی بخار بین شروع جوشش هسته‌ای و آغاز کسر قابل توجه بخار کم است و زمانی که شرایط به شروع تولید بخار خالص می‌رسد به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با این وجود، با در نظر گرفتن جزئیات مقادیر x_{eq} در آغاز کسر قابل توجه بخار در شکل 6 و در جدول 1، می‌توان نشان داد که با افزایش زاویه تماس، آغاز کسر قابل توجه بخار، در x_{eq} کمتر رخ می‌دهد. 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 هسته‌ای (شکل 3 الف) حباب معمولاً پس از تشکیل و بزرگ شدن، از سطح بلند می‌شود و به سرعت در مایع تحت اشباع ناپدید می‌شود، و افزایش قابل توجه کسر حجمی بخار تا زمانی که x_{eq} به اندازه کافی افزایش یابد به تعویق می‌افتد. در این شرایط مشاهده می‌شود که برخی از حباب‌های بلند شده از سطح، دوباره به سطح باز می‌گردند 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

سطح مقطع کanal (m^2)	A
ظرفیت حرارتی مایع ($kJ/kg K$)	c_{pl}
مقیاس کامل $F.S(Full Scale)$	
دبی جرمی ($kg/m^2 s$)	G
میلی ثانیه	ms
تعداد حباب‌ها	N_b
تعداد تصاویر	N_{im}
تعداد هسته‌های فعال حباب (#/ cm^2)	N_s
فشار (pa)	P
احتمال بازگشت مجدد حباب (kW/m^2)	P_r
شار حرارتی ($^{\circ}C$) یا (K)	q_w
حجم پنجره مشاهده در تصاویر (m^3)	T
حجم حباب (m^3)	V_{im}
کیفیت بخار	V_b
کسر حجمی بخار	x_{eq}
دمای تحت اشباع (K)	علائم یونانی
دمای سطح (K)	α
زاویه تماس قبل از آزمایش (°)	ΔT_{sub}
زاویه تماس بعد از آزمایش (°)	ΔT_w
زاویه تماس متوسط (°)	φ_1
حباب	φ_2
شرایط تعادل	φ_m
تصویر	زیرنویس‌ها
متوسط	b
برگشت مجدد حباب	eq
هسته‌های فعال حباب	im
تحت اشباع	m
دیواره، سطح	r
	s
	sub
	w

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 حجمی بخار در این شرایط شوند. شکل 7 ب گرفته شود [5]. تمایل حباب به سطح در سطح آبگریز می‌تواند به علت نیروی کشنش 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 حجمی دهنده 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، توامان 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 شوندگی 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 کشنش سطحی، وابستگی شدیدی به میزان تر شوندگی سطح دارد؛ در سطح آبگریز حباب‌ها در محل تولید هسته خود گیر افتاده‌اند، در حالی که در سطح آبدوست آن‌ها محل تشکیل خود را بلاfacله 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 سطح 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. Warrier, 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. Thornecroft, 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