



## برآورد میزان دز موثر دریافتی در کاربر دستگاه رطوبت سنج نوترونی خاک

کریمی شهری، کیهان‌دخت\*<sup>(۱)</sup>

دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم، گروه فیزیک

### چکیده:

در حال حاضر یکی از دقیق‌ترین ابزارهای سنجش رطوبت خاک، دستگاه رطوبت سنج نوترونی است. به علت وجود چشمه Am-Be در این دستگاه حفظ ایمنی کاربر حائز اهمیت است. در هنگام انتقال دستگاه، کاربر با توجه به چگونگی حمل آن از جهات مختلف تحت تابش قرار می‌گیرد. در این مطالعه این وضعیت‌ها شبیه‌سازی و نتایج دز موثر کل رسیده به کاربر با استفاده از فانتوم ریاضی ORNL و کد مونت کارلو MCNPX برآورد شده است. سپس برای دستگاه مجموعه حفاظ‌های قابل حمل مختلف طراحی و مجدداً دز موثر رسیده به کاربر محاسبه شد. حفاظ انتخاب شده مخلوط همگنی از ۵۵٪ پلی اتیلن، ۵٪ اسید بوریک و ۴۰٪ گالنا است. با قرار دادن دستگاه داخل این حفاظ دز موثر متوسط سالانه روی جهات مختلف به نصف مقدار دستگاه بدون حفاظ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: رطوبت سنج نوترونی خاک - چشمه Am-Be - دز موثر - فانتوم ORNL - شبیه سازی مونت کارلو

## Evaluation of the Effective Dose Received by the Operator of the Soil Neutron Moisture Meter

Karimi-Shahri, Keyhandokht<sup>1</sup>

Department of Physics, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

### Abstract

Nowadays one of the most accurate instruments for determining the soil moisture is neutron moisture meter. This instrument consists of an Am-Be source therefore, it is important to maintain the operator safety. The operator could be irradiated from different directions depending on how to hold the moisture meter during its transferring. In this study, the effective dose received by the operator was simulated using the Oak Ridge National Library (ORNL) modified phantom and the Monte Carlo N-Particle code (MCNPX) in different situations. In the next step, the portable shields were designed against irradiated neutron and photon rays and the moisture meter was put inside these shields. For these cases, the effective dose was also evaluated. The selected shield is a homogeneous mixture of 55% polyethylene, 5% boric acid, and 40% galena. The results show that the average annual effective dose was decreased to half its value in different situations when neutron moisture meter was put inside the selected shield.

Keyword: Soil Neutron Moisture Meter- Am-Be Source- Effective Dose- ORNL Phantom- Monte Carlo Simulation



### مقدمه :

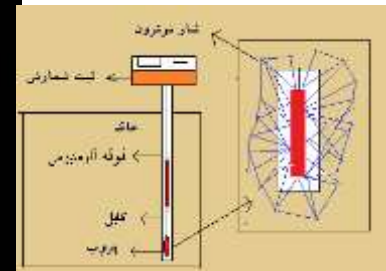
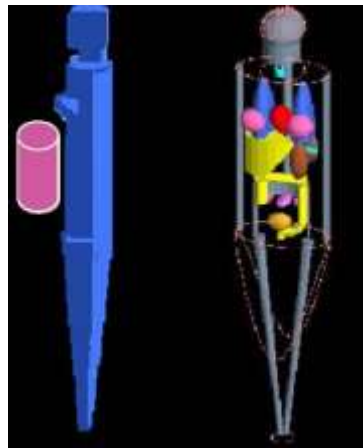
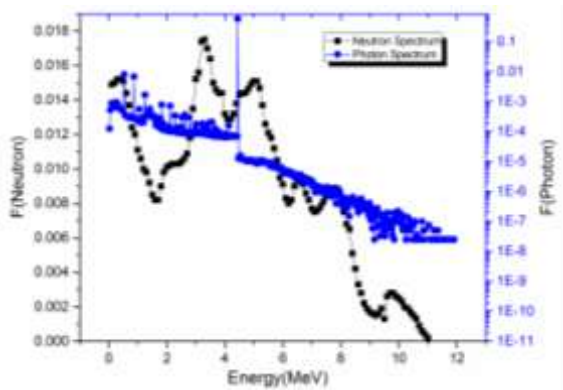
میزان رطوبت خاک از مهمترین عوامل در کشاورزی، زیست‌محیطی و مهندسی عمران است [۱]. اصولاً روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت خاک بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است. در حال حاضر با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج نوترونی می‌توان رطوبت خاک را در مدت کوتاهی اندازه گرفت. نتایج این روش به دلیل بزرگ بودن حجم متوسط خاک در اندازه‌گیری‌ها در مقایسه با نمونه‌های سنسور در حجم‌های کوچک قابل قبول است [۲]. دستگاه رطوبت‌سنج نوترونی در مهندسی عمران در اندازه‌گیری میزان رطوبت مواد حجیم در ساخت جاده و سد، در صنعت آهن و استیل برای تعیین سطح رطوبت در پخت و مخلوط آلیاژها، در صنایع شیشه و بتون برای نظارت در تعیین سطح رطوبت شن استفاده می‌شود [۳]. در یک تحقیق پنج ساله توسط کارگروه زنده بین‌المللی متشکل از کارشناسان ابزار، معلوم شد که تعیین رطوبت خاک به روش نوترونی در مقایسه با سایر روش‌ها نتایج صحیح‌تر و دقیق‌تری را به دست می‌دهد و این تنها روش غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت است که با استناد به داده‌های آن می‌توان به مطالعات بیلان آب، کارآیی مصرف آب توسط گیاه و راندمان آبیاری پرداخت [۲]. یکی از معایب این روش داده‌های غیرقابل اعتماد در عمق‌های کم است (کمتر از ۱۶ cm) زیرا در این عمق‌ها برخی نوترون‌ها به هوای اطراف فرار می‌کنند و در دستگاه آشکار نمی‌شوند. اما اصلی‌ترین عیب این دستگاه به حفاظت کاربر دستگاه به دلیل وجود چشمه نوترون مربوط می‌شود [۴]. به همین دلیل انتقال این دستگاه از نقطه‌ای به نقطه دیگر نیز مشکل است [۴]. چشمه نوترون به کار برده شده در این دستگاه غالباً چشمه رادیوایزوتوپی  $Am-Be$  می‌باشد. نوترون به دلیل اثر بیولوژیکی بسیار مخربی که روی محیط خصوصاً بافت‌های بدن می‌گذارد از سایر پرتوها متمایز می‌شود. چشمه  $Am-Be$  دارای شار نوترون و فوتون پر انرژی است. از اینرو امنیت فیزیکی دستگاه رطوبت‌سنج حائز اهمیت است. این مطالعه بر روی این عیب اصلی دستگاه تمرکز دارد و سعی شده است که با طراحی حفاظی قابل حمل که دستگاه داخل آن قرار می‌گیرد میزان دز کاربر کاهش داده شود.

### روش کار :

#### نحوه کار دستگاه رطوبت‌سنج

شکل ۱ الف تصویر شماتیکی از رطوبت‌سنج نوترونی و شکل ۱ ب نمایی از فانتوم ORNL به کار برده شده به همراه دستگاه داخل حفاظ را نمایش می‌دهد. این دستگاه شامل یک لوله دسترسی با قطر ۳/۸ تا ۵ cm است (در این مطالعه قطر لوله دسترسی ۵ cm و طول لوله ۳۰ cm در نظر گرفته شد) و معمولاً از جنس آلومینیوم و گاهی اوقات PVC انتخاب می‌شود. لوله‌های آلومینیوم عملکرد بهتری نسبت به لوله‌های PVC

دارند زیرا نوترون‌های حرارتی در کلر موجود در PVC جذب می‌شوند درحالی‌که سطح مقطع جذب آلومینیوم برای نوترون پایین است [5].



شکل شماره ۱: نمایی از رطوبت سنج نوترونی (الف) فانтом و شکل شماره ۲: طیف نوترون و فوتون Am-Be حفاظ اطراف دستگاه (ب)

داخل لوله دسترسی چشمه Am-Be و یک آشکارساز حساس به نوترون حرارتی مانند  $BF_3$  یا  $He_3$  قرار دارد. مکانیزم کار دستگاه به این طریق است که نوترون‌های سریع چشمه Am-Be به خاک برخورد کرده به دلیل رطوبت ( $H_2O$ ) و بنابراین هیدروژن موجود در خاک و یکسان بودن تقریبی جرم هیدروژن با نوترون دریک برخورد کشسان، نوترون بخش زیادی از انرژی خود را از دست می‌دهد و حرارتی می‌شود. برخی از نوترون‌های حرارتی به داخل لوله بر می‌گردند و توسط آشکارساز شمارش می‌شوند. سپس از منحنی کالیبراسیون استفاده می‌شود و بر اساس شمارش‌ها مقدار رطوبت خاک مطابق رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\Theta = a + b \left( \frac{R}{R_s} \right) \quad (1)$$

در رابطه  $\Theta$  رطوبت حجمی خاک بر حسب  $cm^3/cm^3$ ،  $a$  عرض از مبدا،  $b$  شیب خط و  $R/R_s$  نسبت شمارش که در آن  $R$  و  $R_s$  به ترتیب شمارش‌های ثبت شده توسط آشکارساز در خاک مرطوب و خشک می‌باشد [6].

این دستگاه به محل مورد نظر باید حمل شود و در آنجا اندازه‌گیری‌ها صورت گیرد. با توجه به اینکه انتقال دستگاه به محل اندازه‌گیری ممکن است با ماشین صورت بگیرد، در این حالت فرد از پشت تحت تابش قرار می‌گیرد (Back)، هنگام انتقال دستگاه رطوبت‌سنج از ماشین تا محل مورد نظر بسته به اینکه حمل دستگاه چگونه انجام می‌شود، کاربر دستگاه از جلو (Front)، سمت راست (Right Side) و سمت چپ (Left Side)



تحت تابش قرار می‌گیرد. همچنین در حین انجام اندازه‌گیری نیز از هر یک از جهات ذکر شده ممکن است تحت تابش قرار گیرد. از اینرو ۴ هندسه تابشی ذکر شده شبیه‌سازی و دز موثر کل بدن برآورد شد. در مرحله بعد دستگاه داخل حفاظ طراحی شده قرار داده شد و مجدداً در هر حالت دز موثر به دست آمد.

### ویژگی‌های حفاظ طراحی شده

در انجام محاسبات طیف نوترون از گزارش ۴۰۳ آژانس بین‌المللی انرژی اتمی [۷] و طیف فوتون از گزارش میری و همکاران [۸] انتخاب شده است. شکل ۲ این طیف‌ها را نشان می‌دهد (به منظور مشاهده نوترون و فوتون به صورت همزمان، نمودار نیم‌لگاریتمی رسم شده است). طراحی حفاظ برای چشمه Am-Be به دلیل شار نوترون و فوتون پر انرژی و نیمه عمر طولانی آن حائز اهمیت است ( $y = 432.7 \text{ } t_{1/2}$ ). ابتدا باید با به کار بردن مواد حفاظ مناسب، سرعت نوترون‌های خروجی از چشمه کاهش داده شود و انرژی آن از بازه سریع به بازه حرارتی منتقل شود. سپس نوترون‌های حرارتی از طریق ماده جاذب نوترون در حفاظ جذب شوند. همان‌گونه که اشاره شد Am-Be شار بزرگی از فوتون‌ها را نیز ایجاد می‌کند که می‌توان آنها را در دو گروه رده‌بندی کرد: فوتون‌هایی که به طور مستقیم توسط چشمه تولید می‌شوند و فوتون‌هایی که از گیراندازی نوترون‌های حرارتی ( $n-\gamma$ ) ایجاد می‌شوند. حفاظ‌های فوتون بر مبنای ضرایب میرایی و چگالی ماده انتخاب شده است. بیشتر فوتون‌های چشمه Am-Be در ناحیه کامپتون قرار دارد و از اینرو مواد حفاظ باید دارای این ویژگی باشند که بتوانند پراکندگی غیرالاستیک بالایی را ایجاد نمایند و تعداد فوتون بیشتری را به ناحیه با انرژی پایین منتقل کنند. در شبیه‌سازی‌ها حفاظ دستگاه یک استوانه با قطر داخلی ۵ cm که دستگاه داخل آن قرار می‌گیرد و با قطر بیرونی ۱۶ cm و ارتفاع ۳۰ cm طراحی شد. حفاظ‌های به کار برده شامل پلی‌اتیلن ( $0.94 \text{ g cm}^{-3}$ )، مخلوط پلی‌اتیلن و ۵٪ بور ( $0.95 \text{ g cm}^{-3}$ )، بتون معمولی ( $2.5 \text{ g cm}^{-3}$ )، بتون سنگین داتولیت گالنا ( $4.62-4.65 \text{ g cm}^{-3}$ ) و مخلوط همگنی از ۵۵٪ پلی‌اتیلن، ۵٪ اسید بوریک و ۴۰٪ گالنا ( $1.49 \text{ g/cm}^{-3}$ ) و PEBAG و همچنین حفاظ‌هایی که از دو لایه شامل یک لایه گالنا ( $7.2 \text{ g cm}^{-3}$ ) و یا تنگستن ( $7.4 \text{ g cm}^{-3}$ ) با شعاع ۳ cm و یک لایه با شعاع ۵ cm مخلوط پلی‌اتیلن و ۵٪ بور تشکیل شده‌اند شامل GPB که گالنا قبل از پلی‌اتیلن، PBG و PBW که به ترتیب گالنا و تنگستن بعد از پلی‌اتیلن قرار گرفته‌اند. علاوه بر این حفاظ‌هایی شامل ۳ لایه نیز در نظر گرفته شد که شامل دو لایه ۱.۵ cm گالنا که به ترتیب در دو طرف بتون معمولی (GOCG) و مخلوط پلی‌اتیلن و ۵٪ بور (GPBG) با شعاع ۵ cm قرار گرفته‌اند.

### چگونگی انجام محاسبات و شبیه‌سازی‌ها

فاصله فانوم با دستگاه ۱ cm و برای نوترون‌های کم انرژی پراکندگی‌های مولکولی در نظر گرفته شده است. کارت PWT (Photon production Weights) در شبیه‌سازی‌ها به منظور تفکیک فوتون‌هایی که مستقیم

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad , \quad E = \sum_T w_T H_T \quad (2)$$

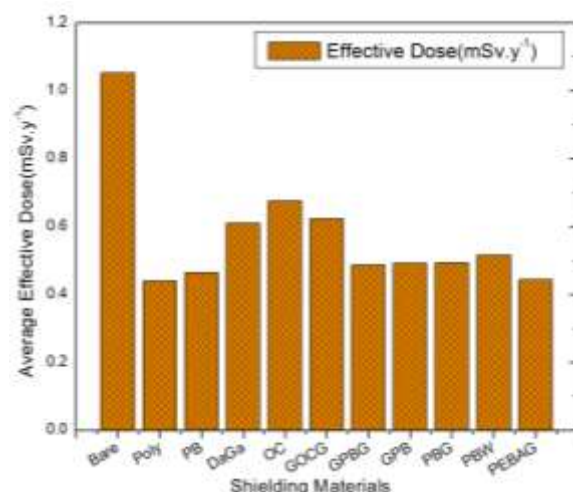
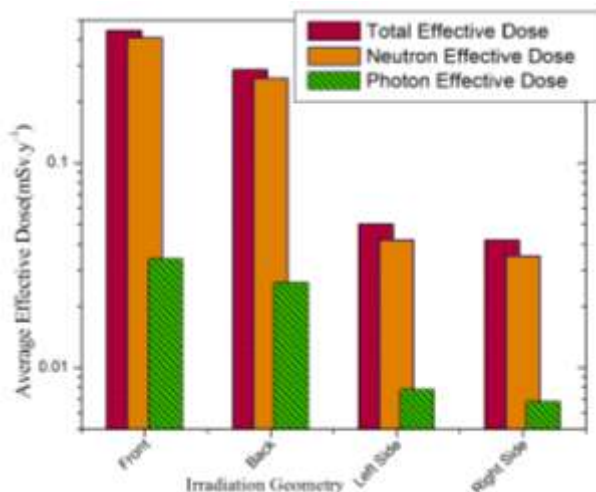


وارد بدن شده‌اند از فوتون‌های ثانویه‌ای که در بدن ایجاد می‌شوند، بکاررفته است. از نتایج این برنامه‌ها برای محاسبه دز معادل نوترون ( $H_T$ ) استفاده شده است زیرا برای محاسبه این کمیت فوتون‌های ثانویه‌ای که از برهمکنش نوترون در بدن ایجاد می‌شوند، در ضریب وزنی تابش ( $w_R$ ) نوترون ضرب می‌شوند در حالی که سایر فوتون‌ها یعنی فوتون چشمه و فوتون ایجاد شده از برهمکنش نوترون در حفاظ در ضریب وزنی تابش ۱ ضرب می‌شوند.

بعد از محاسبه دز معادل نوترون و فوتون با در نظر گرفتن اینکه نسبت  $\gamma/n$  برای چشمه Am-Be حدوداً ۰/۶ می‌باشد، دز موثر کل محاسبه گردید. دز موثر بر طبق گزارش ۱۰۳ این کمیته باجدیدترین ضرایب بافت ارائه شده (WT) به صورت رابطه (۲) در هر ۴ جهت تابشی محاسبه گردید.

### نتایج :

در دستگاه رطوبت‌سنج شار چشمه نوترون معمولاً ۵۰ mCi می‌باشد [۱۰]. از اینرو این مقدار در محاسبه دز موثر به واحد  $mSv/y$  لحاظ شده و ساعت کاری پرتوکار طبق مقررات ۴۰ ساعت در هفته در نظر گرفته شده است. شکل ۳ دز موثر کل رسیده به کاربر که از متوسط‌گیری روی نتایج حاصل از فانتوم زن و مرد به دست آمده در هنگامیکه دستگاه بدون حفاظ و زمانیکه حفاظ‌های مختلف روی دستگاه قرار داده می‌شوند را در هندسه AP نشان می‌دهد.



شکل ۳: دز موثر کل و سهم دزهای نوترون و فوتون در حفاظ‌های مختلف  
 شکل ۴: دز موثر کل و سهم دزهای نوترون و فوتون در هر موقعیت تابش





همانطور که از نتایج مشخص است PB نتایج بهتری نسبت به OC و DaGa ارائه می‌دهد. بررسی نتایج GPB و PBG نشان می‌دهد که دز گاما با انتقال گالنا به انتهای حفاظ کاهش می‌یابد. این نتیجه با قرار دادن عناصری مثل بیسموت و آهن نیز تایید شد. بهترین نتیجه از مخلوط همگن PEBAG به دست می‌آید که دز موثر در کاربر به مقدار  $0.44 \text{ mSv/y}$  می‌رسد که در حدود  $2/5$  برابر نسبت به بدون حفاظ کاهش می‌یابد. درصدهای مختلفی از گالنا به حفاظ انتخابی افزوده شد که حالت بهینه آن در  $40\%$  رخ داد. و با افزایش بیشتر درصد گالنا میزان دز ثابت باقی می‌ماند. شکل ۴ نتایج به دست آمده با قرار دادن این حفاظ را در ۴ هندسه تابشی نمایان می‌کند. در این شکل علاوه بر دز موثر کل، سهم دز موثر ناشی از نوترون و فوتون به تفکیک نشان داده شده است که در آن دز موثر نوترون شامل دز موثر نوترون و فوتون‌های ثانویه تولید شده از گیراندازی نوترون در بدن و دز موثر فوتون دربرگیرنده فوتون‌های تولید شده در حفاظ و فوتون چشمه است. همانطور که در شکل مشخص است بیشترین و کمترین مقدار دز موثر به ترتیب هنگامی که رطوبت‌سنج در جلو و سمت راست بدن کاربر قرار دارد، رخ می‌دهد. در تمامی هندسه‌های تابش سهم فوتون در مقایسه با سهم نوترون در مقدار دز موثر بسیار ناچیز است.

### بحث و نتیجه گیری:

بررسی‌های جرئی در نتایج PB نشان می‌دهد که سهم دز نوترون در آن کمتر از OC و DaGa است. بررسی دقیق تمام نتایج، ایده‌ای در مورد مکان قرارگیری حفاظ گاما در اختیار ما قرار می‌دهد که اگر حفاظ‌های لایه‌ای استفاده شود نتایج بهتری به دست می‌آید با در نظر داشتن این نکته که حتما لایه آخر حفاظ گاما باشد اگرچه وزن حفاظ افزایش می‌یابد. در این صورت گاماها ناشی از برهمکنش نوترون علاوه بر گاماها چشمه نیز جذب می‌شوند. گالنا (PbS) در مقایسه با سرب چگالی کمتری دارد اما به دلیل دربرداشتن گوگرد جاذب خوب نوترون حرارتی نیز است و در واقع یک عنصر دو منظوره می‌باشد.  $55\%$  آستانه اشباع پلی‌اتیلن در ترکیب حفاظ بهینه است. زیرا افزایش درصد پلی‌اتیلن سبب کاهش سهم گالنا می‌شود و بنابراین گاماها حفاظ نمی‌شوند و به بدن می‌رسند و کاهش سهم پلی‌اتیلن به کمتر از  $55\%$  سبب می‌شود نوترون‌ها از حفاظ خارج شده و به بدن برسند. در ترکیب حفاظ بهینه پلی‌اتیلن به همراه اسید بوریک نقش کند کننده و جاذب را ایفا می‌کنند. در این حفاظ نوترون‌های سریع توسط پلی‌اتیلن کند شده و سپس توسط بور جذب می‌شوند و به این ترتیب شار نوترون‌ها کاهش می‌یابد. وزن این حفاظ حدود  $14$  کیلوگرم می‌باشد. مزیت دیگر این حفاظ نسبت به سایر حفاظ‌ها مقرون به صرفه بودن آن است. زیرا ایران یکی از کشورهای صادرکننده گالنا است. با توجه به نتایج بیشترین مقدار دز زمانی که کاربر، دستگاه را در جلو بدن خود گرفته به دست آمد که قابل انتظار است زیرا اعضای حساس به تابش در جلو بدن قرار دارند و بنابراین در این حالت میزان دز جذبی اعضای حساس افزایش می‌یابد. اما زمانیکه دستگاه در طرفین بدن قرار می‌گیرد لایه‌های چربی و ماهیچه



نقش حفاظ را برای اعضای داخلی بازی می‌کنند و باعث می‌شوند دز جذبی اعضای داخلی نسبت به زمانیکه دستگاه در جلو بدن فرد قرار دارد به شدت کاهش یابد. همچنین به دلیل فاصله اعضای حساس به تابش از چشمه، مقدار دز این اعضا نیز کاهش می‌یابد. اما علت اینکه مقادیر دز موثر در تابش از سمت راست نسبت به تابش از سمت چپ کمتر است به وجود اندام‌هایی مثل معده، طحال و... در سمت چپ بدن می‌باشد. همان‌طور که مشخص است دز موثر با قرار دادن دستگاه داخل حفاظ انتخابی به طور محسوسی کاهش می‌یابد. به طوریکه میانگین دز موثر سالانه روی تمام جهت‌های تابش هنگامیکه دستگاه بدون حفاظ حمل می‌شود دو برابر زمانی است که دستگاه داخل حفاظ قرار دارد. به این ترتیب می‌توان میزان خطرپذیری طول عمر در سرطان‌های بدخیم و غیربدخیم را برای کاربر کاهش داد. همچنین توصیه می‌گردد که تا حد امکان دستگاه در طرف راست بدن حمل شود.

#### مراجع :

- [1] Evett SR, Ibragimov N, et al. (2002) Soil moisture neutron probe calibration and use in five soils of Uzbekistan, *17th World Congress of Soil Science*, Bangkok, Thailand.
- [2] Mittelbach H, Lehner I, et al. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland, *J Hydrol*, **430**:39-49, 2012.
- [3] Lownthal GC, Airey PL. Practical application and radioactivity and nuclear radiations, Cambridge university press, UK, p.216-218, 2004.
- [4] Sushalekshmi SU, Singh DN et al. A critical review of soil moisture measurement, *Measurement* **54**:92-105, 2014.
- [5] Stanley JN, Lamb DW, et al. Effect of Aluminum Neutron Probe Access Tubes on the Apparent Electrical Conductivity Recorded by an Electromagnetic Soil Survey Sensor, *IEEE*, **11**:333-336, 2014.
- [6] عباسعلیان، حسین؛ کاربرد کاوشگرهای نوترون و گاما در علوم کشاورزی؛ انتشارات پلک؛ ایران صفحه ۱-۳۰، ۱۳۸۸
- [7] IAEA Technical Report Series 403, Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.
- [8] Miri-Hakimabad H, Panjeh. H, et al. Shielding studies on a total-body neutron activation facility, *Iran J Radiat Res*, **5**:545-51, 2007.
- [9] ICRP Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Elsevier, 2007.
- [10] Gardner WH. Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, p.1-1188, 1986.