



تعیین رطوبت خاک با استفاده از پراکندگی نوترون

محمدی، عقیل^(۱) - کامران نجار*، فهیمه^(۲) - قلعه، نیما^(۳)

^(۱) دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، ^(۲) دانشگاه پیام نور مرکز فریمان، دانشکده علوم، گروه فیزیک، ^(۳) دانشگاه

دامغان، دانشکده فیزیک، ^(۴) دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده:

در این مطالعه، در صد رطوبت خاک بر اساس میزان کند شدن نوترون در نمونه مرطوبت تعیین می‌شود. چشمه ۱۰۰ میلی‌کوری $^{241}\text{Am-Be}$ ، شمارنده BF_3 و سه نوع ماده (پودر سنگ، خاک رس و مخلوط ماسه و سیمان) با چگالی‌های جرمی مختلف و مقادیر مشخص آب اضافه شده به آن‌ها، برای اندازه‌گیری انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار 250cc ($2/28\%$) آب به نمونه خاک رس، 220cc آب به پودر سنگ و 200cc آب به مخلوط ماسه، آهنگ شمارش نوترون به ترتیب با دقت $9/60\%$ از $41/2\text{cps}$ به $71/2\text{cps}$ ($12/44\%$ افزایش)، با دقت $5/57\%$ از $445/1\text{cps}$ به $56/1\text{cps}$ ($7/90\%$ افزایش) و با دقت $9/50\%$ از $51/3\text{cps}$ به $88/3\text{cps}$ ($10/54\%$ افزایش) تغییر می‌کند.

کلمات کلیدی: پراکندگی نوترون، رطوبت‌سنج هسته‌ای، آشکارسازی نوترون گرمایی

مقدمه:

امروزه تکنیک‌های اندازه‌گیری هسته‌ای در صنعت، کشاورزی و پزشکی به‌عنوان روش‌های غیرمخرب و سریع، مورد استفاده قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به کاربردها در چاه‌پیمایی، صنعت سیمان، فولاد و اندازه‌گیری میزان یکنواختی غنای میله‌های سوخت اشاره نمود [۱-۳]. استفاده از این فناوری در اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به مواد از جمله چگالی، خردگی، یکنواختی ریخته‌گری و فرم‌دهی و تعیین رطوبت موجود در آن‌ها نیز جایگاه ویژه‌ای دارد. اندازه‌گیری رطوبت موجود در خاک و مشتقات آن نیز یکی از موارد کاربرد فناوری هسته‌ای به روش پراکندگی نوترون‌های سریع می‌باشد [۴]. هرچند اندازه‌گیری رطوبت موجود در نمونه‌های مورد آزمون با استفاده از روش‌های مختلفی همچون روش‌های صوتی، الکتریکی و نظایر آن انجام می‌شود [۵]، ولی استفاده از فناوری هسته‌ای به‌علت داشتن سرعت و دقت بالا کاربرد بیشتری دارد [۶]. منظور از رطوبت موجود در ماده مورد آزمون، در واقع همان مولکول‌های آب است که در حجم ماده بطور یکنواخت (یا غیریکنواخت) توزیع شده است. با توجه به این‌که هیدروژن عنصری هم جرم با نوترون می‌باشد، بهترین کندکننده برای نوترون‌های سریع محسوب می‌گردد. برای این منظور، از چشمه‌های نوترونی با اکتیویته پایین از مرتبه 10mCi ، آشکار ساز نوترون‌های گرمایی مثل BF_3 و ^3He و یک دستگاه



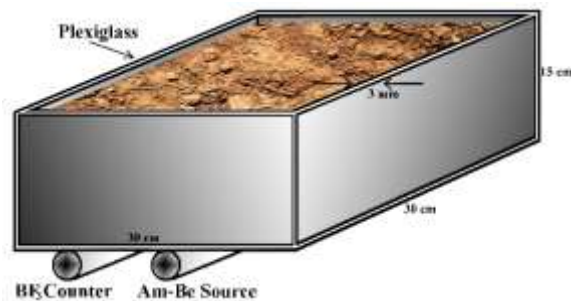
قرائت‌گر با نرم‌افزار مربوطه استفاده می‌شود، به صورتی که نوترون‌های سریع در برخورد با عناصر تشکیل دهنده ماده مورد آزمون از جمله هیدروژن موجود در آن انرژی خود را از دست داده تا اینکه در محدوده انرژی گرمایی نوترون قرار گیرند. کسری از نوترون‌های فوق به سمت آشکار ساز نوترون گرمایی حرکت می‌کند و در برخورد با آن جذب شده و سیگنال ناشی از آنها توسط قرائت‌گر دستگاه ثبت می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از برخورد نوترون با ماده مورد آزمون و آشکار ساز نوترون گرمایی، میزان رطوبت موجود در نمونه خاک‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. همچنین جهت تعیین سرعت در اندازه‌گیری رطوبت، بازه‌های مختلف زمانی برای شمارش انتخاب شده و برای هر یک، دقت موردنیاز ارائه گردیده است.

روش کار:

برای اندازه‌گیری رطوبت موجود در نمونه‌ها از چشمه نوترون $^{241}\text{Am-Be}$ با اکتیویته 100mCi با طول فعال 50mm و قطر 40mm استفاده شده است. برای شمارش نوترون‌های برگشتی، آشکار ساز تناسبی نوترون گرمایی BF_3 از نوع LND2022 با طول فعال 100mm و قطر فعال 24mm مورد استفاده قرار گرفته است که جنس دیواره آن از آلومینیم است. مطابق کاتالوگ شرکت سازنده، ولتاژ کار آشکار ساز $1880\text{V}+$ تنظیم شده است. از مواد مختلفی مثل خاک رس (نمونه ۱)، پودر سنگ (نمونه ۲) و مخلوط ماسه و سیمان (نمونه ۳) برای اندازه‌گیری رطوبت استفاده شده است. برای این منظور، با اضافه کردن مقدار مشخصی آب به ماده مورد آزمون با جرم‌های مشخص اضافه شده است و شمارش نوترون‌های برگشتی از نمونه‌های فوق با استفاده از شمارنده BF_3 انجام شده است. جرم نمونه خشک خاک رس 10910g ، پودر سنگ 11935g و مخلوط ماسه و سیمان 11790g بوده است. تمام نمونه‌های ساخته شده در داخل ظرفی با ابعاد $150 \times 300 \times 300\text{mm}^3$ قرار گرفته است. چشمه نوترون و آشکار ساز در زیر ظرف فوق در فاصله 10cm از همدیگر قرار دارند. فاصله کف ظرف تا کف آزمایشگاه 70cm انتخاب شده است. برای اطمینان از شمارش‌های خالص نوترون توسط ماده مورد آزمون، میزان نوترون‌های برگشتی از کف آزمایشگاه و دیواره‌های ظرف خالی نیز اندازه‌گیری شده و به‌عنوان تابش زمینه برای اندازه‌گیری‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. برای اطمینان از خشک بودن خاک، نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در کوره با دمای 200 درجه سانتیگراد قرار داده شدند.

جداول ۱ تا ۳، به ترتیب مشخصات نمونه‌های خاک رس، پودر سنگ و مخلوط ماسه-سیمان را نشان می‌دهند. شمارش نوترون‌های برگشتی برای نمونه خاک رس، پودر سنگ و مخلوط ماسه-سیمان به ترتیب در بازه‌های زمانی 600 ثانیه، 240 ثانیه و 300 ثانیه انجام شده است. تغییرات چگالی خاک رس $21/70\%$ ، پودر سنگ $19/28\%$ و برای مخلوط ماسه-سیمان 25% است.

شکل ۲ آهنگ شمارش نوترون را بر حسب مقادیر مختلف آب اضافه شده به نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار آب به نمونه‌های مختلف، آهنگ شمارش خالص نوترون زیادتر شده است به گونه‌ای که از مقدار مشخصی آب به بعد شمارش نوترون بصورت خطی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه چگالی نمونه‌های خاک رس و پودر سنگ برای مقادیر مختلف آب اضافه شده تقریباً یکسان هستند، آهنگ شمارش نوترون در آن‌ها نزدیک به هم می‌باشد. ولی برای نمونه مخلوط ماسه-سیمان، آهنگ شمارش نوترون برای مقادیر زیاد آب اضافه شده، اختلاف زیادی را در مقایسه با دو نمونه مذکور نشان می‌دهد. علت این اختلاف را می‌توان ناشی از تفاوت در چگالی مخلوط ماسه-سیمان و نیز عناصر تشکیل‌دهنده دو نمونه که نقش بسزایی در میزان پراکندگی و کندسازی نوترون دارند، دانست.



شکل ۱: ظرف مکعب مستطیلی حاوی نمونه خاک ساخته شده از جنس پلکسی گلس. محل قرارگیری آشکارساز و چشمه نوترون در زیر نمونه خاک نشان داده شده است. ارتفاع خاک در ظرف، ۱۴ cm است.

جدول ۱. مشخصات خاک رس با افزایش مقادیر مختلف آب به آن

| جرم کل نمونه (g) | میزان آب اضافه شده (ml) | چگالی نمونه مورد آزمون (g/cm^3) | چگالی رطوبت (g/cm^3) | نمونه |
|------------------|-------------------------|--|---------------------------------|----------|
| ۱۰۹۱۰ | ۰ | ۱/۵۲ | ۰ | خاک خشک |
| ۱۱۱۶۰ | ۲۵۰ | ۱/۵۵ | ۰/۰۳۰۹ | نمونه ۱ |
| ۱۱۴۰۵ | ۴۹۵ | ۱/۵۸ | ۰/۰۶۱ | نمونه ۲ |
| ۱۱۶۵۰ | ۷۴۰ | ۱/۶۲ | ۰/۰۹۱۳ | نمونه ۳ |
| ۱۱۸۸۰ | ۹۷۰ | ۱/۶۵ | ۰/۱۲ | نمونه ۴ |
| ۱۲۱۱۰ | ۱۲۰۰ | ۱/۶۸ | ۰/۱۴۸ | نمونه ۵ |
| ۱۲۳۵۰ | ۱۴۴۰ | ۱/۷۲ | ۰/۱۸ | نمونه ۶ |
| ۱۲۵۸۵ | ۱۶۷۵ | ۱/۷۵ | ۰/۲۰۷ | نمونه ۷ |
| ۱۲۸۲۵ | ۱۹۱۵ | ۱/۷۸ | ۰/۲۳۶ | نمونه ۸ |
| ۱۳۰۶۵ | ۲۱۵۵ | ۱/۸۱ | ۰/۲۶۶ | نمونه ۹ |
| ۱۳۳۱۰ | ۲۴۰۰ | ۱/۸۵ | ۰/۲۹۶ | نمونه ۱۰ |

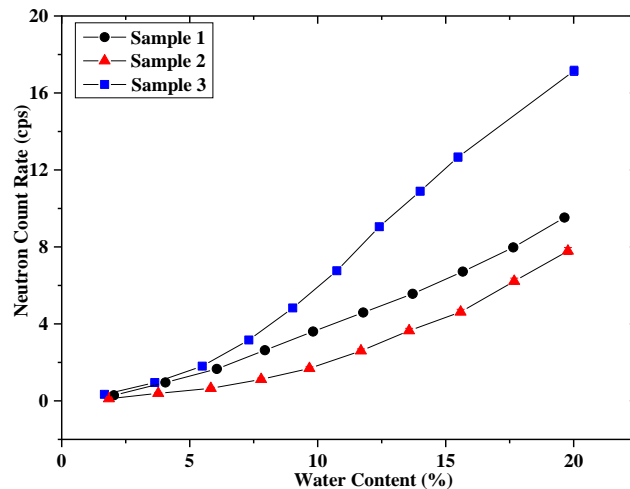


جدول ۲: مشخصات نمونه های پودر سنگ مورد آزمون با افزایش مقادیر مختلف آب

| نمونه | چگالی رطوبت (g/cm ³) | چگالی نمونه مورد آزمون (g/cm ³) | میزان آب اضافه شده (ml) | جرم کل نمونه (g) |
|-----------|-------------------------------------|--|----------------------------|---------------------|
| نمونه خشک | ۰ | ۱/۶۶ | ۰ | ۱۱۹۳۵ |
| نمونه ۱ | ۰/۰۳۰۶ | ۱/۶۹ | ۲۲۰ | ۱۲۱۵۵ |
| نمونه ۲ | ۰/۰۶۲۵ | ۱/۷۲ | ۴۵۰ | ۱۲۳۸۵ |
| نمونه ۳ | ۰/۰۹۶۵ | ۱/۷۵ | ۶۹۵ | ۱۲۶۳۰ |
| نمونه ۴ | ۰/۱۲۹ | ۱/۷۷ | ۹۳۰ | ۱۲۸۶۵ |
| نمونه ۵ | ۰/۱۶۰ | ۱/۸۲ | ۱۱۵۵ | ۱۳۰۹۰ |
| نمونه ۶ | ۰/۱۹۴ | ۱/۸۵ | ۱۳۹۵ | ۱۳۳۳۰ |
| نمونه ۷ | ۰/۲۲۵ | ۱/۸۸ | ۱۶۲۰ | ۱۳۵۵۵ |
| نمونه ۸ | ۰/۲۵۸ | ۱/۹۲ | ۱۸۶۰ | ۱۳۷۹۵ |
| نمونه ۹ | ۰/۲۹۳ | ۱/۹۵ | ۲۱۱۰ | ۱۴۰۴۵ |
| نمونه ۱۰ | ۰/۳۲۸ | ۱/۹۸ | ۲۳۶۰ | ۱۴۲۹۵ |

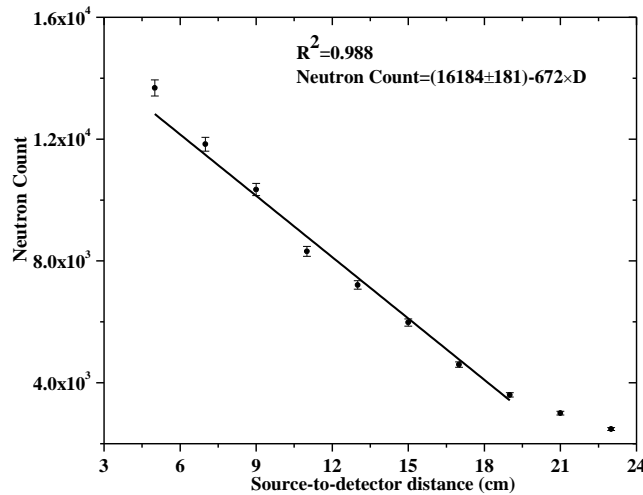
جدول ۳: مشخصات مخلوط ماسه و سیمان با افزایش مقادیر مختلف آب به آن

| نمونه | چگالی رطوبت (g/cm ³) | چگالی نمونه مورد آزمون (g/cm ³) | میزان آب اضافه شده (ml) | جرم کل نمونه (g) |
|----------|-------------------------------------|--|----------------------------|---------------------|
| ماسه خشک | ۰/۰۰ | ۱/۶۴ | ۰/۰ | ۱۱۷۹۰ |
| نمونه ۱ | ۰/۰۲۶ | ۱/۶۷ | ۲۰۰ | ۱۱۹۹۰ |
| نمونه ۲ | ۰/۰۵۸ | ۱/۷۰ | ۲۴۵ | ۱۲۲۳۵ |
| نمونه ۳ | ۰/۰۸۹ | ۱/۷۳ | ۲۴۰ | ۱۲۴۷۵ |
| نمونه ۴ | ۰/۱۲۱ | ۱/۷۷ | ۲۴۵ | ۱۲۷۲۰ |
| نمونه ۵ | ۰/۱۵۰ | ۱/۸۰ | ۲۴۰ | ۱۲۹۶۰ |
| نمونه ۶ | ۰/۱۸۰ | ۱/۸۳ | ۲۵۰ | ۱۳۲۱۰ |
| نمونه ۷ | ۰/۲۱۰ | ۱/۸۷ | ۲۵۰ | ۱۳۴۶۰ |
| نمونه ۸ | ۰/۲۵۰ | ۱/۹۰ | ۲۵۰ | ۱۳۷۱۰ |
| نمونه ۹ | ۰/۲۸۰ | ۱/۹۴ | ۲۴۰ | ۱۳۹۵۰ |
| نمونه ۱۰ | ۰/۳۸۰ | ۲/۰۵ | ۷۹۰ | ۱۴۷۴۰ |



شکل ۲. نرخ شمارش نوترون توسط آشکارساز BF_3 با افزایش مقدار آب به نمونه‌های مختلف.

به طور مثال، میزان افزایش آهنگ شمارش نوترون برای نمونه ۲ خاک رس نسبت به نمونه اولین نمونه مرطوب برابر ۳/۳۱ و برای نمونه ۱۰ برابر ۳۲/۸۳ است. همین مقدار برای پودر سنگ به ترتیب برابر ۳/۴۸ و ۶۹/۲۲ و برای مخلوط ماسه و سیمان به ترتیب برابر ۲/۷۸ و ۴۹/۹۵ می‌باشد. لازم به ذکر است که در دستگاه‌های رطوبت‌سنج تجاری، آشکارساز نوترون تقریباً به چشمه نوترون چسبیده است، در حالیکه در این کار، فاصله آشکارساز تا چشمه نوترون برابر ۱۰ cm انتخاب شده است که کماکان مقادیر آب اضافه شده به نمونه‌های مختلف را با دقت خوبی اندازه‌گیری می‌کند. با افزایش مقداری آب به مخلوط ماسه و سیمان، شمارش نوترون با دور کردن آشکارساز BF_3 از چشمه نوترون اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که آهنگ شمارش نوترون به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند که در شکل زیر این رفتار نشان داده شده است.



شکل ۳. شمارش نوترون بر حسب فاصله چشمه و آشکارساز برای اندازه‌گیری میزان رطوبت موجود در نمونه مورد آزمون.

به منظور بهبود بازدهی دستگاه رطوبت‌سنج برای اندازه‌گیری در مساحت‌های بیشتر و با هدف حصول دقت مورد نظر در راستای استانداردهای جهانی، اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های پودر سنگ در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شده است (جدول ۴). همانطور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود، چگالی آب 0.0305 g/cm^3 در زمان شمارش ۱۵ ثانیه قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. در حالیکه همین مقدار چگالی آب در زمان شمارش ۲۴۰ ثانیه حدود $19/24\%$ خطا دارد. لازم به ذکر است که با کم کردن فاصله بین آشکارساز و چشمه نوترون می‌توان این مقدار چگالی آب را نیز اندازه‌گیری کرد.

جدول ۴. دقت اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های پودر سنگ در دو زمان مختلف ۱۵ و ۲۴۰ ثانیه

| رطوبت % | مقدار آب-CC | چگالی آب | ۱۵ ثانیه | ۲۴۰ ثانیه |
|---------|-------------|----------|----------|-----------|
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۱/۸۴ | ۲۲۰ | ۰/۰۳۰۵ | -- | ۱۹/۲۴ |
| ۳/۷۷ | ۴۵۰ | ۰/۰۶۲ | ۳۳/۳۳ | ۱۰/۳۱ |
| ۵/۸۲ | ۶۹۵ | ۰/۰۹۶۵ | ۴۰/۸۲ | ۷/۹۸ |
| ۷/۷۹ | ۹۳۰ | ۰/۱۲۹ | ۲۵ | ۶/۰۹ |
| ۹/۶۷ | ۱۱۵۵ | ۰/۱۶۰ | ۲۱/۳۲ | ۴/۹۷ |
| ۱۱/۶۸ | ۱۳۹۵ | ۰/۱۹۴ | ۱۶/۶۷ | ۴ |
| ۱۳/۵۷ | ۱۶۲۰ | ۰/۲۲۵ | ۱۳/۶۱ | ۳/۳۸ |
| ۱۵/۵۸ | ۱۸۶۰ | ۰/۲۵۸ | ۱۲/۰۴ | ۳ |
| ۱۷/۶۷ | ۲۱۱۰ | ۰/۲۹۳ | ۱۰/۹۸ | ۲/۵۹ |
| ۱۹/۷۷ | ۲۳۶۰ | ۰/۳۲۸ | ۹/۲۰ | ۲/۳۱ |

نتایج:



داده‌های حاصل از اندازه‌گیری نشان می‌دهد که روش‌های غیرمخرب برپایه تکنیک‌های هسته‌ای با سرعت اندازه‌گیری بالا، می‌توانند در رطوبت‌سنجی خاک نمونه‌های مختلف در حوزه‌های متنوع نظیر تعیین رطوبت ذغال سنگ جهت فراوری، صنعت سیمان و نیز مدیریت منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند. با تست نمونه‌های میدانی می‌توان به ساخت دستگاه رطوبت سنج جهت بکارگیری در صنعت اقدام نمود، هرچند سامانه پیشنهادی نیازمند اصلاحاتی است که مطالعه جوانب مختلف آن در دستور کار می‌باشد.

مراجع

- [1] Non-destructive U-235 enrichment assay by gamma ray spectrometry, US Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide, Office of Nuclear Regulatory Research, Regulatory Guide 521, Dec. 1983 (www.pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003739991.pdf).
- [2] Taliyan, S. S., Sarkar, S., Patil, R. K., BARC Develops Gamma Scanner (www.barc.ernet.in).
- [3] Singh, G., Ramakrishnan, P. S., Tapas, A. S., Dhar, D. C., Walinjkar, P. B., 2006. Automated gamma scanning system for on-line inspection of industrial process column, BARC Publications, 268 (<http://www.barc.gov.in/publications/nl/2006/200605-1.pdf>).
- [4] Balaghi, S., Ghal-Eh, N., Mohammadi, A., Vega-Carrillo, H.R., 2018. A neutron scattering soil moisture measurement system with a linear response. Applied Radiation and Isotopes, 142, 167-172.
- [5] Uniyal, B., Dietrich, J., Vasilakos, C., Tzoraki, O., 2017. Evaluation of SWAT simulated soil moisture at catchment scale by field measurements and Landsat derived indices. Agricultural water management, 193, 55-70.
- [6] Ghaemifard, M., Ghal-Eh, N., Izadi Najafabadi, R., Vega-Carrillo, H.R., Angular distribution of scattered neutrons as a tool for soil moisture measurement: A feasibility study, The XIX International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD2019), Zacatecas, Mexico.