

## بررسی اثر هرکدام از مکانیسم‌های انتقال گرما از سوخت یک راکتور تحقیقاتی پس از حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده

احسان بوستانی<sup>۱\*</sup>، صمد خاکشورنیا<sup>۲</sup>، حسن اسماعیلی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران  
<sup>۲</sup> پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

### چکیده

حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده در اثر وقوع شکستگی شدید در یک راکتور تحقیقاتی سوخت صفحه‌ای به صورت تحلیلی بررسی شده است. پس از لخت شدن کامل قلب، مقداری از انرژی پسمان تولید شده در سوخت به محیط اطراف منتقل می‌شود و بقیه صرف گرم شدن سوخت و غلاف می‌شود. دمای ذوب سوخت در یک راکتور با غلاف آلومینیومی ۶۶۰ درجه سانتیگراد است، اما رسیدن دمای سوخت به محدوده ۴۰۰ درجه سانتیگراد سبب بادکردگی و آسیب دیدن سوخت خواهد شد. گرم‌ترین صفحه سوخت در نظر گرفته شده و انتقال حرارت از آن به محیط اطراف با در نظر گرفتن مکانیسم‌های انتقال گرما از طریق رسانش، همرفت و تابش بررسی شده است. فرایند انتقال گرما از طریق همرفت طبیعی با هوای اطراف، تابش از سوخت و رسانش گرما از طریق شبکه نگهدارنده زیر قلب بررسی شده است. رسانش و تابش به ترتیب سبب کاهش دمای سوخت به میزان ۶۸ و ۴۸ درجه سانتیگراد می‌شوند که قابل توجه است.

**کلیدواژه‌ها:** حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده، راکتور تحقیقاتی، سوخت صفحه‌ای، همرفت طبیعی، رسانش، تابش.

## Investigating the effect of different heat transfer mechanisms from the fuel of a research reactor after complete LOCA

Ehsan Boustani<sup>1\*</sup>, Samad Khakshournia<sup>2</sup>, Hassan Esmaili<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14395-836, Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Physics and accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14395-836, Tehran, Iran.

### Abstract

The complete loss of coolant accident due to a severe break has been investigated analytically in a plate-type research reactor. After happening the completely core uncovering, some of the produced energy in the fuel is transferred to the environment and the rest is caused to fuel and clad heating. The melting temperature for reactors with aluminum clad is 660 °C, but reaching the fuel temperature in the range of 400 °C will cause swelling and damage to the fuel. The hottest fuel plate is selected and the heat transfer from fuel to the environment has been investigated by considering the heat transfer through conduction, convection, and radiation mechanisms. The process of heat transfer through natural convection with the ambient air, radiation from the fuel and conduction of heat through the under core grid plate has been studied. The thermal radiation and conduction to the surrounding structures reduces the fuel temperature by 68 and 48 °C respectively, which is significant.

**Keywords:** Complete LOCA, Research reactor, Fuel plate, Natural convection, Conduction, Radiation.

Email : eboustani@aeoi.org.ir

## ۱. مقدمه

حادثه از دست دادن کامل خنک‌کننده<sup>۱</sup> در یک راکتور تحقیقاتی سوخت صفحه‌ای استخری با توان نامی ۵ مگاوات بررسی شده است. عواقب این حادثه، در صورتی که خیلی شدید نبوده و تنها منجر به بادکردگی سوخت شود، غیرقابل استفاده شدن سوخت و در صورت شدید بودن، ذوب شدن سوخت است. حادثه گفته شده در هر صورت سبب ایجاد آلودگی پرتوی شدید در محیط داخل و بیرون از ساختمان راکتور خواهد شد.

در یک مطالعه روی راکتور "نور"<sup>۲</sup> کشور الجزایر، چگونگی تغییر دما در صفحه سوخت برای این راکتور یک مگاواتی آن کشور 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 که باتوجه به توان نامی و تاریخچه کاری راکتور مقداری قابل توجه است [۱].

در نظر گرفتن سامانه خاموشی اضطراری به عنوان یک قابلیت ایمنی مهندسی شده<sup>۳</sup> در راکتورهای با قدرت بالاتر از ۳ مگاوات برای جلوگیری از آسیب به قلب یا کاهش آسیب به سوخت در حادثه لخت شدن قلب ضروری است. در یک کار مطالعاتی که روی راکتور ۵ مگاواتی IEA-R1m برزیل انجام شده است، راکتور به مدت نامحدود فعالیت داشته و ۳۰۰ ثانیه پس از وقوع حادثه و خاموشی راکتور، خنک‌کننده به‌طور کامل تخلیه شده و قلب لخت شده است، یعنی بین زمان بروز حادثه و لخت شدن قلب یک زمان تاخیر ۳۰۰ ثانیه‌ای وجود داشته است. در این شرایط، تزریق آب به قلب راکتور برای بازه زمانی ۱۳/۵ ساعت با دبی ۳/۵ متر مکعب بر ساعت برای حفظ دمای قلب در محدوده ایمن ۵۰۰ درجه سانتیگراد و عدم آسیب به قلب ضروری است [۲ و ۳]. کارهای پژوهشی دیگری هم انجام شده است که به‌عنوان نمونه، کاری پژوهشی است که روی راکتور سوخت صفحه‌ای ۱۰ مگاوات آرژانس انجام شده است و به ذوب نشدن قلب برای توان‌های کمتر از ۴ مگاوات اشاره می‌کند [۴].

باتوجه به آنچه که آمد، حادثه از دست دادن خنک‌کننده در تعدادی از راکتورهای تحقیقاتی بررسی شده و در بسیاری از آنها به لزوم خنک‌کنندگی قلب با آب پس از لخت شدن قلب اشاره شده است. در این مطالعه، انتقال حرارت از قلب راکتور بررسی شده و نقش هر کدام از مکانیسم‌های انتقال حرارت مشخص شده است.

## ۲. روش کار

گرمای پسمان تنها عامل گرم شدن سوخت است که با افزایش تاریخچه کارکرد و توان کاری قلب و کاهش زمان تاخیر تا لخت شدن قلب، مقدار تولید و انباشت آن در صفحه سوخت بیشتر خواهد بود. تغییرات دمای سوخت و خنک‌کننده با نوشتن تحلیلی معادلات مربوط به تولید و پخش گرمای پسمان در سوخت بررسی شده است. چندین رابطه برای نشان دادن گرمای پسمان تولیدی در قلب وجود دارد که یکی از آنها به صورت (۱) است [۵].

$$P_t = 5 \times 10^{-3} \times P_0 \times \sum_{i=1}^{33} \frac{\alpha_i}{\lambda_i} e^{-\lambda_i t_c} [1 - e^{(-\lambda_i t_0)}] \quad (1)$$

در این رابطه،  $\lambda$  و  $\alpha$  مولفه‌های برازش<sup>۴</sup> و  $i$  تعداد این مولفه‌ها است.

یکی از روش‌های محاسباتی برای تعیین گرمای واپاشی، کد رایانه‌ای ORIGEN 2 است. نوکلیدهای خروجی کد به سه دسته محصولات فعال‌سازی، آکتیوها و محصولات شکافت تقسیم می‌شود. محصولات فعال‌سازی همه ایزوتوپ‌هایی هستند که به‌صورت طبیعی وجود دارند، آکتیوها عناصر با عدد اتمی بالاتر از اورانیوم و محصولات شکافت شامل نوکلیدهای تولید شده در فرایند شکافت عناصر سنگین هستند [۶]. همه معادلات نوشته شده در این پژوهش در نرم‌افزار متلب نوشته شده و خروجی‌های آن به‌عنوان دمای سوخت یا دیگر اجزای آورده شده است [۷].

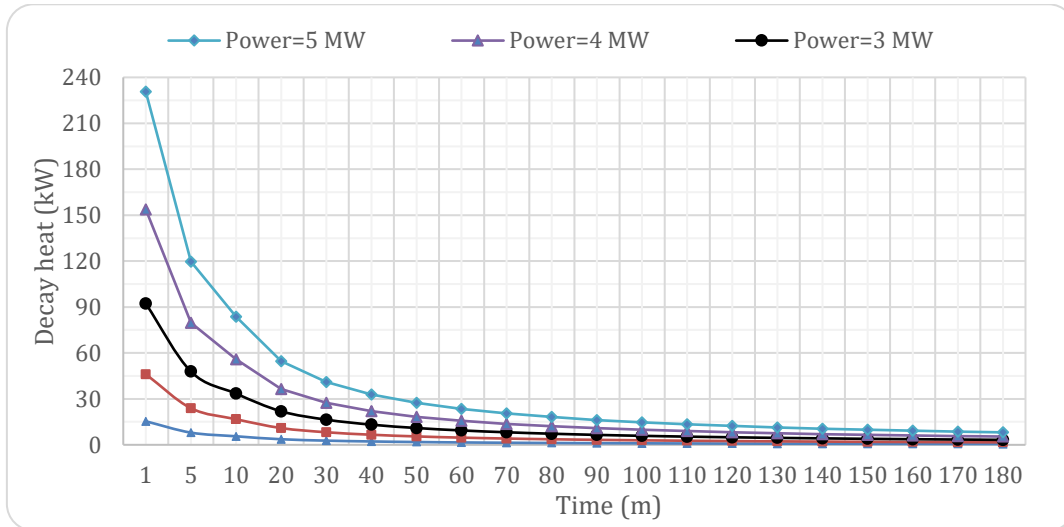
<sup>1</sup> Complete Loss of Coolant Accident

<sup>2</sup> NUR

<sup>3</sup> Engineered Safety Feature (ESF)

<sup>4</sup> Fitting parameters

برای راکتوری که در مدت زمان ۲۰ روز در توان‌های کاری ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ مگاوات در حال کار بوده است، گرمای پسمان محاسبه شده و در شکل ۱ نشان داده شده است. تاثیر توان کاری راکتور بر میزان گرمای پسمان تولیدی از شکل داده شده قابل مشاهده است.

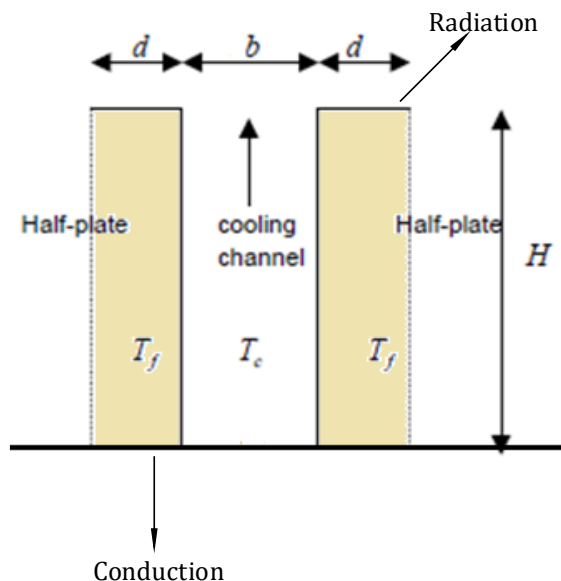


شکل ۱. وابستگی گرمای پسمان به توان کاری راکتور

نکته قابل توجه در بررسی حادثه بالا رفتن دمای سوخت، محدوده‌های ایمنی است. در صورت تجاوز دمای سوخت از محدوده‌های مشخص شده با دگرگونی<sup>۱</sup> سوخت رخ داده و سوخت کیفیت لازم برای بهره‌برداری را از دست می‌دهد. محدوده دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس برای متورم شدن سوخت‌های از جنس آلیاژ آلومینیوم در نظر گرفته شده است [۸]. بنابراین، محدوده دمایی آسیب به سوخت که سبب غیرقابل استفاده شدن آن می‌شود ۶۶۰ درجه سلسیوس نیست، بلکه این دما ۴۰۰ درجه سلسیوس است. در صورت بالا رفتن دمای سوخت تا ۶۶۰ درجه سلسیوس، علاوه بر اینکه سوخت آسیب دیده است، آلودگی پرتوی محیط بر اثر این رویداد نیز به وجود می‌آید.

مقدار چگالی توان پسمان در طول سوخت با توجه به ضریب محوری توان تغییر می‌کند، یعنی این مقدار برای نقاط دور از وسط صفحه سوخت کمتر خواهد شد، به طوری که چگالی توان پسمان تولید شده در انتهای سوخت به اندازه ضریب ۱/۳۵ از چگالی توان تولید شده در وسط سوخت کمتر است. برای محاسبات دقیق‌تر که نیاز به بررسی توزیع دما در راستای محوری یک صفحه سوخت باشد، از این ضریب استفاده می‌شود. طرحواره‌ای از چگونگی انتقال گرمای پسمان از سوخت به محیط اطراف در شکل ۲ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Swellage



شکل ۲- طرحواره انتقال گرمای پسمان از سوخت به محیط

مطابق شکل ۲، مقداری از گرمای پسمان تولید شده در سوخت از طریق همرفت طبیعی با هوای بین صفحات سوخت، از طریق رسانش از شبکه نگهدارنده قلب و پدیده تابش از صفحات سوخت منتشر می‌شود و بقیه صرف گرم شدن سوخت می‌شود. 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 خواهد شد. روابط حاکم بر تولید انرژی پسمان در سوخت و انتقال آن به محیط به صورت رابطه‌های (۲) و (۳) است. پی‌نویس‌های  $a, f, u, g_p$  و  $c$  برای هوا، سوخت، بخش بالای سوخت، شبکه سوخت و خنک‌کننده استفاده می‌شود [۹].

$$\rho_f C_f dA \frac{dT_f}{dt} = P - hA(T_f - T_c) - h_u A_u (T_f - T_a) - h_c A_c (T_f - T_{gp}) - \epsilon \sigma A_u (T_f^4 - T_a^4) \quad (2)$$

$$\rightarrow \rho_c b C_c \frac{dT_c}{dt} = h(T_f - T_c) - \frac{b}{H} \rho_c C_c u (T_c - T_a) \quad (3)$$

در رابطه بالا  $h, A, \sigma, \epsilon, \rho, H, b, T, C$  به ترتیب برای ضریب انتقال همرفت طبیعی برای سطح غلاف، مساحت غلاف، ثابت استفان بولتزمن، ارتفاع سوخت، نیم پهنای کانال خنک‌کننده، دما و ظرفیت گرمایی ویژه استفاده شده است. همچنین  $b$  پهنای مسیر خنک‌کننده،  $d$  نیم پهنای سوخت است. انتقال گرمای پسمان از سوخت به شبکه نگهدارنده و از آنجا به محیط از رابطه (۴) پیروی می‌کند [۹].

$$m_g C_g \frac{dT_g}{dt} = h_c A_c (T_f - T_g) - h_{gh} A_{gh} (T_g - T_a) - h_{gv} A_{gv} (T_g - T_a) - \epsilon \sigma A_{gv} (T_g^4 - T_a^4) \quad (4)$$

$$h_{gv} = \left\{ \begin{array}{l} 0.51 \frac{k}{X} GR_H^{0.25} \text{ for } GR_H < 10^{10} \\ 0.115 \frac{k}{X} GR_H^{1/3} \text{ Otherwise} \end{array} \right\}, GR_H = \frac{g(T_g - T_a)}{\mu k^2 T_a} \quad (5)$$

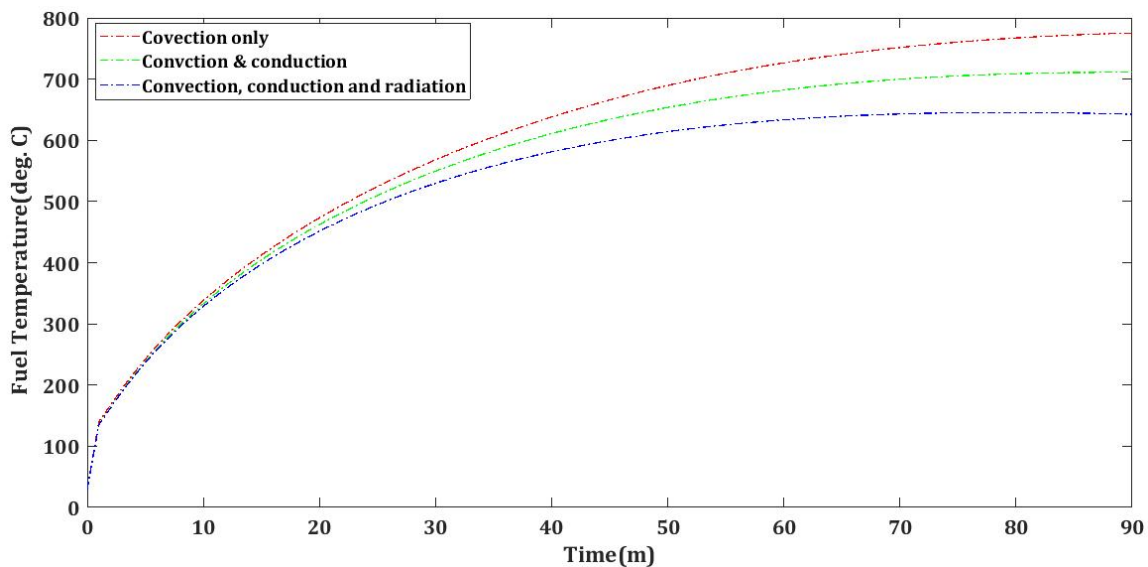
$$\mu_k = (0.1472 T_c + 8.6733) \times 10^{-2} \frac{cm^2}{s} \quad (6)$$

$$h_{gh} = 0.27 \frac{k}{Y} (GR.Pr)^{0.25} \quad (7)$$

در روابط بالا  $\mu_k$ ,  $C_c$ ,  $\rho_c$ ,  $b$ ,  $H$  و  $u$  برای لزجت سینماتیک خنک‌کننده، ظرفیت گرمایی ویژه خنک‌کننده، چگالی خنک‌کننده، پهنای کانال خنک‌کننده، ارتفاع سوخت و سرعت خنک‌کننده استفاده شده است. اثر پایستگی جرم و تکانه، در نوشتن معادله برابری نیروی شناوری رو به بالا با نیروی گرانشی رو به پایین هوا به عنوان سیال ظاهر می‌شود. اثر اعمال این رابطه در به‌دست آمدن ضریب انتقال همرفت و سرعت حرکت رو به بالای خنک‌کننده بین صفحه‌های سوخت است.

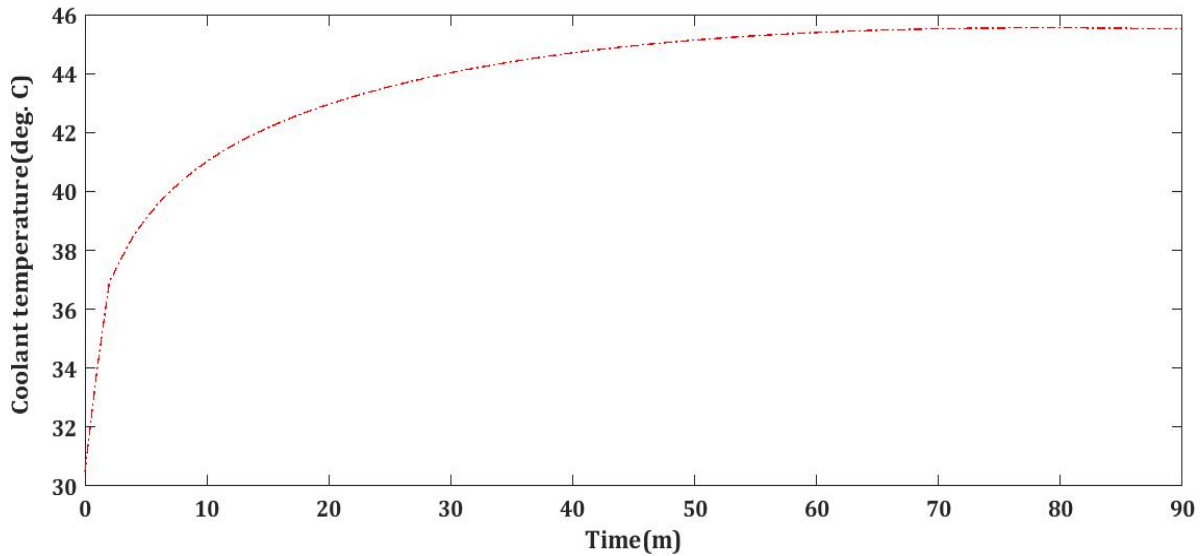
### ۳. محاسبات و نتایج

گرمای پسمان پس از قطع زنجیره شکافت، عامل گرم شدن صفحه‌های سوخت است. ابتدا راستی‌آزمایی مرطوب به گرمای پسمان با مقایسه نتایج رابطه تحلیلی و کد ORIGEN2 انجام شده، سپس نتایج حاصل برای دمای متوسط داغ‌ترین مجموعه سوخت در قلب راکتور تحقیقاتی داده شده است. چندین مولفه در تعیین دمای نهایی یک صفحه سوخت تاثیرگذار است که از جمله عبارتند از توان کاری، زمان تاخیر و تاریخچه کارکرد راکتور. در این مطالعه توان بیشینه ۵ مگاوات، زمان کارکرد ۵ روز و مدت زمان تاخیر بین خاموشی و لخت شدن قلب ۱ ساعت در نظر گرفته شده است. تغییرات دمای سوخت به دنبال این حادثه محاسبه و در شکل ۳ نشان داده شده است.

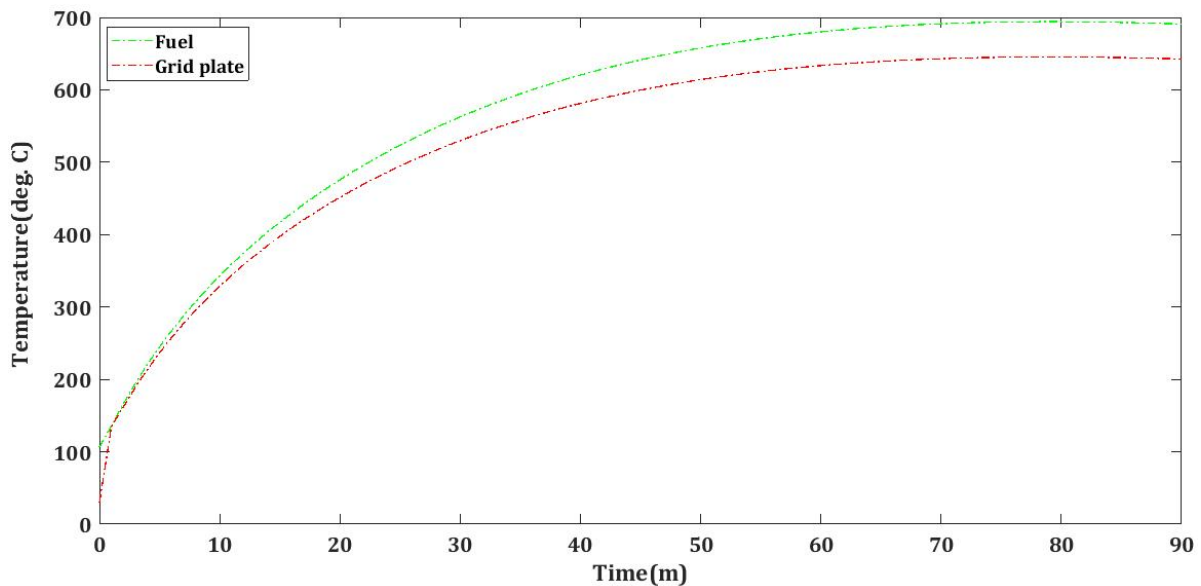


شکل ۳. نقش هرکدام از مکانیسم‌های انتقال حرارت

همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، هرکدام از مکانیسم‌های انتقال حرارت نقشی تعیین‌کننده در انتقال حرارت از قلب برعهده دارند. تغییرات دمای خنک‌کننده برای ۳۰ روز کار در توان ۵ مگاوات و سپس لخت شدن قلب پس از مدت زمان تاخیر ۲۳/۲ دقیقه بررسی و در شکل ۴ آمده است. از آنجاکه در این حالت قلب به طور کامل لخت شده است، هوای بین صفحه‌های سوخت نقش خنک‌کننده را ایفا می‌کند و نمودار داده شده تغییرات این هوا را نشان می‌دهد. برداشت حرارت توسط این هوا از طریق همرفت طبیعی انجام می‌شود.



شکل ۴. تغییرات دمای خنک کننده پس از بروز حادثه از دست دادن کامل خنک کننده همان گونه که از شکل ۴ دیده می شود، دمای خنک کننده پس از رسیدن به مقدار تعادلی ۴۶ درجه سانتیگراد، بیشتر نخواهد شد. تغییرات دمای سوخت و شبکه نگهدارنده که بخشی از توان پسمان تولید شده در قلب از طریق آن به محیط انتقال داده می شود، محاسبه و در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. تغییرات دمای سوخت و شبکه نگهدارنده پس از حادثه همان گونه که از شکل ۵ دیده می شود، دمای شبکه نگهدارنده قلب هم با روندی مشابه با دمای سوخت افزایش می یابد که با توجه به انتقال بخشی از گرمای قلب از طریق این شبکه قابل پیش بینی و منطقی است.

## ۵. نتیجه گیری

حادثه از دست دادن کامل خنک کننده در یک راکتور تحقیقاتی با سوخت صفحه ای بررسی شده است. انتقال گرمای پسمان سوخت از طریق رسانش ناشی از شبکه نگهدارنده قلب، همرفت طبیعی از طریق هوای بین صفحات سوخت و تابش از صفحه سوخت با محیط صورت می گیرد. سهم هر کدام از مکانیسم های انتقال حرارت در برداشت گرما از قلب غیرقابل چشم پوشی است. توان کاری قلب، تاریخچه کارکردی و زمان تاخیر مولفه هایی کلیدی در تعیین شدت حادثه است. محاسبات تحلیلی انجام شده نشان می دهد که رسانش ناشی از شبکه نگهدارنده سبب کاهش دمای سوخت به میزان ۶۸ درجه شده است. از طرفی تابش بین صفحه سوخت و محیط اطراف سبب کاهش دمای داغ ترین سوخت به

میزان ۴۸ می‌شود که مقداری قابل توجه است. باتوجه به پژوهش انجام شده، امکان برقرار بودن خنک‌کنندگی پس از خاموشی راکتور یکی از مهمترین شرطهای لازم برای عدم آسیب به سوخت است که با تجهیز راکتور به سامانه آب اضطراری یا سامانه خنک‌کنندگی اضطراری قابل انجام است.

۶. 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] Torres, W.M., et al. Development of an emergency core cooling system for the converted IEA-R1m research reactor. in 21st International Meeting on RERTR, São Paulo, Brazil. (1998).
- [3] Torres, W.M., et al. Development of an emergency core cooling system for the converted IEA-R1m research reactor. in 21st International Meeting on RERTR, São Paulo, Brazil. (1998).
- [4] Hamidouche, T. and E.-K. Si-Ahmed, Analysis of loss of coolant accident in MTR pool type research reactor, *Progress in nuclear energy*, (2011). 53(3): p. 285-289
- [5] 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.
- [6] IM J, B., ORIGEN-The ORNL Isotope Generation and Depletion Code, ORNL-7628, Oak Ridge National Laboratory, (1973).
- [7] Mathworks, MATLAB Reference Guide. The Math Works Inc, 2018.
- [8] IAEA, Safety Analysis for Research Reactors, Safety Report Series No. 55, (2008): p. 64.
- [9] 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).