

ارزیابی راکتیویته‌ی مازاد راکتور چشمه نوترون مینیاتوری (MNSR) اصفهان در شرایط

حوادث فراتر از پایه‌ی طراحی (BDBA) با روش مونت کارلو

مسعود، احمدی^{۱*}؛ احمد، پیروزمند^۱؛ عطاله، ربیعی^۱؛ مهدی، رضوانی، فرد^۲؛ جواد، عبادتی

اصفهانی^۲

۱- دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای

۲- پژوهشکده راکتورها و ایمنی هسته‌ای، راکتور مینیاتوری اصفهان

چکیده:

در این مقاله مقدار راکتیویته‌ی مازاد قلب راکتور مینیاتوری پس از آخرین احیای قلب و افزودن کلیه‌ی برلیوم‌های حلقوی در بالای قلب محاسبه و افزایش ۱۷ درصدی راکتیویته‌ی مازادی که در اواخر عمر قلب راکتور و در شرایط حادثه می‌تواند ایمنی راکتور را تحت تاثیر قرار دهد می‌پردازد. از نظر مولفین، این جنبه از محاسبات مورد غفلت طراحان و سازندگان راکتور مینیاتوری چشمه‌ی نوترون واقع گردیده است. محاسبات مذکور با روش مونت کارلو با استفاده از کد محاسباتی MCNPX به مقدار راکتیویته‌ی مازادی برابر با $0.09 \pm 7/85\%$ رسیده است. این مقدار از راکتیویته در شرایط حادثه می‌تواند منجر به بحران جوشش در راکتور گردد.

واژه‌های کلیدی: راکتیویته‌ی مازاد، راکتور مینیاتوری، حوادث فراتر از پایه‌ی طراحی

مقدمه:

راکتور مینیاتوری چشمه‌ی نوترون با داشتن ویژگی‌هایی از قبیل ۱- دارا بودن بیشینه راکتیویته‌ی مازادی، کمترین نصف کسر موثر نوترون‌های تاخیری ۲- ضریب راکتیویته‌ی منفی دمایی بالا ۳- خنک شونده‌ی با گردش طبیعی سیال، به عنوان راکتور مینیاتوری با ایمنی ذاتی شناخته شده و نتایج تحقیقات متعددی ایمنی ذاتی این راکتور را اثبات نموده است [1]. در شرایط حوادث پایه طراحی (DBA)، ایمنی ذاتی منجر به خاموشی راکتور با پس‌خورد منفی دمایی خنک کننده می‌گردد. بیشینه راکتیویته مازادی که در تحلیل حوادث این راکتور مورد آزمایش قرار گرفته است راکتیویته‌ی ناشی از حادثه‌ی فراتر از حوادث پایه‌ی طراحی (BDBA)، پر شدن سایت‌های پرتودهی از آب و پائین نیامدن میله‌ی کنترل می‌باشد که راکتیویته‌ی مازادی کمتر از $6/8mk$ در قلب وارد می‌کند [2]. ارتفاع قلب راکتور مینیاتوری ۲۳ سانتیمتر بوده و با مصرف سوخت برای جبران راکتیویته‌ی از دست رفته و احیای دوباره راکتور با افزودن صفحات برلیومی بالای قلب

این ارتفاع افزایش می‌یابد. کلیه‌ی تحقیقات صورت گرفته ارتفاع قلب را در حالت سوخت تازه در نظر گرفته‌اند در حالی که افزایش ارتفاع قلب (ناشی از افزایش برلیوم) باعث افزایش ارزش راکتیویته‌ی آبی که در شرایط حادثه سایت‌های درونی و بیرونی را پر می‌کند، می‌گردد. علاوه بر این، پر شدن لوله‌های تنظیم راکتیویته از آب در این محاسبات دیده نشده است. مجموع راکتیویته‌های در نظر گرفته نشده و راکتیویته‌ی مازاد قلب، ممکن است در شرایط حادثه باعث بحران جوشش در راکتور گردد. با رخداد حادثه جوشش، گردش طبیعی سیال تحت تاثیر قرار گرفته و انتقال حرارت از قلب مختل می‌گردد که ممکن است دمای قلب به بالاتر از دمای استاندارد و معیارهای ایمنی مهندسی تعیین شده برای راکتورهای تحقیقاتی با غلاف سوخت آلومینیوم گردد. کلیه‌ی محاسبات این مقاله با استفاده از کد محاسباتی MCNPX محاسبه شده است. پیش از محاسبات اعتبارسنجی برنامه شبیه‌سازی این راکتور با نتایج تجربی به صورت دقیق صورت گرفت.

روش کار:

اولین قدم در راستای انجام این تحقیق، شبیه‌سازی دقیق قلب راکتور مینیاتوری با استفاده از کد محاسباتی MCNPX می‌باشد. برای اعتبارسنجی این برنامه از نتایج موجود در گزارش آنالیز ایمنی راکتور و همچنین نتایج تجربی صورت گرفته در راکتور مینیاتوری اصفهان استفاده گردیده است. نتایج این محاسبات و مقایسه‌ی آنها در جدول شماره ۱ آورده شده است. از آنجائی که محاسبات راکتیویته ناشی از پر شدن سایت‌های پرتودهی درونی و بیرونی، قبل و پس از افزایش برلیوم بالای قلب مورد نظر می‌باشد در این اعتبارسنجی پس از محاسبه‌ی راکتیویته‌ی مازاد و محاسبه‌ی ارزش میله کنترل، به ارزش برلیوم با ضخامت‌های متفاوت در بالای قلب پرداخته شده و در انتها، محاسبه‌ی ارزش آب در سایت‌های پرتودهی درونی و بیرونی صورت گرفت.

جدول شماره ۱: مقایسه‌ی ارزش پارامترهای مختلف محاسبه شده با کد MCNPX با مقادیر تجربی [3].

| درصد اختلاف با مقادیر تجربی | ارزش (MK) | | | پارامتر | ردیف |
|-----------------------------|------------------|-------------|-------|---------------------------------|------|
| | کد MCNPX | گزارش ایمنی | تجربی | | |
| ۲/۵۹ | $3/75 \pm 0/09$ | ۳/۵۰-۴ | ۳/۸۵ | راکتیویته‌ی مازاد سوخت تازه | ۱ |
| ۰/۴۲ | $7/03 \pm 0/09$ | ۶/۸۰ | ۷/۰۰ | میله کنترل | ۲ |
| ۵/۳۵ | $5/30 \pm 0/09$ | ۵/۵۰ | ۵/۶۰ | ۱ سانتیمتر برلیوم بالای قلب | ۳ |
| ۲/۶۸ | $18/10 \pm 0/09$ | ۱۸/۵۰ | ۱۸/۶۰ | ۱۰/۹۵ سانتیمتر برلیوم بالای قلب | ۴ |

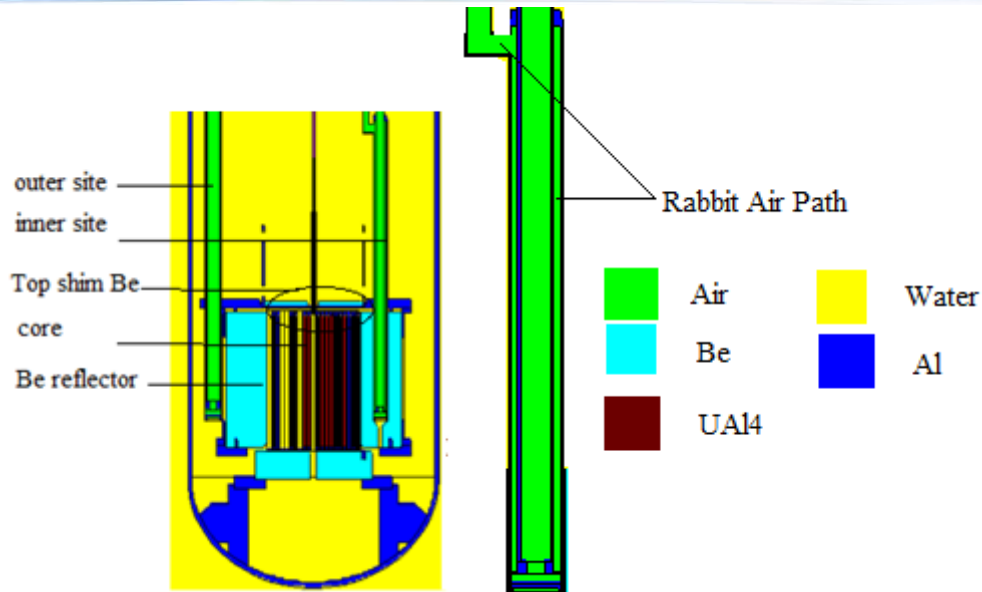
| | | | | | |
|------|------|------|------|----------------------------|---|
| ۵/۱۲ | ۱/۸۵ | ۱/۹۵ | ۱/۹۵ | پر شدن ۵ سایت درونی از آب | ۵ |
| ۱/۳۱ | ۰/۷۷ | ۰/۷۶ | ۰/۷۶ | پر شدن ۵ سایت بیرونی از آب | ۶ |

اختلاف ناچیز میان مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده، شبیه سازی دقیق این راکتور را تأیید می‌نماید. مجموع ارقام ردیف‌های ۱،۵ و ۶ بیشینه راکتیویته‌ی مازاد قلب را در شرایط حوادث فراتر از پایه طراحی رقم می‌زنند. که با احتساب بیشترین راکتیویته قلب ($4/00 \text{ mk}$) مقداری برابر با $6/71 \text{ mk}$ خواهد داشت. لذا ارزش راکتیویته‌ی میله کنترل برابر با $7/00 \text{ mk}$ در نظر گرفته شده تا بتواند حد بالاتری از راکتیویته‌ی قابل تصور در قلب را پوشش دهد.

در ادامه به جنبه‌هایی از افزایش راکتیویته مازاد قلب که در حوادث فراتر از پایه‌ی طراحی همچون پائین نیامدن میله‌ی کنترل و پر شدن کلیه‌ی سایت‌ها و لوله‌ها، از آب رخ خواهد داد و مورد غفلت واقع شده پرداخته خواهد شد.

۱- افزایش راکتیویته ناشی از پر شدن خروجی‌های هوای ریت

در شرایط حادثه شکستن سایت‌های پرتو دهی کلیه‌ی مسیرهای برگشت هوا (شکل ۱) نیز از آب پر خواهند شد که در محاسبات طراحان دیده نشده است. تغییرات راکتیویته‌ی مربوط به پر شدن این سایت‌ها در جدول شماره ۲ آورده شده است.



شکل شماره ۱: نمایی از راکتور مینیاتوری و مسیر هوای ریت [3]

جدول شماره ۲: مقایسه‌ی ارزش راکتیویته‌ی سایت‌های پر شده از آب با در نظر گرفتن مسیر هوا [3]

| درصد افزایش راکتیویته | ارزش (MK) | | پارامتر | شماره |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|-------|
| | بدون در نظر گرفتن خروجی هوا | با در نظر گرفتن خروجی هوا | | |
| ۱۲/۳۲ | $۱/۸۵ \pm ۰/۰۹$ | $۲/۱۱ \pm ۰/۰۹$ | ۵ سایت درونی پر از آب | ۱ |
| ۶ | $۰/۷۷ \pm ۰/۰۹$ | $۰/۸۲ \pm ۰/۰۹$ | ۵ سایت بیرونی پر از آب | ۲ |

۲- تغییرات راکتیویته‌ی ناشی از پر شدن لوله‌های تنظیم راکتیویته (Regulating Rod Tube)

میله‌ها و لوله‌های تنظیم راکتیویته در راکتور مینیاتوری در راستای تنظیم دقیق راکتیویته‌ی مازاد بین ۳/۵۰ تا ۴/۰۰ mk به کار گرفته خواهند شد این میله از استیل ضد زنگ تشکیل شده و دارای راکتیویته‌ی ۰/۴۸ mk- می‌باشد. با توجه به شرایط هر راکتور تعداد میله‌های تنظیم راکتیویته از یک تا چهار عدد متغیر است. در راکتور مینیاتوری اصفهان یکی از این لوله‌ها همراه با میله‌ی تنظیم راکتیویته به کار گرفته شده است. فضای خالی بالا و کنار این لوله از هوا پر شده است که پر شدن این فضا با آب می‌تواند راکتیویته‌ی مازاد قلب را

افزایش دهد. با توجه به اینکه کلیه محاسبات بر اساس اطلاعات راکتور مینیاتوری اصفهان صورت گرفته است این افزایش فقط برای یک لوله محاسبه گردید که نتایج آن در جدول شماره ۳ آورده شده است.

جدول شماره ۳: تغییرات راکتیویته ناشی از پر شدن لوله تنظیم راکتیویته با آب

| پیش از پر شدن از آب | پس از پر شدن آب | درصد افزایش راکتیویته | |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------|
| $1/0.0378 \pm 0/0.0009$ | $1/0.0390 \pm 0/0.0009$ | ۳/۱۷ | Keff |

۳- تغییرات راکتیویته‌ی ناشی از پر شدن کلیه سایت‌ها و لوله‌ها از آب، با تغییر ارتفاع قلب.

یکی از نقص‌های بسیار اثر گذاری که در محاسبات راکتیویته‌ی مازاد قلب راکتور مینیاتوری در نظر گرفته نشده‌است، تغییر ارتفاع قلب با گذر زمان می‌باشد.

از آنجائیکه سوخت گذاری مجدد در راکتور مینیاتوری با مصرف سوخت امکان‌پذیر نمی‌باشد، راکتیویته‌ی مازاد کاهش یافته‌ی قلب با افزودن برلیوم بالای قلب، جبران می‌گردد. افزایش $10/95$ سانتیمتری برلیوم بالای قلب راکتیویته‌ای معادل $18/5$ mk به قلب می‌افزاید که در طول 10 سال عمر قلب به صورت تدریجی به آن افزوده می‌شود. افزایش ارتفاع قلب باعث افزایش ارزش راکتیویته‌ی آب درون کلیه سایت‌ها و لوله‌ها می‌گردد. این محاسبات با استفاده از کد MCNPX با پر کردن کلیه سایت‌ها و لوله‌ها از آب ضمن افزودن صفحات برلیومی بالای قلب، با اعمال کارت مصرف سوخت (Burn Up) صورت گرفت. نتایج در جدول شماره ۴ آورده شده است.

جدول شماره ۴: محاسبه و مقایسه‌ی راکتیویته در سوخت تازه و سوخت مصرف شده با کد MCNPX [3]

| پارامتر | ارزش (MK) | | شماره |
|---------------------------|------------------|---------------------------------|-------|
| | در سوخت تازه | پس از مصرف سوخت و افزایش برلیوم | |
| پر شدن ۵ سایت درونی از آب | $2/11 \pm 0/0.9$ | $2/62 \pm 0/0.9$ | ۱ |

| | | | | |
|------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|---|
| ۰/۷۶ | $1/08 \pm 0/09$ | $0/82 \pm 0/09$ | پر شدن ۵ سایت بیرونی از آب | ۲ |
| - | $0/15 \pm 0/09$ | $0/12 \pm 0/09$ | پر شدن لوله تنظیم راکتیویته با آب | ۳ |

نتایج:

مجموع ارقام محاسبات طراحان راکتور در سوخت تازه (ستون پنجم) با بیشینه راکتیویته‌ی مازاد قلب (۴ mk) بیشینه راکتیویته‌ی ۶/۷۱ mk را رقم می‌زند اما محاسبات مربوط به مکان‌های در نظر گرفته نشده در این محاسبات شامل: راکتیویته‌ی پر شدن لوله تنظیم راکتیویته با آب، راکتیویته‌ی پر شدن مسیرهای هوای ریبیت از آب و بیشینه راکتیویته‌ی مازاد قلب (ستون سوم) به مقدار ۷/۰۴ mk راکتیویته‌ی مازاد در سوخت تازه می‌رسد این مقدار از راکتیویته در اثر مصرف سوخت و افزایش ارتفاع قلب به مقدار mk ۷/۸۵ می‌رسد که تقریباً ۱۷ درصد نسبت به محاسبات طراحان افزایش دارد.

بحث و نتیجه‌گیری:

افزایش راکتیویته‌ی مازاد قلب با شرایط ذکر شده در این تحقیق برای راکتور مینیاتوری اصفهان صورت گرفته است و از آنجایی که تعداد میله‌ها و لوله‌های تنظیم راکتیویته در طراحی این راکتور بیشینه تا ۴ عدد می‌تواند افزایش یابد، افزایش ناشی از راکتیویته‌ی آب وارد شده در این لوله‌ها نیز باید به این عدد اضافه گردد. این مقدار از راکتیویته می‌تواند در شرایط حادثه عامل بحران جوشش در قلب گردد. که باید مورد بررسی قرار گیرد.

منابع:

- [1] Jilin, G. (1992). *General Description of Miniature Neutron Source Reactor*. China Institute of Atomic Energy: internal report.
- [2] Chengzhan, G. (1992). *MNSR Accident (event) Analysis*. China Institute of Atomic Energy: internal report.
- [3] Chengzhan, G. Xianfa, Z. (1992). *The Iranian MNSR Safety Analysis Report (SAR)*.



بیست و سومین کنفرانس هسته‌ای ایران

۱۵ و ۱۶ اسفندماه ۱۳۹۵ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات



China Institute of Atomic Energy: internal report.