مطالعه تجربی از کوئنچ میله های استیل در دو نانو سیال SiO_2 و TiO_2

عارف رحیمیان[۱]، حسین کاظمی نژاد[۲]، حسین خلفی[۲]، سید محمد میروکیلی[۱]، اعظم اخوان[۲]، حسن اسماعیلی[۱]، محمد امین امیرخانی دهکردی[۱]

۱- پژوهشکده‌ی راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

۲- پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

جهت بررسی پدیده کوئنچ، میله هایی از جنس استیل تا دمای نزدیک 800 درجه سانتیگراد رسانیده شده و به صورت متوالی وارد دو نانو سیال میگردند. جهت بررسی میزان پوشش‌دهی نانو ذرات بر سطح، عکس‌های SEM گرفته شده است. در هر بار کوئنچ، لایه هایی از نانو ذرات بر سطح میله ها قرار گرفته که نتایج حاصل از این پوشش دهی ها حاکی از تغییر الگوی کوئنچ و همچنین افزایش سرعت خنک سازی میباشد. سرعت خنک سازی از 80 ثانیه برای میله بدون پوشش به 40 ثانیه برای میله با پوشش SiO_2 افزایش یافته است.

کلید واژه ها: کوئنچ، نانو سیال و SEM

مقدمه

کوئنچ به قرار دادن جسمی با دمایی بسیار بالا در یک سیال با دمای خیلی پایین تر اتلاق می‌گردد. پارامترهای بسیاری از جمله دمای ابتدایی سطح، خصوصیات سطح، جهت سطح و اغتشاشات در سطح بر کوئنچ تاثیر می‌گذارد. پدیده کوئنچ در طبیعت و صنعت اتفاق می‌افتد. برخی از کاربرد های صنعتی شامل سختی فلزات و شکل‌دهی، فریز آنی، خنک سازی سوپرکانداکتورها و ایمنی راکتورهای هسته‌ای می‌باشد.

در تمامی راکتورهای هسته‌ای آب سبک شامل راکتورهای PWR، PHWR و BWR پدیده کوئنچ نقش اساسی بازی می‌کند. در راکتورهای آب سبک زمانی که حادثه از دست رفتن خنک کننده اتفاق می‌افتد دمای سطح غلاف به واسطه انتقال حرارت کم به شدت افزایش می‌یابد. در این زمان آب به واسطه سیستم های تزریق ایمنی جهت حفظ موجودیت قلب به راکتور تزریق می‌گردد. به خاطر دمای بالای غلاف در ابتدا سطح آن تر نمی‌گردد و لایه ای از بخار میان آب و سطح غلاف قرار می‌گیرد. در این صورت ابتدا جوشش فیلمی و مینیمم شار حرارتی و

یا نقطه لیدن فراست اتفاق می‌افتد و به ترتیب جوشش گذرا ، شار حرارت بحرانی ، جوشش هسته‌ای و جریان تک فاز اتفاق می‌افتد.

در پیشینه تعریف واحدی برای دمای کوئنچ و ترشوندگی مجدد وجود ندارد. کارباجو [۱]هر دو را یکی دانسته و آن هم دمایی است که آب به سطح می‌رسد. برخی از پژوهشگران نقطه لیدن فراست را به عنوان نقطه ترشوندگی مجدد [۲, ۳]و برخی دیگر تعریف واحدی برای دو نقطه ندارند[۴, ۵]. آنها دمای کوئنچ را در جایی که شیب منحنی کوئنچ به بیشترین مقدار خود می‌رسد و دمای خنک شوندگی مجدد را در زمانی که آب به سطح می‌رسد تعریف نمودند. بنابراین دمای خنک شوندگی مجدد کمتر از دمای کوئنچ می باشد.

به هر حال نرخ انتقال حرارت در پروسه کوئنچ محدود به اثرات لیدن فراست می‌باشد. دمای مینیمم در جوشش فیلمی در برخی مواقع به عنوان دمای لیدن فراست معرفی می‌گردد. مطالعاتی جهت کاهش اثرات لیدن فراست و بهبود انتقال حرارت موجود می‌باشد که مثال هایی از این نوع، لرزش صفحات هیتر و افزایش سطح حرارتی می‌باشد.

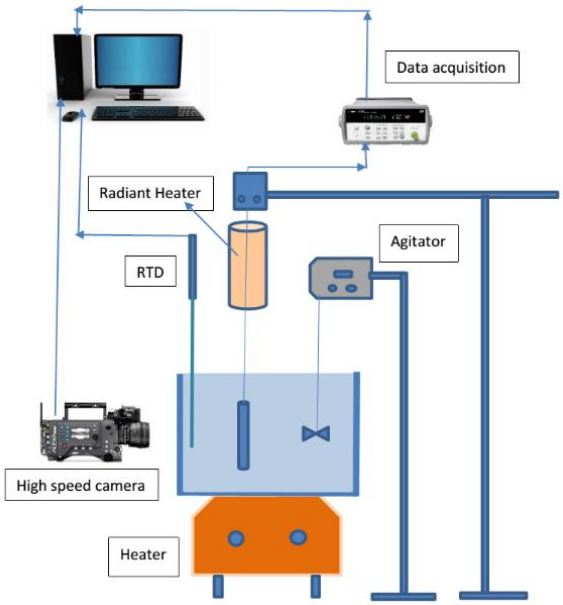
در راستای بهبود ضریب انتقال حرارت و افزایش سرعت کوئنچ با استفاده از نانو سیالات مطالعاتی صورت پذیرفته است. کیم و همکاران [۶] و کیم و همکاران [۷] پدیده کوئنچ را برای میله‌های استوانه‌ای و از جنس استیل و زیرکونیوم در نانو سیالات مختلف بررسی نمودند، در این مطالعات مشاهده شد که سرعت کوئنچ با ورود های مکرر در نانو سیالات بیشتر شده و به عبارت دیگر ضریب انتقال حرارت بهبود یافته است. در این مطالعات نشان داده شد که نانو سیالات مختلف با توجه به اینکه همه سرعت کوئنچ را افزایش داده اند اما میزان تغییرات متفاوتی داشته‌اند.

بابو و کومار [۸]نیز به صورت تجربی به بررسی اثرات اغتشاشات و غلظت نانو سیال بر سرعت کوئنچ و ضریب انتقال حرارت میله‌هایی از جنس استیل پرداختند و مشاهده کردند که میزان شار حرارت بحرانی کاهش یافته و تغییراتی در ضریب انتقال حرارت ایجاد گردیده است.

در این مطالعه پوشش هایی از دو نانو ذره بر سطوح استیل ایجاد شده و تغییرات سرعت کوئنچ یا خنک سازی مورد مطالعه قرار گرفته است. عکس‌های SEM جهت بررسی نشست نانو ذرات و همچنین عکس‌های با دوربین سرعت بالا نیز جهت بررسی رژیم های مختلف جوشش گرفته شده است.

روش انجام آزمایش

در کوئنچ‌های مکرر میله، میزانی از نانو ذره در هر بار بر سطح میله می‌نشیند که این می‌تواند به علت تلاطم ایجاد شده در نواحی مختلف جوشش و اختلاف غلظت نانوذرات موجود در سیال و سطح میله باشد. به عبارت دیگر پوشش‌دهی نانوذرات به صورت انتقال جرم ناشی از اختلاف غلظت و همچنین به صورت مکانیکی خواهد بود. بنابراین با افزایش تعداد دفعات ورود میله به درون نانوسیال پوشش‌دهی حاصل از اختلاف غلظت کاهش خواهد یافت اما پوششدهی حاصل از تلاطم جوشش برقرار خواهد بود. شمای مدار آزمون کوئنچ در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱ شمای مدار آزمون کوئنچ استفاده شده

در بدست آوردن دما و شار حرارتی سطح از روش هدایت حرارتی معکوس[۱] استفاده شده است. معادله حاکم برای انتقال حرارت یک بعدی گذرا به صورت زیر باشد:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (1)$$

برای محاسبه دمای سطح و شار حرارتی در یک زمان معین ، دماهای محاسبه شده در هر زمان با زمان آینده مقایسه می شود. S مجموع مربع خطاهایی است که باید به حداقل برسد.

[۱] Inverse Heat Conduction Method

$$S = \sum_{f=m+1}^{m+n_f} \sum_{j\equiv i;i=1}^{n_T} \left(T_i^{*,f} - T_j^f \right)^2 \quad (2)$$

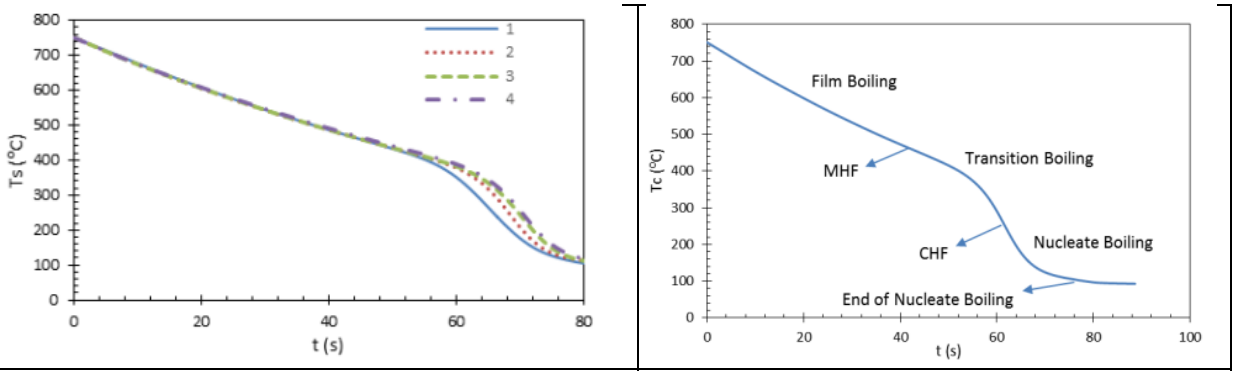
شار گرما ، qm به صورت زیر بیان می شود:

$$q^m = q^{m-1} + \frac{\sum_{f=m+1}^{m+n_f} \sum_{j\equiv i,i=1}^{n_T} \left(T_i^{*,f} T_j^f \right).\phi_i^f}{\sum_{f=m+1}^{m+n_f} \sum_{i=1}^{n_{T^*}} \left(\phi_i^f \right)^2} \quad (3)$$

نتایج

اثرات کوئنچ های متوالی

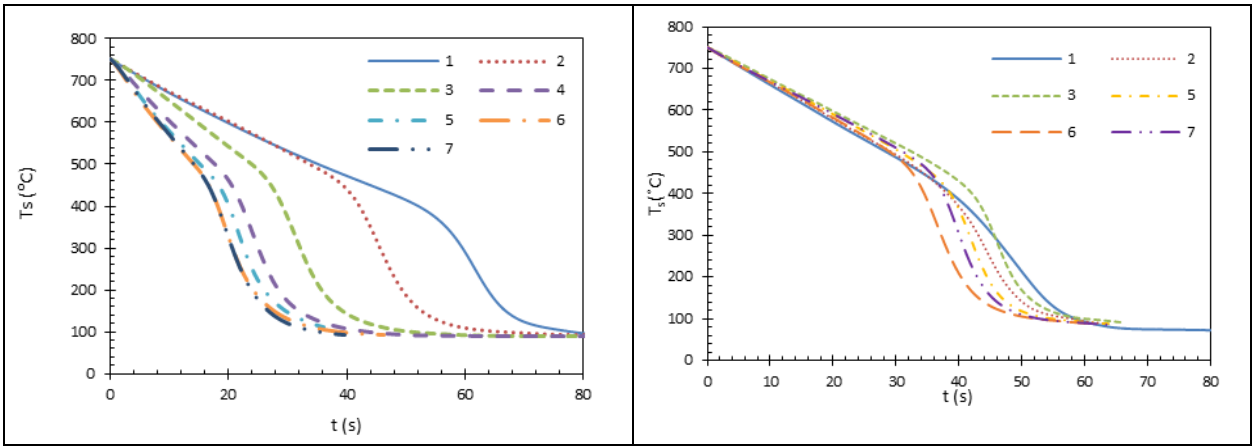
با استفاده از منحنی کوئنچ می توان تمام نواح و رژیم های مختلف جوشش را مشاهده نمود (شکل ۲ الف). قبل از آزمایشات نانوسیال، کوئنچ متوالی میله به صورت عمودی در آب خالص صورت پذیرفت که نتایج این آزمایشات در شکل ۲ ب نشان داده شده است. نتایج بدست آمده تکرار پذیر می‌باشند و نمودارها نتایج تقریبا یکسانی را نشان می‌دهند.



(الف) (ب)

شکل ۲ (الف) شمایی از منحنی کوئنچ و رژیم های انتقال حرارت جوشش در آن (ب) منحنی کوئنچ های مکرر میله در آب خالص

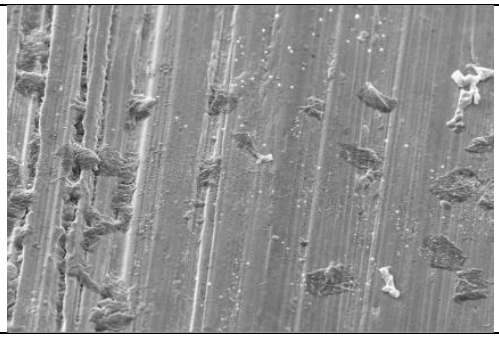
شکل ۳ نمودار کوئنچ میله استیل که به صورت عمودی و مکرر در نانوسیالات TiO_2 و SiO_2 وارد شده را نشان می‌دهد. در این نمودار تغییرات TiO_2 در ناحیه جوشش فیلمی ناچیز می‌باشد. با این حال تغییرات در ناحیه جوشش گذرا و جوشش هسته‌ای با تکرار کوئنچ زیاد می‌باشد. در کوئنچ میله عمودی در نانوسیال SiO_2 نواحی مختلف جوشش از جوشش فیلمی تا جوشش هسته‌ای در تکرارهای مختلف تغییر کرده و سرعت کوئنچ افزایش یافته است.



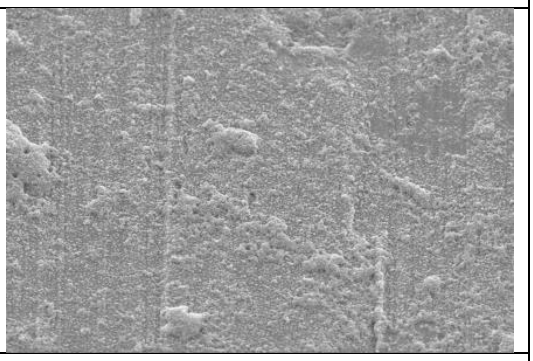
(ب) (الف)

شکل ۳ منحنی کوئنچ های مکرر میله استیل در نانوسیالات (الف) TiO2 (ب) SiO2

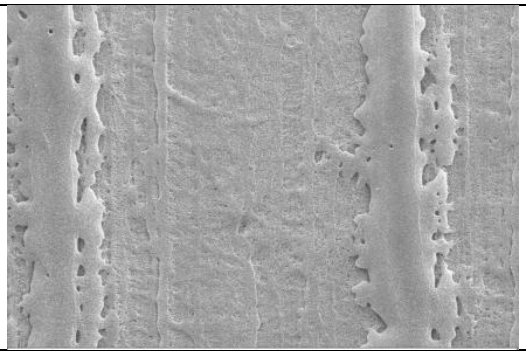
چنانچه در شکل ۳ مشاهده می‌گردد با توجه به اینکه در هر کوئنچ مقداری از نانوذرات درون نانوسیال بر میله می‌نشیند و به عبارتی از میزان ذرات در نانوسیال کم می‌شود، اما در هر کوئنچ نسبت به کوئنچ دفعه قبل زمان خنک‌شدن یعنی گذر از تمام فرآیندهای جوشش کمتر شده است. البته دمای نانوسیال در تمام آزمایشات در دمای اشباع می‌باشد. بنابراین تمام تغییرات ایجاد شده در منحنی کوئنچ به تغییرات سطح وابسطه می‌باشد. یکی دلایلی که سبب افزایش سرعت کوئنچ شده، افزایش پوشش‌دهی نانو ذرات بر سطح میله می‌باشد. جهت بررسی میزان پوشش‌دهی نانو ذرات بر سطح، عکس‌های SEM گرفته شده است (شکل ۴).



(الف)



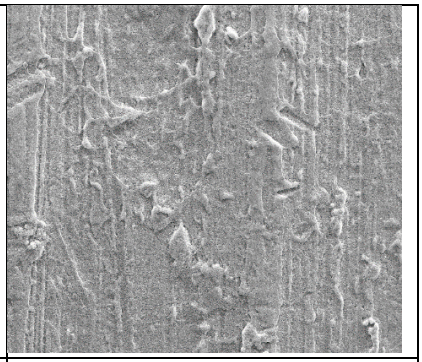
(ب)



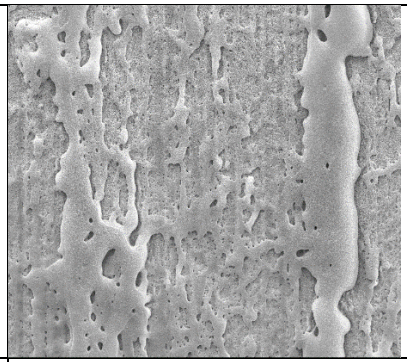
(ج)

شکل ٤ عکسهای SEMگرفته شده از سطوح میله استیل (الف) بدون پوشش و پوشش داده شده با (ب) TiO_2و (ج) SiO_2

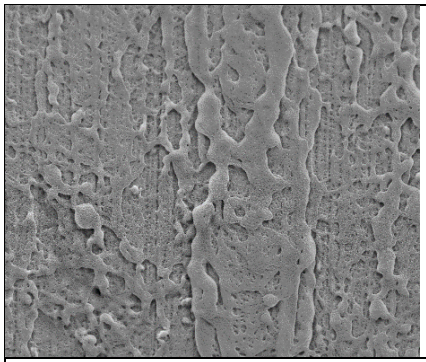
جهت مشاهده افزایش نشست نانو ذرات بر سطح میله در تکرارهای مکرر کوئنچ، عکس‌های SEM در سه زمان یعنی اولین، سومین و پنجمین بار ورود میله به نانوسیال گرفته شده است (شکل ۵). با افزایش تعداد ورود میله به درون نانوسیال میزان ضخامت ذرات بر آن نیز افزایش یافته است.



(الف)



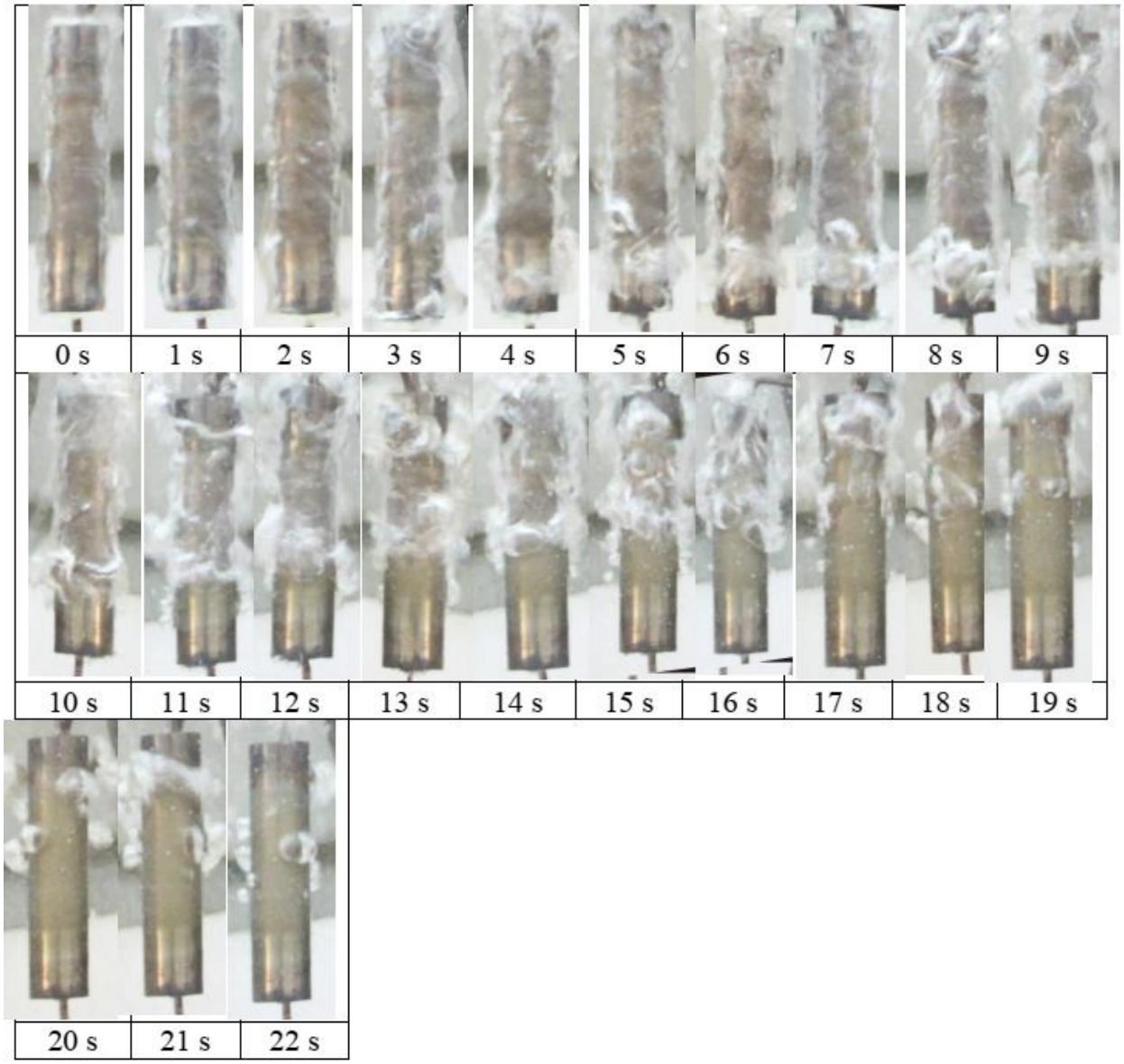
(ب)



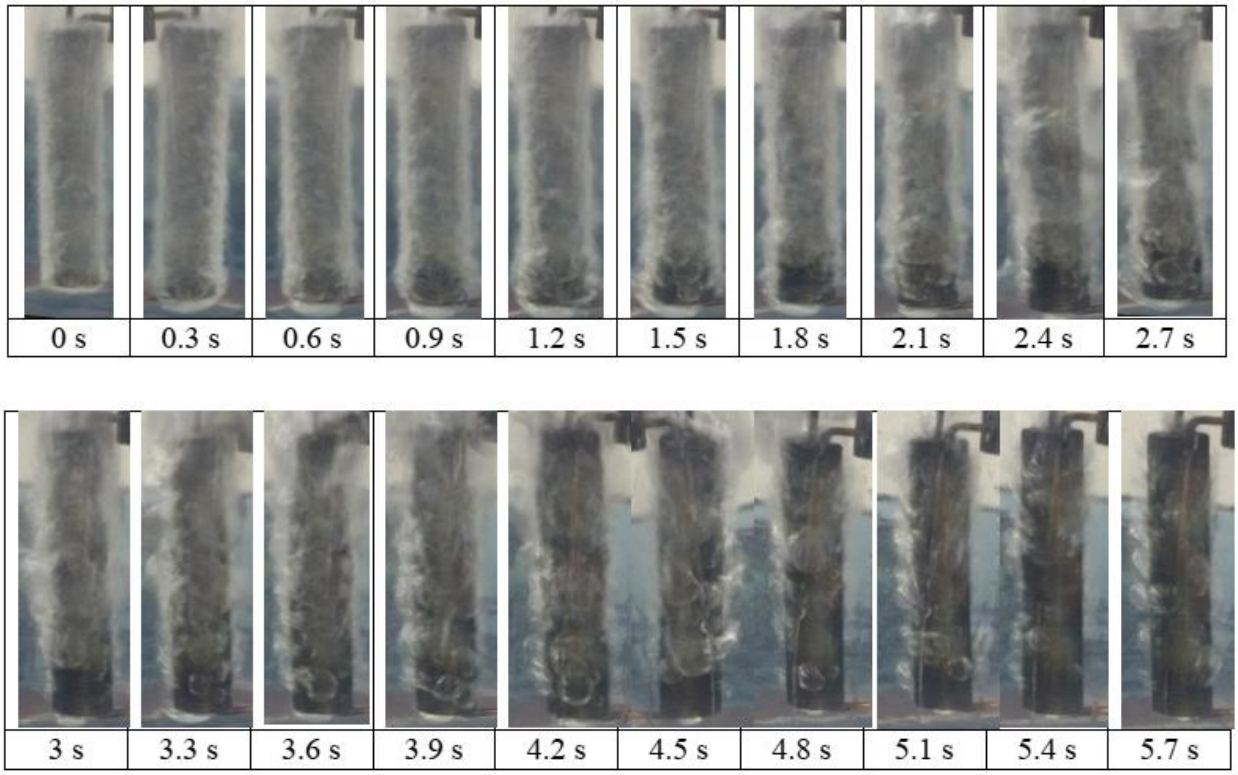
(ج)

شکل ۵ عکس های SEM از سطوح پوشش داده در (الف) یک بار (ب) سه بار (ج) پنج بار کوئنچ در نانوسیال SiO_2

جهت مشاهده بهتر پدیده کوئنچ در آب خالص و نانوسیال SiO_2 از جوشش فیلمی تا رسیدن به سیال تک فاز در نزدیکی سطح میله عکس برداری شده است (شکل ۶). به علت غیر شفاف بودن دیگر نانوسیالات نمی‌توان از فرآیند کوئنچ در آنها عکس برداری نمود. در آب خالص فرآیند خروج از جوشش فیلمی از پایین میله شروع شده و به تدریج به بالای میله حرکت می کند، تا اینکه تمام میله از جوشش فیلمی خارج گردد. کوئنچ میله در نانوسیال SiO_2 روند متفاوتی دارد، به این صورت که قبل از اینکه فرآیند خروج از جوشش فیلمی از پایین میله شروع گردد، کل میله به یکباره از جوشش فیلمی خارج می‌گردد و در یک فرایند سریع و پر تلاطم لایه بخار در کل طول میله از بین می‌رود.


0 s
1 s
2 s
3 s
4 s
5 s
6 s
7 s
8 s
9 s
10 s
11 s
12 s
13 s
14 s
15 s
16 s
17 s
18 s
19 s
20 s
21 s
22 s

(الف)



(ب)

شکل ٦ (الف) کوئنچ در آب خالص (ب) کوئنچ در نانوسیال SiO2

نیشیو و همکاران [۹] دو حالت فرو پاشی لایه بخار در کوئنچ را در نظر گرفتند؛ یکی فرآیند تدریجی خروج از جوشش فیلمی و دیگری خروج یکباره از جوشش فیلمی می‌باشد. کوئنچ در آب خالص مطابق حالت اول یعنی خروج تدریجی از جوشش فیلمی می‌باشد و کوئنچ در نانوسیال SiO_2 مطابق با حالت دوم یعنی خروج یکباره از جوشش فیلمی می‌باشد.

سرعت کوئنچ در حوادث راکتورهای هسته‌ای پارمتر بسیار مهمی می‌باشد. مطالعات تجربی و تحلیلی بسیاری در نرخ کوئنچ و ترشدن مجدد آب و بخار صورت پذیرفته است. در مطالعه حاضر، در تمامی منحنی‌های کوئنچ که بدان‌ها اشاره گردیده است یک حالت حدی وجود دارد که سرعت خنک سازی به یک حالت ماکزیمم رسیده و با افزایش دفعات کوئنچ تغییری در سرعت آن ایجاد نخواهد گشت.

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از بخش کوئنچ به صورت زیر می‌باشد:

- با استفاده از پدیده کوئنچ می‌توان تمامی نواحی جوشش (از جوشش فیلمی تا جوشش هسته‌ای) را مورد بررسی قرار داد و همچنین با کوئنچ‌های مکرر در نانو سیالات می‌توان علاوه بر پدیده جوشش، اثرات پوشش‌دهی نانو ذرات را نیز مشاهده نمود.
- منحنی‌های کوئنچ مکرر میله‌های استیل و زیرکونیوم در نانو سیالات نشان از افزایش سرعت کوئنچ داشته که در میان چهار نانو سیال مورد استفاده، نانو سیال SiO_2 بیشترین میزان (در حدود دو برابر) افزایش سرعت را داشته است.
- در کوئنچ‌های مکرر یک میزان حدی در افزایش سرعت خنک سازی وجود دارد که این میزان با افزایش ضخامت پوشش تغییری نمی‌نماید.
- روند کوئنچ میله لخت با میله پوشش داده شده متفاوت می‌باشد به طوری که در میله لخت کوئنچ به صورت تدریجی از پایین به بالا و در میله پوشش داده شده کوئنچ به صورت یکپارچه در تمام طول میله صورت خواهد پذیرفت.

مراجع

[۱] J. J. Carbajo, "A study on the rewetting temperature," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 84, no. 1, pp. 21-52, 1985.

[۲] B. Piggott and D. Porthouse, "A correlation of rewetting data," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 32, no. 2, pp. 171-181, 19۷۵.

[۳] T. Lubben, F. Frerichs, and H.-W. Zoch, "Rewetting behaviour during immersion quenching," *Strojarstvo: Casopis za Teoriju i Praksu u Strojarstvu*, vol. 53, no. 1, pp. 45-52, 2011.

[۴] F. Gunnerson and A. Cronenberg, "On the minimum film boiling conditions for spherical geometries," *ASME J. Heat Transfer*, vol. 102, no. 2, pp. 335-341, 1980.

[۵] F. Gunnerson and T. Yackle, "Quenching and rewetting of nuclear fuel rods," *Nuclear Technology*, vol. 54, no. 1, pp. 113-117, 1981.

[۶] McKrell, J. Buongiorno, and L.-w. Hu, "On the quenching of steel .H. Kim, G. DeWitt, T and zircaloy spheres in water-based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 35, no. 5, pp. 427-438, 2009.

[۷] H. Kim, J. Buongiorno, L.-W. Hu, and T. McKrell, "Nanoparticle deposition effects on the minimum heat flux point and quench front speed during quenching in water-based

alumina nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 7, pp. 1542-1553, ۲۰۱۰.

[۸] K. Babu and T. P. Kumar, "Effect of CNT concentration and agitation on surface heat flux during quenching in CNT nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 1, pp. 106-117, 2011.

[۹] *Nishio, S., Uemura, M., & Sakaguchi, K., Film Boiling Heat Transfer and Minimum-Heat-Flux (MHF)-Point Condition in Subcooled Pool Boiling: Heat Transfer, Power, Combustion, Thermophysical Properties, JSME international journal, 30(266), 1274-1281, 1987.*