محاسبه پرتوگیری ناشی از حادثه لخت شدن جزیی قلب زیر گنبد راکتور تحقیقاتی تهران

احسان بوستانی[۱]، روح اله آهنگری شاهدهی*[۱]

[۱]سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

لخت شدن قلب راکتور سبب کاهش قابل توجه در برداشت حرارت سوخت و وارد شدن آسیب جدی به آن خواهد شد. شدت آسیب به عوامل مختلف ازجمله تاریخچه کارکرد، توان و زمان تاخیر تا لخت شدن قلب بستگی دارد. میزان رادیونوکلئیدهای منتشر شده از قلب تعادلی ۷۶ با ذوب ۲۰٪ بخش بالای قلب به زیر گنبد با استفاده از کد ORIGEN2 *و میزان پرتوگیری افراد زیر گنبد با استفاده از کد* RASCAL *محاسبه شده است. دز معادل موثر کل بدن (*TEDE*) در دقیقه اول حدود ۳۰ میلی‌سیورت و برای تیروئید پس از ۴ دقیقه حدود ۵۰ میلی‌سیورت است. این میزان آلودگی نیاز به تخلیه و توزیع قرص ید داشته و نشان‌دهنده لزوم توجه به ایمنی این راکتور برای جلوگیری از بروز چنین حوادثی است.*

کلیدواژه: راکتور تحقیقاتی تهران، حادثه شدید، لخت شدن قلب، *دز معادل موثر کل بدن (*TEDE*)*، دز تیروئید

مقدمه:

پس از بروز حادثه فوکوشیما، تاکید فراوانی بر تحلیل حوادث شدید[۱] که حوادث فراتر از مبنای طرح[۲] هستند، شده است. به‌دنبال بروز حادثه از دست رفتن خنک‌کننده و ذوب بخشی از قلب، انتشار آلودگی پرتوی به زیرگنبد و پرتوگیری قابل توجه افراد شاغل در راکتور اولین پیامد این حادثه شدید است [۱]. مطالعه حادثه از دست دادن خنک‌کننده برای راکتوری ژاپنی که شبیه به راکتور تحقیقاتی تهران است و راکتور تحقیقاتی شماره ۱ یونان انجام شده است. برای راکتور ژاپنی، اگر خنک‌کنندگی قلب پس از خاموشی برای برداشت گرمای پسمان[۳] به مدت ۲ هفته ادامه داشته باشد و سپس قطع شود، دمای صفحه‌های سوخت پس از حدود ۲۶ ساعت به نقطه ذوب خواهد رسید [۲]. در راکتور یونانی نیز درصورت لخت شدن قلب کمتر از ۱/۵ ساعت پس از حادثه، ذوب قلب در کمتر از ۳ ساعت پس از قطع خنک‌کننده رخ خواهد داد [۳]. درصورت از دست رفتن خنک‌کننده در راکتور تحقیقاتی

[1]Severe Accidents
[2]Beyond Design Basis Accident (BDBA)
[3]Decay heat

تهران امکان ذوب قلب وجود دارد. حوادثی که در صورت وقوع در راکتور تحقیقاتی تهران می‌تواند سبب بروز حادثه ذوب قلب شود، می‌تواند ترک برداشتن دیواره استخر براثر زلزله یا شکستن همزمان دو یا تعداد بیشتری از ۸ کانال پرتودهی[1] موجود باشد.

روش کار:

راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور با سوخت صفحه‌ای است که ۵۴ محل قلب تعادلی قلب شماره ۷۶ آن همان‌گونه که در سمت راست شکل (۱) نشان داده شده است، شامل ۲۸ مجموعه سوخت استاندارد، ۵ مجموعه سوخت کنترلی، ۸ محل برای پرتودهی و ۱۳ گرافیت است که مشخصات آن در جدول(۱) آمده است [۴]. حجم کل آب استخر ۵۰۰ متر مکعب است و قلب این راکتور در عمق ۹/۵ متری استخر شماره ۱ قرار گرفته است [۵].

جدول(۱). مشخصات قلب تعادلی شماره ۷۶ راکتور تحقیقاتی تهران

کمیت	مقدار
چگالی سوخت (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۴/۷۶
ابعاد سوخت (سانتی‌متر)	۶۱/۵ × ۶ × ۰/۰۷
مقدار متوسط مصرف سوخت[2] (٪)	۳۰
مقدار اورانیوم در هر صفحه سوخت (گرم)	۷۶
مقدار اورانیوم در هر مجموعه سوخت استاندارد (گرم)	۱۴۵۳
مقدار اورانیوم در هر مجموعه سوخت کنترلی (گرم)	۱۰۷۰
اورانیوم کل قلب شماره ۷۶ (گرم)	۴۶۰۲۷
اورانیوم ۲۳۵ کل قلب شماره ۷۶ (گرم)	۹۲۰۵

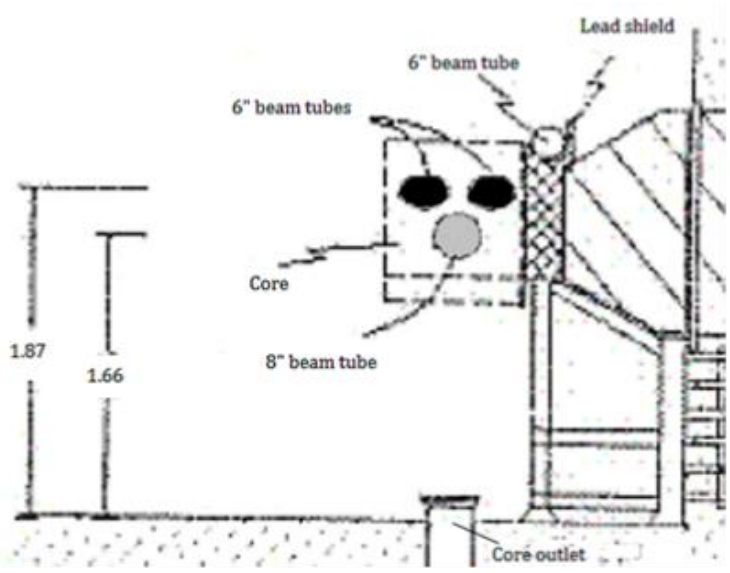
نمای مربوط به قلب راکتور تهران و موقعیت کانال‌های پرتودهی در سمت چپ شکل (۱) آمده است. چند حادثه در این راکتور می‌تواند سبب ذوب قلب شود که شامل تزریق راکتیویته[3]، از دست دادن شارش خنک کننده[4] و از دست دادن خنک‌کننده است که بررسی آنها در گزارش تحلیل ایمنی راکتور موجود است [۵]. همان‌طورکه از سمت چپ شکل (۱) دیده می‌شود، شکستن ۴ کانال ۶ اینچی به همراه ۲ کانال ۸ اینچی، موجب لخت شدن جزیی قلب

[1] Beam tubes
[2] Burn-up
[3] Reactivity Insertion Accident (RIA)
[4] Loss of Flow Accident (LOFA)

خواهند شد. این مطالعه برای حالتی است که براثر شکسته شدن کانال‌های پرتودهی و تخلیه آب، نیمی از ارتفاع قلب در معرض هوای آزاد قرار گرفته است. گرمای پسمان تولیدی در قلب از رابطه (۱) به دست می‌آید. [۶].

$$P_t = 0.0622\, P_0 \times [t^{-0.2} - (t+T)^{-0.2}] \qquad (۱)$$

در رابطه بالا P_0 توان راکتور، T مدت زمانی است که راکتور در حال کار بوده است و t زمانی است که از خاموشی راکتور می‌گذرد.



	Thermal Column				
IR	GR	GR	GR	IR	GR
SFE	RR	SFE	SFE	SFE	SFE
SFE	SFE	SFE	SFE	SR2	SFE
SFE	SR1	SFE	IR	SFE	SFE
SFE	SFE	SFE	SFE	SR3	SFE
SFE	SFE	SR4	SFE	SFE	SFE
IR	SFE	SFE	SFE	SFE	IR
GR	IR	IR	GR	GR	GR
GR	GR	GR	IR	GR	GR
A	B	C	D	E	F

SFE: STANDARD FUEL ELEMENT
SR : SHIM SAFETY ROD
RR : REGULATING ROD
GR: GRAPHITE BOX
IR: IRRADIATION BOX

شکل (۱). چیدمان قلب شماره ۷۶ راکتور تحقیقاتی تهران (راست) و نمای جانبی کانال‌های پرتودهی (چپ)

برای قلبی که به مدت ۱۰ روز با توان ۳ مگاوات در حال کار بوده است، درصورتی‌که حادثه لخت شدن جزیی قلب رخ داده و قلب به مدت ۲۱ دقیقه لخت باشد، ۲۰٪ از بخش لخت شده قلب ذوب خواهد شد. محاسبات مربوط به نوع و میزان مواد رادیواکتیو راکتور تهران، با استفاده از کد ORIGEN2 انجام شده است. این کد ویرایش ارتقایافته‌ای از کد ORIGEN است و شامل به‌روزرسانی‌هایی در الگوهای راکتور، سطح مقطع‌ها، بهره‌های محصولات شکافت، اطلاعات واپاشی و اطلاعات فوتون واپاشی به همان کیفیت کد اصلی است [۷]. برای ارزیابی دز ناشی از رادیونوکلیدهای زیرگنبد راکتور در شرایط حادثه از کد RASCAL استفاده شده است. موارد استفاده

این کد شامل ارزیابی نحوه انتشار مواد رادیواکتیو در راکتورهای هسته‌ای، استخر و مخازن نگهداری سوخت مصرف شده، تاسیسات چرخه سوخت و تاسیساتی که با رهاسازی مواد رادیواکتیو به محیط سرکار دارند، می‌باشد. [۸].

نتایج:

محاسبات مربوط به نوع و میزان مواد پرتوزا قلب راکتور تهران با استفاده از کد ORIGEN2 برای آرایش قلب ۷۶ راکتور تهران با میزان مصرف سوخت ۲۲۴۸ مگاوات روز انجام گرفته است و در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲). رادیونوکلئیدهای موجود در سوخت و زیرگنبد راکتور

رادیونوکلئید	پرتوزایی(Ci)		رادیونوکلئید	پرتوزایی(Ci)	
	سوخت	زیرگنبد		سوخت	زیر گنبد
ید			پاره‌های شکافت		
I-131	1.21E+05	4.36E-05	Mo-99	2.42E+05	9.68E-08
I-132	1.79E+05	6.44E-05	Nb-95m	3.19E+02	1.28E-10
I-133	2.71E+05	9.76E-05	Nd-147	9.21E+04	1.23E-09
I-134	3.04E+05	1.09E-04	Pm-147	1.30E+04	1.73E-10
I-135	2.52E+05	9.07E-05	Pm-148	3.70E+04	4.93E-10
گازهای نجیب			Nb-95	2.57E+05	Nb-97
KR-83m	2.05E+04	5.47E-03	Nb-95	2.57E+05	1.03E-07
KR- 85m	4.77E+04	1.27E-02	Pm-149	8.60E+04	1.15E-09
KR- 87	9.56E+04	2.55E-02	Pr-143	2.26E+05	3.01E-09
KR- 88	1.35E+05	3.60E-02	Pr-144	1.49E+05	1.99E-09
KR- 89	1.70E+05	4.53E-02	Rh-103m	1.30E+05	5.20E-08
Xe-133	2.63E+05	7.01E-02	Rh-106	2.15E+04	8.60E-09
Xe-133m	8.01E+03	2.14E-03	Ru-106	1.57E+04	6.28E-09
Xe-135	3.57E+04	9.52E-03	Sb-127	8.30E+03	2.99E-08
Xe-135m	4.75E+04	1.27E-02	Sr-89	1.85E+05	7.40E-08

در جدول (۲) نتایج محاسبات برای نوع و میزان مواد پرتوزای قلب راکتور و همچنین مقدار مواد آزاد شده به زیرگنبد راکتور برای برخی از رادیونوکلئیدها آورده شده است. پس از خروج مواد رادیواکتیو از سوخت به خنک-کننده، بسته به ماهیت فیزیکی و شیمیایی این مواد، هر دسته از این محصولات با ضریب مخصوص به خود امکان خارج شدن از خنک‌کننده را پیدا می‌کنند. میزان رهاسازی عناصر رادیواکتیو از سوخت برای I، Te و Cs به‌ترتیب ۱۰۰، ۰/۲۷ و ۰/۰۳ می‌باشد، برای عناصر Ba، Sr، Ru و سایر پاره‌های شکافت برابر ۰/۰۰۱ می‌باشد [۹]. همچنین میزان رهاسازی عناصر رادیواکتیو از خنک‌کننده به زیرگنبد راکتور برای گازهای نجیب، ید و ذرات هوابرد به ترتیب برابر ۰/۰۲، ۰/۰۰۰۱ و $۱۰^{-۶}$ می‌باشد [۱۰].

نتایج محاسبات TEDE[1] و دز تیروئید برای مدت زمان حضور افراد برحسب دقیقه در فضای زیرگنبد راکتور محاسبه و در جدول (۳) آورده شده است. همان‌گونه که از نتایج این جدول دیده می‌شود، میزان آلودگی پرتوی فضای زیرگنبد راکتور به اندازه‌ای شدید است که میزان TEDE و دز تیروئید افراد حاضر در آنجا به‌ترتیب در دقیقه‌های اول و چهارم از حدود مجاز اعلام شده در اسناد [۱۱]، فراتر رفته است.

جدول (۳). نتایج محاسبات دز معادل موثر کل بدن و تیروئید برحسب زمان

زمان حضور زیرگنبد (دقیقه)	۱	۳	۴	۷	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
TEDE (میلی‌سیورت)	۳۰	۹۰	۱۲۶	۲۲۰	۳۱۰	۶۲۱	۹۴۰	۱۲۶۰	۱۵۷۰	۱۸۹۰
دز تیروئید (میلی‌سیورت)	۱۰	۴۱	۵۱	۹۱	۱۳۱	۲۷۰	۴۰۰	۵۴۰	۶۸۰	۸۱۱

حدود دز اعلام شده برای انجام اقدامات حفاظتی مربوط طبق استانداردهای موجود [۱۱]، به‌گونه‌ای است که اگر میزان TEDE بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌سیورت باشد، باید اقدام تخلیه یا پناهگیری در محل و درصورتی‌که بیشتر از ۵۰ میلی سیورت باشد باید استفاده از قرص ید نیز انجام شود. باتوجه به نتایج جدول (۳) و آنچه که طبق استانداردها گفته شده است، نیاز به اقدامات حفاظتی و ایمنی در راکتور تحقیقاتی تهران درصورت بروز حادثه ذوب این مقدار از قلب از همان لحظه‌های ابتدایی مهم و حیاتی است.

[1]Total Effective Dose Equivalent (TEDE)

بحث و نتیجه‌گیری:

تاریخچه کاری قلب، توان راکتور در زمان‌های قبل از بروز حادثه، مدت زمان تاخیر تا لخت شدن قلب و مدت زمانی که قلب پس از بروز حادثه لخت است، مولفه‌هایی حیاتی در تعیین میزان آسیب به قلب در حادثه از دست دادن خنک‌کننده است. در این تحقیق، گرمای پسمان سبب ذوب ۲۰ درصد از بخش بالایی قلب که لخت است می‌شود. با مقایسه نتایج به‌دست آمده برای TEDE و دز تیروئید با حدود دز اعلام شده، مشخص می‌شود که مقدار TEDE در همان دقیقه اول حادثه بالاتر از حد مجاز است و نیاز به اقدام حفاظتی تخلیه یا پناهگیری در محل می‌باشد. همچنین دز تیروئید ۴ دقیقه پس از رخدادن حادثه از حد مجاز فراتر رفته و نیاز به اقدام برای استفاده از قرص ید می‌باشد. باتوجه به این مطالعه، در مرحله اول، درنظرگرفتن تمهیدات ایمنی جهت جلوگیری از بروز این‌گونه حوادث و در مرحله بعد، کاهش اثرات ناشی از این‌گونه حادثه‌ها درصورت وقوع در راکتور تحقیقاتی تهران ضروری است.

مراجع:

1. IAEA, *Research reactor core conversion guidebook*, TEC-DOC 643, (1991). Volume 2, IAEA, Vienna.
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. AEOI, *Logbook of Tehran Research Reactor No. 46*, (2015). Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.
5. AEOI, *Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor*, (2009). Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.
6. J.R. Lamarsh, *Introduction to Nuclear Engineering*, Addision-Wesely publishing company, (1975). Polytechnic Institute of New York, USA: p. 276-290.
7. ORNL, *ORIGEN 2.2, Isotope Generation and Depletion Code*, (June 2002). Oak Ridge, Tennesse.
8. McGuire, S.A., J. Ramsdell, and G. Athey, *RASCAL 3.0. 5: Description of models and methods*. 2007: Office of Nuclear Security and Incident Response, US Nuclear Regulatory Commission.
9. Shibata, T., et al., *Release of fission products from irradiated aluminide fuel at high temperatures*, Nuclear Science and Engineering, (1984). 87(4): p. 405-417.
10. IAEA, *Derivation of the Source Term and Analysis of the Radiological Consequences of Research Reactor*, safety report series No. 53, (2008). IAEA, Vienna.
11. Guides, P.A., *Planning Guidance for Radiological Incidents*. 2013, EPA.

Calculation of exposure due to partial core uncovering under the Tehran research reactor Containment

Ehsan Boustani[1], Rohollah Ahangari Shahdehi[1*]

[1]Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), NSTRI, Reactor and nuclear safety school, Tehran, Iran

Abstract

Reactor core uncovering causes to significant reduction in the heat removal from fuel which leads to serious damage to the core. The severity of damage depends to some parameters such as operation history, operating power and lag time to uncovering the core. The amount of released radionuclides from 20% melted fraction of operating core No. 76 is calculated by ORIGEN2, and the personnel exposure under containment is calculated using RASCAl code. Total Effective Dose Equivalent (TEDE) for the whole body exceeds from 30 mSv in the first minute and 50 mSv for thyroid during 4 minutes after the accident. This amount of radiation dose needs to evacuation and prophylaxis as protective actions. These results indicate the importance of attention to this reactor safety for preventing from such accidents.

Keywords: Tehran research reactor, Severe accident, Core uncovering, TEDE, Thyroid dose