

## تعیین پرتوگیری کارکنان در حوادث بحرانی شدن به روش دزیمتری مو

فریدون میانجی<sup>۱\*</sup>، شیدا جعفری<sup>۲</sup>، سعیده زریونی<sup>۲</sup>، بردیا حاجی زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> دانشگاه بوعلی سینا، همدان، همدان، ایران.

<sup>۳</sup> نظام ایمنی هسته‌ای کشور، تهران، تهران، ایران.

\* تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کد پستی: ۱۴۳۹۹۵۱۱۱۳

پست الکترونیکی: fmianji@aeoi.org.ir

### چکیده

در این مقاله، روش دزیمتری مو برای نخستین بار در کشور، برای تخمین دز دریافتی افراد، مورد پژوهش قرار گرفته است. این روش یکی از نیازمندی‌های مهم برای سیستم‌های دزیمتری جامع در برخورد با حوادث بحرانی شدن است. نمونه‌های مو بر روی چند ناحیه از یک فانتوم راندو تحت تابش با چشمه کالیفرنیم ۲۵۲ در دزهای گوناگون قرار گرفتند. از خاکسترسازی و سپس محلول کردن برای آماده‌سازی نمونه‌ها و از شمارنده سوسوزن مایع برای سنجش پرتوزایی آن‌ها بهره گرفته شد. نتایج تجربی به‌دست آمده، کاربرد موفق این روش و حساسیت مناسب آن در اندازه‌گیری پرتوگیری بدن و تعیین جهت پرتوگیری در حوادث بحرانی شدن را تأیید می‌کند. علاوه بر تهیه منحنی دز- پاسخ برای نمونه‌ای از فرد ایرانی که در ارزیابی پرتوگیری افراد کشور در چنین حوادثی ضروری است، روش مناسب آماده‌سازی نمونه‌های پرتو دیده نیز تعیین شده و پارامترهای روش پیشنهادی بهینه‌سازی شدند.

**کلیدواژگان:** دزیمتری مو، حوادث بحرانی شدن، نقشه پرتوگیری بدن، منحنی دز- پاسخ.

### ۱. مقدمه

دزیمتری فردی یکی از مهم‌ترین اصول و سیستم‌ها در تضمین ایمنی افراد در کاربردهای پرتوی و تأسیسات هسته‌ای است. به دزیمتری فردی، سیستم اطلاق می‌شود؛ زیرا این مفهوم فراتر از به‌کارگیری یک یا چند ابزار و روش در پایش پرتوگیری فرد است. به‌ویژه در نیروگاه‌های هسته‌ای، بخش‌هایی از چرخه سوخت هسته‌ای، مانند نگهداری سوخت مصرف‌شده و تأسیسات بازفرآوری سوخت مصرف‌شده، تأسیسات پرتودهی مبتنی بر مواد شکافت‌پذیر و... که در آن‌ها امکان پرتوگیری‌های بالا به دلیل بروز اشکالات فنی یا حوادث بحرانی شدن<sup>۱</sup> وجود دارد، به سیستم جامع دزیمتری فردی نیاز است. از ویژگی‌های پرتوگیری احتمالی در این‌گونه تأسیسات، این است که غالباً

پرتوگیری اندام‌های بدن همگن نبوده و برخی اندام‌ها بسیار بیشتر پرتوگیری می‌کنند. این امر از اهمیت بسیار زیادی در دزیمتری و برنامه‌ریزی برای انجام اقدامات درمانی برخوردار است. در نتیجه، برآورد دز فرد به چیزی بیشتر از به‌کارگیری یک دزیمتر فردی نیاز دارد [۱].

حوادث بحرانی شدن شبیه آنچه در ۲۰۰۱ در ساروو<sup>۲</sup> فدراسیون روسیه [۲]، در ۱۹۹۹ در جی سی او ژاپن<sup>۳</sup> [۳] و در ۲۰۱۱ در فوکوشیمای ژاپن [۴ و ۵] روی داد، نمونه‌های بسیار خوبی از نیاز به وجود یک سیستم دزیمتری فراگیر در تأسیسات هسته‌ای یا در مراکز دزیمتری مربوط در هر کشورند. اینها تنها چند مورد از بیش از ۶۰ حادثه بحرانی شدن در دنیا می‌باشد که

2. Sarov

3. JCO

1. Criticality accidents

فانتوم مانند جلو و پشت سر، شقیقه و روی سینه نصب شده و در میدان استاندارد نوترونی پرتودهی شده‌اند. پس از پرتودهی، نمونه‌ها برای شمارش آماده شده و پرتوزایی آن‌ها اندازه‌گیری شده است. با ارزیابی پاسخ‌ها، جهت و میزان دز دریافتی اندام مربوط قابل تعیین است. تئوری و جزئیات روش کار در زیر توضیح داده شده است.

## ۱.۲. دزیمتری مو

موی انسان دارای مقدار تقریبی  $0/05$  گرم گوگرد در هر گرم مو می‌باشد. انجام عملیات آرایشی و رنگ‌آمیزی مو به دلیل بهره‌گیری از مواد شیمیایی، می‌تواند بر میزان گوگرد مو اثرگذار باشد. همچنین، جنسیت در این زمینه تأثیرگذار است. موی مردها به‌طور طبیعی، از گوگرد بیشتری نسبت به زنان برخوردار است [۸]. نژاد و رنگ مو (طبیعی) دیگر عوامل تأثیرگذار در این زمینه‌اند. تاکنون در این زمینه، مطالعه فراگیری که دربردارنده تمامی این عوامل باشد، صورت نگرفته، اما می‌توان تا زمان انجام چنین بررسی فراگیری، به‌طور تقریبی، منحنی دز- پاسخ یک نمونه مو را برای نمونه‌های دیگر نیز به‌کار برد. واکنش مورد نظر در دزیمتری مو در رابطه (۱) تعریف شده است.



آستانه واکنش رابطه (۱)  $2/5$  مگا الکترون ولت است؛ بدین معنی که گوگرد تنها با نوترون‌های تند که دارای چنین کمینه انرژی باشند، واکنش خواهد نمود. محصول واکنش فسفر  $^{32}\text{P}$  است که یک گسیلنده خالص بتا بوده و با نیمه‌عمر  $14/3$  روز واپاشی می‌کند. بیشینه انرژی ذرات بتای ساطع شده  $1/709$  مگا الکترون ولت است که به بهره‌گیری از یک شمارنده بتا با زمینه پایین قابل سنجش می‌باشد. بدیهی است که چنانچه از پیش، اطلاعات مربوط به ارتباط دز مو و شمارش پرتوزایی ایجاد شده در آن در دسترس نباشد، نمی‌توان از نمونه‌گیری از یک فرد حادثه‌دیده در میدان نوترونی یا در رویداد بحرانی شدن به میزان دز دریافتی وی پی برد. این نیازمند تهیه منحنی دز- پاسخ برای پرتوهای نوترون است. یکی از پیچیدگی‌های بسیار مهم میدان‌های پرتوی نوترونی، گوناگونی بسیار زیاد در طیف انرژی آن‌هاست. پاسخ روش پیشنهادی، ناشی از نوترون‌های با انرژی بیش از  $2/5$

تاکنون رخ داده است. داشتن اطلاعات پایه لازم برای تحلیل نتایج مانند منحنی‌های دز- پاسخ هر روش و نیز عزم و تعهد در سطح مدیریتی نسبت به تقویت چنین سیستمی، از اهمیت بسیار زیادی در برپاسازی یک سیستم دزیمتری کارآمد برخوردار است.

روش بیواسی دزیمتری مبتنی بر بررسی تغییرات در یک بافت بیولوژیکی بر اثر پرتوگیری است. بیواسی دزیمتری در حوادث بحرانی شدن می‌تواند به سنجش میزان سدیم  $^{24}$  خون یا بدن که بر اثر برخورد نوترون‌های حرارتی به بدن از سدیم  $^{23}$  تولید می‌شود یا به سنجش فسفر  $^{32}$  تولید شده در اثر برخورد نوترون‌های تند به گوگرد  $^{32}$  موجود در ناخن یا مو اشاره داشته باشد. دزیمتری خون در تریاز فوری افراد کاربرد فراوانی دارد، اما در تعیین دز اندام ناتوان است [۶]. چنانچه از پرتوگیری فرد بیش از  $2$  روز گذشته باشد، تقریباً ناکارآمد خواهد بود. دزیمتری ناخن و به‌ویژه مو، از توانایی بسیار خوبی در تعیین دز اندام‌های بدن برخوردار بوده و حتی چند هفته پس از پرتوگیری نیز می‌توان از این روش بهره گرفت.

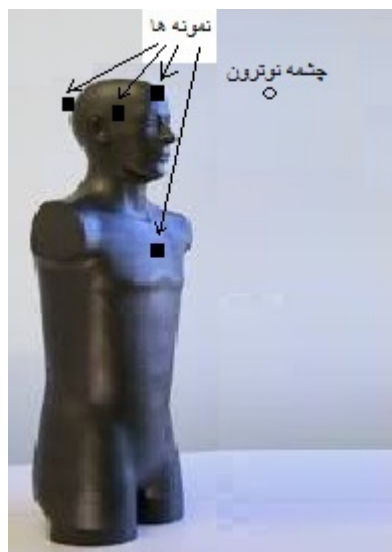
با وجود چند دهه پیشینه در دزیمتری مو در جهان، گزارشی در زمینه به‌کارگیری آن در تخمین دز اندام‌های بدن موجود نیست. همچنین، با توجه به اینکه دزیمتری مو تاکنون در کشور اجرا نشده است، اطلاعات مهم لازم در این زمینه مانند فرایند آماده‌سازی مناسب نمونه‌ها، بهترین روش شمارش پرتوزایی نمونه‌ها و منحنی دز- پاسخ این روش در دسترس نیست. بنابراین، انجام آزمایش‌هایی در این زمینه بسیار ضروری است. گزارش‌ها و مقاله‌های زیادی در این زمینه نیز وجود ندارد، اما منابع موجود، حساسیت روش دزیمتری مو با تکنیک شمارش مستقیم نمونه‌ها را  $200$  میلی‌گری اعلام کرده‌اند [۷]. در این تحقیق، روش آماده‌سازی نمونه مبتنی بر خاکسترسازی و محلول کردن نمونه‌ها و شمارش نمونه‌ها با شمارنده سوسوزن مایع پیشنهاد گردیده و نشان داده شده که با به‌کارگیری روش پیشنهادی، می‌توان از دزیمتری مو برای تعیین نقشه پرتوگیری بدن (دز ارگان‌ها) با دقت مناسبی بهره گرفت.

## ۲. روش کار

نمونه‌های مو در بسته‌بندی‌های کوچک بر روی بخش‌هایی از

حالت‌هایی که در چندین زاویه از روبه‌رو پرتوگیری می‌کند (مانند حالت عادی فرد در کار با دستگاه‌ها) فانتوم با زاویه نسبت به چشمه (گروه ۲) قرار داده شد. نکته دیگر در میزان پرتودهی به نمونه‌ها این است که پرتودهی به هر نمونه، تنها براساس فاصله آن نمونه از چشمه نوترونی محاسبه شده است؛ بنابراین، برای نمونه‌های نصب‌شده در پشت سر فانتوم، وجود سر فانتوم که نقش مهمی در کاهش تعداد نوترون‌های با انرژی بیشتر از  $2/5 \text{ MeV}$  به نوترون‌های با انرژی کمتر از این آستانه دارد، در نظر گرفته نشده است.

در حوادث بحرانی شدن، باید نمونه‌های برداشته شده از سر و بدن فرد پیش از شمارش پرتوزایی شسته شوند. در این آزمایش، شست‌وشو و خشک‌کردن نمونه‌ها پیش از پرتودهی انجام گرفت. پس از پایان پرتودهی هر گروه، نمونه‌ها با کمترین زمان ممکن برای شمارش آماده شدند.



شکل ۱: آرایش نمونه‌ها روی فانتوم در حین پرتودهی

### ۲.۳. آماده‌سازی نمونه‌ها و سنجش پرتوزایی آن‌ها

پرتوزایی نمونه‌ها را می‌توان با روش مستقیم، به‌وسیله شمارشگر بتای با زمینه پایین یا پس از کاهش حجم با روش شمارشگر سوسوزن مایع اندازه‌گیری کرد. برای رسیدن به حساسیت بهتر، از روش خاکسترسازی نمونه و محلول‌کردن آن بهره گرفته شد. بر پایه گزارش‌های حوادث بحرانی شدن موجود در منابع، به‌نظر می‌رسد که با توجه به به‌کارگیری روش دزیمتری مو در دزهای بسیار بالا (چندین گری تا ده‌ها گری)،

مگا الکترون ولت است، اما چنانچه روش برای یک طیف خاص با دزهای از پیش تعیین‌شده (که ناشی از کل طیف است) کالیبره شده باشد، در شرایطی که پرتوگیری از طیف نوترونی مشابه باشد، می‌توان به تخمین مناسبی از دز ناشی از همه طیف دست یافت. بدیهی است که در شرایطی که پرتوگیری از طیفی ناشناخته باشد، از روش معرفی‌شده تنها می‌توان برای سنجش دز ناشی از نوترون‌های با انرژی بالاتر از آستانه معرفی‌شده بهره برد.

### ۲.۲. پرتودهی نوترونی نمونه‌ها

پرتودهی نمونه‌ها در آزمایشگاه مرجع کالیبراسیون نظام ایمنی هسته‌ای کشور انجام شد. در این آزمایشگاه، یک عدد فانتوم راندو روی میز پرتودهی در شرایط لازم قرار گرفته و با تنظیم فاصله و زمان پرتودهی نمونه‌ها به میزان مورد نظر، دز دریافت کردند. برای تهیه نمونه‌ها، از یک فرد ۲۷ ساله مقداری کافی موی رنگ نشده (با رنگ طبیعی سیاه) تهیه شد. برای پیشگیری از عوامل تداخلی و کاهش راندامان شمارش، موها شست‌وشو شده و در کوره خشک شدند. ۱۷ نمونه یک گرمی از این مو در پوشش سلفونی، به شکل بسیار فشرده آماده شد. یک نمونه به‌عنوان زمینه و ۱۶ نمونه دیگر در ۴ گروه چهارتایی روی فانتوم قرار داده شده و در میدان تابش کالیفرنیم ۲۵۲ (به دلیل شباهت به طیف راکتور) در دزهای گوناگون پرتودهی شدند. نمونه‌های هر گروه بر روی پیشانی، شقیقه، پشت سر و سینه فانتوم قرار داده شد. پرتودهی به‌گونه‌ای تنظیم شد که نمونه‌ای که بالاترین دز را در گروه‌های ۱ تا ۴ دریافت می‌کند، به ترتیب دزی برابر با ۴۹۴، ۶۵۸، ۸۲۳ و ۱۱۵۳ میلی‌گری دریافت کند. شکل (۱) چگونگی قرارگیری نمونه‌ها بر روی فانتوم و وضعیت پرتودهی در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. به‌منظور شبیه‌سازی حالتی که در آن، ممکن است عضوی از بدن فرد دچار پرتوگیری بیشتری شود، در سه سری از پرتودهی‌ها (گروه‌های ۱، ۳ و ۴) سر فانتوم و در یک سری از پرتودهی‌ها (گروه ۲) سینه فانتوم نزدیک‌تر به چشمه نوترونی قرار گرفت. همچنین، به‌منظور شبیه‌سازی حالت‌هایی که فرد کاملاً از روبه‌رو پرتوگیری می‌کند، فانتوم کاملاً رو به چشمه (همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده: گروه‌های ۱، ۳ و ۴) و برای

فسفر ۳۲ تولیدشده در نمونه در لحظه  $t$  از پرتودهی بستگی به تعداد اتم‌های گوگرد ۳۲ پرتوزا شده (تبدیل به فسفر ۳۲ گردیده) و نیز تعداد اتم‌های فسفر ۳۲ ( $N(t)$ ) واپاشی نموده در لحظه  $t$  دارد..

$$\frac{dN(t)}{dt} = \phi\sigma N_T(t) - \lambda N(t) \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\phi$  شار نوترون،  $\sigma$  سطح مقطع گوگرد ۳۲ برای نوترون‌های تند،  $N_T(t)$  تعداد کل اتم‌های گوگرد ۳۲ در لحظه  $t$  و  $\lambda$  ثابت واپاشی فسفر ۳۲ است. بنابراین، پرتوزایی فسفر ۳۲ نمونه ( $A_{net}$ ) در پایان زمان پرتودهی از رابطه (۳) قابل محاسبه خواهد بود. در این رابطه،  $t_a$  کل زمان پرتودهی است.

$$A_{net} = \phi\sigma N_T(1 - e^{-\lambda t_a}) \quad (3)$$

با استفاده از سری تیلور  $e^{-\lambda t}$  روابط ۵ و ۶ از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$e^{-\lambda t} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\lambda t)^n}{n!} = 1 - \frac{(\lambda t)^1}{1!} + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \quad (4)$$

$$A_{net} = \phi\sigma N_T \lambda t_a - \phi\sigma N_T \left( \frac{(\lambda t_a)^2}{2!} - \frac{(\lambda t_a)^3}{3!} + \dots \right) \quad (5)$$

$$A_{gross} = \phi\sigma N_T \lambda t_a \quad (6)$$

در رابطه (۶)،  $A_{gross}$  کل فسفر ۳۲ تولید شده در پایان دوره پرتودهی با در نظر گرفتن میزان واپاشی نموده آن است. با بخش کردن رابطه (۶) بر رابطه (۵) ضریب تصحیح واپاشی ( $ADCF$ : Activation Decay Correction Factor) که اثر واپاشی فسفر ۳۲ تولید شده در طول دوره پرتودهی را تعیین می‌کند، به دست خواهد آمد.

$$ADCF = \frac{A_{gross}}{A_{net}} = \frac{\lambda t_a}{(1 - e^{-\lambda t_a})} \quad (7)$$

نکته دیگری که باید در ارتباط دادن پرتوزایی اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها به میزان پرتودهی به آن‌ها (فسفر ۳۲ تولید شده بدون در نظر گرفتن میزان واپاشی آن) مورد نظر قرار گیرد، ضریب تصحیح واپاشی پس از پایان پرتودهی تا آغاز شمارش نمونه

حساسیت روش چندان مورد توجه نبوده است. در بسیاری از پرتوگیری‌ها در حوادث بحرانی شدن دز دریافتی اندام‌های فرد حادثه‌دیده، در محدوده زیر یک گری می‌باشد. در این بازه، حساسیت روش اهمیت زیادتری نسبت به دزهای بسیار بالا دارد. گذشته از این، دیگر روش‌های بیواسی دزیمتری نیز در این بازه، از حساسیت محدودی برخوردارند. با توجه به مفهوم سیستم دزیمتری که در آن، به‌کارگیری چندین روش برای تخمین بهتر دز دریافتی و نیز برای تعیین دز اندام‌ها ضروری است، لازم است تا به حساسیت مناسبی در روش دزیمتری مو دست یافت تا با کمک آن و در کنار دیگر روش‌های دزیمتری، به تخمین درست دز اندام‌های فرد پرتو دیده مبادرت ورزید. در این پژوهش، پس از بررسی روش شمارش مستقیم و روش‌های شیمیایی و فیزیکی، آماده‌سازی نمونه‌های مو، فرایند خاکسترسازی برای رسیدن به بهترین نتیجه برگزیده شد. در این فرایند، دمای خاکسترسازی، مدت نگهداری در دمای مورد نظر، شرایط حرارت‌دهی و نحوه نگهداری نمونه‌ها پس از خاکسترسازی، از اهمیت زیادی برخوردار است. نمونه‌های پرتو دیده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در درون کوره به خاکستر تبدیل شدند. برای معلق نمودن آن‌ها در مایع سوسوزن (مدل Beckman ۶۵۰۰)، نخست خاکستر نمونه با استفاده از حلال مناسب و دستگاه همزن حل شده و محلول به دست آمده در درون مایع سوسوزن، در ویال ریخته شد. باید توجه داشت که وزن خاکستر به دست آمده از سوزاندن هر گرم مو، کمتر از یک صدم گرم است و این خاکستر به راحتی ممکن است در جابه‌جایی از بین برود؛ بنابراین، در انتقال آن از بوتله حرارتی به داخل ویال، باید دقت کافی به عمل آید. پس از تکان دادن کافی محلول برای پیشگیری از ته‌نشین شدن خاکسترها، ویال در دستگاه شمارشگر قرار داده شد. هر نمونه به مدت ۴۵ دقیقه شمارش شد. افزایش زمان شمارش می‌تواند عدم قطعیت شمارش را کاهش دهد.

در این بخش، باید تمامی عوامل و روابط لازم در تعیین دقیق پرتوزایی به کار گرفته شوند. این عوامل عبارت‌اند از: واپاشی فسفر ۳۲ تولیدشده در طول پرتودهی نمونه‌ها، فاصله زمانی پایان پرتودهی تا شمارش نمونه‌ها، ... تعداد اتم‌های

تکمیل سیستم دزیمتری فراگیر کشور برخوردار است. با توجه به پایین بودن اکتیویته تنها چشمه کالیفرنیوم ۲۵۲ استاندارد موجود در کشور و محدودیت دسترسی به آزمایشگاه مربوط، پرتودهی نمونه‌های بیشتر مو (از افراد گوناگون) با این چشمه روی فانتوم، بسیار زمان‌بر بوده و امکان آن در این پژوهش وجود نداشته است. البته با توجه به هدف اصلی پژوهش که ارزیابی امکان تهیه نقشه پرتوگیری بدن و تعیین جهت پرتوگیری بوده است، به آزمایش روی نمونه افراد بیشتر نیز نیاز نبوده و می‌توان چنین مطالعه‌ای را بدون فانتوم و با استفاده از راکتور اتمی انجام داد. همان‌گونه که در شکل (۲) دیده می‌شود، ارتباط دز و پرتوگیری نمونه‌ها بسیار خطی بوده و نشانگر پرتوگیری تقریبی  $0.95 \text{ Bq}$  نمونه پرتو دیده به ازای هر گری دز می‌باشد. این فاکتور با استفاده از رابطه به دست آمده برای منحنی در شکل (۲) و با تبدیل  $\text{cpm}$  به  $\text{mGy}$  و  $\text{cps}$  به  $\text{Gy}$  در رابطه به دست می‌آید.

نتایج نشان می‌دهند (بدون در نظر گرفتن نمونه‌های پشت سر و نمونه‌هایی که خیلی کمتر از  $100$  میلی‌گری پرتودهی شده‌اند) سنجش دزهای کمتر از  $100$  میلی‌گری نیز بر پایه معیار  $25\%$  برای نسبت انحراف معیار به  $\text{cpm}$  از دقت مناسبی برخوردارند. از آنجاکه با افزایش زمان شمارش نمونه‌ها، انحراف معیار به میزان ریشه دوم نسبت افزایش زمان کاهش می‌یابد، برای مثال، دو برابر کردن زمان شمارش نمونه انحراف معیار را با ضریب  $0.7$  می‌کاهد، می‌توان چنین نتیجه گرفت که حساسیت روش پیشنهادی تا حدود  $50$  میلی‌گری قابل بهبود است. چنین حساسیتی در تعیین دز دریافتی، در حالی که دیگر روش‌های بیواسی از حساسیت‌های بالاتر از  $100$  میلی‌گری برخوردار بوده و بیشتر آن‌ها در دزهای دریافتی کمتر از  $200$  میلی‌گری تقریباً بدون کاربردند، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

( $CDCF$ : Counting Decay Correction Factor) است. این ضریب در رابطه (۸) معرفی شده است. در این رابطه،  $t_d$  فاصله زمانی از پایان پرتودهی نمونه تا آغاز اندازه‌گیری پرتوگیری نمونه است.

$$CDCF = \frac{1}{1 - e^{-\lambda t_d}} \quad (8)$$

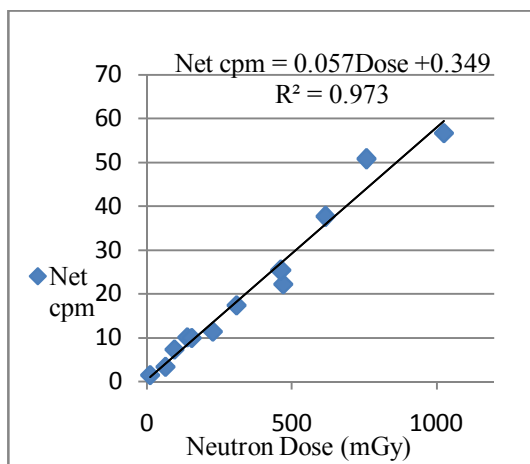
### ۳. نتایج و بحث

نتایج به دست آمده امکان کاربرد روش پیشنهادی در تعیین جهت پرتوگیری و نقشه پرتوگیری بدن از نوترون با حساسیت بالا را تأیید می‌کند. در محاسبه پرتوگیری نمونه‌ها، تمامی عوامل مهم بر پایه روابط ارائه شده در بخش پیشین در نظر گرفته شده و در جدول (۱) نتایج به دست آمده برای هر نمونه ارائه شده است. از آنجاکه انحراف معیار در هر اندازه‌گیری، شاخصی کمی در ارتباط با حساسیت روش یا عدم قطعیت آن است، می‌توان گفت که روش از حساسیت بسیار خوبی برخوردار است. عدم قطعیت یا حساسیت روش در این آزمایش‌ها بهتر از  $\text{mGy}$   $100$  به دست آمده که با افزایش زمان شمارش به  $90$  دقیقه، تا حدود  $50 \text{ mGy}$  بهبود خواهد یافت (بر پایه انحراف معیار شمارش‌ها). این بسیار بهتر از حساسیت اعلام شده برای روش شمارش مستقیم نمونه‌های مو ( $200 \text{ mGy}$ ) است که مورد اشاره مراجع می‌باشد. شایان ذکر است که در دزیمتری نوترون، یک انحراف معیار برای تعیین حساسیت یا عدم قطعیت روش کافی بوده [۹] و بنا بر توصیه آژانس بین‌المللی اتمی نیز نسبت انحراف معیار شمارش پرتوگیری به  $\text{cpm}$  باید در بازه  $25\%$  قرار گیرد [۱۰].

دیگر نتیجه مهم به دست آمده از این پژوهش، تهیه منحنی دز- پاسخ برای یک نمونه از موی ایرانی است که در شکل (۲) نمایش داده شده است. این منحنی برای نخستین بار، در کشور تهیه شده و با توجه به بهره‌برداری از نیروگاه اتمی بوشهر و برنامه‌های در دست اجرا و آینده برای گسترش تأسیسات هسته‌ای و نیروگاهی از اهمیت بسیار زیادی، برای

جدول ۱: داده‌ها، محاسبات و نتایج به دست آمده از پرتودهی و اندازه‌گیری پرتوزایی نمونه‌های گروه‌های چهارگانه. منظور از دز داده شده دزی است که بر مبنای فاصله نمونه تا چشمه و زمان پرتودهی محاسبه شده و اثر سر فانتوم برای نمونه‌های پشت سر در نظر گرفته نشده است.

گروه	محل نصب نمونه	دز داده شده (mGy)	<i>ADCF</i>	<i>CDCF</i>	cmp خالص	انحراف معیار ( $\sigma$ )
۱	پیشانی	۴۹۴/۱۲	۱/۰۵۲	۱/۰۳۹	۲۲/۲۵	۱/۵۳۷
	شقیقه	۶۷/۵۳	۱/۰۵۲	۱/۰۴۰	۳/۳۶	۱/۳۹۳
	پشت سر	۲۸/۸۲	۱/۰۵۲	۱/۰۴۲	۲/۲۲	۱/۳۸۴
	سینه	۱۱/۵۳	۱/۰۵۲	۱/۰۴۴	۱/۴۳	۱/۳۷۸
۲	پیشانی	۲۶۸/۴۷	۱/۱۸۱	۱/۰۵۶	۱۱/۳۹	۱/۴۵۶
	شقیقه	۱۶۴/۷۰	۱/۱۸۱	۱/۰۵۴	۱۰/۰۷	۱/۴۴۶
	پشت سر	۱۲۹/۲۹	۱/۱۸۱	۱/۰۵۴	۴/۶۶	۱/۴۰۴
	سینه	۶۵۸/۸۲	۱/۰۶۹	۱/۱۰۲	۳۷/۶۳	۱/۶۴۴
۳	پیشانی	۸۲۳/۵۳	۱/۰۸۸	۱/۱۰۲	۵۰/۷۸	۱/۷۳۱
	شقیقه	۴۹۴/۱۲	۱/۰۶۹	۱/۱۰۳	۲۵/۳۵	۱/۵۵۹
	پشت سر	۵۱/۸۸	۱/۱۲۴	۱/۰۲۴	۵/۰۱	۱/۴۰۶
	سینه	۱۶۴/۷۰	۱/۰۶۹	۱/۱۰۷	۹/۹۷	۱/۴۴۵
۴	پیشانی	۱۱۵۲/۹۴	۱/۱۲۴	۱/۰۱۰	۵۶/۶۷	۱/۷۶۸
	شقیقه	۱۰۵/۴۱	۱/۱۲۴	۱/۰۲۶	۷/۲۷	۱/۴۲۴
	پشت سر	۱۴۸/۲۳	۱/۱۲۴	۱/۰۲۸	۴/۹۲	۱/۴۰۶
	سینه	۳۲۹/۴۱	۱/۰۶۹	۱/۱۰۵	۱۷/۳۵	۱/۵۰۱



شکل ۲: منحنی دز- پاسخ مو برای چشمه کالیفرنیوم ۲۵۲ برای نمونه موی یک فرد ایرانی

#### ۴. نتیجه‌گیری

داشتن اطلاعات تجربی بر پایه مشخصات بومی، یکی از اصول مهم در برپاسازی روش‌های بیواسی دزیمتری است. چنین اطلاعاتی تاکنون در کشور، برای روش دزیمتری مو، به‌عنوان روشی کارآمد و مهم، در ارزیابی دز افراد در حوادث

همچنین، باید توجه داشت که پایین‌بودن پرتوزایی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های قرار داده شده در پشت سر فانتوم، نشانگر جهت پرتودهی است و می‌توان بر پایه این تفاوت، جهت پرتوگیری فرد پرتودیده را نیز تعیین کرد. به‌جز گروه ۲، نتایج دیگر گروه‌ها نشان‌دهنده آن است که پرتوگیری فرد به‌طور عمده، تنها از روبه‌رو و با زاویه تقریباً صفر از محور فانتوم- چشمه صورت گرفته است؛ زیرا پرتوزایی نمونه‌های پشت سر در گروه‌های ۱، ۳ و ۴ بسیار کمتر از دیگر نمونه‌های همان گروه‌هاست. این نکته در تعیین دز اندام‌های سطحی و درونی فرد، اهمیت بسیاری دارد؛ زیرا بدن انسان از حجم و ویژگی لازم برای کاهش شدت پرتوهای نوترونی تند برخوردار است.

به روش شمارش مستقیم تعیین شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده قابل اطمینان بودن روش پیشنهادی در تعیین جهت پرتوگیری و تخمین دز دریافتی از نوترون‌های تند در حوادث بحرانی شدن است.

## ۵. سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از سرکار خانم ژیلا کریمی دیبا، آقایان داریوش مرزبانی، دکتر مهدی حسینی پویا، مهندس علی اکبر کاظمی موحد و مهندس محمدرضا دشتی پور، به دلیل همکاری صمیمانه در انجام آزمایش‌ها و از جناب آقای دکتر محمدرضا کاردان و دکتر اسد باباخانی به دلیل حمایت‌های اجرایی در اجرای طرح، کمال سپاسگزاری را دارند.

بحرانی شدن تهیه نشده بود. همچنین، تاکنون گزارشی از به‌کارگیری دزیمتری مو برای تعیین دز اندام‌های بدن منتشر نشده است. به همین دلیل، پژوهش حاضر به این موضوع پرداخته و با توجه به کمبود منابع و گزارش‌های علمی در دسترس، علاوه بر پیاده‌سازی روش و بررسی پارامترهای لازم برای اجرای بهینه آن، با انجام آزمایش‌هایی، کارایی دزیمتری مو در تهیه نقشه پرتوگیری بدن را اثبات می‌کند. در این مقاله، روش خاکسترنمودن مو و محلول‌سازی آن برای آماده‌سازی نمونه‌ها و شمارنده سوسوزن مایع برای سنجش پرتوزایی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها از اهمیت زیادی در حساسیت روش برخوردار است. در کار حاضر، گذشته از آنکه منحنی دز-پاسخ لازم برای دزیمتری مو در حوادث بحرانی شدن تهیه شد، حساسیت روش به‌ویژه در تعیین دز اندام‌های بدن نسبت

## ۶. مراجع

- [1] F. A. Mianji, J. Karimi Diba, and M.R. Kardan. Internal Dose Assessment for Environmental Monitoring in Nuclear Power Plant Accidents. Nuclear Technology & Radiation Protection. 28 (3) (2013) 325-331.
- [2] The Criticality Accident in Sarov, IAEA, Vienna, 2001.
- [3] T. Hiroshi, M. Kiriko, Y. Masae, N. Yushikazu, W. Yoshito, K. Hee Sun, F. Shoichi, K. Noriko, K. Fuyuki, J. Hisamasa, H. Toshiyasu, and A. Makoto. Bioassay for Neutron-Dose Estimations of Three Patients in the JCO Criticality Accident in Tokai-mura by measuring  $\beta$ -ray emitters. Journal of Radiation Research. 42 (2001) S129-S135.
- [4] Nuclear and Industrial Safety Agency Report of Japanese government to the IAEA ministerial conference on nuclear safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations NISA Jun. 2011 [http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea\\_houkokusho\\_e.html](http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html).
- [5] Sakai K., Lessons Learnt from Fukushima Accident, IAEA regional meeting in occupational radiation protection in emergency exposure situations, 23 Nov. 2011, Chiba, Japan.
- [6] K. Byoung-il, K. Jeong-in, L. Gyu-dong, and L. Young-khi. Neutron Dose Assessment Using  $^{24}\text{Na}$  in Blood for Korean Radiation Workers, Nuclear Technology & Radiation Protection. 1 (2011) 178-181.
- [7] Feng Y, Brown K S, Casson W H, Mei G T, Miller L F, and Thein M, 1993, Oak Ridge National Laboratory, Determination of neutron dose from criticality accidents with bioassays for sodium-24 in blood and phosphorous-32 in hair.
- [8] A. Franbourg, P. Hallegot, F. Baltenneck, C. Toutain, and F. Leroy. Current research on ethnic hair. Journal of the American Academy of Dermatology. 48 (2003) S115-9.
- [9] L. Lebaron-Jacobs, E. Gaillard-Lecanu, F. Briot, S. Distinguin, P. Boisson, I. Exmelin, Y. Racine, P. Berard, A. Flury-Herard, A. Miele, and R. Fottorino. Hair Dosimetry Following Neutron Irradiation. The Radiation Safety Journal. 92(2) (2007) S98-S104.
- [10] Nuclear Accident Dosimetry Systems, 1970, International Atomic Energy Agency, IAEA, Vienna.