



مطالعه تجربی جوشش استخری گذرای آب دیونیزه در دو حالت حضور و غیاب میدان مغناطیسی

احمدرضا ایوبی^۱ و احمدرضا فقیه خراسانی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

در این پژوهش جوشش استخری گذرای آب دیونیزه در شرایط اشباع و فشار اتمسفر در دوره‌های زمانی ۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه بررسی شده است. سیم آلیاژی آهن-آلومینیوم-کروم در حالت افقی به عنوان سطح گرم کن و برای بررسی اثر میدان مغناطیسی بر روی جوشش آب دیونیزه از دو آهن ربای دائمی از جنس سرامیک استفاده شد. افزایش شار حرارتی در دوره‌های زمانی بصورت ایجاد اختلاف ولتاژ دو سر سیم گرم کن است و این اختلاف ولتاژ با زمان بطور خطی افزایش می‌یابد. افزایش شار حرارتی به وسیله یک تابع چندجمله ای درجه دوم با افزایش ولتاژ از صفر تا ۵۰ ولت در هر دوره زمانی بدست آمده است. با حضور میدان مغناطیسی شار حرارتی بحرانی در دماهای مافوق گرم بزرگتر بدست آمد. مقدارهای شار حرارتی بحرانی در دوره‌های زمانی ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه در حضور میدان مغناطیسی، بیشتر از مقدارهای مشابه در عدم حضور میدان مغناطیسی است که می‌تواند به سبب تغییر ویژگی‌های شیمیایی-فیزیکی آب تحت میدان مغناطیسی باشد. مقدار افزایش شار حرارتی در اثر حضور میدان مغناطیسی نسبت حالت عدم حضور میدان برای دوره زمانی ۱۰۰ ثانیه و ۱۰۰۰ ثانیه به ترتیب برابر با ۱۲/۷۴٪ و ۷/۳٪ بدست آمد.

کلمات کلیدی: جوشش گذرا؛ شار حرارتی بحرانی؛ ضریب انتقال حرارت جوششی گذرا؛ جوشش هسته‌ای؛ جوشش فیلمی.

Study of Transient Pool Boiling of Deionized Water in Two Modes of Presence and Absence of a Magnetic Field

A. Ayoobi¹, A. Faghieh khorasani^{2*}

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran.

² Asst. Prof., Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran.

Abstract

The transient pool boiling of deionized water was studied under saturation condition and atmospheric pressure at time periods of 1, 10, 100 and 1000s. Iron-aluminum-chromium alloy wire was used in the horizontal position as a surface heater and two permanent ceramic magnets were used to investigate the magnetic field effect on the deionized water boiling. Voltage difference on the wire heater was used to increase heat flux during periods of time, and this voltage difference increases linearly with time. The increase of heat flux was obtained by a quadratic polynomial function with increasing the voltage from zero to 50 volts over time periods. The critical heat flux with the presence of the magnetic field happens at higher superheat temperatures of wire. The critical heat flux values for periods of 100 and 1000s in the presence of the magnetic field are more than the same values in the absence of the magnetic field which could be due to the change in the chemical-physical properties of magnetized water. The magnitudes of the heat flux enhancement due to the magnetic field relative to the absence of the magnetic field for the period of 100 and 1000s were 12.74% and 7.3%, respectively.

Keywords: Transient Boiling; Critical Heat Flux; Transient Boiling Heat Transfer Coefficient; Nucleate Boiling; Film Boiling.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۳۵۳۲۲۵۷۹۹۹؛ فکس: ۰۳۵۳۸۲۱۲۷۸۱

آدرس پست الکترونیک: faghieh@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

آب مایع با توجه به خصوصیات فیزیکی-شیمیایی، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی یکی از مبردهای بسیار رایج و کاربردی در موضوع انتقال حرارت است که در دستگاه‌های مانند مبدل حرارتی کاربرد گسترده‌ای دارد. فرآیند جوشش نیز به سبب ضریب انتقال حرارت بزرگ آن یکی از فرآیندهای موثر در انتقال حرارت است که تحقیق جوشش مبردهای مانند آب در صنایعی مانند، صنایع هسته‌ای در خنک کاری راکتور از اهمیت زیادی برخوردار است. بررسی پدیده جوشش در زمان‌های مختلف، پیچیدگی‌های زیادی را نشان می‌دهد که نشان از اهمیت مطالعه زمانی این پدیده است. تصاویر این پدیده، بهترین شاهد این واقعیت است. به عنوان مثال، چندین منطقه انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای مربوط به تولید بخار یافت می‌شود. با افزایش دمای سطح، ساختارهای بخار با یک توالی از حباب‌های گسسته، ستون‌های بخار، قارچ‌های بخار و در نهایت تکه‌های بخار تغییر می‌یابند [۱]. با این وجود، در اغلب تحقیقات این پارامتر را در نظر نگرفته و حالت پایدار را مورد بررسی قرار داده اند [۲، ۳]، در حالی که گاهی به عنوان مثال در ۰/۲۵- ۰/۵ ثانیه [۴، ۵] نیاز به انتقال سریع حرارت وجود دارد. در تحقیق به روش حالت پایدار، زمان انتقال حرارت در طول فرآیند جوشش و افزایش شار حرارتی در نظر گرفته نمی‌شود؛ همچنین با پیشرفت علم و ضرورت انتقال سریع حرارت در کاربردهای مختلف مانند، راکتورهای هسته‌ای [۶، ۷]، خنک کاری تجهیزات الکترونیکی [۸، ۹]، مبدل‌های حرارتی [۱۰] و غیره پارامتر زمان بسیار مهم شده است. علاوه بر این، روش‌های مختلفی برای بررسی پدیده جوشش در شرایط پایدار یا شرایط گذرا وجود دارد [۱۱]؛ بنابراین، پدیده جوشش در کاربردهای مختلف و زمان‌های گذرای متفاوت، به شکل‌های خاصی اتفاق می‌افتد که در همه آن شرایط متفاوت باید مانند هر آزمایشی در زمان مورد نظر مورد بررسی قرار گیرد.

اثرات قدرت گذرا (شار حرارتی)، تابع افزایش شار حرارتی و مادون سرد بودن سیال در انتقال حرارت در آزمایش‌های قبلی در درجه اول، مورد بررسی قرار گرفته است. از قرن نوزدهم، جوشش گذاری آب و سیالات دیگر در انواع مختلف تابع شار حرارتی بررسی شده است [۱۲-۱۴].

توابع افزایش شار حرارتی عبارتند از: نمایی [۶، ۱۵-۱۸]، درجه دوم [۱۹]، گام به گام [۱۲، ۲۰]، شیبدار [۲۱] و پالس مربع موج [۲۲]. بیشتر این مطالعات در شرایط جوشش استخری با استفاده از گرم کن سیم [۱۶، ۱۸]، روبان [۱۱] و از نوع صفحه [۶] انجام شده است. بعضی از تحقیقات روی جابجای اجباری نیز با استفاده از گرم کن لوله [۲۳]، روبان [۲۴] و سیم [۲۵، ۲۶] انجام شده است.

ایوبی و همکاران [۲۷] آزمایش‌های جوشش استخری گذرا را برای آب دیونیزه در فشار اشباع انجام دادند. آنها از سیم گرم کن آلایزی به عنوان سطح گرم کن استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش دوره زمانی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد؛ همچنین شار حرارتی بحرانی با افزایش دوره زمانی در ابتدا کاهش و در یک دوره زمانی به کمترین مقدار رسیده و سپس افزایش یافت. لی^۱ و همکاران آزمایش‌های حالت پایدار و گذرای جوشش استخری روی یک سیلندر افقی در یک استخر آب تقطیرشده یونی را از فشار ۲۰ تا ۱۰۱/۶ کیلوپاسکال انجام دادند [۱۷]. آنها شار حرارتی بحرانی گذرا را با افزایش حرارت با تابع نمایی در محدوده دوره نمایی از ۱۰ میلی ثانیه تا ۲۰ ثانیه در فشار یک اتمسفر و زیر فشار اتمسفر و محدوده مادون سردی از صفر تا ۴۰ درجه کلوین را اندازه‌گیری کردند. آنها مشاهده کردند که مقادیر شار حرارتی بحرانی جوشش گذرا با کاهش دوره زمانی در ابتدا تا یک مقدار ماکزیمم افزایش، سپس تا یک مقدار مینیمم کاهش و دوباره افزایش می‌یابد. پارک^۲ و همکاران سطوح شار حرارتی بحرانی را با افزایش نمایی حرارت برای دوره‌های زمانی مختلف روی یک استوانه افقی با قطر ۱ میلی متر مغروق در مایع‌های مختلف بوسیله مطالعه تصویری اندازه‌گیری کردند [۱۹]. مطالعه از طریق تصویربرداری دو مکانیزم اصلی شار حرارتی بحرانی را نشان داد؛ یک مکانیزم در شروع حالت پایدار شار حرارتی بحرانی در ابتدای جوشش هسته‌ای توسعه یافته کامل اتفاق می‌افتد که به سبب تاخیر زمانی ناپایداری هیدرودینامیکی است. مورد دوم در یک مافوق حرارتی شبه انفجاری هسته زای ناهمگن خودبخودی (HSN) معین در حفره‌های آب گرفته

^۱ Li^۲ Park

مطالعه کردند [۳۳]. نتایج آنها نشان داد که ضریب اصطکاک در آب مغناطیس شده کمتر است. وانگ و همکاران، اثر میدان مغناطیسی روی ویژگی‌های جزئی فیزیکی آب را بررسی کردند [۳۴]. در این تحقیق از آب شیرین و چهار نوع آب مغناطیس شده استفاده شد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های آب شیرین در اثر رفتار میدان مغناطیسی تغییر می‌کند؛ مقدار تبخیر افزایش و حرارت ویژه و نقطه جوش کاهش می‌یابد و این تغییرات وابسته به خواص آب تحت میدان مغناطیسی است. تولدو^۷ و همکاران، اثر میدان مغناطیسی روی ویژگی‌های شیمیایی-فیزیکی آب مایع را تحقیق کردند [۳۵]. نتایج نشان داد که لزجت، کشش سطحی و انتالپی آب مغناطیس شده نسبت به آب در عدم حضور میدان مغناطیسی بیشتر شده است. ایشیمیتو^۸ [۳۶] رفتار حباب در میدان مغناطیسی بطور تجربی بررسی کرد. نتایج نشان داد که با افزایش میدان مغناطیسی کسر خالی حباب‌ها کاهش می‌یابد. لیکودیس^۹ [۳۷] در یک تحقیق تحلیلی نشان داد که در حضور و غیاب میدان مغناطیسی رشد یک حباب به شکل سهموی است و یک پارامتری بعد در رابطه با حل معادله رشد حباب ریلی^{۱۰} در حضور میدان مغناطیسی ارائه کرد.

تمرکز این تحقیق بررسی تلفیق جوشش استخری آب دیونیزه در حالت گذرا با افزایش شار حرارتی با تابع چندجمله‌ای درجه دوم و حضور میدان مغناطیسی در حین آزمایش است. در تحقیقات گذشته جوشش استخری آب در حالت گذرا، بیشتر از تابع نمایی و یک مورد خطی در محدوده زمانی‌های بسیار کوتاه انجام شده است، ولی افزایش شار حرارتی با تابع چندجمله‌ای درجه دوم و محدوده وسیع از زمان‌های گذاری کوتاه و طولانی بررسی نشده است. برخی از ویژگی‌های آب در حالت حضور میدان مغناطیسی بطور تجربی، تحلیلی و عددی انجام گرفته است که اثرات متفاوتی (کاهش یا افزایش) روی فرآیند جوشش و انتقال حرارت جوششی دارد، ولی رفتار جوششی آب در حالت عملی بررسی نشده است؛ بنابراین بررسی رفتارها و تغییرات جوشش آب،

اصلی روی صفحه استوانه به سبب فرآیند شبه انفجاری هسته زای ناهمگن خودبخودی (HSN) اتفاق می‌افتد. سو^۲ و همکاران یک تحقیق در مورد انتقال حرارت جوشش استخری گذرا در آب در فشار اتمسفر تحت افزایش نمایی شار حرارتی روی گرم کن نوع صفحه‌ای ارائه کردند [۸]. آنها افزایش نمایی شار حرارتی را در دوره‌های ۵ تا ۱۰۰ میلی ثانیه و مادونسردی^۳، ۲۵ و ۷۵ درجه کلونین بررسی کرده و شرایط شروع جوشش هسته‌ای را مشاهده کردند. نتایج نشان داد که دما و شار حرارتی در شروع جوشش هسته‌ای بطور یکنواخت با کاهش دوره زمانی و افزایش دمای مادون سردی مایع افزایش می‌یابد. ساکورای^۴ و شیوتسو^۴ شروع مافوق حرارتی جوشش را برای افزایش نمایی حرارت روی یک سیم پلاتینی در حالت افقی درون آب را اندازه‌گیری کردند [۲۸]. دوره‌های نمای آنها از ۵ میلی ثانیه تا ۱۰ ثانیه و مادون سردی از ۲۵ تا ۷۵ درجه کلونین بود. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت قبل از شروع جوشش، برابر با رژیم هدایت و جابجای طبیعی است. در تحقیق دیگر، ساکورای و شیوتسو انتقال حرارت جوشش گذرا برای افزایش حرارت بطور نمایی را روی یک سیم پلاتینی افقی درون استخر آب تحقیق کردند [۱۸]. آنها مشاهده کردند که بعد از شروع جوشش، در یک شار حرارتی یکسان، ضریب انتقال حرارت جوششی گذرا کمتر از ضریب انتقال حرارت جوششی حالت پایدار است و دلیل آن را تاخیر زمانی فعالیت حفره‌هایی بیان کردند که در طول نرخ افزایشی حرارتی ورودی از ابتدا پر از آب بوده اند.

از چندین دهه قبل مطالعات زیادی روی اثر میدان مغناطیسی بر خواص فیزیکی و شیمیایی آب انجام شده است [۲۹-۳۲]. زمانی که یک میدان مغناطیسی بر آب اعمال می‌شود، آب را به آب مغناطیس شده تغییر می‌دهد. هان^۵ و همکاران ویژگی‌های بصری آب بین دو آهنربای قوی را تحقیق کردند و ویژگی جذب فرسرخ آب مغناطیس شده را مشاهده کردند [۳۲]. وانگ^۶ و همکاران اثر میدان مغناطیسی استاتیک روی آب مایع را با استفاده از آزمایش اصطکاکی

¹ Originally Flooded Cavities

² Su

³ Sakurai

⁴ Shiotsu

⁵ Han

⁶ Wang

⁷ Toledo

⁸ Ishimoto

⁹ Lykoudis

¹⁰ Rayleigh

مکانیزم‌های انتقال حرارت جوششی و رشد و جدایش حباب‌ها و مکان‌های هسته‌زا در فرآیند جوشش آب در حالت عملی لازم بوده که این موضوع بررسی شده است.

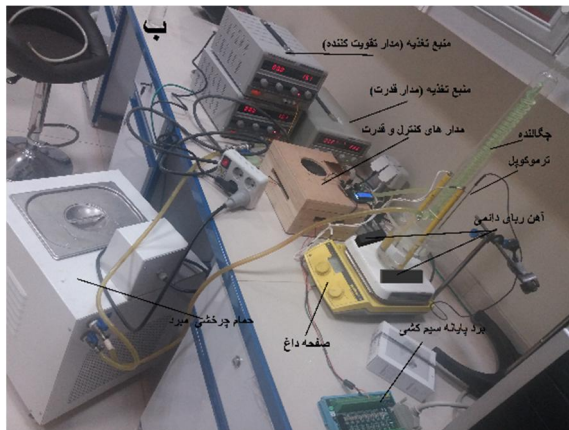
در این تحقیق جوشش استخری گذرای آب دیونیزه در شرایط اشباع و فشار اتمسفر در دوره‌های زمانی ۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه بررسی گردیده است؛ در حالی که تحقیقات اخیر حالت پایای جوشش استخری را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق افزایش شار حرارتی با افزایش ولتاژ از صفر تا ۵۰ ولت توسط تابع خطی در هر دوره زمانی است و در نتیجه تابع شار حرارتی با تقریب بسیار خوبی یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم وابسته به زمان بدست آمد. این روش گرمایش سطح با تابع چندجمله‌ای درجه دوم، یکی از نوآوری‌های این تحقیق است. بعلاوه، یکی دیگر از مباحث جدید مطرح شده در این تحقیق محدوده‌های زمانی جوشش گذرا است؛ درحالی که بسیاری از مقالات گذشته بر دوره‌های کوتاه تمرکز کرده‌اند، این تحقیق دوره‌های زمانی ۱ ثانیه و بزرگتر را بررسی کرده و ویژگی‌های جوشش مانند جزئیات شار حرارتی بحرانی و مشخصات دما را توضیح داده است؛ همچنین اثر حضور میدان مغناطیسی روی فرآیند جوشش نیز، از موضوعات جدید تحقیق شده است. این تحقیق از معدود پژوهش‌های است که روند جوشش از نخستین رژیم (رژیم جابجای آزاد) تا رژیم نهایی جوشش (جوشش فیلمی) و افزایش ضخامت فیلم بخار را بررسی کرده است. در این مقاله به ترتیب تجهیزات استفاده شده، مشخصات آنها، روش تحقیق موضوع مقاله و روابط استفاده شده در بخش تجهیزات آزمایشگاهی بیان شده است. بخش تحلیل نتایج با اعتبار سنجی نتایج شروع می‌شود و در ادامه مشخصات فرآیند جوشش در دو حالت حضور و غیاب میدان مغناطیسی و توضیحات مربوطه ارائه گردیده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

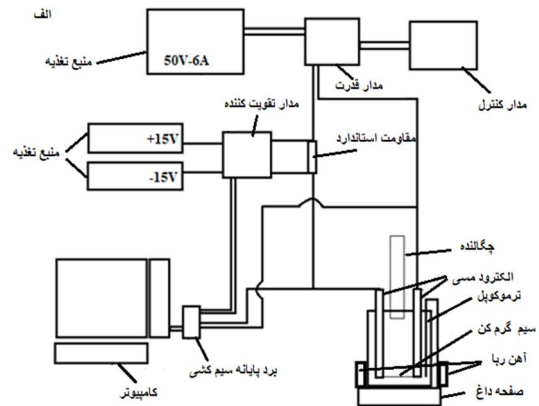
شکل ۱ نمای کلی تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این پژوهش یک مخزن استوانه‌ای از جنس پیرکس با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر به عنوان مخزن جوشش و یک صفحه داغ با کنترل دما برای شرایط اشباع آب استفاده شده است. از دو الکترود مسی به قطر ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر برای نگه داری سیم گرمکن و هدایت جریان

الکتریکی استفاده شده است. الکترودها با پوشش پلاستیکی به منظور جلوگیری از اکسید شدن و آلودگی آب کاملاً پوشش داده شده‌اند؛ همچنین از یک درب دایره‌ای شکل از جنس پلگسی گلاس برای جلوگیری از ورود آلودگی به داخل مخزن و همچنین نگه داری الکترودهای مسی در موقعیت مناسب استفاده گردیده است. یک چگالنده برای برگرداندن آب تبخیر شده به مخزن که با حمام چرخشی سرد خنک می‌شود، روی مخزن قرار گرفت؛ بنابراین سطح آب دیونیزه در مخزن ثابت می‌ماند. سیم آلیاژی آهن-آلومینیم-کرم با قطر ۰/۱۵ میلی‌متر و طول ۶۵ میلی‌متر به عنوان سطح گرم کن استفاده شد. این سیم بصورت محکم بین دو الکترود بطور افقی با دو واشر از جنس استیل قرار داده شده است. قبل از آزمایش‌ها، ضریب مقاومت-دما با آزمایش دیگری بدست آمده است. مقدار این ضریب $0/0068$ بر درجه سلسیوس است.

برای حرارت سریع بوسیله توان الکتریکی، مدارهای قدرت و کنترل طراحی و ساخته شده‌اند. وظیفه مدار قدرت، فراهم کردن مقدار انرژی درخواستی مدار کنترل است. با استفاده از مدار کنترل می‌توان مقدار شار حرارتی و دوره زمانی را تعیین کرد. یک منبع تغذیه (GPC-3060D, Gwinstek co., Ltd) توان مورد نیاز مدار قدرت را تامین می‌کند. از یک مقاومت استاندارد ۴۰ میلی اهم برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی استفاده شده است؛ همچنین یک مدار تقویت کننده برای قرار دادن مقدار خروجی جریان در محدوده کارت داده برداری طراحی و ساخته شد. مدار تقویت کننده به دو ولتاژ ± 15 ولت نیاز دارد که از دو منبع تغذیه (Hy3020, Huayi electric co., Ltd) استفاده شده است. برای هر آزمایش، جریان گذرنده از سیم گرم کن (I) و مقدار اختلاف پتانسیل مربوطه در دو سر سیم گرم کن (ΔV) بطور پیوسته اندازه‌گیری شده و مقدار مقاومت محاسبه می‌شود و سپس از مقاومت، دمای سیم بدست می‌آید. برای حذف نویزها با یک تابع خطی در نرم افزار متلب از مقادیرهای اختلاف ولتاژ بدست می‌آید و مقادیرهای جریان الکتریکی در دوره‌های زمانی مربوطه متوسط‌گیری زمانی می‌شود. رابطه‌های (۱) و (۲) به ترتیب برای محاسبه مقاومت و دمای سیم بصورت تابعی از زمان استفاده می‌شوند [۳۸]. در رابطه (۲) پارامتر α ضریب دما-مقاومت سیم گرم کن است.



(ب)



(الف)

شکل ۱- شماتیک تجهیزات آزمایش؛ الف) نمای شماتیک (عکس بالا) و ب) عکس واقعی (عکس پایین)

آنها است؛ بنابراین، شار حرارتی لحظه‌ای به سیال از رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$q'' = \frac{v}{A_w} (\overline{I\Delta V}/v - \rho_w c_{pw} dT_w/dt) \quad (3)$$

مقدار ضریب انتقال حرارت جوششی گذرا را می‌توان از شار حرارتی و دمای مافوق گرم سیم $\Delta T_w = \bar{T}_w - T_{sat}$ رابطه (۴) بدست آورد:

$$h = q''/\Delta T_w \quad (4)$$

از روش موفات^۱ [۳۹] برای تحلیل عدم قطعیت نتایج استفاده شد. عدم قطعیت اختلاف ولتاژ، جریان و مساحت سیم به ترتیب تقریباً برابر با ۰/۳۵٪، ۰/۵۷٪ و ۰/۲۳٪ است. عدم قطعیت دمای سیم و شار حرارتی نیز به ترتیب برابر با ۰/۱۷٪ و ۰/۳۱٪ است.

$$E(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5)$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [x_i - E(x)]^2}{N - 1}} \quad (6)$$

$$U(x) = \frac{\sigma(x)}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

$$\bar{I} = \frac{\overline{\Delta V}}{R_{shunt}} \quad (8)$$

$$\bar{R}(t) = \overline{\Delta V}(t) / \bar{I}(t) \quad (1)$$

$$\bar{T}_w(t) = (\bar{R}(t) - R_0)/(\alpha R_0) + T_0 \quad (2)$$

شار حرارتی لحظه‌ای با تغییر اختلاف ولتاژ خروجی از مدار قدرت در هر زمان از صفر تا ۵۰ ولت در زمان t_0 تغییر می‌کند که t_0 نرخ افزایش شار حرارتی را مشخص می‌کند؛ بنابراین ولتاژ روی گرم کن بصورت $V = 50t/t_0$ تغییر می‌کند و در نهایت قدرت تولید شده در گرم کن با تقریب خوبی یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم است. چهار مقدار از t_0 (دوره زمانی ولتاژ خطی از صفر تا ۵۰ ولت است) در این تحقیق بررسی شده است که عبارتند از ۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه. به علت اینکه آزمایش‌های گذار در زمان کوتاهی اتفاق می‌افتد، نیاز به یک کارت داده بردای با سرعت بالا است. برای این منظور نتایج اختلاف ولتاژ و جریان گرم کن بوسیله یک کارت داده‌بردی Advantech PCI-1716 با سرعت ۲۵۰ کیلوهرتز و دقت ۱۶ بیت خوانده و ذخیره می‌شود.

یک روش متفاوت با حالت پایدار برای تعیین شار حرارتی (برای آن دوره زمانی) منتقل شده به سیال استفاده می‌شود. تمامی توان بوسیله رابطه $\overline{I\Delta V}$ بدست می‌آید که مقداری از آن در گرم کن با اثر ژول از بین می‌رود و باقیمانده آن به سیال اطراف منتقل می‌شود. مقدار نرخ انرژی ذخیره شده در سیم $\rho_w c_{pw} dT_w/dt$ نرخ تغییر \bar{T}_w بطور تقریبی بوسیله تفاضل $\Delta \bar{T}_w/\Delta t$ بدست می‌آید که $\Delta \bar{T}_w$ تفاضل بین دو مقدار متوالی T سیم است و Δt اختلاف زمانی اندازگیری

¹ Moffat

تجربی استفاده می‌شود که با رابطه‌های (۵) و (۶) در زیر آمده است.

$$\Delta T_s = h_{fg} / C_{p,l} C_{sf} \left[\frac{q''}{\mu_l h_{fg}} \left(\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{0.5} \right]^{\frac{1}{3}} \Pr^n \quad (13)$$

$$q''_{CHF} = 0.131 h_{fg} \rho_v^{0.5} (g\sigma(\rho_l - \rho_v))^{1/4} \quad (14)$$

همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، نتایج بدست آمده در رژیم جوشش هسته‌ای تقریباً رابطه رزنو را دنبال کرده است و مقدار شار حرارتی بحرانی بسیار نزدیک به مقدار پیش بینی زوبر است. منحنی قرمز رنگ مربوط به حدود پیش بینی شده توسط رابطه زوبر است. این خط نشان می‌دهد که شار حرارتی بحرانی پیش‌بینی شده توسط رابطه زوبر تا این مقدار عددی شار حرارتی است و نتایج بدست آمده در آزمایش نیز نزدیک به این مقدار شار حرارتی است. بعد از جوشش هسته‌ای افزایش توان ادامه داده شده و رژیم‌های انتقال از رژیم جوشش هسته‌ای به رژیم جوشش فیلمی و رژیم جوشش فیلمی را نیز بدست می‌آیند. در آزمایش حالت پایدار، افزایش توان بطور تدریجی و بدون در نظرگیری زمان انجام می‌شود. برای افزایش شار حرارتی، مقدار اختلاف افزایش ولتاژ بصورت گام به گام است و هر گام مقدار یک ولت افزایش می‌یابد. مقدار دمای مافوق گرم سیم بعد از شار حرارتی بحرانی در هر گام بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از رژیم‌های جوشش هسته‌ای و جابجای آزاد است که نشان دهنده تغییر رژیم جوشش استخری است.

۳-۲- اثر میدان مغناطیسی بر روی خصوصیات جوشش آب دیونیزه

برای آزمایش اثر میدان مغناطیسی روی جوشش آب از دو آهن ربای دائم سرامیکی به شکل مکعب با اندازه $100 \times 150 \times 25$ میلی‌متر استفاده شد. در هر آزمایش از ابتدای حالت اشباع، مخزن در بین این آهن‌رباها قرار گرفته که فاصله بین دو آهن ربا برابر با قطر مخزن آزمایش است.

$$\frac{U_A}{A} = \left[\left(\frac{U_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{U_l}{l} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (9)$$

$$\frac{U_{T_w}}{T_w} = \left[\left(\frac{U_{\Delta V}}{\Delta V} \right)^2 + \left(\frac{U_I}{I} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (10)$$

$$\frac{U_I}{I} = \left[\left(\frac{U_{\Delta V}}{\Delta V} \right)^2 + \left(\frac{U_{R_{shunt}}}{R_{shunt}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (11)$$

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \left[\left(\frac{U_{\Delta V}}{\Delta V} \right)^2 + \left(\frac{U_I}{I} \right)^2 + \left(\frac{U_A}{A} \right)^2 + \left(\frac{U_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{U_{T_w}}{T_w} \right)^2 + \left(\frac{U_t}{t} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (12)$$

در این تحقیق ابتدا برای جدایش مقدار بخار آب و گازهای غیر قابل چگالش، آب به مدت ۴۵ دقیقه در حالت جوشش قرار گرفته است. سپس برای شروع گرمایش در زمان مقرر طبق دوره‌های زمانی طراحی شده، مقدار زمان و ولتاژ ابتدا و انتها بوسیله برد مدار کنترل مشخص می‌شود. کارت داده برداری نصب شده روی کامپیوتر با ولتاژ مرجع کالیبره شده و با شروع گرمایش سیم، داده‌های مربوط به ولتاژ و جریان الکتریکی را ذخیره می‌کند. در این مدت ترموکوپل در هر لحظه دمای آب را اندازه گیری کرده و در صورت کاهش نسبت به دمای نقطه جوشش بطور اتوماتیک دستگاه صفحه داغ مقدار گرمای لازم را به آب می‌دهد. هر آزمایش تا پاره شدن سیم گرم کن ادامه یافته است. طبق طراحی آزمایش‌ها، دو دسته آزمایش برای بررسی میدان مغناطیسی با قرار دادن آهن رباهای دائم سرامیکی در دو طرف مخزن انجام گرفته است. در آخر، با استفاده از نرم افزار متلب و برنامه نویسی، داده‌ها تجزیه و تحلیل شده‌اند.

۳- نتایج و تحلیل

۳-۱- اعتبار سنجی

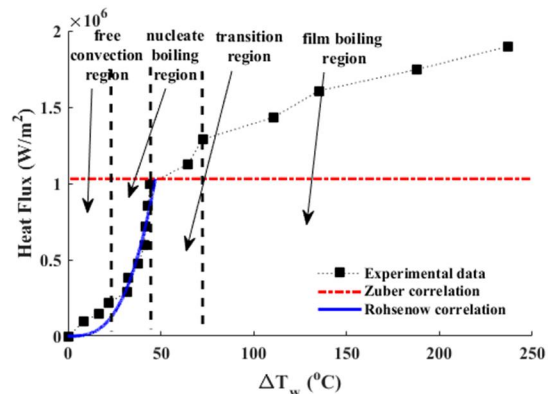
نتایج تجربی بدست آمده با رابطه رزنو و زوبر در حالت پایدار جوشش مقایسه شده و شکل ۲ آن را نشان می‌دهد. رابطه‌های رزنو^۱ [۴۰] و زوبر^۲ [۴۱] برای اعتبار سنجی رژیم جوشش هسته‌ای و مقدار شار حرارتی بحرانی در تحقیقات

¹ Rohsenow

² Zuber

می‌توان با تقریب خوبی با یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم تخمین زد. مقدارهای دمای مافوق گرم سیم در همه دوره‌های زمانی و در هر دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی روند یکسانی را دارند، اما مقدارهای آنها در دوره‌های زمانی متفاوت است. با افزایش دوره‌های زمانی مقدار دماهای مافوق گرم سیم کاهش یافته و برای هر دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی روند کاهشی، یکسان است؛ اما در حضور میدان مغناطیسی مقدار دمای مافوق گرم سیم بیشتر از حالت عدم حضور میدان مغناطیسی است که علت را می‌توان کاهش اثر نیروی بویانسی حسابها به سبب اثر حضور میدان مغناطیسی و جدایش دیرتر و در نتیجه کاهش انتقال حرارت از سیم به آب دانست؛ همچنین، شیب نتایج دمای مافوق گرم سیم در زمان‌های مختلف متفاوت است و با افزایش دوره زمانی آزمایش شیب نتایج کاهش یافته و در حضور میدان مغناطیسی شیب نتایج بزرگتر از عدم حضور میدان مغناطیسی است. علت بزرگتر بودن شیب در حضور میدان مغناطیسی می‌تواند به سبب افزایش شار حرارتی مورد نیاز در دمای مافوق گرم مربوطه باشد که در نتیجه افزایش لزجت، کشش سطحی و آنتالپی آب مغناطیس شده طبق تحقیق تولدو [۳۵] است. مقدارهای ضریب انتقال حرارتی جوششی گذرا تابع نتایج شار حرارتی و دمای مافوق گرم سیم است که طبق رابطه (۴) بدست آمده است.

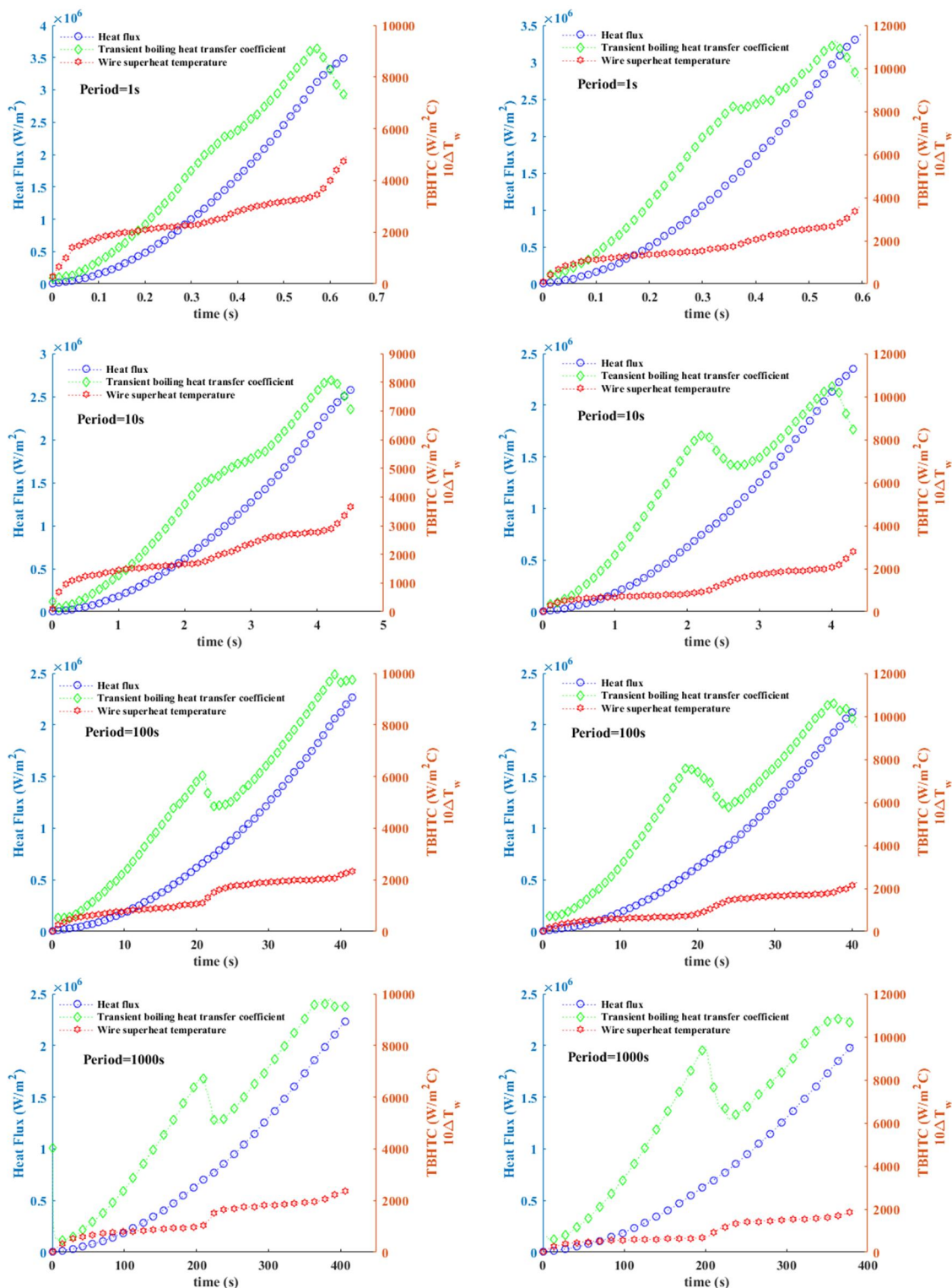
شکل ۴ نمودار جوششی در دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی در دوره‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، در تمامی دوره‌های زمانی مقدار نتایج عدم حضور میدان مغناطیسی کمتر از حالت حضور میدان مغناطیسی است که می‌تواند به سبب تغییر در مشخصات شیمیایی-فیزیکی مانند افزایش مقدار تبخیر، کاهش نقطه جوش، افزایش لزجت، کشش سطحی و آنتالپی آب تحت اثر میدان مغناطیسی باشد [۳۴، ۳۵]. با تغییر متفاوت هر کدام از مشخصات آب در حضور میدان مغناطیسی، در نهایت اثر برآیند آنها باعث افزایش نقطه شروع جوشش هسته‌ای آب در شرایط واقعی شده است؛ همچنین وانگ [۳۴]، نشان داد که تحت میدان‌های مغناطیسی با قدرت‌های متفاوت، دو پارامتر انرژی درونی و ظرفیت حرارتی



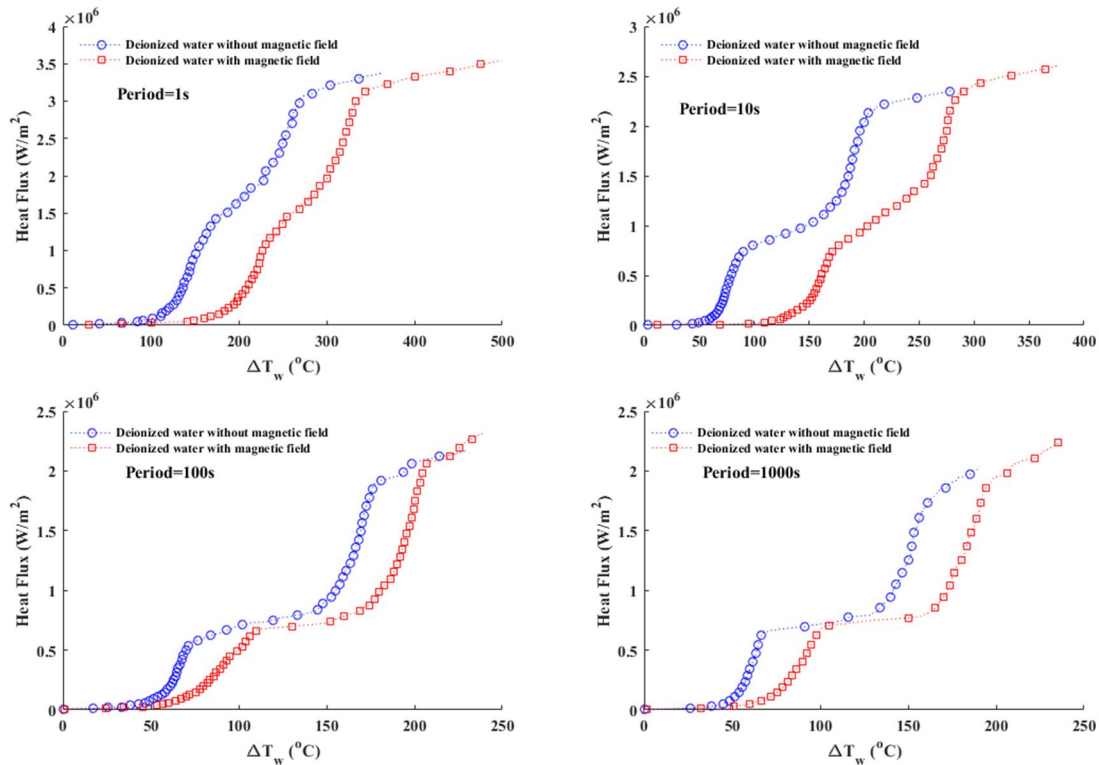
شکل ۲- مقایسه نتایج تجربی آب دیونیزه با رابطه‌های رزنو و زوبر [۳۷]

میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده با استفاده از گوس متر Bruker BH15 field controller ساخت کشور آلمان در فاصله مورد نظر داخل مخزن آزمایش برابر با ۸۰۰ گوس و خطوط میدان مغناطیسی موازی با محور سیم گرم کن است. شکل ۳ نتایج جوشش آب دیونیزه را در حالت‌های حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی در دوره‌های زمانی ۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه در شرایط اشباع را نشان می‌دهد. در این شکل محورهای سمت چپ شار حرارتی و محور سمت راست ضریب انتقال حرارت جوششی گذار و دمای مافوق گرم سیم با ضریب ۱۰ را نشان می‌دهند. در تمامی دوره‌های زمانی مدت زمان آزمایش زودتر از مدت دوره زمانی برنامه ریزی شده به اتمام رسیده است، اما در حالت عدم حضور میدان مغناطیسی فرآیند جوشش زودتر از حضور میدان مغناطیسی متوقف شده است. با توجه به تحقیق لیکودیس [۳۷] توقف زودتر فرآیند جوششی در حضور میدان مغناطیسی می‌تواند بخاطر محدود شدن نیروی بویانسی در میدان مغناطیسی افقی باشد که در این حالت حساب‌ها مدت زمان بیشتری را در مکان‌های هسته‌زا باقی می‌مانند که در نتیجه دمای سطح سیم بطور متوسط بیشتر از عدم حضور میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و زمان رسیدن دمای سیم به نقطه ذوب سیم کاهش می‌یابد. همه دوره‌های زمانی در هر دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی شار حرارتی بدست آمده را

¹ Lykoudis



شکل ۳- شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت جوششی گذرا و دمای مافوق گرم سیم در دوره زمانی (سمت چپ با حضور میدان مغناطیسی، سمت راست عدم حضور میدان مغناطیسی)

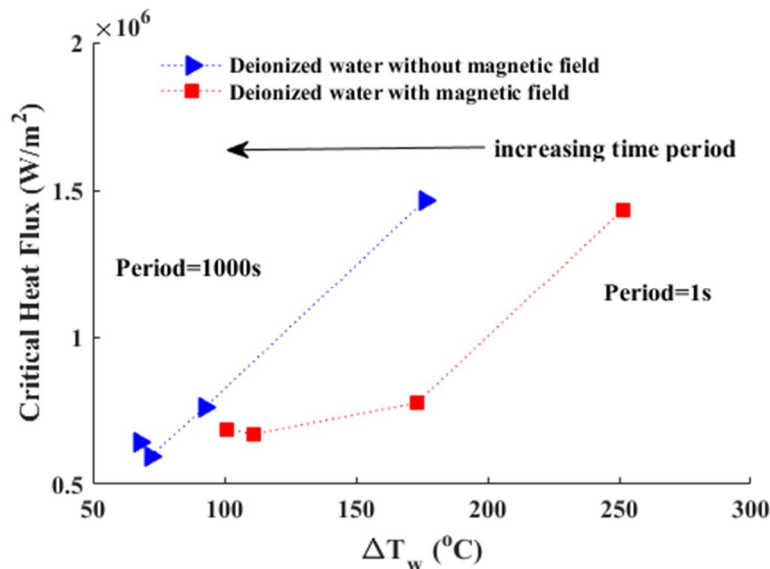


شکل ۴- شار حرارتی در برابر دمای مافوق گرم سیم در دوره‌های زمانی ۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

جوشش فیلمی بصورت خیلی کوتاه و با شیب زیاد بین دو رژیم جوشش هسته‌ای و جوشش فیلمی است؛ در حالی که در دوره زمانی ۱۰۰۰ ثانیه شیب آن کمتر و محدوده انتقال بزرگتر است. در انتهای رژیم جوشش فیلمی شیب نتایج افزایش یافته که می‌توان علت آن را افزایش ضخامت فیلم اطراف سیم دانست. با افزایش ضخامت فیلم بخار حول سیم مقدار انتقال حرارت از سیم به آب کاهش می‌یابد و سبب افزایش دمای مافوق گرم سیم می‌شود تا جای که در ضعیف‌ترین نقطه، سیم به حالت ذوب برسد و جریان قطع شود.

شکل ۵ مقادیر شار حرارتی بحرانی در برابر دمای مافوق گرم سیم در دوره‌های زمانی متفاوت را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که حضور میدان مغناطیسی سبب بدست آمدن شار حرارتی بحرانی در دماهای مافوق گرم بزرگتر نسبت به غیاب میدان مغناطیسی می‌شود. علت آن را می‌توان در حضور طولانی‌حباب‌ها روی سیم گرم کن در حضور میدان مغناطیسی دانست؛ همچنین مقادیر شار حرارتی بحرانی

ویژه یک تابع چندقله‌ای است که در مقادیر متفاوت میدان در خلاف هم تغییر می‌کنند. در این تحقیق، اثر این دو پارامتر در قدرت ۸۰۰ گوس و میدان مغناطیسی موازی با محور سیم سبب کاهش نقطه جوش آب مغناطیس شده گردیده است. در هر دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی، با افزایش دوره زمانی به تدریج محدوده رژیم‌های جابجای آزاد، جوشش هسته‌ای، انتقال از رژیم جوشش هسته‌ای به رژیم جوشش فیلمی و جوشش فیلمی کوتاه‌تر می‌شود. این رفتار نشان دهنده، کاهش خصوصیات جوشش گذرا، نرخ‌های بالای افزایش شار حرارتی، انتقال سریع حرارت از سیم به آب و مکانیزم شبه انفجاری هسته‌زای ناهمگن خودبخودی (H SN) و میل به سمت جوشش در حالت پایدار و نرخ‌های کم شار حرارتی است. در دوره زمانی ۱ ثانیه به علت نرخ بالای شار حرارتی و افزایش سریع دما در زمان کوتاه بیشترین مقدار دمای مافوق گرم در طول فرآیند جوشش در تمامی رژیم‌های جوششی را نسبت به دیگر دوره‌ها دارد. بعلاوه، محدوده انتقال از رژیم جوشش هسته‌ای به رژیم



شکل ۵- شار حرارتی بحرانی در برابر دمای مافوق گرم برای دوره‌های زمانی ۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی

ثانیه به بعد به حالت پایدار جوشش آب دیونیزه نزدیک شده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش جوشش استخری گذرای آب دیونیزه در دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی در شرایط اشباع و فشار اتمسفر بررسی شد. از سیم آلیاژی آهن-آلومینیوم-کروم با قطر ۰/۱۵ میلی‌متر و طول ۶۵ میلی‌متر به عنوان سطح گرم کن استفاده شد و افزایش شار حرارتی بوسیله یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم با ایجاد اختلاف ولتاژ بطور خطی در سیم گرم کن بدست آمد. قدرت میدان مغناطیسی و چگالی انرژی مغناطیسی برای آهن رباهای دائمی استفاده شده شبیه سازی شدند. نتایج بدست آمده در رژیم جوشش هسته‌ای بخوبی رابطه رزنو را دنبال کرده و همچنین مقدار شار حرارتی بحرانی بسیار نزدیک به مقدار پیش بینی زوبر است. افزایش شار حرارتی بعد از رژیم جوشش هسته‌ای ادامه داده شد و رژیم انتقال از رژیم جوشش هسته‌ای به رژیم جوشش فیلمی و رژیم جوشش فیلمی بدست آمده‌اند. در تمامی دوره‌های زمانی مدت زمان آزمایش زودتر از مدت دوره زمانی برنامه ریزی شده به اتمام رسیده، اما در حالت عدم حضور میدان مغناطیسی فرآیند جوشش زودتر از حضور میدان

در دوره‌های زمانی ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه بیشتر از مقدارهای مشابه در عدم حضور میدان مغناطیسی است. مقدار افزایش شار حرارتی در اثر حضور میدان مغناطیسی نسبت به حالت عدم حضور میدان برای دوره‌های زمانی ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه به ترتیب برابر با ۱۲/۷۴٪ و ۷/۳٪ بدست آمده است. علت افزایش شار حرارتی بحرانی در دوره‌های زمانی بزرگ می‌تواند به سبب نفوذ بیشتر اثر میدان مغناطیسی نسبت به دوره‌های زمانی کوتاه باشد. همانطور که قبلاً بیان شد، اثر میدان مغناطیسی روی آب افزایش لزجت، کشش سطحی و آنتالپی آب مغناطیس شده است که در نتیجه مقدار شار حرارتی بیشتری برای رسیدن به شرایط شار حرارتی بحرانی لازم است. در هر دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی، با افزایش دوره زمانی مقدارهای شار حرارتی بحرانی کاهش یافته، اما در دوره زمانی ۱۰۰ ثانیه روند کاهش شار حرارتی بحرانی تغییر کرده و در دوره زمانی ۱۰۰۰ ثانیه مقدار شار حرارتی بحرانی افزایش یافته است.

دلیل این تغییر روند را همانطور که قبلاً بیان شد، می‌توان کاهش فرآیند جوشش گذرا و اثرات شبه انفجاری هسته زای ناهمگن خودبخودی (HSN) دانست و در شرایط این آزمایش دوره زمانی ۱۰۰ ثانیه انتهای جوشش سریع آب دیونیزه است و جوشش استخری از دوره زمانی ۱۰۰

دمای مافوق گرم سیم $(= T_w - T_{sat})$ ، °C	ΔT	مغناطیسی متوقف شده است. شیب دمای مافوق گرم سیم در زمان‌های مختلف متفاوت است و با افزایش دوره زمانی آزمایش کاهش می‌یابد و در حضور میدان مغناطیسی بزرگتر از عدم حضور میدان مغناطیسی است. در هر دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی، با افزایش دوره زمانی مقدارهای شار حرارتی بحرانی کاهش یافت.
شرایط اشباع	0	
شار حرارتی بحرانی	CHF	
سیال	l	
بخار	v	
سیم	w	
	بالانویس	
متوسط	-	
۶- مراجع		
[1] Gaertner RF (1965) Photographic study of nucleate pool boiling on a horizontal surface. J Heat Trans-T ASME 87(1): 17-27.		
[2] Zou A, Chanana A, Agrawal A, Wayner Jr PC, Maroo SC (2016) Steady state vapor bubble in pool boiling. Sci Rep 6 :20240.		
[3] Nasiri S, Talebi S, Salimpour MR (2018) The effect of grooved surfaces on pool boiling heat transfer of water and Fe3O4/water nanofluid. Modares Mechanical Engineering 18(5): 490-500.		
[4] Hursin M, Downar T (2008) PWR control rod ejection analysis with the MOC code decart. in: Joint International Workshop: Nuclear Technology Society-Needs for Next Generation, Berkley, CA.		
[5] Khafizov R, Poplavskii V, Rachkov V, Sorokin A, Trufanov A, Ashurko YM, Volkov A, Ivanov E, Privezentsev V (2017) Experimental studies of heat exchange for sodium boiling in the fuel assembly model: Safety substantiation of a promising fast reactor. Therm Eng 64(1): 6-14.		
[6] Su GY, Bucci M, McKrell T, Buongiorno J (2016) Transient boiling of water under exponentially escalating heat inputs. Part I: Pool boiling. Int J Heat Mass Tran 96: 667-684.		
[7] Park SD, Lee SW, Kang S, Kim SM, Bang IC (2012) Pool boiling CHF enhancement by graphene-oxide nanofluid under nuclear coolant chemical environments. Nucl Eng Des/Fusion 252: 184-191.		
[8] El-Genk MS (2012) Immersion cooling nucleate boiling of high power computer chips. Energy Convers Manag 53(1): 205-218.		
		۵- فهرست علائم
		علائم انگلیسی
	A_w	مساحت انتقال حرارت، m^2
	Cp_w	ظرفیت حرارتی ویژه سیم گرم کن، kJ/kgC
	C_{sf}	ثابت آلیاژ آهن-آلومینیوم-کروم
	g	شتاب جاذبه، m/s^2
	h	ضریب انتقال حرارت، W/m^2C
	h_{fg}	حرارتی نهان سیال، kJ/kg
	\bar{I}	متوسط جریان الکتریکی، A
	n	ثابت آلیاژ آهن-آلومینیوم-کروم
	Pr	عدد پراتل
	q''	شار حرارتی، W/m^2
	R	مقاومت الکتریکی، Ω
	T	دما، °C
	v	حجم گرم کن، m^3
		علائم یونانی
	α	ضریب دما-مقاومت، $1/0C$
	μ	لزجت دینامیکی، N/m^2
	ρ	چگالی، kg/m^3
	σ	کشش سطحی، N/m
	$\overline{\Delta T}$	متوسط اختلاف پتانسیل، v

- [24] Johnson H (1971) Transient boiling heat transfer to water. *Int J Heat Mass Tran* 14(1): 67-82.
- [25] Isao K, Akimi S, Akira S (1983) Transient boiling heat transfer under forced convection. *Int J Heat Mass Tran* 26(4): 583-595.
- [26] Sakurai A, Serizawa A, Kataoka I, Shiozu M (1978) Transient boiling heat transfer under forced convection. *Kyoto Daigaku Genshi Enerugi Kenkyusho Iho* 16-19.
- [27] Ayoobi A, Khorasani AF, Tavakoli MR, Salimpour MR (2019) Experimental study of the time period of continued heating rate on the pool boiling characteristics of saturated water. *Int J Heat Mass Tran* 137: 318-327.
- [28] Sakurai A, Shiotsu M (1977) Transient pool boiling heat transfer—part 1: Incipient Boiling superheat. *J Heat Trans-T ASME* 99(4): 547-553.
- [29] Kobe S, Dražić G, McGuinness PJ, Stražisar J (2001) The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device, materials. *J Magn Magn Mater* 236(1-2): 71-76.
- [30] Holysz L, Szczes A, Chibowski EJJOC, Science I (2007) Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. *J Colloid Interface Sci* 316(2): 996-1002.
- [31] Pang XF, Deng BJ (2008) The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field. *Physica B Condens Matter* 403(19-20) 3571-3577.
- [32] X. Han, Y. Peng, Z. Ma, E. Optics (2016) Effect of magnetic field on optical features of water and KCl solutions, *127(16) 6371-6376*.
- [33] Wang Y, Zhang B, Gong Z, Gao K, Ou Y, Zhang J (2013) The effect of a static magnetic field on the hydrogen bonding in water using frictional experiments. *J Mol* 1052: 102-104.
- [34] Wang Y, Wei H, Li Z (2018) Effect of magnetic field on the physical properties of water. *Results Phys* 8: 262-267.
- [35] Toledo EJ, Ramalho TC, Magriotis Z (2008) Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models. *J Mol Sci* 888(1-3) 409-415.
- [36] Ishimoto J, Okubo M, Kamiyama S, Higashitani M, Engineering T (1995) Bubble behavior in magnetic fluid under a nonuniform magnetic field. *J Jpn Soc* 38(3): 382-387.
- [37] Lykoudis P, Transfer M (1976) Bubble growth in the presence of a magnetic field. *Int J Heat Mass Tran* 19(12): 1357-1362.
- [38] Kuphaldt TR (2006) Lessons in electric circuits. Volume I-DC.
- [9] Ali AF, El-Genk MS (2012) Spreaders for immersion nucleate boiling cooling of a computer chip with a central hot spot. *Energy Convers Manag* 53(1): 259-267.
- [10] Zhang Y, Lu D, Wang Z, Fu X, Cao Q, Yang Y (2017) Experimental investigation on pool-boiling of C-shape heat exchanger bundle used in PRHR HX. *Appl Therm Eng* 114: 186-195.
- [11] Rosenthal MW (1957) An experimental study of transient boiling. *Nucl Sci Eng* 2(5): 640-656.
- [12] Ervin JS, Merte H, Keller R, Kirk K (1992) Transient pool boiling in microgravity. *Int J Heat Mass Tran* 35(3): 659-674.
- [13] Pavlenko A, Tairov E, Zhukov V, Levin A, Tsoi A (2011) Investigation of transient processes at liquid boiling under nonstationary heat generation conditions. *J Eng Thermophys-Rus* 20(4): 380-406.
- [14] Auracher H, Marquardt W (2002) Experimental studies of boiling mechanisms in all boiling regimes under steady-state and transient conditions. *Int J Therm Sci* 41(7): 586-598.
- [15] Park J, Fukuda K, Liu Q (2017) Critical heat flux phenomena depending on pre-pressurization in transient heat input. in: AIP Conference Proceedings, AIP Publishing.
- [16] Shiotsu M (1977) Transient Pool boiling heat transfer. *J Heat Trans-T ASME* 99: 547.
- [17] Li Y, Fukuda K, Liu Q (2017) Steady and Transient CHF in Subcooled Pool Boiling of Water under Sub-atmospheric Pressures, Marine engineering. *Journal of the Japan Institute of Marine Engineering* 52(2): 245-250.
- [18] Sakurai A, Shiotsu M (1977) Transient pool boiling heat transfer—part 2: Boiling heat transfer and burnout. *J Heat Trans-T ASME* 99(4): 554-560.
- [19] Sharma VI, Buongiorno J, McKrell TJ, Hu LW (2013) Experimental investigation of transient critical heat flux of water-based zinc-oxide nanofluids. *Int J Heat Mass Tran* 61: 425-431.
- [20] Kwark SM, Kumar R, Moreno G, You SM (2012) Transient characteristics of pool boiling heat transfer in nanofluids. *J Heat Trans-T ASME* 134(5): 051015.
- [21] Tachibana F, Akiyama M, Kawamura H (1968) Heat transfer and critical heat flux in transient boiling.(i) an experimental study in saturated pool boiling. *J Nucl Sci Technol* 5(3): 117-126.
- [22] Derewnicki K (1985) Experimental studies of heat transfer and vapour formation in fast transient boiling. *Int J Heat Mass Tran* 28(11): 2085-2092.
- [23] Hata K, Masuzaki S (2010) Influence of heat input waveform on transient critical heat flux of subcooled water flow boiling in a short vertical tube. *Nucl Eng Des/Fusion* 240(2): 440-452.

- Cambridge, Mass.: MIT Division of Industrial Cooperation.
- [41] Zuber N (1963) Nucleate boiling. The region of isolated bubbles and the similarity with natural convection. *Int J Heat Mass Tran* 6(1): 53-78.
- [39] Moffat RJ (1988) Describing the uncertainties in experimental results. *Exp Therm Fluid Sci* 1(1): 3-17.
- [40] Rohsenow WM (1951) A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids,