



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

## اثر مقدار سزیم ۱۳۷ و رودی به بدن در جذب آن در بافت

فاطمه عبدالکریمی<sup>۱</sup>، عفت یاحقی<sup>۲\*</sup>، امیر موافقی<sup>۳</sup> و کمال مصطفی نژاد<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد واحد نطنز، نطنز، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup> دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

<sup>۳</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

<sup>۴</sup> دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

\* قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، کد پستی: ۱۶۸۱۸-۳۴۱۴۹

پست الکترونیکی: eyahaghi@ikiu.ac.ir

### چکیده

برخی مواد رادیواکتیو در اثر فعالیت انسان به صورت انبوه در محیط زیست پخش می‌شوند. از جمله این فعالیت‌ها می‌توان به آزمایش‌های هسته‌ای و به‌ویژه به حوادث بزرگ نیروگاه‌های هسته‌ای مانند چرنوبیل و فوکوشیما اشاره کرد. پرتوگیری‌های خارجی و داخلی در نتیجه ورود این رادیونوکلئیدها (از طریق خوراکی‌ها، نوشیدنی‌ها و استنشاق هوای آلوده) به بدن، می‌تواند خطرات بالقوه و بالفعلی را برای انسان ایجاد کند. میزان این پرتوگیری‌ها بسته به نوع رادیونوکلئید، میزان آلودگی و رودی و مدت زمان متفاوت خواهد بود. از جمله مهم‌ترین موارد آلودگی هسته‌ای، سزیم ۱۳۷ است که در حوادث هسته‌ای چرنوبیل و فوکوشیما مقادیر متناهی از آن وارد محیط زیست شده است که با توجه به نیمه عمر حدود ۳۰ سال آن، مدت‌های طولانی در محیط باقی می‌ماند. در این تحقیق، برای بررسی نحوه جذب سزیم ۱۳۷ در بدن، از مدل چند بخشی شامل بخش‌های خون و سایر بافت‌ها استفاده شده است. با استفاده از حل معادلات چند بخشی از دو روش تحلیلی و عددی و با در نظر گرفتن پرتوایی غذا به عنوان ورودی پرتوایی سزیم در خون، بافت‌ها، ادرار و مدفوع محاسبه شده است. ضرایب انتقال بین بخش‌ها با توجه به پاسخ معادلات و داده‌های دفع سزیم از طریق ادرار و مدفوع ارائه شده در ICRP-54<sup>۱</sup> به دست آمده که با ضرایب محاسبه شده از طریق نرم‌افزار COMKAT با اختلاف مطلق در حدود  $5/5 \times 10^{-6}$  مطابقت دارد. برای بررسی نحوه اثر مقدار رادیونوکلئید و رودی بر عکس‌العمل بافت‌ها، در حل معادلات حاکم بر مدل دوبخشی، ورودی‌های متفاوت پیوسته، ضربه‌ای، دوره‌ای و تصادفی در نظر گرفته شده و منحنی‌های ادرار و مدفوع در حالت‌های متفاوت به دست آمده است. اگرچه فرد در تمام این حالات، مقدار پرتوایی معادل یکسان را دریافت می‌کند و انتظار می‌رود که پرتوایی خروجی ادرار و مدفوع یکسانی مشاهده شود، به دلیل اعمال توابع ورودی متفاوت، عکس‌العمل بافت‌ها در هر حالت متفاوت است و پرتوایی خروجی یکسانی مشاهده نمی‌شود. نتایج نشان می‌دهد درصد اختلاف این ورودی‌ها نسبت به ورودی ضربه‌ای مورد توصیه ICRP قابل ملاحظه است و برای تعیین پرتوگیری بدن در حوادث هسته‌ای باید مورد توجه قرار گیرد.

کلیدواژگان: سزیم ۱۳۷، آلودگی هسته‌ای، مدل چند بخشی، مدل پخش دور برد، روش‌های تحلیلی و عددی، پرتوایی ورودی.

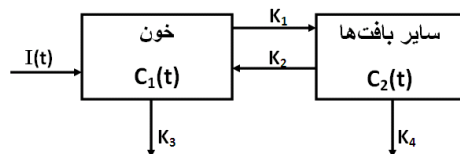
## ۱. مقدمه

این معادلات چه تأثیری دارد. در اینجا هدف، بررسی این نکته است که آیا حالات مختلف برای پرتوزایی ورودی، در منحنی‌های خروجی مدل تأثیر دارد؟ اگر تأثیر دارد، درجه تغییرات در منحنی‌ها چقدر است؟ این بررسی برای ورودی‌های مختلف شامل ورودی‌های پیوسته، ضربه‌ای، دوره‌ای و تصادفی انجام شده است. فرد در تمام این حالات، مقدار پرتوزایی معادل یکسان را دریافت می‌کند.

## ۲. روش‌ها

## ۲-۱. مدل چندبخشی

هر سیستم بیولوژیکی را می‌توان با مدل چندبخشی بررسی کرد. در این مدل، قسمت‌هایی از سیستم را که دارای عملکرد خاصی است و یا با یک غشای خاص از اطراف جدا می‌شود، می‌توان به عنوان یک بخش در نظر گرفت و با یک معادله دیفرانسیل توصیف کرد [۴]. با توجه به توزیع یکنواخت سزیم در بدن، ساده‌ترین و بهترین مدل در این زمینه، یک مدل دوبخشی است. در مواردی که برای رادیونوکلید، یک ارگان بحرانی وجود داشته باشد و جذب آلودگی توسط یک ارگان خاص نسبت به سایر ارگان‌ها بیشتر باشد، باید ارگان مورد نظر به صورت یک بخش جداگانه در نظر گرفته شود [۵]. برای بررسی توزیع سزیم ۱۳۷ در بدن، یک مدل دوبخشی که در آن خون به عنوان بخش اول و سایر بافت‌های بدن به عنوان بخش دوم هستند، مناسب است [۶]. در شکل (۱) این مدل دوبخشی نشان داده شده است.



شکل (۱): مدل دوبخشی ارائه شده برای بررسی نحوه توزیع سزیم ۱۳۷ در بدن

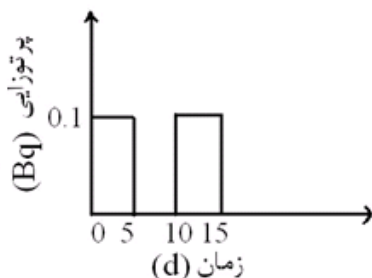
در شکل (۱)،  $C_1(t)$  و  $C_2(t)$  به ترتیب، مقدار پرتوزایی در خون و سایر بافت‌های بدن هستند.  $K_1$  و  $K_2$  ضرایب انتقالی بین دو بخش و  $K_3$  و  $K_4$  به ترتیب، کسر خروجی پرتوزایی از طریق ادرار و مدفوع‌اند.  $I(t)$  پرتوزایی سزیم ۱۳۷ ورودی به بدن است که در ICRP-54 به صورت ضربه‌ای و برابر با ۱ بکرل در نظر گرفته شده است. معادلات مدل دوبخشی برای بررسی نحوه توزیع سزیم ۱۳۷ در بدن چنین است:

همه موجودات دنیا در معرض پرتوهای مختلف پرتوزا مانند سزیم ۱۳۷ قرار دارند. این پرتوها می‌توانند حاصل از منابع طبیعی مانند پرتوهای طبیعی و یا منابع غیرطبیعی ایجادکننده تابش مانند انفجارات هسته‌ای باشند [۱]؛ برای مثال مقادیر متناهی از سزیم پس از حادثه فوکوشیما در محیط پخش شد و منجر به رتبه‌بندی این فاجعه در رتبه ۷ (بالترین رتبه) در مقیاس حوادث هسته‌ای INES<sup>۱</sup> گردید. آلودگی به مواد رادیواکتیو از جمله سزیم، از دو طریق پرتوگیری داخلی و خارجی رخ می‌دهد [۶-۲]. سزیم پس از رها شدن در محیط زیست و با ورود به زنجیره غذایی خاک-گیاه-حیوان و یا از طریق غذاهای گیاهی، همچنین از طریق نوشیدن آب و استنشاق هوای آلوده به رادیوسزیم، به بدن انسان راه می‌یابد [۱ و ۹-۷]. رفتار بیولوژیکی سزیم در بدن و برهم‌کنش آن با بخش‌های مختلف بدن، یک عامل مهم در تعیین میزان خطرناک بودن سزیم به شمار می‌رود. سزیم مانند پتاسیم، به سرعت از دستگاه گوارش جذب می‌شود و با ورود به سیستم گردش خون به طور یکنواخت در بدن توزیع می‌شود و ضمن دفع از طریق ادرار و مدفوع، در همه بافت‌های بدن ته‌نشین می‌شود [۲ و ۹-۱۱]؛ بنابراین، برای بررسی نحوه توزیع رادیونوکلیدها در بدن، مدلی مورد نظر است که کارآیی لازم برای بیان برهم‌کنش بیولوژیکی رادیونوکلیدها با ارگان‌های متفاوت بدن و همچنین خواص هسته‌ای آن‌ها را داشته باشد.

مرجع بررسی پخش و جذب مواد کمیسیون بین‌المللی تابش و حفاظت ICRP<sup>۲</sup> است که دارای دستورالعمل‌های مختلفی در این رابطه است. در ICRP-54 [۵] که یکی از این دستورالعمل‌هاست، نحوه جذب سزیم برای ورودی آبی و پیوسته توضیح داده شده است. در این دستورالعمل، اگر ورودی پیوسته نباشد، برای مثال، فرد در روزهای مختلف پرتوزایی‌های متفاوت دریافت کند، پرتوزایی را معادل متوسط دریافتی در این چند روز در نظر می‌گیرد و آن را به صورت پیوسته بررسی می‌کند. نکته دارای اهمیت، این است که نوع ورودی در بررسی

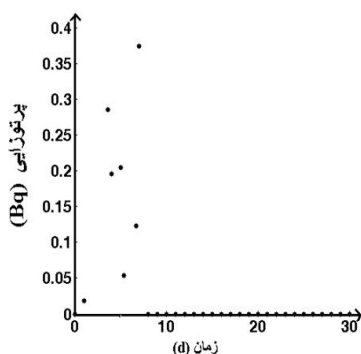
1. International Nuclear Event Scale
2. International Commission on Radiation Protection

بازه‌های زمانی متفاوت و با مقادیر متفاوت پرتوزایی، به بدن وارد شود. در شکل (۲)، این تابع برای پرتوزایی معادل ۱ بکرل نمایش داده شده است. تابع پرتوزایی ورودی دوره‌ای به این ترتیب است:



شکل (۲): تابع پرتوزایی ورودی در حالت ورودی دوره‌ای معادل ۱ بکرل

در ورودی تصادفی پرتوزایی تصادفی و نامنظم است که معمولاً هنگام حوادث پیش می‌آید. در این حالت، افراد در زمان‌های مختلف در معرض پرتوزایی‌های متفاوت قرار می‌گیرند. برای بررسی این حالت در اینجا، با استفاده از تابع Rand در نرم‌افزار MATLAB اعداد تصادفی در بازه صفر و یک تولید شده و شرایطی اعمال شده که پرتوزایی ورودی معادل ۱ بکرل باشد. در شکل (۳)، نمونه‌ای از این تابع نشان داده شده است.



شکل (۳): تابع پرتوزایی ورودی در حالت ورودی تصادفی معادل ۱ بکرل

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. ارزیابی مدل دوبخشی

در این تحقیق مدل ارائه شده مدل دوبخشی برای سزیم ۱۳۷ برای بررسی نحوه جذب سزیم ۱۳۷ در بافت‌های بدن به کار برده شده است. با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی برای حل دستگاه معادلات حاکم بر مدل، پرتوزایی سزیم ۱۳۷ در ادرار و

$$dC_1/dt = I(t) - (\lambda_R + (0.81 \times K_1 + 0.19 \times K_3) \lambda_1) C_1(t) + K_2 \times \lambda_2 \times C_2(t) \quad (1)$$

$$dC_2/dt = 0.81 \times K_1 \times \lambda_1 \times C_1(t) - (\lambda_R + (K_2 + K_4) \times \lambda_2) \times C_2(t)$$

در این معادلات،  $\lambda_R$  ضریب واپاشی سزیم  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  به ترتیب، ضرایب دفع بیولوژیکی این رادیویزوتوپ از خون و بافت هستند. لازم به ذکر است، مقدار  $0.19$  از حجم خونی که از قلب خارج می‌شود، به کلیه‌ها می‌رود و  $0.81$  آن در سایر بخش‌های بدن توزیع می‌شود. به عبارت دیگر، مقدار FCO<sup>۱</sup> برای کلیه‌ها  $0.19$  می‌باشد، که این ضرایب در معادلات اعمال شده است [۴].

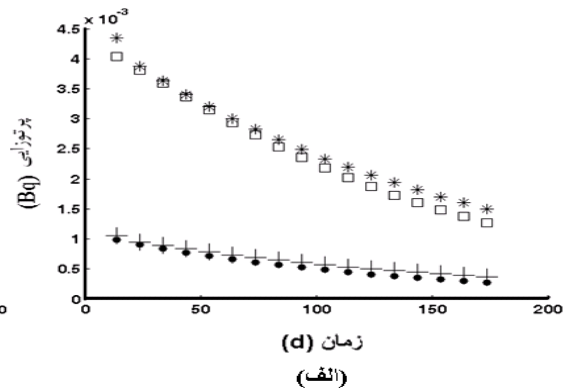
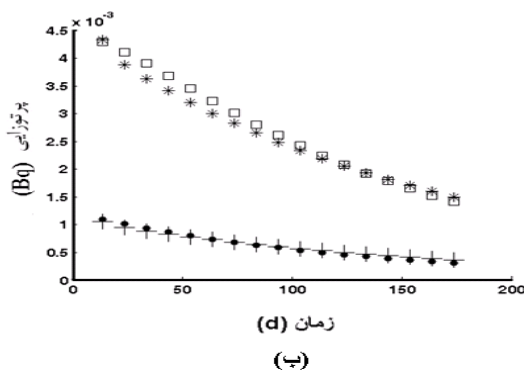
در اینجا برای بررسی اثر سزیم ۱۳۷ ورودی به بدن در نحوه جذب آن، این دستگاه معادلات با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و به دو روش تحلیلی و عددی رانگ‌گوتا حل شده است و با استفاده از توابع پرتوزایی در خون و سایر بافت‌ها، توابع پرتوزایی در ادرار و مدفوع به دست آمده است. برای مقایسه جذب سزیم ۱۳۷ در حالات متفاوت، توابع ورودی مختلف وابسته به زمان، که انتگرال زمانی آن‌ها در بازه مورد نظر، معادل ۱ بکرل باشد، در نظر گرفته شده است. این توابع ورودی وابسته به زمان، شامل ورودی‌های دوره‌ای و تصادفی هستند. در ورودی ضربه‌ای، فرد در یک زمان خاص، پرتوزایی کل را به صورت آنی دریافت می‌کند. این حالت معمولاً بلافاصله پس از حوادث هسته‌ای رخ می‌دهد. در ورودی پیوسته سزیم ۱۳۷ در طی مدتی مشخص چند روز به بدن وارد می‌شود. تابع پرتوزایی ورودی پیوسته برای مدت ۱۰ روز حادثه با پرتوزایی کل ۱ بکرل چنین است:

$$I(t) = \begin{cases} 0 \leq t \leq 10 \rightarrow 0.1\text{Bq} \\ \text{otherwise} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$I(t) = \begin{cases} 0 \leq t \leq 5 \rightarrow 0.1\text{Bq} \\ 5 < t < 10 \rightarrow 0 \\ 10 \leq t \leq 15 \rightarrow 0.1\text{Bq} \end{cases} \quad (3)$$

برای ورودی دوره‌ای فرض می‌شود پرتوزایی‌ای معادل در

ضرایب انتقال بدن از روی آن به دست آمده‌اند. با توجه به اینکه مقدار پرتوزایی سزیم ۱۳۷ و رودی در داده‌های ICRP-54، ۱ بکرل می‌باشد، در اینجا نیز معادلات با در نظر گرفتن پرتوزایی ورودی به صورت ضربه‌ای و برابر با ۱ بکرل حل شده است. در شکل (۴)، منحنی‌های پرتوزایی بر اساس داده‌های ICRP-54 و مدل ارائه شده نشان داده شده است.



شکل (۴): الف. منحنی‌های پرتوزایی در ادرار و مدفوع برای مدل دوبخشی بر اساس داده‌های ICRP-54 و روش تحلیلی:

□ پرتوزایی در ادرار (روش تحلیلی)، \* پرتوزایی در ادرار (ICRP-54)، • پرتوزایی در مدفوع ادرار (روش تحلیلی)، + پرتوزایی در مدفوع (ICRP-54)، ب. منحنی‌های پرتوزایی در ادرار و مدفوع برای مدل دوبخشی بر اساس داده‌های ICRP-54 و روش عددی، □ پرتوزایی در ادرار (روش عددی)، \* پرتوزایی در ادرار (ICRP-54)، • پرتوزایی در مدفوع (روش عددی)، + پرتوزایی در مدفوع (ICRP-54)

حدود  $5/5 \times 10^{-6}$  مطابقت دارد. این نرم‌افزار که در پزشکی کاربرد دارد، اثر پخش مواد هسته‌ای در بدن را با مدل‌های چندبخشی بررسی می‌کند.

### ۲-۳. مقایسه جذب سزیم ۱۳۷ در بافت‌های بدن با در نظر گرفتن ورودی‌های متفاوت

پس از ارائه و ارزیابی مدل دوبخشی ارائه شده در بررسی جذب سزیم ۱۳۷ در بافت‌ها، اثر تغییرات پرتوزایی ورودی به بدن بررسی شد. در شرایط متفاوت و با توجه به منبع و نحوه توزیع آلودگی در محیط زیست، نوع پرتوزایی ورودی به بدن متفاوت است. این ورودی‌ها معمولاً تابع ریاضی ندارند و حل معادلات مدل دوبخشی برای بررسی نحوه جذب سزیم در بدن با روش عددی امکان‌پذیر است. برای مقایسه اثر پرتوزایی ورودی، معادلات مدل دوبخشی برای ورودی‌های ضربه‌ای، پیوسته، دوره‌ای و تصادفی حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند منحنی‌های

مدفوع به دست آمده است. برای به دست آوردن ضرایب انتقال بین بخش‌ها و ضرایب خروجی‌های بدن (مقادیر ضرایب K در معادلات (۱))، با تغییر ضرایب انتقال، دسته منحنی‌های پرتوزایی بر حسب زمان در ادرار و مدفوع به دست آمده‌اند. در ادامه، این منحنی‌ها با داده‌های ICRP-54 مقایسه و نزدیک‌ترین منحنی به داده‌های ICRP-54 انتخاب شده و

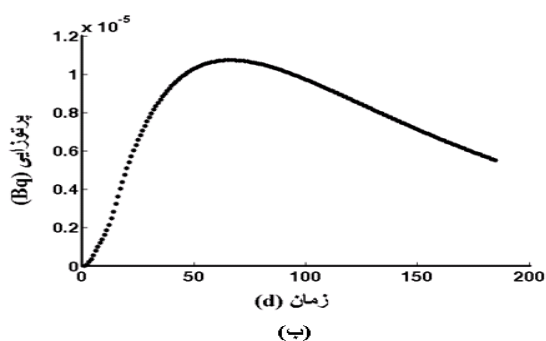
جدول (۱): ضرایب انتقال سزیم ۱۳۷- بین بخش‌های متفاوت بدن

حاصل از مدل دوبخشی

(ضریب انتقال از خون به بافت) $K_1$	(ضریب انتقال از بافت به خون) $K_2$	(ضریب خروجی ادرار) $K_3$	(ضریب خروجی مدفوع) $K_4$
۰/۰۰۱	۰/۹۷	۰/۴۸	۰/۲۸

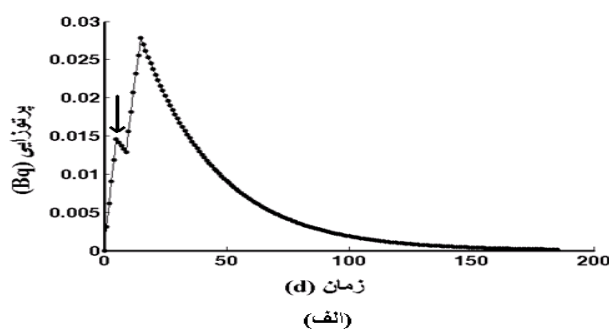
با توجه به منحنی‌ها مشاهده می‌شود که پرتوزایی سزیم ۱۳۷ در ادرار و مدفوع با گذشت زمان و با دفع تدریجی سزیم از بدن به صورت نمایی کاهش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود با توجه به اینکه سزیم عمدتاً از طریق ادرار دفع می‌شود و سرعت دفع از ادرار نسبت به سرعت دفع مدفوع بیشتر است، شیب منحنی مربوط به غلظت پرتوزایی در ادرار بیشتر است. ضرایب انتقال حاصل از این مدل که در جدول (۱) ارائه شده است. برای ارزیابی ضرایب محاسبه شده از نرم‌افزار COMKAT استفاده شده که نتایج خروجی برای ادرار و مدفوع با اختلاف مطلق در

انجام شود، منحنی پرتوزایی در ادرار در شکل (۵-الف) دارای دو قله خواهد بود. اولین قله مربوط به پایان اولین دوره جذب و قله دوم مربوط به پایان دومین دوره جذب است؛ بنابراین در حالتی که ورودی به صورت دوره‌ای است، به ازای هر دوره جذب سزیم ۱۳۷ یک حداکثر پرتوزایی در منحنی مربوط به ادرار دیده می‌شود. در روزهای بین دو دوره که جذبی صورت نمی‌گیرد، پرتوزایی در ادرار کاهش می‌یابد و با شروع دوره جذب بعدی، مجدداً پرتوزایی افزایش می‌یابد. برای تابع تصادفی نیز، منحنی‌های پرتوزایی ادرار و مدفوع از مقدار کمینه شروع می‌شوند و با افزایش پرتوزای به بیشینه می‌رسند. با قطع شدن پرتوزایی ورودی کاهش در پرتوزایی خروجی‌های بدن دیده می‌شود.



پرتوزایی خروجی در ادرار و مدفوع برحسب زمان برای ورودی پیوسته و تصادفی از مقدار کمینه صفر تا یک مقدار حداکثر افزایش می‌یابد و همراه با دفع مواد از بدن، مقدار پرتوزایی سزیم ۱۳۷ به مرور کاهش می‌یابد؛ اما منحنی پرتوزایی در ادرار در حالت ضربه‌ای از یک مقدار بیشینه که همان پرتوزایی ورودی است، آغاز می‌شود و در بر اثر دفع به سرعت کاهش می‌یابد. مقدار پرتوزایی در ادرار، تابع مقدار پرتوزایی در خون است و مقدار پرتوزایی در مدفوع، تابع مقدار پرتوزایی در بافت‌هاست؛ در نتیجه، آثار تغییر پرتوزایی در مدفوع با تأخیر مشاهده می‌شود و کندتر است.

برای تابع ورودی دوره‌ای (شکل ۲) منحنی‌های پرتوزایی در ادرار و مدفوع در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد اگر جذب سزیم ۱۳۷ طبق این تابع، یعنی طی دو دوره



شکل (۵): الف. منحنی پرتوزایی در ادرار حاصل از روش عددی با ورودی دوره‌ای، ب. منحنی پرتوزایی در مدفوع حاصل از روش عددی با ورودی دوره‌ای

جدول (۳): مشخصات منحنی پرتوزایی سزیم-۱۳۷ در ادرار و مدفوع با در نظر گرفتن پرتوزایی ورودی متفاوت

نوع پرتوزایی ورودی	مشخصات منحنی پرتوزایی سزیم-۱۳۷ در ادرار				مشخصات منحنی پرتوزایی سزیم-۱۳۷ در مدفوع			
	حداکثر پرتوزایی (Bq)	زمان حداکثر پرتوزایی (d)	متوسط پرتوزایی (Bq)	FWHM (d)	حداکثر پرتوزایی (Bq)	زمان حداکثر پرتوزایی (d)	متوسط پرتوزایی (Bq)	(d)FWHM
ورودی ضربه‌ای	۰/۰۳۲۵	۰	۰/۰۰۵۶	۱۲	$۱/۰۲۶۹ \times ۱۰^{-۵}$	۵۸	$۶۹۶۸ \times ۱۰^{-۶}$	۱۱۳
ورودی پیوسته	۰/۰۲۷۱	۱۰	۰/۰۰۵۳	۱۵	$۹/۷۷۹۴ \times ۱۰^{-۶}$	۶۳	$۷/۱۹۱۷ \times ۱۰^{-۶}$	۱۱۴
ورودی دوره‌ای	۰/۰۲۷۹	۱۵	۰/۰۰۵۹	۱۵	$۱/۰۷۳۵ \times ۱۰^{-۵}$	۶۶	$۷/۸۳۰۶ \times ۱۰^{-۶}$	۱۱۴
ورودی تصادفی	۰/۰۳۷۲	۸	۰/۰۰۶۷	۱۳	$۱/۲۳۵۳ \times ۱۰^{-۵}$	۶۴	$۹/۰۵۱۸ \times ۱۰^{-۶}$	۱۱۴

نشان داده شده است. با توجه به جدول ملاحظه می‌شود مشخصات استخراج شده از منحنی‌های پرتوزایی، تغییرات زیادی دارند؛ برای مثال، حداکثر پرتوزایی در ادرار در حالت ورودی

برای مقایسه منحنی‌های پرتوزایی ادرار و مدفوع برای توابع مختلف ورودی، مشخصات مختلفی از آن‌ها استخراج و با تابع ضربه‌ای مورد توصیه ICRP مقایسه شد. نتایج در جدول (۳)

در جدول (۴) تفاوت مشخصات منحنی‌های خروجی برای ورودی‌های دوره‌ای و تصادفی با ورودی پیوسته آورده شده است. حالت ایده‌آل ورودی طبق توصیه ICRP در نظر گرفته شده و محاسبات نسبت به پارامترهای آن انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد درصد اختلاف حداکثر پرتوزایی در ادرار  $2/9520$  برای ورودی دوره‌ای و  $37/2693$  برای ورودی تصادفی است. بیشترین اختلاف در زمان حداکثر پرتوزایی دیده می‌شود ۵۰ درصد برای ورودی دوره‌ای و ۲۰ درصد برای ورودی تصادفی در ادرار است. کمترین اختلاف برای FWHM در مدفوع است که تفاوتی با حالت پیوسته ایده‌آل ندارد و می‌تواند یکی از مهم‌ترین پارامترها برای بررسی حوادث هسته‌ای و پرتوزایی وارد شده به بدن باشد.

پیوسته  $0/0271\text{Bq}$  و در حالت ورودی دوره‌ای  $0/0279\text{Bq}$  است که برای حالت پیوسته در روز دهم و برای ورودی دوره‌ای در روز پانزدهم رخ می‌دهد. همچنین حداکثر پرتوزایی در مدفوع در حالت ورودی پیوسته  $10^{-6} \times 9/7794$  است و در ۶۳ روز پس از آغاز دوره جذب رخ می‌دهد، در حالی که حداکثر پرتوزایی در مدفوع در حالت ورودی دوره‌ای  $10^{-6} \times 1/0735$  (بیشتر از حالت ورودی پیوسته) است و در ۶۶ روز پس از آغاز دوره جذب و دیرتر از حالت ورودی پیوسته رخ می‌دهد. برای ورودی تصادفی با توجه به اعداد تصادفی تولید شده، حداکثر پرتوزایی در ادرار، در روز هشتم رخ داده است که نسبت به حالت ورودی پیوسته و دوره‌ای کمتر است.

نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد مقدار پرتوزایی خروجی به نوع و مقدار پرتوزایی ورودی بستگی دارد و برای بررسی مقدار پرتوزایی لازم است این پارامترها به صورت دقیق بررسی شوند.

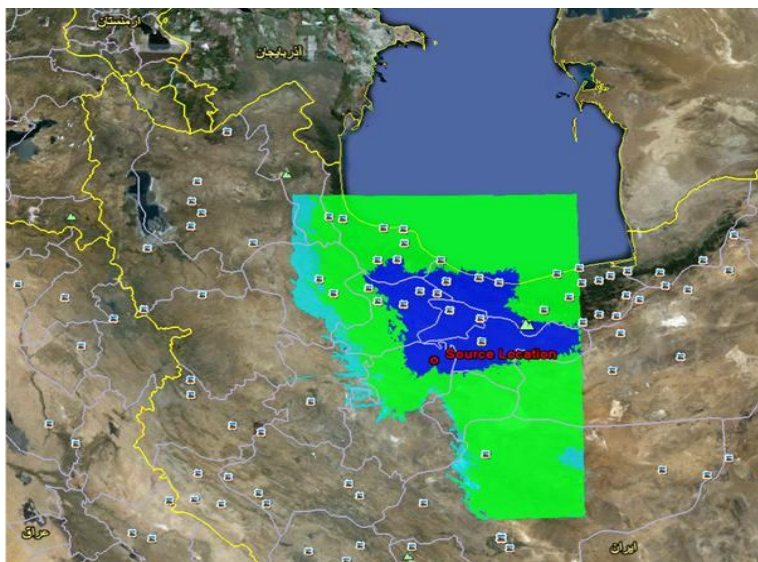
جدول (۴): مقایسه درصد اختلاف مشخصات منحنی‌های خروجی برای ورودی‌های دوره‌ای و تصادفی با ورودی پیوسته در جدول

نوع پرتوزایی ورودی	درصد اختلاف مقادیر مربوط به پرتوزایی در ادرار				درصد اختلاف مقادیر مربوط به پرتوزایی در مدفوع			
	درصد اختلاف حداکثر پرتوزایی	درصد اختلاف زمان حداکثر پرتوزایی	درصد اختلاف متوسط پرتوزایی	درصد اختلاف FWHM <sup>۱</sup>	درصد اختلاف حداکثر پرتوزایی	درصد اختلاف زمان حداکثر پرتوزایی	درصد اختلاف متوسط پرتوزایی	درصد اختلاف FWHM
ورودی دوره‌ای	۲/۹۵۲۰	۵۰	۱۱/۳۲۰۷	۰	۹/۷۷۱۵	۴/۷۶۱۹۰	۸/۸۳۳۸	۰
ورودی تصادفی	۳۷/۲۶۹۳	۲۰	۲۶/۴۱۵۰	۱۳/۳۳۳۳	۲۶/۳۱۶۵	۱/۵۸۷۳	۲۵/۸۶۴۵	۰

<sup>۱</sup> Full Width at Half Maximum

گرفته و منحنی‌های پرتوزایی در ادرار و مدفوع استخراج شده است [۱۵ و ۱۶]. برای محاسبه این تابع پرتوزایی ورودی، فرض شده است که یک حادثه هسته‌ای در مختصات جغرافیایی مشخص ( $33^{\circ}/50^{\circ}$ ,  $35/43^{\circ}$ ) و در ۲ آوریل ۲۰۰۹ رخ داده است (با توجه به در اختیار داشتن اطلاعات هواشناسی سال ۲۰۰۹). همچنین فرض شده است که در حادثه مورد نظر، سزیم ۱۳۷ با آهنگ پرتوزایی  $10^{11} \text{Bq/h}$  از محل حادثه به بیرون نشت پیدا کرده و وارد محیط زیست شده است. با استفاده از مدل پخش ذکر شده، پخش سزیم ۱۳۷، شبیه‌سازی شده و مقدار نشست این رادیونوکلئید در فواصل متفاوت از محل حادثه در یک بازه زمانی به مدت ۲۸ روز تعیین شده است. محل این حادثه در شکل (۶) نشان داده شده است.

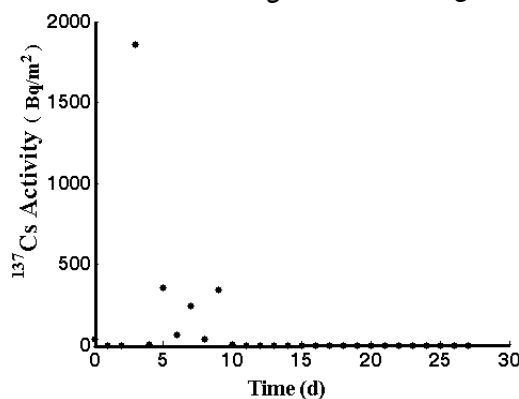
پس از بررسی منحنی‌های پرتوزایی سزیم ۱۳۷ در ادرار و مدفوع، با در نظر گرفتن توابع مختلف به عنوان ورودی معادلات مدل دوبخشی، در این قسمت تابع واقعی پخش پرتوزایی سزیم ۱۳۷ در محیط، که با استفاده از مدل FLEXPART تعیین شده و در اختیار است. مدل FLEXPART از جمله مدل‌های بلندبرد است که بعد از حادثه چرنوبیل توسط مرکز علوم هسته‌ای اتریش تهیه شده است. این مدل بهترین کارایی را برای منابع آلودگی نقطه‌ای مانند حوادث هسته‌ای بدون محدودیت در مقیاس دارد. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این مدل این است که تقریباً می‌تواند از داده‌های تمام مدل‌های هواشناسی استفاده کند و تمام اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رادیونوکلئیدهای مهم در آن لحاظ شده است [۱۲]. این منحنی پرتوزایی به عنوان ورودی معادلات مدل دوبخشی در نظر



شکل (۶): نمایش محل حادثه هسته‌ای فرضی در نظر گرفته شده برای تعیین تابع ورودی پرتوزایی واقعی

انتقال سزیم ۱۳۷ از خاک به گیاه مربوط به کشورهای ترکیه، هند، سوریه و روسیه طبق در نظر گرفته شده است [۱۳]. اگر فرض شود هر فرد به طور متوسط در هر روز به میزان ۵۰۰ گرم از غلات، ۲۰۰ گرم از میوه‌ها و ۲۰۰ گرم از سبزیجات را در رژیم غذایی خود داشته باشد، در هر روز از مقدار سزیم موجود در هر کیلوگرم خاک، مقدار تقریبی  $1/57 \times 10^{-2}$  Bq وارد بدن می‌شود. با توجه به اینکه نتایج حاصل از شبیه‌سازی پخش بر حسب بکرل بر مترمربع است، برای برقراری ارتباط بین پرتوزایی که در محیط نشست یافته و پرتوزایی ورودی به بدن، باید مقدار سزیم موجود در یک کیلوگرم خاک تعیین شود. به دلیل عدم دسترسی به اعداد معتبر در مورد چگالی خاک منطقه مورد نظر، با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه تعیین چگالی خاک، در اینجا چگالی خاک، ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است [۱۴]. با در نظر گرفتن ضریب انتقال سزیم ۱۳۷ از خاک به گیاه، همچنین با توجه به چگالی در نظر گرفته شده برای خاک، تابع توصیف کننده سزیم ۱۳۷ ورودی به بدن، به صورتی که در شکل (۸) نشان داده شده است، پیش‌بینی می‌شود. قابل ملاحظه است که این حالت مشابه حالت ورودی تصادفی است یعنی تابع ورودی واقعی بدن، یک تابع تصادفی وابسته به شرایط حادثه و شرایط جوی محیط است. با در نظر گرفتن این ورودی، نتایج مشابه ورودی تصادفی به دست آمد.

با توجه به نتایج مدل پخش، مقادیر سزیم ۱۳۷ که در نقاط متفاوت پیرامون محل حادثه نشست می‌یابد، از جمله مقادیر سزیم در مختصات جغرافیایی مشخص ( $35/45^\circ, 50/59^\circ$ ) استخراج شده است. این مقادیر در واقع مقدار سزیم ۱۳۷ وارد شده به محیط زیست است که می‌تواند وارد خاک منطقه شود و سپس توسط گیاهان جذب گردد. تابع خروجی از مدل پخش در این مختصات در شکل (۷) نشان داده شده است.



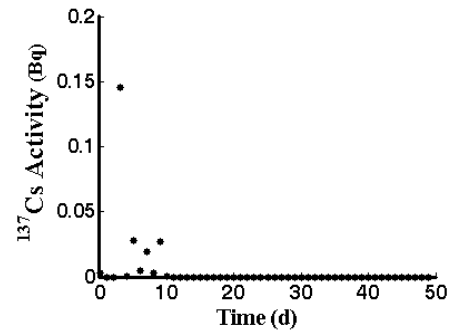
شکل (۷): تابع پرتوزایی واقعی سزیم ۱۳۷ حاصل از مدل پخش

#### FLEXPART

درصدی از این سزیم وارد خاک می‌شود. برای محاسبه مقدار سزیم ورودی به بدن، باید تعیین شود چه مقدار از این سزیم به گیاهان منتقل، و سپس به بدن وارد می‌شود. به دلیل عدم دسترسی به مقادیر تجربی ضرایب انتقال سزیم ۱۳۷ از خاک به گیاه در محل مورد نظر، با توجه به رژیم غذایی معمول در منطقه، با توجه به اطلاعات تجربی موجود، متوسط ضرایب



منحنی خروجی و پارامترهای استخراج شده از آن اثر دارد و اختلافات در محاسبه پارامترهای استخراجی از منحنی‌های ادرار و مدفوع قابل ملاحظه است؛ بنابراین برای محاسبات پرتوزایی وارد شده به بدن، در نظر گرفتن نوع ورودی مهم به نظر می‌رسد. با توجه به تأثیر چگونگی مقدار سزیم  $^{137}\text{Cs}$  ورودی به بدن بر نحوه جذب آن در بافت برای بررسی دقیق‌تر لازم است. در ادامه معادلات، مدل دو بخشی جذب سزیم در بدن با در نظر گرفتن تابع پرتوزایی واقعی که مقدار واقعی سزیم ورودی به بدن را در محیط‌های آلوده تعیین می‌کند، حل شده و اطلاعات منحنی‌های پرتوزایی خروجی در ادرار و مدفوع استخراج شده است. نتایج به دست آمده شبیه ورودی تصادفی است و نشان می‌دهد نوع پرتوزای ورودی که تابع شرایط محیطی و نوع حادثه است، در نحوه جذب تأثیر دارد.



شکل (۸): تابع پرتوزایی واقعی  $^{137}\text{Cs}$  ورودی به بدن

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر تابع ورودی پرتوزایی بر بدن انسان، بررسی و نتایج برای ورودی‌های پیوسته، دوره‌ای و تصادفی به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد نوع و شکل ورودی پرتوزایی بر

#### مراجع

- [1] Julie Louise Gerberding, M.D, M.P.H, Toxicological Profile For CESIUM, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2004.
- [2] Matti Kaikkonen, "A Novel Assay Method For Measuring Added Plasma Caesium And Its Application In The Measurement Of Short-term Kinetics", Department Basic Veterinary Sciences, 2006.
- [3] Joan Harrison and McNeill, D.Phil., "Effect of Chlorothiazide on Caesium-137 Excretion In Human Subjects", Canad. Med. Ass.J, 1963, vol. 89, 1266-1269.
- [4] R.W.Leggett, L.R. Williams, D.R.Melo, J.L.Lipsztein, "A Physiologically Based Biokinetic Model For Cesium In The Human Body", The science of the Total Environment 317, 2003, 235-255.
- [5] ICRP, ICRP Publication 54, "Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers: Design and Interpretation", Pergamon Press, 1988.
- [6] Cyrill Burger and Alfred Buck, Requirements and Implementation of a Flexible Kinetic Modeling Tool, The Journal Of Nuclear Medicine, Vol.38, 1997, 1818-1823.
- [7] Lavrans Skuteru, Birgitta Ahman, Dina Soltie and Eldar Gaare, "Long-term decline of radiocaesium in Fennoscandian reindeer", NKS-193, 2009, 1-17.
- [8] Vinichuk M, Mårtensson A, Ericsson T, Rosén K., Effect of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on  $(^{137}\text{Cs})$  uptake by plants grown on different soils. J Environ Radioact. 2012 Aug 28; 115C:151-156.
- [9] esa Oikonen and Kaisa Sederholm, "Model equations for reference tissue compartmental models", Turku PET Center modeling report, 2003, 1-6.
- [10] Burton Bennett, Michael Repacholi and Zhanat Carr, "Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care programmes", 2006.
- [11] X. L.Hou, C. L. Fogh, K. G. Andersson, H. Dahlgaard and S. P. Nielsen, "Iodine-129 and Caesium-137 in Chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation", The Science of Total Environment 308, 2003, 97-109.
- [12] مصطفی نژاد، ک، ۱۳۸۹، جانمایی سیستم‌های هشدار آبی مواد پرتوزا در سطح کشور ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات.
- [13] Friberg, I, Vesanen, R, Detection limits for  $^{90}\text{Sr}$ , Pu, Am and Cm in soil and pasture vegetation shortly after a nuclear accident, Applied Radiation and Isotopes 51, 1999, 229-237.
- [14] Hewitt, A, Soil properties for plant growth, Landcare Research Science Series No26, 2004, 1-26.
- [15] Kang DJ, Seo YJ, Saito T, Suzuki H, Ishii Y., Uptake and translocation of cesium-133 in napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schum.) under hydroponic conditions, Ecotoxicol Environ Saf. 2012 Aug; 82:122-6.
- [16] Rääf, C. L., Falk, R., Lauridsen, B., Rahola, T., Skuterud, L., Soogard-Hansen, J., Human Metabolism of Caesium, NKS-120, 2006, 1-8.