



امکان‌سنجی استفاده از توزیع زاویه ای نوترون‌های پراکنده شده در رطوبت‌سنجی با استفاده از روش مونت کارلوی کمترین مربعات

قائمی فرد، مسعود*^(۱) - ایزدی نجف آبادی، رضا^(۱) - قلعه، نیما^(۲)

(۱) دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

(۲) دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک

چکیده

در پژوهش حاضر، به منظور شبیه‌سازی یک سامانه اندازه‌گیری در صد رطوبت خاک، از توزیع زاویه‌ای نوترون‌های پراکنده شده ناشی از برخورد نوترون‌های یک چشمه رادیوایزوتوپی (Am-Be) با سطح نمونه خاک، استفاده شده است. داده‌های شبیه‌سازی با کد مونت کارلوی MCNPX 2.6 (به ازاء 10^8 نوترون چشمه) به همراه روش کمترین مربعات نشان می‌دهند می‌توان از شمارش نوترون‌های گرمایی پراکنده شده که با یک شمارنده BF_3 قرار داده شده در گام‌های زاویه‌ای $5/725^\circ$ ، در تعیین دقیق رطوبت با خطای کمتر از $2/19\%$ درصد استفاده کرد.

کلمات کلیدی: رطوبت خاک، توزیع زاویه ای، نوترون، پراکندگی، MCNPX 2.6، آشکارساز BF_3

۱- مقدمه

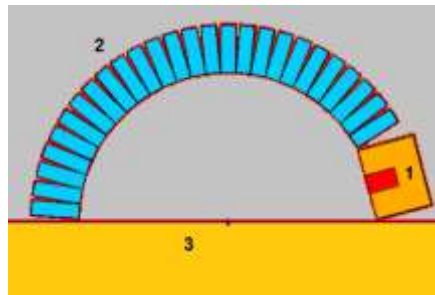
ویژگی‌ها و نقش بی‌بدیل خاک در طبیعت و سامانه‌های محیطی باعث گردیده تا فاکتور مهم رطوبت خاک دارای اهمیت فراوانی باشد. با اینکه رطوبت موجود در خاک، درصد ناچیزی از مقدار آب موجود در جهان را تشکیل می‌دهد اما تقریباً تمامی فرایندهای اتفاق افتاده در خاک را کنترل می‌کند [۱]. تعیین رطوبت موجود در خاک از موضوعات مهم در کشاورزی، سدسازی، ساخت فرودگاه و بزرگراه‌ها به شمار می‌رود. روش‌های متنوعی برای تعیین رطوبت خاک وجود دارند که پرکاربردترین آنها روش توزین [۲] و روش انعکاس سنجی زمانی [۳] است.

هرچند استفاده از پرتوهای گاما و نوترون در تعیین درصد رطوبت خاک سابقه طولانی داشته است، لیکن عموم این روش‌ها بر تأثیر میزان رطوبت خاک بر تغییر انرژی نوترون (کندسازی) یا آشکارسازی گاماها بی‌تأثیر بوده است. در مقاله حاضر، تعیین درصد رطوبت خاک بر اساس توزیع زاویه‌ای نوترون‌های پراکنده شده صورت می‌گیرد که از این حیث تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. در صورت موفقیت‌آمیز بودن اندازه‌گیری‌ها بر اساس سامانه پیشنهادی در تعیین رطوبت خاک (اندازه‌گیری‌های کمی)، می‌توان مطالعات مشابهی را در خصوص اندازه‌گیری‌های کمی و تعیین نوع عناصر تشکیل‌دهنده نیز در دستور کار قرار داد.

۲- مواد و روش‌ها

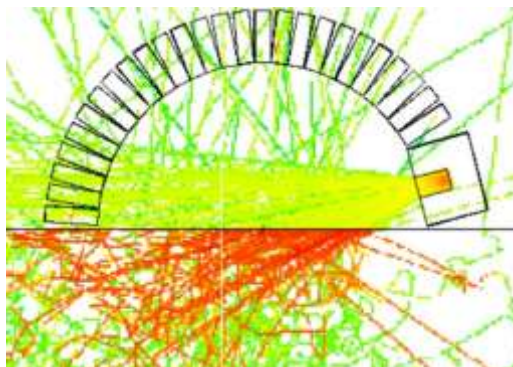
۲-۱- شبیه‌سازی با کد MCNPX

به منظور انجام شبیه‌سازی یک سامانه رطوبت‌سنجی، ابتدا یک نمونه خاک خشک با ابعاد $50 \times 70 \times 70 \text{ cm}^3$ در نظر گرفته شد. تعریف ماده خاک، بر اساس مرجع PNNL-15870 Rev1 و تحت عنوان U.S. Average Soil [۴] با عناصر تشکیل‌دهنده مطابق جدول شماره ۱ و چگالی $1/52 \text{ g/cm}^3$ انجام شد. سپس هندسه چیدمان شبیه‌سازی مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شد. چنانچه ملاحظه می‌شود چیدمان ارائه شده از ۲۶ مکان قرارگیری آشکارساز استوانه‌ای BF_3 و یک همسوساز جهت قرارگیری چشمه Am-Be تشکیل شده است. آشکارساز BF_3 استوانه‌ای از نوع LND 20137 [۵] به ابعاد $123/8 \text{ mm}$ طول و 16 mm قطر و جنس بدنه استیل و فشار گاز 400 Torr در نظر گرفته شده است. محاسبه نشان می‌دهد در صورت وجود غنای 96% برای ^{10}B و دمای 300 K باید چگالی گاز BF_3 را $2/992 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ در نظر گرفت.



شکل ۱: سامانه رطوبت‌سنج پیشنهادی بر اساس اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای نوترونهای پراکنده شده: (۱) همسوساز و چشمه نوترون Am-Be ، (۲) زوایای مختلف قرارگیری آشکارساز BF_3 و (۳) نمونه خاک.

همسوساز چشمه نوترون از پلی‌اتیلن سنگین و لایه نازک کادمیوم تشکیل شده است. مطابق شکل (۲)، که خروجی مش‌تالی کد MCNPX می‌باشد، بخشی از نوترون‌های خروجی از چشمه پس از برخورد با سطح خاک به سمت محل قرارگیری آشکارساز پراکنده می‌شوند. با در نظر گرفتن همزمان تالی شار (F4) و تالی (FM4) و کد ۱۰۷ که متناظر با واکنش (n, α) است، می‌توان تعداد برهم‌کنش‌های نوترون گرمایی با ^{10}B موجود در گاز آشکارساز BF_3 را محاسبه کرد.



شکل ۲: خروجی گرافیکی مش‌تالی نرم‌افزار Xming مربوط به رد نوترونهای خروجی از یک چشمه Am-Be در سامانه رطوبت‌سنج پیشنهادی.

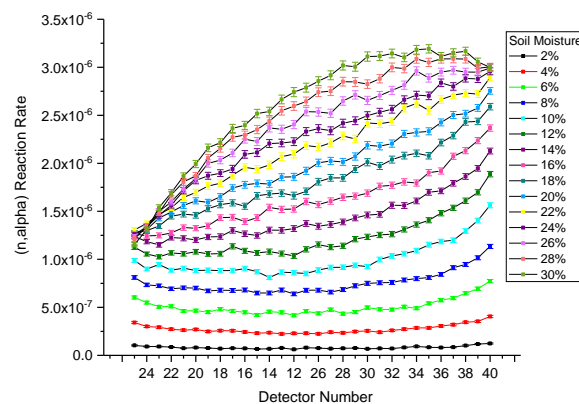


سپس با اضافه نمودن آب به نمونه خاک، درصد رطوبت از صفر تا ۳۰ درصد و با گام های ۲ درصد در شبیه سازی تغییر داده شد. برای هر نمونه خاک با درصد رطوبت مشخص (۱۵ میزان درصد رطوبت به همراه حالت خاک خشک)، آهنگ واکنش (n, α) یا متناظراً شمارش آشکار ساز BF_3 محاسبه شد. نتایج محاسبات شبیه سازی با کد MCNPX برای ۱۶ درصد رطوبت و ۲۶ موقعیت قرارگیری آشکار ساز BF_3 در زوایای $0^\circ/75^\circ$ تا $0^\circ/175^\circ$ در شکل (۳) آمده است.

جدول ۱. عناصر تشکیل دهنده و درصد وزنی آنها در نمونه خاک خشک [۴].

درصد وزنی	عنصر تشکیل دهنده
۰/۵۱۳۷۱۳	O
۰/۰۰۶۱۴۰	Na
۰/۰۱۳۳۰۳	Mg
۰/۰۶۸۵۶۳	Al
۰/۲۷۱۱۸۳	Si
۰/۰۱۴۳۲۷	K
۰/۰۵۱۱۶۷	Ca
۰/۰۰۴۶۰۵	Ti
۰/۰۰۰۷۱۶	Mn
۰/۰۵۶۲۸۳	Fe

داده های شکل (۳) را می توان در قالب یک ماتریس پاسخ با ۱۶ ستون (متناظر با ۱۶ درصد رطوبت مختلف) و ۲۶ سطر (متناظر با ۲۶ موقعیت قرارگیری آشکار ساز) نمایش داد. ماتریس پاسخ تهیه شده در بخش محاسبات مونت کارلوی کمترین مربعات (Monte Carlo Library Least Squares) یا MCLS به عنوان ورودی استفاده خواهد شد.



شکل ۳: نتایج شبیه سازی MCNP آهنگ شمارش آشکار ساز BF_3 در زوایای فضایی مختلف.



۲-۲- روش کمترین مربعات

در این روش ابتدا با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX، کتابخانه ماتریس پاسخ به صورت داده‌هایی در ۱۶ ستون و ۲۶ سطر تهیه می‌گردد. سپس نمونه خاک با درصد رطوبت مجهول در معرض چشمه Am-Be قرار گرفته و شمارش آشکارساز در ۲۶ موقعیت (زاویه) مختلف مطابق شکل (۲) محاسبه می‌گردد.

در برنامه فرترنی که به همین منظور نوشته شده است، کتابخانه ماتریس پاسخ به همراه پاسخ آشکارساز (در ۱۶ زاویه مختلف) برای نمونه خاک با رطوبت مجهول به عنوان ورودی در نظر گرفته شده و مجموع مربعات تفاضل شمارش‌ها (شمارش آشکارساز در هر زاویه به ازاء خاک با رطوبت معلوم منهای مقادیر متناظر با نمونه خاک با رطوبت مجهول) مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$Y = \sum_{k=1}^N (X_k(i) - X_k(j))^2$$

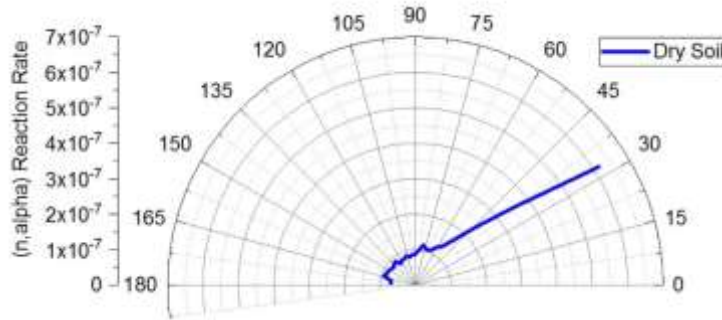
که در رابطه بالا $X_k(i)$ و $X_k(j)$ به ترتیب شمارش آشکارساز برای نمونه های معلوم و مجهول در زاویه k ام را نشان می‌دهد و N در این محاسبه برابر ۲۶ است. رابطه فوق برای یک مقدار درصد رطوبت خاص انجام می‌شود و نهایتاً ۱۶ مقدار برای Y بدست خواهد آمد. از بین Y های مختلف، ۲ مقدار که از بقیه کمتر هستند انتخاب شده و مشخص می‌شود که متناظر با کدام دو رطوبت هستند (به فرض رطوبت‌های ۱ و ۲). داده‌های متناظر با رطوبت‌های ۱ و ۲ عبارت خواهند بود از $X(1)$ و $X(2)$. می‌توان رابطه زیر را برحسب دو رطوبت معلوم $X(1)$ و $X(2)$ و رطوبت مجهول X نوشت:

$$X = PX(1) + QX(2)$$

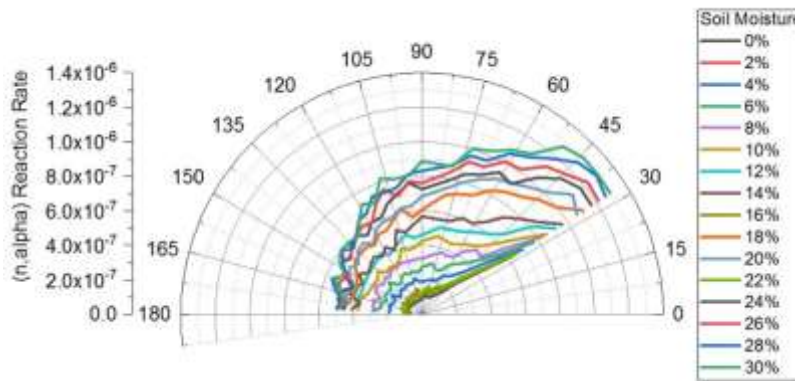
که با تعیین مقادیر P و Q ، مقدار رطوبت مجهول قابل محاسبه است. تفاضل مقدار رطوبت محاسبه شده و رطوبت واقعی نمونه مجهول، خطای محاسبه را تعیین می‌کند.

۳- نتایج

آهنگ واکنش (n, α) در حجم آشکارساز BF_3 با استفاده از تالی FM4 کد MCNPX محاسبه و در زوایای مختلف قرارگیری آشکارساز به ازاء درصد رطوبت صفر (خاک خشک) در شکل (۴) نشان داده شده است. در شکل (۵)، اثر افزایش درصد رطوبت از صفر تا ۳۰ درصد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش رطوبت، توزیع زاویه‌ای نوترون‌های گرمایی پراکنده شده در زوایای ۲۶ گانه به سمت همسانگرد شدن تغییر می‌کند. این تغییر می‌تواند به عنوان ملاکی برای تعیین رطوبت از طریق برنامه محاسبه کمترین مربعات محسوب شود.

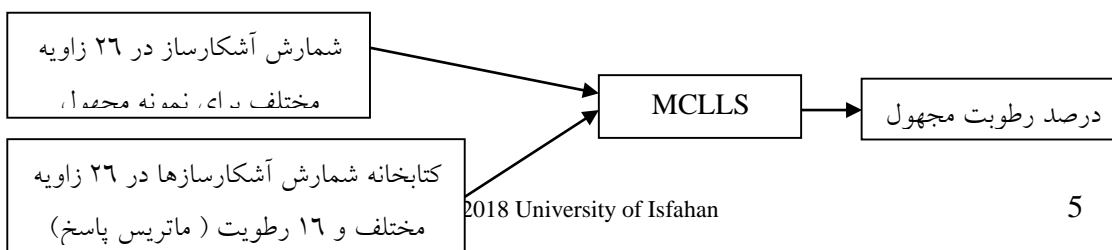


شکل ۴: نمایش توزیع فضایی نوترونها گرمایی به صورت تابعی از زاویه قرارگیری آشکارساز BF_3 برای نمونه خاک خشک.



شکل ۵: نمایش توزیع فضایی نوترونها گرمایی به صورت تابعی از زاویه قرارگیری آشکارساز BF_3 برای نمونه خاک با درصدهای مختلف رطوبت.

به منظور راستی‌آزمایی نتایج سامانه پیشنهادی، یک نمونه خاک با درصد رطوبت ۱۵/۷۵ (نمونه خاک مجهول) که در معرض چشمه نوترون Am-Be قرار دارد در نظر گرفته می‌شود. سپس شمارش آشکارساز در ۲۶ زاویه مختلف به عنوان داده‌های ورودی مطابق شکل (۶) در برنامه MCLLS قرار داده می‌شود. با استفاده از برنامه MCLLS نوشته شده به زبان فرترن، درصد رطوبت برابر با تقریباً ۱۵/۷۲ بدست آمده که خطای نسبی ۲/۱۹ درصد را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، به منظور تسریع در استخراج داده‌ها از شبیه‌سازی با کد MCNPX، از ۲۶ آشکارساز به صورت همزمان در نظر گرفته شده است (که این امر باعث crosstalk در آشکارسازهای مجاور می‌گردد)، در حالی که در عمل، در سامانه رطوبت سنج پیشنهادی از یک آشکارساز و در ۲۶ موقعیت زاویه‌ای مختلف استفاده می‌شود. نتایج، بر اساس این تقریب می‌تواند تا حداکثر ۱۰ درصد (نسبت به وقتی که تنها از یک آشکارساز استفاده می‌شود) تحت تاثیر قرار گیرد، هرچند در صورتی که از یک آشکارساز استفاده شود می‌بایست کتابخانه داده نیز متناظراً اصلاح گردد.





شکل ۶: بلوک دیاگرام برنامه MCLLS برای محاسبه درصد رطوبت مجهول.

۴- بحث و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، یک سامانه اندازه گیری در صد رطوبت خاک بر اساس اندازه گیری نوترون‌های پراکنده شده در ۲۶ زاویه مختلف ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی با کد MCNPX برای ۲۶ زاویه قرارگیری آشکارساز و ۱۶ رطوبت مختلف به عنوان کتابخانه ورودی یک برنامه کمترین مربعات در نظر گرفته می‌شود. از نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تکنیک کمترین مربعات که درصد خطای نسبی ۲/۱۹ درصد را نشان می‌دهد، حاکی از این است که می‌توان از توزیع زاویه‌ای نوترون‌های پراکنده‌شده به عنوان ابزاری مناسب در تعیین رطوبت خاک استفاده کرد.

نتایج شبیه‌سازی کد MCNPX با 10^8 ذره چشمه انجام شده است. اگر به صورت تقریبی، هر ۲۲۰۰ نوترون گسیلی در ثانیه از چشمه Am-Be را معادل یک میلی‌کوری اکتیویته چشمه رادیوایزوتوپی در نظر بگیریم، نتیجه می‌شود که با یک چشمه ۷۵۰ mCi در مدت یک دقیقه می‌توان به خطای مورد نظر در تعیین رطوبت رسید.

مراجع

[۱] دانیل هیل. فیزیک خاک و محیط زیست. ترجمه‌ی دکتر بیژن قهرمانی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۲.

[۲] Romano, N., 2014. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. *Journal of hydrology*, 516, pp.6-20.

[۳] Gwak, Y. and Kim, S., 2017. Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope. *Hydrological Processes*, 31(2), pp.431-445.

[۴] McConn, R.J., Gesh, C.J., Pagh, R.T., Rucker, R.A. and Williams III, R., 2011. *Compendium of material composition data for radiation transport modeling* (No. PNNL-15870 Rev. 1). Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US).

[۵] <http://Indinc.com/>