



بررسی نقش سامانه خنک‌کنندگی اضطراری قلب در جلوگیری از آسیب دیدن سوخت در راکتورهای تحقیقاتی سوخت صفحه‌ای

بوستانی، احسان*^(۱) - خاکشورنیا، صمد^(۲)

^(۱) سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

^(۲) سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگر

چکیده:

حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده در اثر وقوع یک شکستگی شدید در یک راکتور سوخت صفحه‌ای بررسی شده است. در صورت لخت شدن قلب، مقداری از انرژی تولید شده در سوخت به غلاف و از آنجا به محیط اطراف منتقل می‌شود و بقیه این انرژی صرف گرم شدن سوخت و غلاف می‌شود. در نظر گرفتن این نکته ضروری است که دماهایی بسیار کمتر از دمای ذوب آلومینیوم، که ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد است، هم سبب آسیب جدی به سوخت خواهد شد. از این رو باید تجهیزات ایمنی راکتور به گونه‌ای باشد که از رسیدن دمای سوخت به محدوده ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، که با دکردگی سوخت رخ می‌دهد، پیشگیری کند. **کلمات کلیدی:** راکتور تحقیقاتی، سوخت صفحه‌ای، خنک‌کننده اضطراری قلب، حادثه از دست دادن خنک‌کننده.

مقدمه:

حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده در اثر وقوع یک شکستگی شدید در راکتور زمانی قابل تصور است که براثر یک حادثه شدید مثل زلزله، همه یا بخشی از خنک‌کننده تخلیه و قلب لخت شود. عواقب این حادثه، در صورتی که خیلی شدید نبوده و تنها منجر به با دکردگی سوخت شود، غیرقابل استفاده شدن سوخت و در صورت شدید بودن، ذوب شدن سوخت است. چگونگی تغییر دما در صفحه سوخت برای این راکتور ۱ مگاواتی "نور" الجزایر انجام شده است. این بررسی برای حالتی است که این راکتور قبل از حادثه به مدت ۲ روز در حال کار بوده و تخلیه آب از استخر ۲۵۰ ثانیه طول کشیده است. در نتیجه این حادثه، دمای غلاف سوخت تا ۵۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد [۱]. مطالعه‌ای دیگر برای راکتور سوخت صفحه‌ای دانشگاه توکیو انجام گرفته است. این راکتور از نوع سوخت صفحه‌ای، تانکی با قدرت نامی ۵ مگاوات و کندکننده آب سبک است. وقوع حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده و خنک شدن راکتور با همرفت طبیعی هوا برای حالتی که راکتور به مدت ۱۵۵ روز با قدرت ۵ مگاوات در حال کار بوده، بررسی شده است. پس از بروز



حادثه، خنک‌کنندگی طبیعی با هوا باید به مدت بیشتر از ۳ هفته جهت سرد شدن کافی قلب ادامه داشته باشد [۲]. حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده در راکتور تحقیقاتی شماره ۱ یونان بررسی شده است. این راکتور از نوع سوخت صفحه‌ای از جنس اکسید سیلیسیم و قدرت نامی ۵ مگاوات است که برای مدت زمان نامحدود در حال کار بوده است. در صورت وقوع بدترین حادثه، زمان شروع لخت شدن قلب ۱۶ دقیقه، زمان لخت شدن کامل آن ۲۳ دقیقه و ذوب قلب در ۲ ساعت و ۱۵ دقیقه پس از لخت شدن قلب رخ خواهد داد [۳]. با توجه به اهمیت ایمنی در راکتورهای تحقیقاتی، تحلیل یک‌بعدی حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده در یک راکتور تحقیقاتی سوخت صفحه‌ای انجام و نیاز به سامانه خنک‌کنندگی اضطراری بررسی شده است.

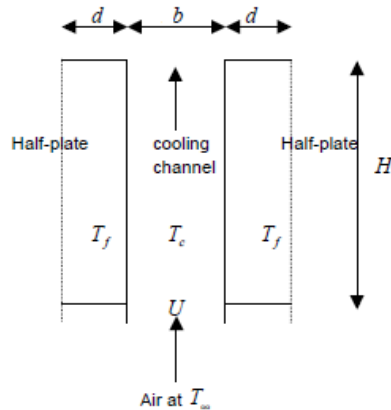
روش کار :

یکی از مهمترین مولفه‌ها میزان گرمای پسمان تولید شده در سوخت پس از بروز حادثه و خاموشی راکتور است. رابطه وی-ویگنر برای محاسبه گرمای پسمان برای زمان‌های بالاتر از ۱۰ ثانیه پس از خاموشی راکتور است [۴].

$$P_t = 0.0622 P_0 \times [t^{-0.2} - (t + T)^{-0.2}] \quad (1)$$

در رابطه (۱)، P_0 توان اولیه راکتور، T و t زمان روشن بودن و پس از خاموشی راکتور به ثانیه است.

گرمای پسمان تولید شده در قلب راکتور مربوط به همه صفحه‌های سوخت است که برای داغ‌ترین کانال می‌توان پس از به‌دست آوردن انرژی متوسط در ضریب قله شعاعی ضرب کرد. ضریب قله کل، حاصل ضرب سه کمیت ضریب شعاعی، ضریب محوری و یک ضریب مهندسی برای ایمنی در نظر گرفتن بدترین حالت است. برای قلب تعادلی حاوی ۲۸ مجموعه سوخت استاندارد، این اعداد به ترتیب ۱/۶۹، ۱/۳۱۵ و ۱/۱۵ است که حاصل ضرب آن عدد ۲/۵۵ خواهد بود [۵]. محاسبه ضریب قله شعاعی برای قلب تعادلی انجام شده که عدد ۱/۳ حاصل این محاسبه است. در این تحقیق از عدد ۱/۵ به عنوان ضریب قله شعاعی برای دمای متوسط گرم‌ترین صفحه قلب تعادلی استفاده شده است. برای بررسی فرایند انتقال حرارت از سوخت به هوا، همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، معادله پایداری انرژی برای سوخت و هوای اطراف آن نوشته شده است.



شکل ۱. انتقال گرما از صفحه‌های سوخت توسط همرفت طبیعی هوا

همان‌گونه که از شکل ۱ دیده می‌شود، b پهنای مسیر خنک‌کننده، d نیم پهنای سوخت، H ارتفاع سوخت، T_c دمای خنک‌کننده و T_f دمای سوخت است. مقداری از گرمای پسمان تولید شده در سوخت از طریق همرفت طبیعی با هوای بین صفحات سوخت و پدیده تابش از صفحات سوخت منتشر می‌شود و بقیه صرف گرم شدن سوخت می‌شود. ضریب انتقال حرارت از سوخت به هوا (h) به صورت رابطه (۵) و ضریب تابش به هوا با استفاده از قابلیت نشر غلاف (ϵ) در نظر گرفته شده است. اثر همرفت طبیعی هوا در مساله، ایجاد یک جریان خنک‌کننده روبه بالا بین صفحه‌های سوخت است که سبب حرکت رو به بالای هوای بین این صفحه‌ها با سرعت داده شده در رابطه (۴) خواهد شد. این پدیده سبب برداشت و انتقال به بیرون بخشی از گرمای تولید شده در سوخت می‌شود که به صورت جمله دوم در سمت راست رابطه (۲) ظاهر شده است [۳].

$$T_{f2} = T_{f1} + \frac{\Delta t}{\rho_f C_f d} \left[\frac{P(1)}{A} - h(1)(T_{f1} - T_{c1}) - \epsilon \sigma (T_{f1}^4 - T_c^4) \right] \quad (2)$$

در رابطه بالا h , A , ϵ , σ , T_a , T_f و C_f به ترتیب برای ضریب انتقال همرفت طبیعی برای سطح غلاف، مساحت غلاف، قابلیت نشر غلاف، ثابت استفان بولتزمن ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$), دمای محیط، دمای سوخت و ظرفیت گرمایی ویژه سوخت استفاده شده است. دمای خنک‌کننده به صورت رابطه (۳) است.

$$T_{c2} = T_{c1} + \frac{2h}{\rho_c C_c b} (T_{f1} - T_{c1}) \Delta t - \frac{2u}{H} (T_{c1} - T_a) \Delta t \quad (3)$$

در رابطه بالا C_c , ρ_c , H , b و u برای ظرفیت گرمایی ویژه خنک‌کننده، چگالی خنک‌کننده، پهنای کانال خنک‌کننده، ارتفاع سوخت و سرعت خنک‌کننده استفاده شده است.



ضریب انتقال همرفت به عواملی مثل چگالی سیال، سرعت و دمای سیال، دمای سطح، ضریب هدایت گرمایی، گرمای ویژه، شکل هندسی و شرایط جریان وابسته است. سرعت داده شده در معادله (۳) با استفاده از برابری نیروی شناوری با نیروی گرانش به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود [۲].

$$u = \frac{g \beta b^2 (T_f - T_c)}{8\nu} \quad (4)$$

در رابطه بالا g ، β و ν نشان‌دهنده شتاب گرانش، ضریب حجمی انبساط و لزجت سینماتیک است. ضریب انتقال حرارت داده شده در معادله های بالا به صورت رابطه (۵) داده می‌شود [۲].

$$h = Pr \frac{\lambda_a g \beta b^2 (T_f - T_c) \xi^2}{\nu^2} \times \frac{\xi}{l} \quad (5)$$

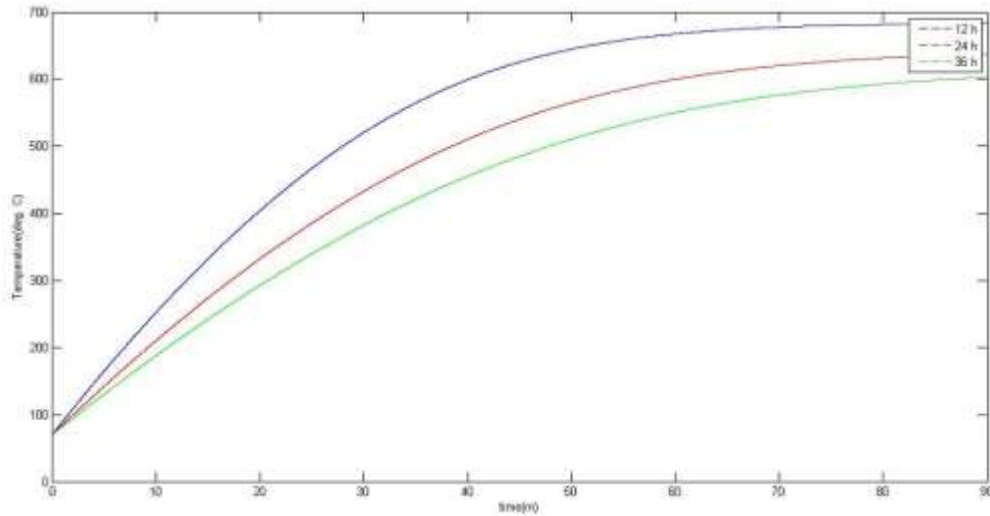
در رابطه بالا Pr ، ξ_a ، λ ، ξ و l برای عدد پرانتل، رسانش حرارتی سوخت، طول مشخصه و ارتفاع سوخت است. عدد پرانتل نسبت تغییرات سرعت به دما است و با رابطه زیر نمایش داده می‌شود [۶].

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (6)$$

در رابطه بالا ν ، α ، C_p ، μ و k به ترتیب لزجت سینماتیک، ضریب پخش گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه، لزجت دینامیک و ضریب هدایت گرمایی است. دمای اولیه سوخت، خنک‌کننده و محیط به عنوان شرایط اولیه مساله به ترتیب ۷۰، ۵۵ و ۳۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج :

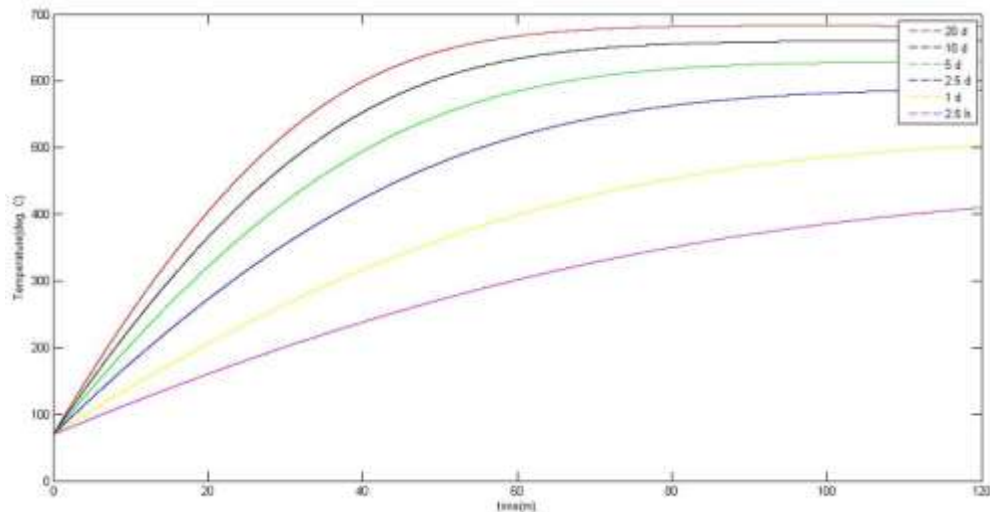
نتایج حاصل برای دمای متوسط داغ‌ترین مجموعه سوخت راکتور تحقیقاتی داده شده است. حل دقیق‌تر می‌تواند شامل در نظر گرفتن ضریب‌قله محوری، برداشت حرارت توسط شبکه نگهدارنده و دیگر متغیرها باشد. از آنجاکه بدترین حادثه زمانی است که راکتور با توان نامی در حال کار باشد، در این مطالعه توان راکتور ۵ مگاوات در نظر گرفته شده است و اثر عوامل دیگر با فرض بالاترین توان بررسی شده است. اثر زمان تاخیر در اولین گام بررسی می‌شود، در صورتی که راکتور برای مدت زمان ۲۰ روز (معادل با ۱۷۲۸۰۰۰ ثانیه) در توان نامی در حال کار بوده و حادثه رخ دهد، به طوری که همزمان سبب خاموشی راکتور هم شده باشد، نمودار مربوط به دمای متوسط داغ‌ترین مجموعه سوخت برای سه زمان خنک‌کنندگی ۱۲، ۲۴ و ۳۶ ساعت در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. تاثیر زمان تاخیر بر دمای سوخت

همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای این شرایط، ۲۴ ساعت خنک‌کنندگی برای جلوگیری از رسیدن دمای سوخت به دمای ذوب کافی است.

تاریخچه کارکرد قلب از دیگر عوامل تعیین‌کننده در دمای نهایی سوخت است. دمای نهایی سوخت برای راکتوری با تاریخچه‌های کاری متفاوت، که با توان نامی در حال کار است و خنک‌کنندگی تا ۱۲ ساعت پس از بروز حادثه برقرار است، محاسبه و در شکل ۳ نشان داده شده است.

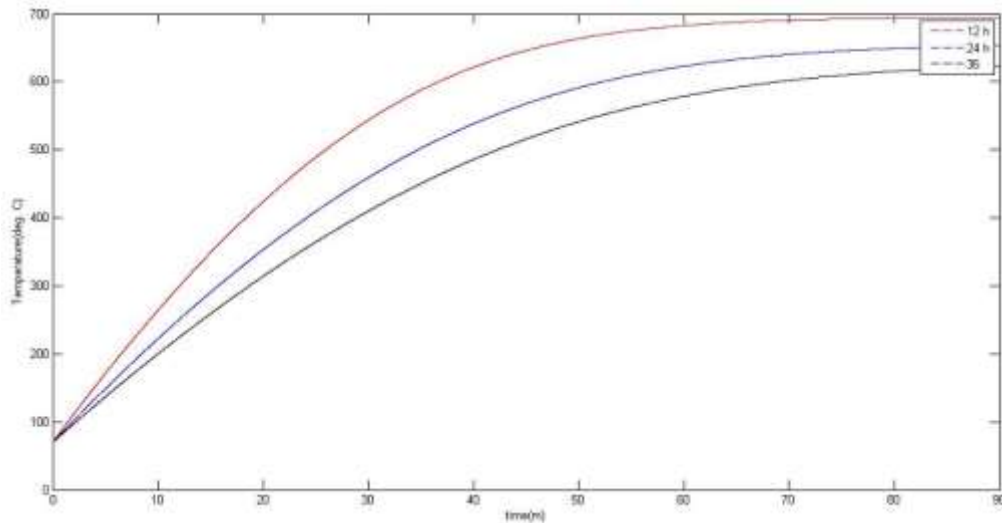


شکل ۳. دمای سوخت برای زمان‌های متفاوت کارکرد راکتور



همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در صورتی که راکتور در توان نامی ۵ مگاوات در حال کار بوده و خنک‌کنندگی به مدت ۱۲ ساعت پس از بروز حادثه و خاموشی راکتور برقرار باشد، در صورتی دمای سوخت به دمای ذوب نخواهد رسید که تاریخچه کاری راکتور برای مدت زمان کمتر از ۱۰ روز باشد. برای زمان‌های بیشتر از ۱۰ روز، دمای سوخت از نقطه ذوب ۶۶۰ درجه سلسیوس فراتر خواهد رفت.

برای در نظر گرفتن بدترین حالت ممکن، دمای سوخت برای حالتی که راکتور به مدت ۳۰ روز در توان نامی در حال کار بوده و حادثه از دست دادن کامل خنک‌کنندگی رخ می‌دهد بررسی شده است. دمای سوخت برای سه زمان تاخیر ۱۲، ۲۴ و ۳۶ ساعت محاسبه و در شکل ۴ داده شده است.



شکل ۴. دمای سوخت برای ۳۰ روز کار در توان نامی و چند زمان تاخیر متفاوت

همان‌طور که از شکل ۴ دیده می‌شود، برای این حادثه در صورتی دمای متوسط گرم‌ترین صفحه سوخت کمتر از ۶۶۰ درجه سلسیوس است که خنک‌کنندگی قلب با آب به مدت بیشتر از ۲۴ ساعت پس از وقوع حادثه و خاموشی راکتور ادامه داشته باشد.

بحث و نتیجه گیری :

بررسی مقدماتی حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده در راکتور تحقیقاتی و انتقال گرمای پسمان تولید شده در صفحه‌های سوخت مربوط به گرم‌ترین مجموعه سوخت این راکتور انجام شده است. محدوده دمایی ۴۰۰ درجه سانتیگراد می‌تواند سبب آسیب دیدن و غیر قابل استفاده شدن سوخت شود. تجهیزات راکتور باید به گونه‌ای باشد که در صورت وقوع هرگونه رخدادی از نزدیک شدن دمای سوخت به این درجه جلوگیری شود. در این مطالعه برخی ساده‌سازی و تقریب‌ها به کار گرفته شده است، از جمله معادله‌های انتقال گرما از سوخت به محیط به صورت یک‌بعدی



نوشته شده، غلاف و مغز سوخت یک ماده در نظر گرفته شده، خنک‌کننده به‌عنوان ماده اطراف سوخت در جمله مربوط به اتلاف از طریق تابش فرض شده و ضریب قله شعاعی $1/5$ برای گرمترین مجموعه سوخت اعمال شده است. در صورت وقوع حادثه لخت شدن قلب درحالتی که راکتور برای مدت زمان زیادی روشن بوده و زمان لخت شدن قلب کم باشد، دمای سوخت از محدوده های 400 و 660 درجه سانتیگراد که مربوط به تورم و ذوب سوخت است، بالاتر خواهد رفت. از این رو، مجهز بودن راکتور به سامانه خنک‌کنندگی اضطراری برای جلوگیری از آسیب دیدن سوخت ضروری است.

مراجع :

1. Meftah, B., T. Zidi, and A. Bousbia-Salah, *Neutron flux optimization in irradiation channels at NUR research reactor*. Annals of Nuclear Energy, 2006. 33(14): p. 1164-1175.
2. Ito, D. and Y. Saito, *Natural convection cooling characteristics in a plate type fuel assembly of Kyoto University Research Reactor during loss of coolant accident*. Annals of Nuclear Energy, 2016. 90: p. 1-8.
3. Housiadas, C., *Thermal-hydraulic calculations for the GRR-1 research reactor core conversion to low enriched uranium fuel*. National Centre for Scientific Research " Demokritos," Institute of Nuclear Technology and Radiation Protection, 1999.
4. Bokhari, I.H. and T. Mahmood, *Engineered safety feature, an emergency core cooling system at Pakistan research reactor-1*. Annals of Nuclear Energy, 2008. 35(6): p. 1167-1170.
5. AEOI, *Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor*. 2009. Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.
6. El-Wakil, M., *Nuclear Heat Transport*. University of Wisconsin, UK. 1971: International Textbook Company.