

به دست آوردن طول و قطر بهینه کولیماتور چشمه $Am-Be$ در گیج صنعتی رطوبت سنج کک به روش $FNGT$ و شبیه سازی مونت کارلو

حبیب صفی قلی^{۱*}، رضا فقیهی^{۱,۲}، سید محسن حسینی^۱

۱- بخش مهندسی هسته ای دانشگاه شیراز

۲- مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز

چکیده:

در این مقاله تکنیک اندازه گیری رطوبت کک در پروسه تولید آهن بر اساس عبور نوترون های سریع و تابش گامای $(FNGT)^{22}$ چشمه $Am-Be$ به کمک کد مونت کارلو $MCNP4C$ بررسی شده است. هدف از شبیه سازی این گیج، به دست آوردن ابعاد بهینه طول و قطر کولیماتور چشمه $Am-Be$ می باشد. عبور نوترون های سریع از حجم کک در این گیج صنعتی به غلظت رطوبت موجود در واحد سطح کک بستگی دارد، در حالیکه تابش گامای ناشی از چشمه به جرم واحد سطح (g/cm^2) اندازه گیری بستگی دارد. با استفاده از این دو ایده، رطوبت کک به دست می آید. با تغییر طول و قطر کولیماتور، ابعاد بهینه آنها بر حسب شمارش فلاکس نوترون به دست آمده است. در نهایت طول و قطر بهینه کولیماتور به ترتیب ۱۵ و ۵ سانتیمتر به دست آمده است.

کلید واژه ها: تکنیک $FNGT$ - شبیه سازی مونت کارلو - کولیماتور - چشمه $Am-Be$ - رطوبت کک.

مقدمه:

در فرآوری آهن، کک به همراه سنگ معدن آهن در کوره بلند استفاده می شود. درصد رطوبت کک از لحاظ متالورژیکی در فرآیند تولید آهن حائز اهمیت است. برای اولین بار ایده استفاده از بیم نوترونی تک انرژی باریک برای اندازه گیری رطوبت کک توسط Miller در سال ۱۹۶۳ مطرح شد. [۱] پس از آن تکنیک استفاده از نوترون سریع و تابش گاما $(FNGT)$ ، بعد از مدت زیادی برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط Tominuga ارائه شد. [۲] در این روش عبور نوترون سریع به غلظت هیدروژن موجود در کک وابسته است و عبور تابش گاما نیز به جرم واحد سطح (g/cm^2) بستگی دارد، با ترکیب این دو ایده دقت رطوبت کک مستقل از تغییرات چگالی به دست می آید. [۳]

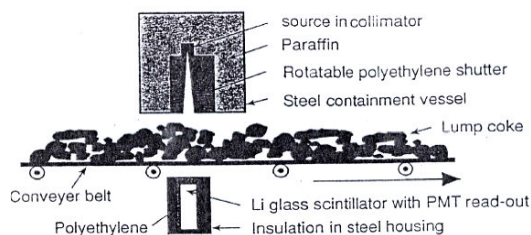
تکنیک $FNGT$:

بر اساس این ایده، فلاکس نوترون عبوری از ماده (کک) با ضخامت z (cm) و چگالی ρ (g/cm^3) رفتار نمایی دارد که از رابطه (۱) به دست می آید.

$$\phi_n = \phi_{n0} \exp(-\mu_n \rho z) \quad (1)$$

در این رابطه ϕ_{n0} ، فلاکس نوترون اولیه برای کک با ضخامت صفر سانتیمتر است و μ_n ، ضریب تضعیف جرمی نوترون بر حسب cm^2/g است. هندسه مدل عملی این گیج در شکل (۱) نشان داده شده است.

²²-Ash



شکل (۱): هندسه اندازه‌گیری گنج FNGT در تست‌های صنعتی. [۴]

چون در عمل حجم کک‌کی که تحت تابش نوترون و گاما قرار می‌گیرد متغیر می‌باشد، برای آن یک ضریب تضعیف جرمی ظاهری μ_{na}^{23} تعریف می‌شود (Sowerby 1985)، که نه تنها به ضخامت، چگالی، ترکیب ساختار کک و طیف نوترون وابسته است بلکه به چگونگی نصب و تنظیم این گنج در عمل بستگی دارد.

این ضریب، همچنین وابستگی زیادی به طول و قطر کولیماتور دارد. μ_{na} از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\mu_{na} = -1/\rho z \ln(\phi_n / \phi_{n0}) \quad (2)$$

در این رابطه ρz جرم واحد سطح کک بر حسب واحد (g/cm²) است.

جرم واحد سطح کک حاوی رطوبت (m)، را می‌توان به صورت ترکیبی از جرم رطوبت (m_1) و جرم خشک کک (m_2) در نظر گرفت ($m = m_1 + m_2$)، که در آن کسر وزنی رطوبت از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$w = m_1 / (m_1 + m_2) \quad (3)$$

همچنین ضریب جذب ظاهری نوترون بر حسب ترکیب خطی جرم رطوبت و جرم خشک کک، از رابطه (۴) به دست می‌آید. در این رابطه μ_{na1} و μ_{na2} به ترتیب ضریب جذب جرمی ظاهری نوترون برای جرم رطوبت و جرم خشک می‌باشند.

$$\mu_{na} = (\mu_{na1} - \mu_{na2})w + \mu_{na2} \quad (4)$$

ضریب جذب جرمی گاما نیز طبق ایده بالا، از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$\mu_g = (\mu_{g1} - \mu_{g2})w + \mu_{g2} \quad (5)$$

در نهایت فلاکس نوترون و گامای عبوری از کک، با جایگذاری روابط (۴) و (۵) در رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\phi_n = \phi_{n0} \exp\{ -[(\mu_{na1} - \mu_{na2})w + \mu_{na2}]m \} \quad (6)$$

$$\phi_g = \phi_{g0} \exp\{ -[(\mu_{g1} - \mu_{g2})w + \mu_{g2}]m \} \quad (7)$$

کسر وزنی رطوبت (w)، نیز از تقسیم رابطه (۶) بر (۷) به دست می‌آید.

$$w = \phi_n / \phi_g = (\mu_{g2}R - \mu_{na2}) / [(\mu_{na1} - \mu_{na2}) - R(\mu_{g1} - \mu_{g2})] \quad (8)$$

در رابطه (۸)، R به صورت زیر در نظر گرفته شده است و مشاهده می‌شود که کسر رطوبت مستقل از چگالی

$$R = \ln(\phi_n / \phi_{n0}) / \ln(\phi_g / \phi_{g0}) \quad (9)$$

است.

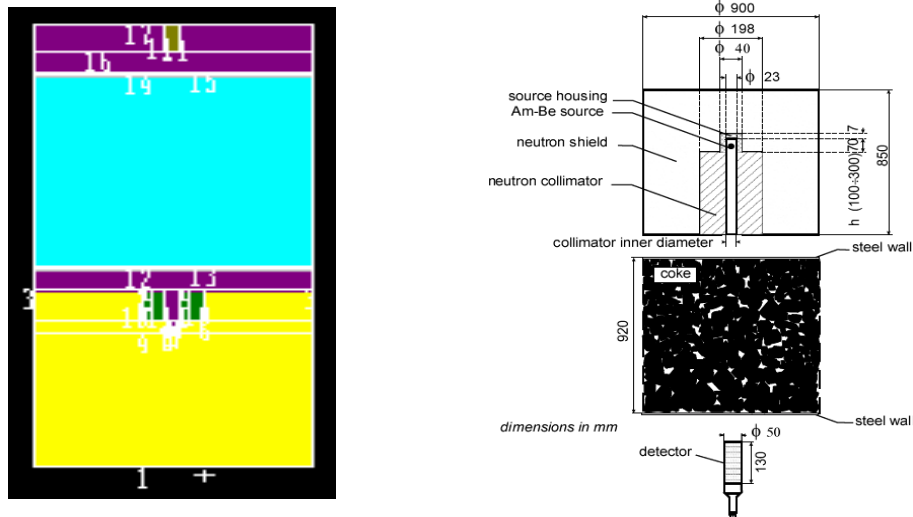
انحراف استاندارد به دست آمده برای R ، از رابطه (۱۰) به دست می‌آید. [۴ و ۵]

$$\sigma R = R/\rho z \times \sqrt{\left\{ \frac{\sigma \phi_n}{\phi_n [(\mu_{na1} - \mu_{na2})w + \mu_{na2}]} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma \phi_g}{\phi_g [(\mu_{g1} - \mu_{g2})w + \mu_{g2}]} \right\}^2} \quad (10)$$

از رابطه (۱۰) این موضوع استنباط می‌شود که برای کاهش خطا در R و کسر وزنی رطوبت، نیاز به μ_{na} و فلاکس نوترون بالایی است.

روش کار:

در کاربردهای صنعتی ارتفاع کک در گیج اندازه‌گیری بین ۷۵ تا ۹۵ سانتیمتر است. در این تحقیق نیز ارتفاع کک، ۹۲ سانتیمتر با چگالی $0.6g/cm^3$ انتخاب شده است. چشمه نوترون نیز Am-Be است زیرا در مقایسه با چشمه Cf-252، نیمه عمر بالاتری دارد و متوسط انرژی نوترون آن نیز بالاتر است. ($\bar{E} = 4.5Mev$) آشکارساز نیز یک سیلندر استوانه‌ای به قطر ۵۰ میلیمتر و طول ۱۳۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است تا مشابه با سایز واقعی یک سنتیلاتور مایع از نوع NE213 باشد. در حجم این آشکارساز از تالی F4، برای تخمین مسیر فوتون‌ها و نوترون‌ها به طور مشترک استفاده شده است؛ یعنی یک مرتبه، تالی F4 برای فوتون در سلول آشکارساز و یک مرتبه دیگر از تالی F4 برای نوترون در همان سلول آشکارساز (سنتیلاتور NE213) استفاده شده است. هندسه واقعی [۵] و مدل مونت کارلو آن، ستم اندازه‌گیری در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): شکل سمت راست هندسه واقعی گیج و شکل سمت چپ مدل MCNP4C به دست آمده از هندسه واقعی است.

ترکیب شیمیایی کک در این شبیه‌سازی شامل؛ کربن، رطوبت و خاکستر^{۲۴} به صورت دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) می‌باشد. همچنین ظرف حاوی کک از جنس استیل است، ضخامت آن در بالا و پایین محفظه کک ۱ سانتیمتر می‌باشد، و از پارافین با ۳٪ وزنی بور برای شیلد نوترون استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری رطوبت به نرخ شمارش فلاکس نوترون در آشکارساز وابسته است. کیفیت اندازه‌گیری یا فلاکس نوترونی برای کک حاوی رطوبت با نماد MG_{H_2O} نشان داده می‌شود. MG_{H_2O} ، از تقسیم فاکتور حساسیت بر خطای نسبی فلاکس نوترون‌های آشکارشده در آشکارساز به دست می‌آید.

²⁴ Riso National Laboratory, Denmark

* pgeramifar@gmail.com

$$MG_w = S_w / (\sigma \phi_{nw} / \phi_{nw}) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، S_w فاکتور حساسیت گیج است که طبق رابطه (۱۱) تعریف می‌شود. [۵]

$$S_w = \frac{\Delta \phi_n}{\Delta M_w} = \frac{|\phi_{nw} - \phi_{n0}|}{\Delta M_w} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، ϕ_{nw} فلاکس نوترون‌های عبوری از کک حاوی ΔM_w گرم رطوبت می‌باشد. نماد W نشان دهنده کسر وزنی آب است و ΔM_w نیز تغییرات رطوبت برحسب واحد گرم است. کک در ساده‌ترین حالت شامل ۷۴٪ کربن، ۲۶٪ رطوبت و دی‌اکسید سیلیسیم می‌باشد. در این شبیه‌سازی جمع درصد رطوبت و دی‌اکسید سیلیسیم ثابت است ولی درصد رطوبت یک بار ۲٪ و بار دیگر ۱۰٪ انتخاب شده است. پس برای کک دو ترکیب در نظر گرفته شده است.

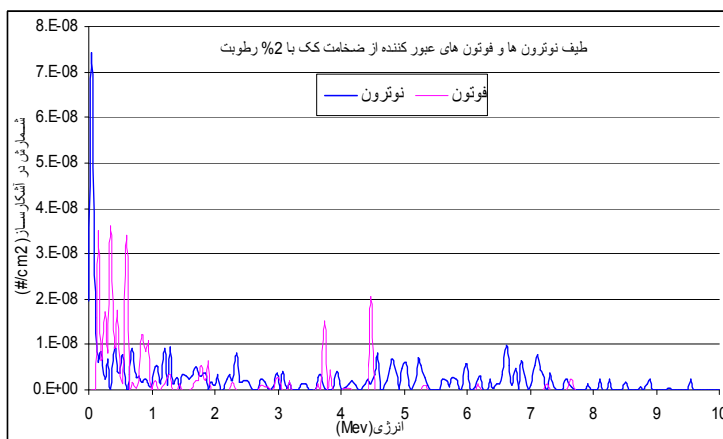
الف - 74 wt %C, 2wt%H2O, 24wt%SiO2

ب - 74 wt %C, 10wt%H2O, 16wt%SiO2 - (عبارت wt% نشان دهنده کسر وزنی است).

جنس ماده کولیماتور نوترون از پلی‌اتیلن با ۳٪ وزنی بور انتخاب شده است. برای به دست آوردن ابعاد بهینه کولیماتور، طول‌ها و قطرهای متفاوت کولیماتور در عبور شار نوترونی از نمونه‌های کک، الف و ب شبیه‌سازی شده است.

نتایج:

طیف انرژی نوترون‌ها و فوتون‌های آشکارشده در آشکارساز مشترک فوتون و نوترون در نمودار شکل (۳) نشان داده شده است.

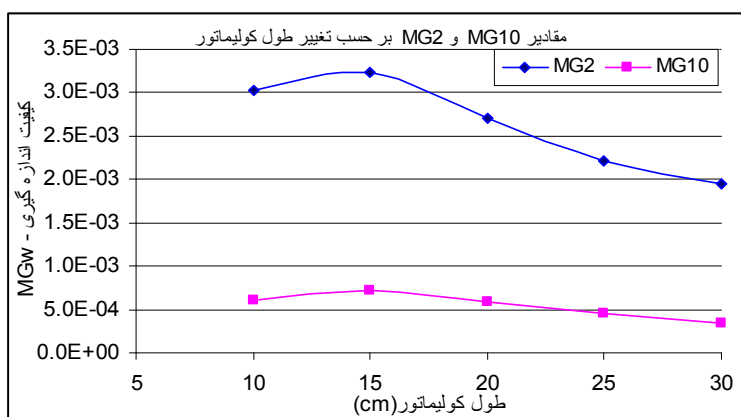


شکل (۳): طیف انرژی نوترون و فوتون شبیه‌سازی شده به کمک MCNP4C در سنتیلاتور NE213

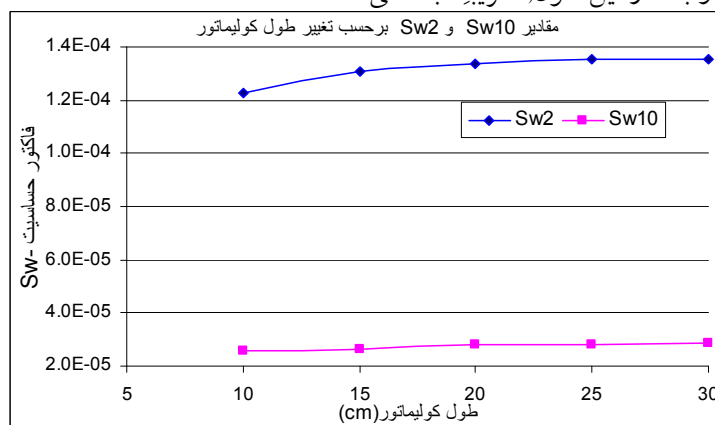
با استفاده از رابطه (۱۰) و (۱۱) کیفیت اندازه‌گیری (MG_w) و فاکتور حساسیت (S_w) برای کک حاوی ۲٪ و ۱۰٪ رطوبت در طول‌های متفاوت از کولیماتور به دست آمده است. هر بار برنامه برای هر ۵ سانتیمتر افزایش طول کولیماتور برای تابش‌های عبورکننده از ظرف کک و ظرف بدون کک با تاریخچه ۱۰۰۰۰۰۰۰ ذره اجرا

شده است. شبیه سازی با یک کامپیوتر پنتیوم ۴ با حافظه جانبی ۵۱۲ مگا بایت انجام شده است. خطای شبیه سازی شبیه سازی به زیر ۱۰٪ رسیده است.

در نمودار شکل (۴) کیفیت اندازه گیری بر حسب طول کولیماتور به دست آمده است. با افزایش طول کولیماتور تا ۱۵ سانتیمتر، رفتار صعودی دارد و در ۱۵ سانتیمتر به ماکزیمم می رسد، بعد از این طول نمودار حالت نزولی دارد و در طول های بیشتر از این به اشباع می رسد به طوری که خطای نسبی فلاکس نوترونی افزایش می یابد. مشاهده می شود که بهترین کیفیت اندازه گیری (بیشترین فلاکس نوترونی) در طول ۱۵ سانتیمتر برای کولیماتور اتفاق می افتد.



شکل (۴): کیفیت اندازه گیری بر حسب طول کولیماتور در کک با درصد وزنی آب ۲٪ و ۱۰٪. فاکتور حساسیت (Sw) نیز بر حسب تغییر طول کولیماتور از ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر محاسبه شده و در نمودار شکل (۵) نشان داده شده است. فاکتور حساسیت به دست آمده برای درصد های رطوبت ۲٪ و ۱۰٪ کک تا طول ۲۰ سانتیمتر رفتاری صعودی دارند و بعد از این طول، تقریباً ثابت می ماند.



شکل (۵): فاکتور حساسیت بر حسب تغییر طول کولیماتور در کک با درصد وزنی آب ۲٪ و ۱۰٪.

از روابط (۱۰) و (۱۱) و نتایج به دست آمده در نمودارهای (۴) و (۵) می توان به این نکته پی برد که فاکتور حساسیت و کیفیت اندازه گیری یا فلاکس نوترون عبوری از کک دو پارامتر متناقض هستند، بنابراین نیاز به یک مصالحه بین این دو پارامتر است. همانطور که مشاهده می شود رفتار نمودار حساسیت گنج بر حسب تغییر طول کولیماتور از ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر حالت صعودی دارد و بعد از آن تقریباً ثابت می ماند. همچنین رفتار فلاکس

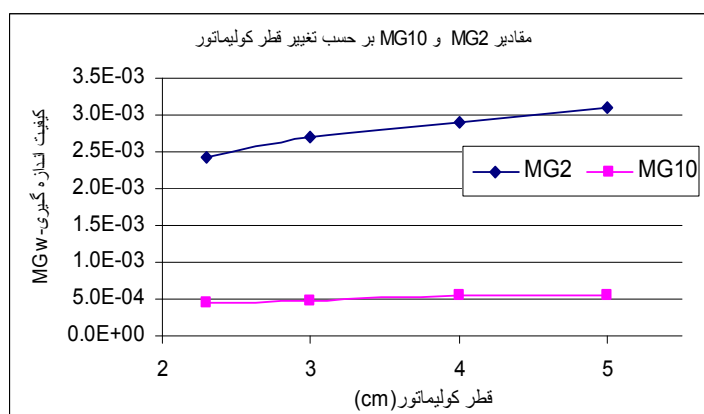
نوترونی (کیفیت اندازه گیری) بر حسب تغییر طول کولیماتور از ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر حالت صعودی و بعد از این طول حالت نزولی دارد و در نهایت تقریباً ثابت می شود. بنابراین طول ۱۵ سانتیمتر نقطه مصالحه بهینه بین فاکتور حساسیت و کیفیت اندازه گیری می باشد.

سپس اثر تغییرات قطر کولیماتور با ثابت در نظر گرفتن طول بهینه به دست آمده (۱۵ سانتیمتر)، از ۲/۳ تا ۵ سانتیمتر بررسی شده است. تغییرات حساسیت بر حسب دهانه قطر کولیماتور در نمودار شکل (۶) نشان داده شده است. تغییرات حساسیت برای Sw10 و Sw2 به ترتیب ۱/۹۸٪ و ۱/۴۸٪ به دست آمده است که بسیار ناچیز است.



شکل (۶): فاکتور حساسیت بر حسب تغییر قطر کولیماتور در کک با درصد وزنی آب ۲٪ و ۱۰٪.

همچنین تغییرات قطر کولیماتور بر حسب فلاکس نوترون آشکار شده (کیفیت اندازه گیری) برای درصدهای وزنی آب ۲٪ و ۱۰٪ در نمودار شکل (۷) نشان داده شده است. با افزایش قطر کولیماتور از ۲/۳ به ۵ سانتیمتر، فلاکس نوترون آشکار شده ۲۸٪ بهتر شده است در حالیکه تغییرات حساسیت ناچیز بوده است. پس قطر بهینه کولیماتور ۵ سانتیمتر می باشد. مقادیر بیشتر از ۵ سانتیمتر دارای محدودیت فیزیکی از لحاظ گنج اندازه گیری می باشند.



شکل (۷): کیفیت اندازه گیری بر حسب تغییر قطر کولیماتور در کک با درصد وزنی آب ۲٪ و ۱۰٪.

بحث و نتیجه گیری:

مقادیر فلاکس نوترونی به دست آمده در رطوبت ۱۰٪ - (MG10)، پایین تر از رطوبت ۲٪ - (MG2) می باشند که به دلیل کند شدن فلاکس نوترون در درصدهای بالاتر رطوبت از کک می باشند. طول بهینه کولیماتور، یعنی ۱۵



سانتیمتر بهترین نقطه مصالحه گیج، بین دو پارامتر متناقض فاکتور حساسیت و فلاکس نوترونی است، در این طول بیشترین شمارش را برای فلاکس نوترونی در آشکارساز داریم. در این شرایط، یعنی طول ۱۵ سانتیمتر، بهترین قطر کولیماتور بر حسب شمارش فلاکس نوترون، ۵ سانتیمتر به دست آمده است و مقدار حساسیت کمترین بوده است. در طول و قطر بهینه، کمترین خطای نسبی برای فلاکس نوترون های آشکار شده به دست آمده است. در عمل نیز با این ابعاد بهینه کولیماتور، بهترین فلاکس نوترون برای درصدهای متفاوت رطوبت کک، به دست می آید.

مراجع:

- [1] D. W. Miller., "Fast Neutron Physics, Part 2" Inter science, New York. (1963).
- [2] H. Tominaga., and et. al. "Simultaneous Utilization of Neutrons and gamma-rays from ^{252}Cf for Measurement of Moisture and Density." *Int. J. Application Radiation Isotope*. 34(1), 429-436, (1983).
- [3] G. A. Johansen., P. Jackson, "Radioisotope Gauges for Industrial Process Measurements" Copyright, England, (2004).
- [4] B. D. Sowerby., J. s. Watt., "Development of nuclear techniques for on-line analysis in the Coal industry", *Nucl. Instr. Meth. A299*, 642, (1990).
- [5] T. Cywicka-Jakiel, J. Łoskiewicz, G. Tracz., " The optimization of the fast neutron and gamma-ray transmission set-up for moisture measurement of coke" *Int. J. Application Radiation Isotope*, 58, 137-142, (2003).