

بررسی آثار زیست‌شناختی خروج مواد رادیواکتیو از راکتور تحقیقاتی تهران بعد از وقوع یک حادثه فرضی

اکبر انوری*، میر رشید حسینی اقدم و سید محمودرضا آقامیری

گروه مهندسی پرتوپزشکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

* تهران، دانشگاه شهید بهشتی، کدپستی: ۱۹۸۳۹-۶۳۱۱۳

پست الکترونیکی: A_Anvari@sbu.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از راکتورهای هسته‌ای برای تولید برق و رادیوایزوتوپ‌ها در حال افزایش است. راکتورهای هسته‌ای به‌طور معمول یا بر اثر نقص سیستم‌های ایمنی و سیستم تهویه، مواد رادیواکتیو را از طریق دودکش راکتور در محیط آزاد می‌کنند و موجب افزایش دز محیط اطراف راکتور می‌شوند. بررسی خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان کارکنان و ساکنان اطراف راکتور، نقش ویژه‌ای در زمینه ایمنی راکتورهای هسته‌ای و حفاظت محیط زیست دارد. در این تحقیق، فرض شده است که بر اثر حادثه فرضی، مواد رادیواکتیو به‌صورت تصادفی و بر اثر اختلال در سیستم تهویه راکتور، از دودکش راکتور تحقیقاتی تهران خارج می‌شوند. در این مطالعه، ابتدا مقادیر دز معادل مؤثر کل (TEDE) ناشی از خروج مواد رادیواکتیو از دودکش راکتور با استفاده از کد فیزیک بهداشت HOTSPOT نسخه ۲/۰۷ در تمامی کلاس‌های جوی و برای بیشترین و کمترین میزان سرعت باد که به ترتیب ۱۳ m/s و ۲ بودند، شبیه‌سازی و محاسبه شده، سپس براساس معادلات BEIR V، خطر نسبی و همچنین احتمال ابتلا به سرطان در بدترین شرایط جوی، یعنی برای ناپایدارترین کلاس به‌دست آمده و ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد در تمامی موارد، میزان دز جذبی افراد کمتر از حد مجاز سالانه است. بیشینه مقدار TEDE اطراف راکتور با سرعت باد رابطه معکوسی دارد و با افزایش سرعت باد، مقدار بیشینه دز جذبی کاهش می‌یابد و در فاصله کمتری از راکتور اتفاق می‌افتد. همچنین در شرایط جوی ناپایدارتر، دز جذبی کارکنان و ساکنان اطراف راکتور، به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. نتایج محاسبات خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان نیز حاکی از آن است که کودکان بیشتر در معرض سرطان هستند و با افزایش سن، احتمال ابتلا به سرطان و خطر نسبی کاهش می‌یابد.

کلیدواژگان: راکتور تحقیقاتی تهران، دز معادل مؤثر کل، حادثه هسته‌ای فرضی، خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان.

۱. مقدمه

احتمال وقوع حادثه فرضی برای کارکنان و جمعیت اطراف راکتور، باید نحوه عملکرد راکتور به‌طور مکرر و منظم، مورد بررسی و کنترل قرار گیرد. محاسبه خطر نسبی (RR) و احتمال ابتلا به سرطان ناشی از مواد رادیواکتیو که بر اثر وقوع حادثه ناگهانی فرضی از دودکش راکتور خارج می‌شوند، امری ضروری در مبحث فیزیک بهداشت و ایمنی راکتورهای هسته‌ای است.

یکی از عمده‌ترین نگرانی‌ها در خصوص راکتورهای هسته‌ای، حفاظت و کنترل میزان رادیونوکلیدهای پخش شده در اطراف آن‌هاست. راکتورهای هسته‌ای به‌طور معمول یا بر اثر نقص سیستم‌های ایمنی و همچنین بر اثر سوانح هسته‌ای، رادیونوکلیدهایی را از طریق سیستم تهویه، در محیط آزاد می‌کنند و موجب افزایش دز محیط اطراف راکتور می‌شوند. به‌دلیل

۱.۲. حادثه هسته‌ای فرضی

در این مقاله، فرض شده است که بر اثر اختلال در بردهای الکترونیکی سیستم تهویه، مواد رادیواکتیو بیش از حالت کارکرد عادی از دودکش راکتور تحقیقاتی تهران وارد محیط می‌شود. رادیونوکلیدهای قلب راکتور حین کارکرد و در زمان حادثه با استفاده از کد ORIGEN نسخه ۲/۱ توسط انوری و همکارانش شبیه‌سازی شده و نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است [۳]. رادیونوکلیدهای پخش شده در محیط به دو گروه تقسیم می‌شوند. این مواد به صورت گاز و ذرات ریز معلق در هوا منتشر می‌شوند. براساس استانداردهای آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، درصد رها شده گروه‌های مختلف رادیونوکلیدها آورده شده است. برای گازهای نجیب، هالوژن، فلزات قلیایی، گروه توریم، گروه Ba-Sr، فلز نجیب، گروه سریوم و لانتانید به ترتیب مقادیر ۱۰۰، ۴۰، ۳۰، ۵، ۲، ۰/۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۲ می‌باشند [۹، ۱۰].

۲.۲. عوامل محیطی

جهت باد غالب در مکان راکتور تحقیقاتی تهران، غرب و جنوب غربی است که در مواقع غروب و در طول شب به سمت شمال تغییر پیدا می‌کند. بیشترین سرعت و جهت باد براساس گزارشات برج هواشناسی مرکز راکتور تحقیقاتی تهران در طول دوره ده سال در جدول ۲ آورده شده است و نشان می‌دهد که جهت باد از سمت غرب به شرق مکرراً در منطقه امیرآباد حاکم می‌شود [۲]. با توجه به تأثیر سرعت باد بر میزان انتشار رادیواکتیویته، بیشترین و کمترین میزان سرعت باد که به ترتیب ۱۳ و ۲ m/s بودند، در شبیه‌سازی‌ها اعمال شد. محاسبات TEDE برای هر شش کلاس وضعیت آب‌وهوایی پاسکال؛ از کلاس A (خیلی ناپایدار) تا کلاس F (نسبتاً پایدار) انجام شده است و در تعیین خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان، شرایط جوی ناپایدار کلاس A که بدترین حالت برای پخش مواد رادیواکتیو و میزان TEDE می‌باشد، در نظر گرفته شده است.

راکتور تحقیقاتی تهران (TRR^۱) یک راکتور تحقیقاتی ۵ MW از نوع استخری با نوع سوخت MTR^۲ است که در منطقه امیرآباد تهران واقع شده است [۱، ۲]. این راکتور مجهز به سیستم تهویه^۳ جهت آلودگی‌های قلب راکتور است. سیستم تهویه یک راکتور هسته‌ای برای اهدافی مانند کنترل و کمینه کردن انتشار مواد رادیواکتیو به محیط، محافظت کارکنان و محققان راکتور از پرتوگیری بیش از حد مجاز، فراهم کردن فشار منفی در داخل ساختمان راکتور به منظور کمینه کردن خطر انتشار مواد رادیواکتیو، در کل فراهم کردن یک محیط محدود و مناسب برای کارکنان است [۳].

این مطالعه در راستای پژوهش‌های انجام شده توسط این گروه پژوهشی است که در مجلات و کنفرانس‌ها به چاپ رسیده و ارائه شده است [۳، ۴] و هدف از آن، ارزیابی خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان^۴ ناشی از خروج مواد رادیواکتیو از راکتور تحقیقاتی تهران بر اثر وقوع حادثه ناگهانی فرضی است.

۲. مواد و روش‌ها

در ابتدا مقادیر دز معادل مؤثر کل (TEDE^۵) ناشی از خروج مواد رادیواکتیو از دودکش راکتور در تمامی کلاس‌های جوی و برای بیشترین و کمترین میزان سرعت باد که به ترتیب ۱۳ و ۲ m/s بودند، با استفاده از کد فیزیک بهداشت HOTSPOT نسخه ۲/۰۷ شبیه‌سازی و محاسبه شده است. سپس براساس معادلات BEIR V خطر نسبی و همچنین احتمال ابتلا به سرطان در بدترین شرایط جوی، یعنی برای ناپایدارترین کلاس به دست آمده و ارزیابی شده است [۳، ۵-۷]. کد HOTSPOT توسط آزمایشگاه ملی لارنس لیورمور (LLNL^۶) طراحی شده است و در آن از مدل توزیع گوسی (GPM^۷) برای محاسبات انتشار مواد رادیواکتیو استفاده شده است [۸].

1. Tehran Research Reactor
2. Material Testing Reactor
3. Ventilation System
4. Probability Caution
5. Total Effective Dose Equivalent
6. Lawrence Livermore National Laboratory
7. Gaussian plume model

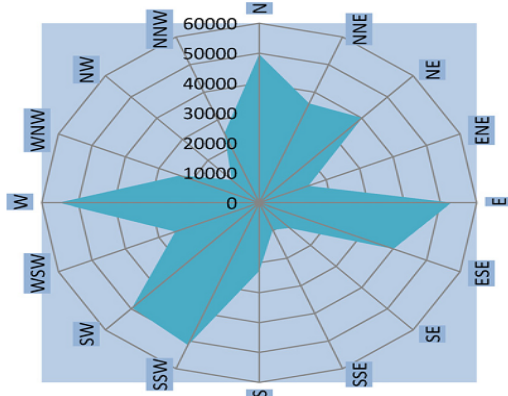
جدول ۱: ویژگی‌های رادیونوکلیدهای پخش شده از راکتور تحقیقاتی تهران براساس شبیه‌سازی‌های انوری و همکارانش [۳]

درصد رها شده	اکتیویته رها شده (بکرل)	گروه	رادیونوکلید
۱۰۰	$1/754E+14$	گازنجیب	Kr-۸۳m
۱۰۰	$2/823E+14$	گازنجیب	Kr-۸۵m
۱۰۰	$4/110E+14$	گازنجیب	Kr-۸۷
۱۰۰	$7/688E+14$	گازنجیب	Kr-۸۸
۱۰۰	$7/844E+14$	گازنجیب	Kr-۸۹
۱۰۰	$7/588E+12$	گازنجیب	Xe-۱۳۱m
۱۰۰	$3/260E+14$	گازنجیب	Xe-۱۳۳
۱۰۰	$6/989E+14$	گازنجیب	Xe-۱۳۵m
۱۰۰	$5/712E+11$	گازنجیب	Xe-۱۳۵
۱۰۰	$3/569E+15$	گازنجیب	Xe-۱۳۷
۱۰۰	$3/187E+15$	گازنجیب	Xe-۱۳۸
۴۰	$5/434E+14$	هالوژن	I-۱۳۱
۴۰	$1/281E+15$	هالوژن	I-۱۳۲
۴۰	$1/515E+15$	هالوژن	I-۱۳۳
۴۰	$1/732E+15$	هالوژن	I-۱۳۴
۴۰	$1/491E+15$	هالوژن	I-۱۳۵
۳۰	$9/591E+11$	فلزقلیایی	Cs-۱۳۷
۵	$9/964E+12$	گروه تلریوم	Te-۱۲۷
۵	$2/865E+13$	گروه تلریوم	Te-۱۲۹
۵	$8/874E+13$	گروه تلریوم	Te-۱۳۱
۵	$1/408E+14$	گروه تلریوم	Te-۱۳۲
۲	$0/208E+11$	گروه Br-Sr	Sr-۹۰
۲	$6/537E+12$	گروه Br-Sr	Zr-۹۵
۲	$2/977E+13$	گروه Br-Sr	Ba-۱۴۰
۰/۲۵	$9/851E+11$	فلزنجیب	Ru-۱۰۳
۰/۲۵	$1/807E+11$	فلزنجیب	Ru-۱۰۶
۰/۲۵	$0/578E+11$	فلزنجیب	Rh-۱۰۵
۰/۵	$2/201E+11$	گروه سریوم	Ce-۱۴۱
۰/۵	$1/199E+12$	گروه سریوم	Ce-۱۴۳
۰/۵	$0/442E+11$	گروه سریوم	Ce-۱۴۴
۰/۰۲	$0/172E+11$	لانتانید	Nd-۱۴۷
۰/۰۲	$0/3314E+11$	لانتانید	Pr-۱۴۳
	$1/71E+16$		کل

در نظر گرفتن شانزده جهت با شعاع‌های مختلف آورده شده است. شایان ذکر است ارتفاع دودکش راکتور تحقیقاتی تهران ۵۷ متر است که در شبیه‌سازی‌ها اعمال شده است [۲].

علاوه بر این، براساس گزارشات هواشناسی در منطقه امیرآباد تهران، کلاس A در ۳۰٪ مواقع حاکم بوده است. در شکل (۱) توزیع جمعیت در اطراف راکتور تحقیقاتی تهران با

از داده‌های آماری، با در نظر گرفتن سن و جنسیت افراد قابل محاسبه است؛ در نتیجه، محاسبات احتمال ابتلا به سرطان بر پایه سن و جنسیت و مدت زمان پرتوگیری است و از سایر مشخصات فردی چشم‌پوشی می‌شود [۵-۷].



شکل ۱: توزیع جمعیت در اطراف محل راکتور

جدول ۲: جهت و سرعت باد گزارش شده در محل راکتور تهران [۲]

سرعت باد (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	کل
۴/۹-۷/۰	۰	۴	۲	۴	۰	۰	۲	۰	۱۲
۷/۱-۹/۰	۰	۰	۰	۲	۰	۴	۲	۰	۸
۹/۱-۱۱/۰	۲	۰	۰	۴	۰	۸	۸	۴	۲۶
۱۱/۱-۱۳/۰	۲	۰	۲	۲	۲	۶	۱۰	۸	۳۲
۱۳/۱-۱۵/۰	۰	۰	۲	۰	۰	۶	۱۰	۲	۲۰
۱۵/۱-۱۷/۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۲
کل	۴	۴	۶	۱۲	۲	۲۴	۳۴	۱۴	۱۰۰

۳. نتایج

نتایج دز معادل مؤثر کل جذبی بر حسب سیورت برای سرعت‌های باد ۱۳ و ۲ m/s برای فواصل مختلف در تمامی کلاس‌های جوی برای شخص قرار گرفته روی سطح زمین (۱/۵ متری) به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. برای سرعت ۲ m/s بیشینه مقدار TEDE در کلاس A و در فاصله ۰/۳ km متری دودکش اتفاق افتاده و برابر با ۴۶ mSv است و برای سرعت ۱۳ m/s نیز، بیشینه مقدار TEDE برابر با ۱۴ mSv که برای کلاس A و در فاصله ۰/۲۲ km از مکان دودکش حاصل شده است که در تمامی موارد، میزان دز جذبی

۳.۲. خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان

مقادیر دز معادل مؤثر کل محاسبه شده توسط کد HOTSPOT برای تخمین خطر نسبی و همچنین احتمال ابتلا به سرطان ناشی از پرتوگیری استفاده شده است [۱۱]. یکی از شاخص‌هایی که در مطالعات اپیدمیولوژیک کاربرد وسیعی دارد، شاخص خطر نسبی است. این شاخص برای مقایسه دو گروه یا جمعیت با توجه به یک پیشامد مانند سرطان یا مرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص خطر نسبی فقط برای مطالعات آینده‌نگر به کار می‌رود و از نسبت میزان بروز سرطان در دو گروه به دست می‌آید [۱۲]. این محاسبات براساس معادلات BEIR V است [۵-۷]، در این معادلات، از مدل خطر نسبی استفاده شده است. این مدل براساس مطالعه بر روی مغز استخوان بازماندگان بمباران اتمی ژاپن برای دزهای کمتر از ۴ Sv و سنین بالای ۷۵ سال است [۵]. معادلات حاصل از این مطالعات، خطر نسبی سرطان را پس از دریافت D گری دز به جز سرطان‌های خون، پستان، تنفسی و گوارشی به صورت زیر محاسبه می‌کند [۱۱، ۱۳].

$$RR = 1 + (\alpha_1 D) \quad e \leq 10 \quad (1)$$

$$RR = 1 + (\alpha_1 D) \exp(\beta_1(e-10)) \quad e > 10 \quad (2)$$

به طوری که e سن فرد تحت تابش پرتو، D میزان دز دریافتی فرد و $\alpha_1 = 1/221 \text{ Sv}^{-1}$ و $\beta_1 = -0/0464$ است.

تشخیص اینکه سرطان فقط ناشی از پرتوگیری باشد، بسیار مشکل است؛ بنابراین، شاخص احتمال ابتلا به سرطان در ارتباط با تأثیر سن در وقوع سرطان ناشی از پرتوگیری توسط موسسه بهداشت آمریکا^۱ را در سال ۱۹۸۵ مطرح شد [۵-۷]. براساس نتایج حاصل از معادلات BEIR V، احتمال ابتلا به سرطان به صورت تابعی از خطر نسبی، به صورت زیر محاسبه شد:

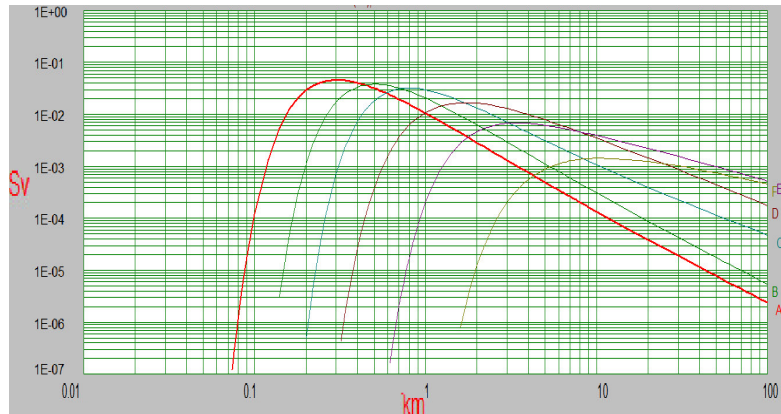
$$PC = [RR - 1/RR] \times 100 \quad (3)$$

ابتلا به سرطان نه تنها به جنسیت و سن افراد بستگی دارد، بلکه به عوامل دیگری مانند ژنتیک و سبک زندگی نیز مربوط می‌شود؛ بنابراین، میزان احتمال ابتلا به سرطان به طور معمول،

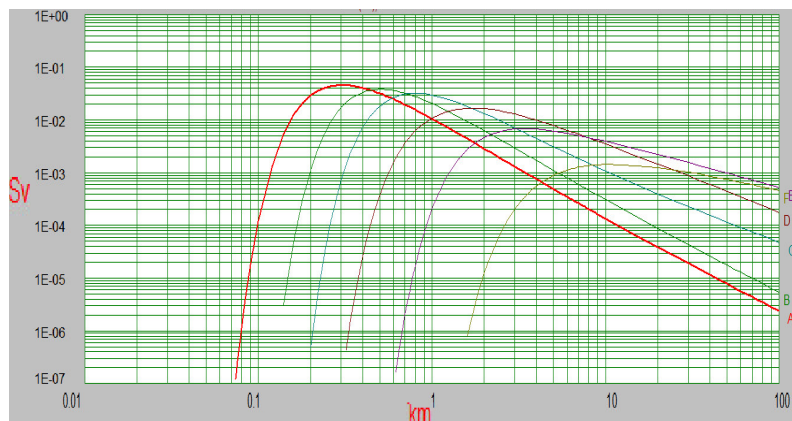
1. U.S. National Institutes of Health (NIH)

محاسبه و در جدول (۳) نشان داده شده است. علاوه بر این، محاسبات برای دز مجاز سالانه یک میلی سیورت نیز انجام شده که در جدول (۴) آورده شده است. برای مقایسه بهتر نمودارهای خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان در سنین مختلف، با استفاده از فرمول‌های (۱) و (۲) در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

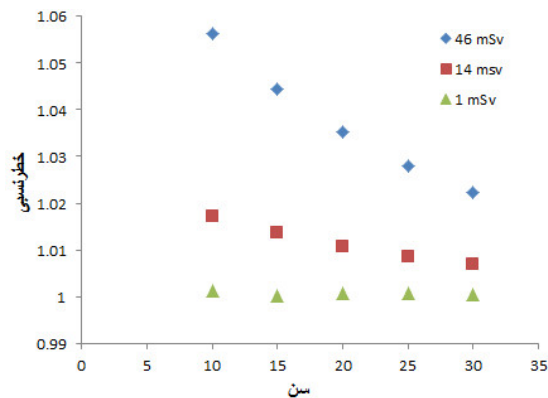
افراد کمتر از حد مجاز سالانه بود [۱۴، ۱۵]. خطر نسبی و همچنین احتمال ابتلا به سرطان در شرایط جوی ناپایدار کلاس A که بدترین حالت برای پخش مواد رادیواکتیو و میزان TEDE می‌باشد، به صورت تابعی از سن برای سرعت‌های ۲ و ۱۳ m/s در بیشینه مقدار TEDE به ترتیب ۴۶ mSv و ۱۴ mSv



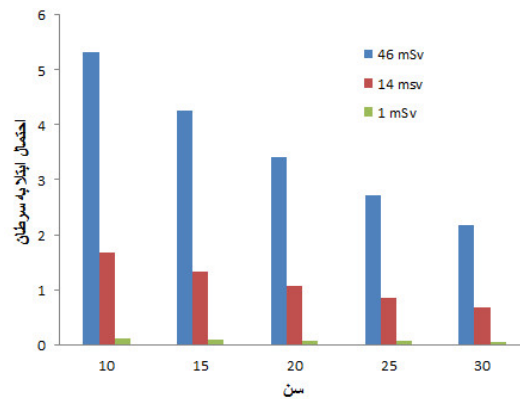
شکل ۲: TEDE تابعی از مسافت از محل TRR در جهت باد با سرعت ۲ m/s



شکل ۳: TEDE تابعی از مسافت از محل TRR در جهت باد با سرعت ۱۳ m/s



شکل ۴: خطر نسبی تابعی از سن برای مقادیر مختلف دز



شکل ۵: احتمال ابتلا به سرطان تابعی از سن برای مقادیر مختلف دز

جدول ۳: خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان برای میزان دزهای محاسبه شده

سرعت باد	دز	سن (سال)	خطر نسبی	احتمال ابتلا به سرطان (%)
۲ (m/s)	۴۶ (mSv)	۱۰ و کمتر از ۱۰	۱/۰۵۶۲	۵/۳۱۷۹
		۱۵	۱/۰۴۴۵	۴/۲۶۳۸
		۲۰	۱/۰۳۵۳	۳/۴۱۱۱
		۲۵	۱/۰۲۸۰	۲/۷۲۴۰
		۳۰	۱/۰۲۲۲	۲/۱۷۲۳
۱۳ (m/s)	۱۴ (mSv)	۱۰ و کمتر از ۱۰	۱/۰۱۷۱	۱/۶۸۰۷
		۱۵	۱/۰۱۳۶	۱/۳۳۷۳
		۲۰	۱/۰۱۰۷	۱/۰۶۳۴
		۲۵	۱/۰۰۸۵	۰/۸۴۵۱
		۳۰	۱/۰۰۶۸	۰/۶۷۱۳

جدول ۴: خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان برای دز مجاز سالیانه یک میلی سیورت

دز	سن (سال)	خطر نسبی	احتمال ابتلا به سرطان (%)
۱ (mSv)	۱۰ و کمتر از ۱۰	۱/۰۰۱۲	۰/۱۲۲۰
	۱۵	۱/۰۰۱۰	۰/۰۹۶۷
	۲۰	۱/۰۰۰۸	۰/۰۷۶۷
	۲۵	۱/۰۰۰۶	۰/۰۶۰۸
	۳۰	۱/۰۰۰۵	۰/۰۴۸۲

۴. بحث و نتیجه گیری

منظور، ابتدا مقادیر دز معادل مؤثر کل (TEDE) ناشی از مواد رادیواکتیو خروجی برای تمامی کلاس‌های جوی، با استفاده از کد فیزیک بهداشت HOTSPOT نسخه ۲/۰۷ شبیه‌سازی و محاسبه شده است. سپس براساس معادلات BEIR V خطر

هدف از این مطالعه، ارزیابی خطر نسبی و احتمال ابتلا به سرطان^۱ ناشی از خروج رادیونوکلیدها از طریق دودکش راکتور تحقیقاتی تهران، بر اثر وقوع حادثه ناگهانی فرضی است. بدین

احتمال ابتلا به سرطان برای سنین ده و کمتر از ده سال اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که شیب این منحنی‌ها در مقادیر دزهای بالاتر برای تمامی سنین بیشتر است. یکی از نتایج مهم حاصل از این پژوهش، اهمیت سن در احتمال ابتلا به سرطان است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که احتمال ابتلا به سرطان برای کودکان، بر اثر دریافت دز ۱ mSv تقریباً برابر با احتمال ابتلا به سرطان اشخاص میان‌سال در دز جذبی ۲/۵ mSv است؛ ولی باید توجه داشت که منحنی احتمال ابتلا به سرطان براساس سن در دزهای زیاد، دارای شیب تندی است؛ بنابراین، با افزایش میزان دز، این رابطه برقرار نیست.

نسبی و همچنین احتمال ابتلا به سرطان در بدترین شرایط جوی، یعنی برای ناپایدارترین کلاس به‌دست آمده و ارزیابی شده است. عواملی محیطی مانند تأثیر باد و شرایط جوی در میزان دز جذبی کارکنان و ساکنان اطراف راکتورها نقش دارند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که بیشینه مقدار TEDE اطراف راکتور با سرعت باد، رابطه معکوسی دارد. با افزایش سرعت باد، مقدار بیشینه دز جذبی کاهش می‌یابد و در فاصله کمتری از راکتور اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود در وضعیت جوی ناپایدارتر، دز جذبی به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. براساس شکل‌های ۴ و ۵، با افزایش سن احتمال ابتلا به سرطان در تمام مقادیر دز کاهش می‌یابد؛ بنابراین، کودکان بیشتر در معرض سرطان هستند. مطابق با نتایج جدول ۳، بیشینه خطر نسبی و

۵. مراجع

- [1] A.E.O.o.I. (AEOI), Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor, 2007.
- [2] A.E.O.o.I. (AEOI), calculation of Annual Doses to Man from Routine Release of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance, (1977) Regulatory Guide 1.109, Appendix I.
- [3] A. Anvari, L. Safarzadeh, Assessment of the total effective dose equivalent for accidental release from the Tehran Research Reactor, Annals of Nuclear Energy 50(2012) 251-255.
- [4] A. Anvari, L. Safarzadeh, Assessment of molybdenum powder discharge from Tehran research reactor due to a hypothetical human error, Iranian Journal of Radiation Safety and Measurement 1(2013) 9-14.
- [5] V. Beir, Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, National Academy of Sciences. National Academy Press. Washington DC, EEUU(1990).
- [6] J.T. Bushberg, J.M. Boone, The essential physics of medical imaging, Lippincott Williams & Wilkins, 2011.
- [7] H. Cember, T.E. Johnson, P. Alaei, Introduction to health physics, Medical Physics 35(2008) 5959.
- [8] S.G. Homann, HotSpot, Health Physics Codes for the PC. Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-MA-106315(1994).
- [9] S.S. Raza, M. Iqbal, Atmospheric dispersion modeling for an accidental release from the Pakistan Research Reactor-1 (PARR-1), Annals of Nuclear Energy 32(2005) 1157-1166.
- [10] U.R. Guide, 1.183: Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors, US Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide. Office of Nuclear Regulatory Research(2000).
- [11] IAEA, Methods for Estimating the Probability of Cancer from Occupational

- Radiation Exposure, in: IAEA-TECDOC-870, (Ed), Vienna, 1996.
- [12] C.L. Siström, C.W. Garvan, Proportions, Odds, and Risk, *Radiology* 230(2004) 12-19.
- [13] T.L. Saint Yves, P.A. Cabral, T. Brum, F.C. Rother, P.F. Alves, D.C. Lauria, E.R. de Andrade, Terrorist Radiological Dispersive Device (RDD) Scenario and Cancer Risk Assessment, Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal 18(2012) 971-983.
- [14] I.C.o.R.P. (ICRP), Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: A Report. Ingestion dose coefficients.(1993), Elsevier, 1994.
- [15] I.C.o.R.P. (ICRP), Human respiratory tract model for radiological protection: A report of a task group of the International Commission on Radiological Protection, Elsevier Science Health Science Division, 1994.