مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱، شمارهٔ ۱، زمستان ۱۳۹۱

بررسی نشت پودر مولیبدن از راکتور تحقیقاتی تهران در اثر اشتباه فرضی نیروی انسانی

اکبر انوری* و لاله صفرزاده

گروه مهندسی پرتو پزشکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* تهران، دانشگاه شهید بهشتی، گروه مهندسی پرتوپزشکی، کدپستی: ۶۳۱۱۳- ۱۹۸۳۹

پست الکترونیکی: A_Anvari@sbu.ac.ir

چکیده

محاسبهٔ دز جذبی اطراف راکتورها در زمان کارکرد عادی و شرایط اضطراری برای ایمنی راکتورهای هسته‌ای بسیار ضروری است. در این پژوهش، میزان دز معادل مؤثر جذبی کل کارکنان و جمعیت اطراف راکتور تحقیقاتی تهران (TRR) ناشی از نشت پودر مولیبدن اکتیو در اثر اشتباه نیروی انسانی با استفاده از کد فیزیک بهداشت HOTSPOT نسخه ۲/۰۷ شبیه‌سازی و محاسبه شده است. در این تحقیق، فرض شده است که در حین خارج کردن آمپول کوارتز حاوی مولیبدن پرتودهی شده از کن آلومینیومی، بر اثر اشتباه نیروی انسانی آمپول کوارتز شکسته و پودر مولیبدن به صورت گاز و ذرات معلق در هوا از دودکش آزمایشگاه رادیوایزوتوپ‌ها خارج و در محیط اطراف منتشر می‌شوند. در کد HOTSPOT از مدل توزیع گوسی برای محاسبهٔ انتشار مواد رادیواکتیو استفاده شده است. محاسبات برای هر شش کلاس شرایط آب و هوایی پاسکال و سرعت‌های متفاوت باد برای کارکنان و ساکنان قرار گرفته تا شعاع صد کیلومتری راکتور انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که دز جذبی کارکنان و ساکنان اطراف راکتور تحقیقاتی تهران، ناشی از انتشار پودر فعال مولیبدن بسیار کمتر از میزان مجاز است.

کلیدواژگان: بررسی دز جذبی، حادثه هسته‌ای فرضی، کد HOTSPOT، راکتور تحقیقاتی تهران.

۱. مقدمه

با توجه به گسترش علوم و فنون هسته‌ای و نیاز بیش از پیش به تولید رادیوایزوتوپ‌ها و رادیوداروها جهت درمان بیماران و همچنین تولید برق، ساخت راکتورهای تحقیقاتی و نیروگاه‌های هسته‌ای در کنار راکتورهای موجود ضروری به نظر می‌رسد؛ اما نکته‌ای که باید به آن توجه ویژه‌ای شود، مبحث فیزیک بهداشت و ایمنی راکتورهاست. نخستین مسئله در ساخت و راه‌اندازی یک راکتور اعم از راکتورهای تحقیقاتی و نیروگاه‌های برق هسته‌ای، بررسی مسائل فیزیک بهداشت و حفاظت کارکنان و جمعیت اطراف راکتورها در برابر مواد رادیواکتیو انتشار شده از آن‌هاست. به جرأت می‌توان گفت که تمامی توجهات این مبحث در بخش پسمانداری خلاصه شده است. انتشار مواد رادیواکتیو از سیستم تهویهٔ راکتورها به صورت معمول روی می‌دهد که در صورت بی‌توجهی ممکن است آثار جبران‌ناپذیری به بار آورد.

راکتورهای هسته‌ای مجهز به سیستم تهویه[1] می‌باشند که نقش مهمی را ایفا می‌کند. 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 برای کمینه کردن خطر انتشار مواد رادیواکتیو و در کل فراهم کردن یک محیط محدود و مناسب برای کارکنان، از جمله فاکتورهای مهم در ایمنی راکتور هستند [۱ و ۲]. چندین فاکتور مهم در انتشار مواد رادیواکتیو خروجی از دودکش

1. Ventilation System

راکتورها مانند مقدار و اندازهٔ رادیونوکلیدهای منتشر شده، ارتفاع دودکش راکتور، سرعت باد، شرایط جوی مؤثرند، و محاسبهٔ دز معادل مؤثر کل (TEDE[1]) اطراف راکتورها در زمان کارکرد عادی و شرایط اضطراری برای ایمنی راکتورها بسیار ضروری است. مواد رادیواکتیو انتشاری از راکتورها تابش داخلی و خارجی را متوجه کارکنان و ساکنان اطراف می‌کنند. دز معادل مؤثر کل حاصل جمع دز معادل مؤثر (EDE) است که ناشی از تابش‌های خارجی مانند تابش مواد رادیواکتیو انتشاری ته‌نشین شده در سطح زمین و نهفته شده در آب باران به اضافهٔ دز معادل مؤثر اجباری (CEDE[2]) که ناشی از تنفس می‌باشد [۳].

امروزه از راکتورهای تحقیقاتی برای تولید رادیوایزوتوپ جهت مصارف پزشکی هسته‌ای استفاده می‌شود. بسیاری از بیماری‌ها به‌ویژه سرطان‌ها تنها با استفاده از رادیوداروها قابل تشخیص و درمان‌اند. در ایران نیز بیش از ۱۲۰ مرکز پزشکی هسته‌ای وجود دارد و به صورت میانگین در هر هفته ده هزار بیمار تحت درمان قرار می‌گیرند. رادیوایزوتوپ‌های مورد نیاز مراکز پزشکی هسته‌ای کشور توسط سازمان انرژی اتمی ایران در راکتور تحقیقاتی تهران (TRR[3]) تولید می‌شوند. راکتور تهران یک راکتور تحقیقاتی ۵ MW از نوع استخری با نوع سوخت MTR[4] است که در منطقهٔ امیرآباد تهران واقع شده است [۱].

یکی از رادیوایزوتوپ‌های پرکاربرد در تشخیص بیماری‌ها تکنسیوم-۹۹m است. در حال حاضر، بیش از ۹۰ درصد رادیوداروهای مصرفی جهان را تکنسیوم-۹۹m تشکیل می‌دهد و چون نیمهٔ عمر آن شش ساعت است، نمی‌توان بلافاصله پس از تولید به مراکز پزشکی هسته‌ای ارسال کرد، بدین سبب از ژنراتور مولیبدن- تکنسیوم استفاده می‌گردد. مولیبدن تولید شده در راکتور به صورت ژنراتور به مراکز پزشکی هسته‌ای انتقال داده می‌شود و در آنجا تکنسیوم حاصل از دوشیدن ژنراتور، مورد استفاده قرار می‌گیرد. هم‌اکنون نیاز هفتگی کشور به مولیبدن- تکنسیوم بیش از ۹۰ Ci است.

۲. مواد و روش‌ها

۲ـ۱. تولید مولیبدن و شکستن آمپول کوارتز حاوی آن

^{99}Mo در اثر بمباران نوترونی اکسید مولیبدن طبیعی[5] با فراوانی ۲۰٪ نسبت به ^{98}Mo در قلب راکتور تحقیقاتی تهران تولید می‌گردد. در این پژوهش، فرض شده است برای تولید تکنسیوم، یک گرم از اکسید مولیبدن طبیعی با فراوانی ۲۰٪ نسبت به ^{98}Mo در یک میلی‌لیتر اسید نیتریک ۱ درصد حل می‌شود و سپس درون آمپول کوارتز تبخیر و با گاز نیتروژن خشک می‌گردد و به مدت هفت روز در قلب راکتور تهران با نوترون‌های گرمایی با شار 3×10^{13} $n/cm^2.s$ پرتودهی می‌شود. فعالیت ویژهٔ ^{99}Mo تولید شده از مرتبهٔ ۳۲۰۰ GBq/mg (۸۷ mCi/mg) می‌باشد. بدین ترتیب، فعالیت کل حاصل برابر با ۳۲۰۰ GBq (۸۷ mCi) خواهد بود. بعد از اتمام پرتودهی نمونه، آمپول کوارتز حاوی $^{99}MoO_3$ که درون کن آلومینیومی قرار دارد، به آزمایشگاه رادیوایزوتوپ‌ها منتقل می‌گردد و در آنجا مراحل تولید تکنسیوم-۹۹m شروع می‌گردد. همواره این امکان وجود دارد که در بازه ما، بین اتمام پرتودهی نمونه و خارج کردن آمپول کوارتز حاوی مولیبدن پرتودهی شده از کن آلومینیومی، بر اثر اشتباهات انسانی آمپول کوارتز شکسته و مواد رادیواکتیو در فضای داخل آزمایشگاه منتشر و در ادامه از طریق سیستم تهویه و دودکش آن وارد محیط شوند. در این مقاله، به شبیه‌سازی و محاسبهٔ میزان دز معادل مؤثر جذبی کل کارکنان و جمعیت اطراف راکتور تهران ناشی از نشت پودر مولیبدن بعد از وقوع یک حادثهٔ فرضی با استفاده از کد فیزیک بهداشت HOTSPOT نسخه ۲/۰۷ پرداخته شده است. این کد توسط آزمایشگاه ملی لارنس لیورمور (LLNL[6]) طراحی شده و در آن از مدل توزیع گوسی (GPM[7]) برای محاسبات انتشار مواد رادیواکتیو استفاده شده است [۳].

1. Total Effective Dose Equivalent
2. Committed Effective Dose Equivalent
3. Tehran Research Reactor
4. Material Testing Reactor

5. MoO_3
6. Lawrence Livermore National Laboratory
7. Gaussian plume model

۲ـ۲. نقش باد

جهت باد غالب در منطقهٔ امیرآباد تهران، غربی و جنوب غربی است. به هنگام عصر و در طول شب، جریان باد کوه‌های شمالی غالب می‌گردد. سرعت و جهت باد گزارش شدهٔ این منطقه در یک بازهٔ ده‌ساله توسط برج هواشناسی مرکز راکتور تحقیقاتی تهران نشان می‌دهد که جهت باد غرب به شرق مکرراً در منطقهٔ امیرآباد حاکم می‌شود. سرعت باد میانگین ۵ m/s در محاسبات در نظر گرفته شده است [۱]. علاوه بر آن، به منظور بررسی اثر سرعت باد بر میزان انتشار رادیواکتیویته، کمترین میزان مجاز سرعت باد که ۲ m/s است نیز در شبیه‌سازی‌ها اعمال گردید [۲ و ۳].

۲ـ۳. ارتفاع دودکش

راکتور تحقیقاتی تهران، دو دودکش به ارتفاع ۵۷ متر دارد که یکی مربوط به ساختمان راکتور، و دیگری مربوط به آزمایشگاه رادیوایزوتوپ‌ها می‌باشد که در جدول (۱) ویژگی‌های آن‌ها آورده شده است [۱]. ارتفاع دودکش، ارتفاع واقعی انتشار مواد رادیواکتیو نیست و برای محاسبهٔ ارتفاع مؤثر انتشار مواد رادیواکتیو از معادلهٔ هلند استفاده شده است که عواملی مانند سرعت خروج مواد از دودکش، اختلاف دمای داخل دودکش و هوای بیرون در آن نقش دارند [٤]. هنگامی که مواد از دهانهٔ دودکش خارج می‌شوند، قبل از آنکه در مسیر جریان باد قرار گیرند، بسته به درجه حرارت و سرعت آن‌ها، مقداری از دهانهٔ دودکش به طرف بالا صعود می‌کند (Δh). به این مقدار، ارتفاع بلند شدن مواد رادیواکتیو از دهانه یا خیزش مواد خروجی[1] گفته می‌شود. ارتفاع مؤثر دودکش عبارت است از ارتفاع فیزیکی (h) آن به اضافه ارتفاع خیزش دود از دهانه دودکش:

$$H = h + \Delta h$$
$$\Delta h = V_s D/u \, [1.5+2.68\times10^{-3} PD \, (T_s-T_a)/T_s]$$

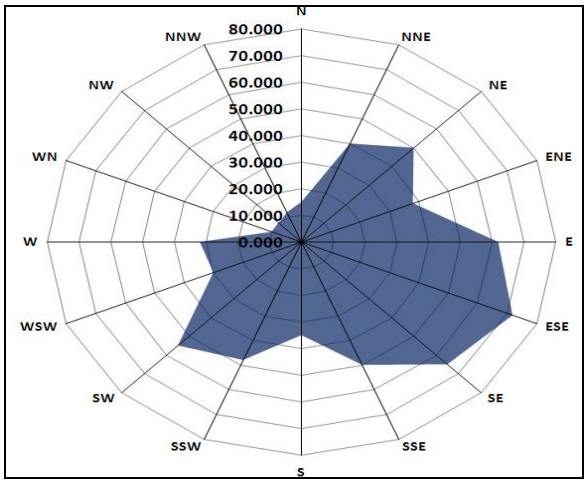
در این رابطه، V_s سرعت مواد خروجی از دهانهٔ دودکش (m/s)، D قطر داخلی دودکش (m)، u سرعت باد (m/s)، P فشار اتمسفر (mbar)، T_s دمای مواد خروجی از دودکش و T_a دمای محیط (K) است. معادله هلند برای کلاس آب و هوایی D (معتدل) مناسب است. برای کلاس‌های A و B در ضریب ۱/۲ و برای کلاس‌های E و F در ۰/۸ ضرب می‌شود [٤].

جدول (۱): ویژگی‌های دودکش راکتور تهران و آزمایشگاه رادیوایزوتوپ‌ها [۱].

مشخصات	
تعداد	۲
قطر (m)	۲.۵
ارتفاع (m)	۵۷
سرعت خروج مواد رادیواکتیو (m/s)	8.7

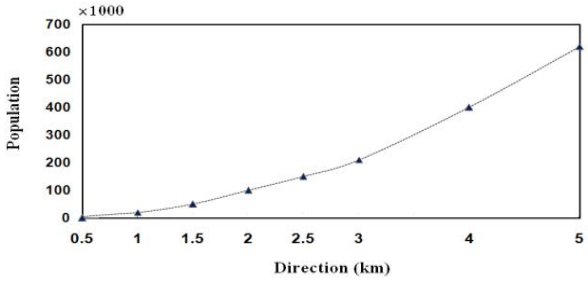
۲ـ٤. جمعیت اطراف راکتور

راکتور تحقیقاتی تهران در شمال غربی شهر تهران در منطقهٔ امیرآباد واقع شده است. در شعاع ده کیلومتری آن بیش از ۸۰٪ کل جمعیت ۸ میلیونی تهران ساکن‌اند. تا شعاع ۵۰۰ متری راکتور آزمایشگاه‌ها و ساختمان‌های اداری سازمان انرژی اتمی واقع شده‌اند و به غیر از کارکنان سکنه‌ای وجود ندارد. در شکل (۱) و (۲) جمعیت ساکن اطراف راکتور در شانزده جهت و فاصله‌های مختلف تا شعاع ۵ km نشان داده شده است [۱]. همچنین میزان متوسط تنفس (m^3/s $۳/۳۳ \times ۱۰^{-٤}$) در محاسبات اعمال شده است [۲ و ۳].



شکل (۱): جمعیت اطراف راکتور در شانزده جهت مختلف تا شعاع ۵ km [۱]

1. Plume Rise



شکل (۲): جمعیت اطراف راکتور تحقیقاتی تهران [۱]

۲ـ۵. شرایط جوی

هر شش کلاس شرایط آب و هوایی پاسکال؛ از کلاس A (خیلی ناپایدار) تا کلاس F (نسبتاً پایدار) در محاسبات و شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده‌اند [۳]. در منطقهٔ امیرآباد تهران بر اساس گزارشات هواشناسی، کلاس A در ۳۰٪ مواقع حاکم بوده است. اطلاعات هواشناسی در منطقهٔ امیرآباد تهران در جدول (۲) ارائه شده است [۱].

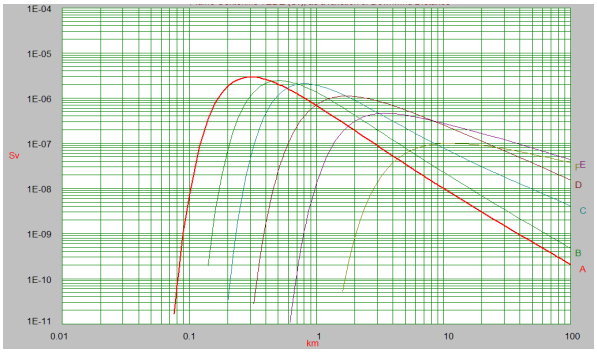
جدول (۲): اطلاعات هواشناسی در منطقه امیرآباد تهران [۱]

شرایط آب و هوایی	
بارندگی سالیانه (cm/year)	۲۳
متوسط دمای سالیانه (°C)	۱۸
ارتفاع از سطح دریا (m)	۱۳۵۹
رطوبت (g/m^3)	۵

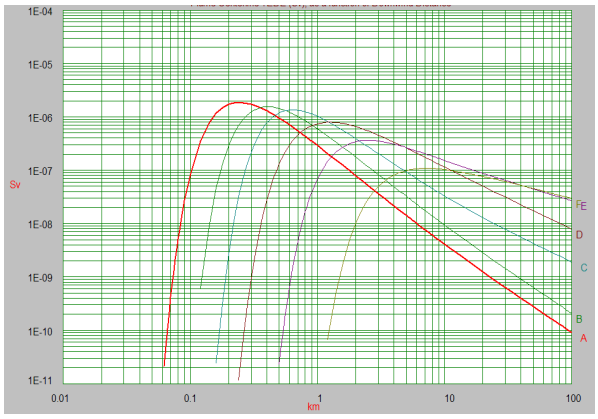
۳. نتایج

محاسبات و شبیه‌سازی محاسبه TEDE برای نشت پودر مولیبدن بعد از یک سانحهٔ فرضی در شرایط مختلف جوی و با سرعت‌های متفاوت باد تا شعاع صد کیلومتری راکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از کد HOTSPOT انجام شد. در محاسبات انجام شده، سرعت باد غالب و کمترین سرعت باد در محل راکتور به منظور اهداف مقایسه‌ای در نظر گرفته شده است. در کد HOTSPOT از مدل توزیع گوسی استفاده می‌شود. مدل توزیع گوسی یکی از معتبرترین مدل‌های توزیع می‌باشد و در عمل نیز، این مدل به صورت موفقیت‌آمیزی برای موارد پراکندگی و پخش استفاده شده است. نتایج TEDE بر حسب سیورت محاسبه شده برای فواصل مختلف در تمامی کلاس‌های جوی برای شخص قرار گرفته روی سطح زمین (۱/۵متری) در فواصل مختلف با سرعت‌های باد ۲ m/s و ۵ m/s به ترتیب در شکل‌های (۳) و (٤) آورده شده است. برای مقایسهٔ بهتر، مقادیر ماکزیمم TEDE در فواصل مربوط برای سرعت‌های باد مذکور در جدول (۳) نشان داده شده است.

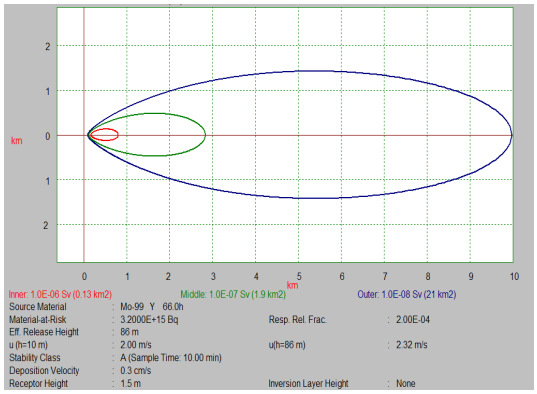
شکل‌های (۵) و (٦) میزان انتشار دز در اطراف راکتور تهران به صورت دو بعدی برای کلاس A را نشان می‌دهند. در این نمودارها دز حاصل از انتشار پودر مولیبدن با مقادیر µSv ۱ و ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ به ترتیب در نواحی km^2 ۰/۱۳، ۱/۹ و ۲۱ برای سرعت باد ۲ m/s و km^2 ۰/۰۳٦، ۰/۷۷ و ۸/۵ برای سرعت باد ۵ m/s مشخص شده‌اند.



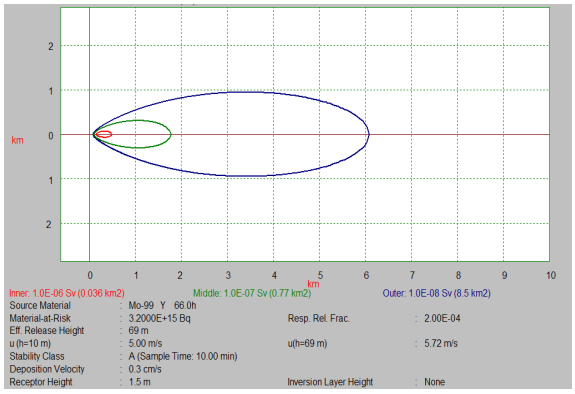
شکل (۳): TEDE محاسبه شده در فواصل مختلف (Sv) برای تمامی کلاس‌های جوی با سرعت باد ۲ m/s



شکل (٤): TEDE محاسبه شده در فواصل مختلف (Sv) برای تمامی کلاس‌های جوی با سرعت باد ۵ m/s



شکل (۵): میزان انتشار دز در اطراف راکتور برای کلاس A با سرعت باد ۲ m/s



شکل (٦): میزان انتشار دز در اطراف راکتور برای کلاس A با سرعت باد ۵ m/s

جدول (۳): مقادیر ماکزیمم TEDE در فواصل مربوط برای سرعت باد ۲ m/s و ۵

سرعت باد ۵ m/s		سرعت باد ۲ m/s		
مسافت (km)	ماکزیمم TEDE (Sv)	مسافت (km)	ماکزیمم TEDE (Sv)	شرایط جوی
0.24	1.86E-۰٦	0.3	2.93E-۰۵	کلاس A (خیلی ناپایدار)
0.41	1.55E-۰٦	0.51	2.44E-۰٦	کلاس B (نسبتاً ناپایدار)
0.63	1.37E-۰٦	0.8	2.16E-۰٦	کلاس C (اندکی ناپایدار)
1.2	8.44۸E-۰۷	1.6	1.25E-۰٦	کلاس D (معتدل)
2.5	3.67۳E-۰۷	2.7	7.76E-۰۷	کلاس E (اندکی پایدار)
6.7	۲1.27E-۰۷	7.3	2.60E-۰۷	کلاس F (نسبتاً پایدار)

٤. بحث و نتیجه‌گیری

چندین فاکتور مهم در میزان دز جذبی ساکنان اطراف راکتورها نقش دارند که در این مطالعه به آن‌ها پرداخته شد و از نتایج مهم به دست آمده می‌توان به آثار باد و شرایط جوی بر دز جذبی اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که ماکزیمم TEDE اطراف راکتور با سرعت باد رابطهٔ عکس دارد، با افزایش سرعت باد، مقدار ماکزیمم دز جذبی کاهش می‌یابد و در فاصلهٔ کمتری از راکتور اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود در شرایط جوی ناپایدارتر دز جذبی به طور محسوسی افزایش می‌یابد. ماکزیمم TEDE در ناپایدارترین شرایط جوی (کلاس A) با سرعت باد ۲ m/s، ۲۹/۳ μSv به دست آمد که خیلی کمتر از میزان دز جذبی سالیانه مجاز است. بر اساس پروتکل‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA[1]) و حفاظت در برابر اشعه (ICRP[2]) دز جذبی سالیانه مجاز برای عموم مردم و کارکنان مراکز هسته‌ای به ترتیب ۱ و ۵۰ میلی سیورت در سال تعیین شده است. در شرایط خاص، دز سالیانه می‌تواند تا ۵ میلی سیورت افزایش یابد مشروط بر اینکه میانگین دز در پنج سال متوالی از ۱ میلی سیورت در سال تجاوز نکند [۵ و ٦]. تمامی نتایج به دست آمده مؤید آن است که دز جذبی کارکنان و ساکنان اطراف راکتور تحقیقاتی تهران بعد از شکستن آمپول کوارتز حاوی پودر اکتیو مولیبدن-۹۹ و نشت مولیبدن بسیار کمتر از میزان مجاز است و هیچ یک از حدود ایمنی را نقض نمی‌کند؛ بنابراین برای سلامتی کارکنان راکتور و ساکنان اطراف آن خطری ایجاد نمی‌کند. با توجه به اینکه سرعت باد و میزان خیزش مواد خروجی از دهانه دودکش راکتور رابطهٔ عکس دارند، در سرعت ۲ m/s، ارتفاع مؤثر انتشار مواد رادیواکتیو بیشتر از سرعت ۵ m/s خواهد بود. این عامل موجب خواهد شد که شعاع بزرگ‌تری از منطقه تحت تأثیر مواد رادیواکتیو قرار گیرد.

1. International Atomic Energy Agency
2. International Commission Radiation Protection

۵. تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی به جهت حمایت از فعالیت‌های پژوهشی سپاس‌گزاریم. شایان ذکر است این پژوهش با استفاده از اعتبارات پژوهشی این معاونت طی قرارداد شماره ۶۰۰/۲۴۰ مصوب در تاریخ ۹۱/۳/۲۱ انجام شده است.

مراجع

[1] Atomic Energy Organization of Iran, Safety analysis report for Tehran research reactor (TRR), (2007).
[2] S S Raza and M Iqbal, Annals of Nuclear Energy 32 (2005) 1157.
[3] G Steven, Lawrence Livermore National Laboratory, Health physics codes version 2.07.1 user's guide, CA 94550 (2010).
[4] H S Peavy, New York, London: McGraw-Hill Book Company, (1985).
[5] International Commission on Radiological Protection, Human respiratory tract model for radiological protection, ICRP 66, Annals of ICRP, 24, 1–3, (1994).
[6] International Commission on Radiological Protection, Age dependent doses to the members of the public from intake of radio nuclides, ICRP 72, Annals of ICRP, 26, 1, (1996).